

NGHIÊN CỨU CHẾ TẠO BỘ CHUYỂN ĐỔI NĂNG LƯỢNG TRÊN CƠ SỞ CẢM BIẾN ÁP ĐIỆN VÀ CHIP LTC3588

A STUDY ON HARVEST ENERGY SYSTEM BASED ON PIEZO-SENSOR AND LTC3588 IC

Phạm Thanh Huyền^{1,*}, Hồ Thành Trung¹, Vũ Ngọc Quý¹,
Khổng Đức Chiến², Nguyễn Hoàng Trung¹, Đào Thanh Toán¹

DOI: <https://doi.org/10.57001/huih5804.36>

TÓM TẮT

Mỗi bước chân của con người hay bánh xe của phương tiện giao thông đều có lực tác động tới bề mặt đặt xuống, những lực tác động này chứa nguồn năng lượng có khả năng được thu thập để tái sử dụng. Bài báo này trình bày kết quả nghiên cứu chế tạo module thu thập năng lượng bước chân nhờ sử dụng cảm biến áp điện PZT và chip LTC3588. Kết quả nhận được cho thấy việc chiếu sáng cho các khu công cộng như nhà ga, sân bay, trung tâm thương mại... có thể thực hiện nhờ năng lượng từ hoạt động đi lại của con người. Từ các kết quả tính toán mở rộng từ module cơ sở cho thấy cần sử dụng khoảng 2,2m² vật liệu áp điện để đảm bảo cho việc lưu trữ năng lượng là 1000mAh.

Từ khóa: Hệ thống thu thập năng lượng, cảm biến áp điện, năng lượng sạch.

ABSTRACT

Human walking on the street or tire of vehicle on road can provide a natural source of clean energy to serve our life. In this paper, we present results of our experiment on harvest energy module based on PZT piezo-sensors and LTC3588 IC. The results show that it is possible to implement lighting systems in public areas, such as, metro, railway station, airport or commercial center. Extracted result from the module suggests that in order to supply for 1000mAh accumulators for LED lighting, about piezoelectric material area of 2.2m² is needed.

Keywords: harvest energy system, piezo sensor, recycled energy

¹Trường Đại học Giao thông Vận tải

²Học viện Kỹ thuật Quân sự

*Email: huyenktdt@utc.edu.vn

Ngày nhận bài: 19/7/2022

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 15/10/2022

Ngày chấp nhận đăng: 27/10/2022

1. GIỚI THIỆU

Bên cạnh sự phát triển nhanh trong thời đại công nghệ 4.0 về các máy móc, thiết bị điện tử và dữ liệu thì yêu cầu về nguồn năng lượng sạch là vấn đề mà nhiều người quan tâm. Trước đây nguồn năng lượng được lấy từ các nguồn nhiên liệu hóa thạch nhưng các nguồn năng lượng hóa thạch trên khắp thế giới đang dần trở nên cạn kiệt và việc khai thác chúng chính là tàn phá môi trường trái đất. Do đó cần thiết phải tìm ra các giải pháp thay thế là các nguồn

năng lượng tái tạo phổ biến như năng lượng mặt trời, năng lượng từ gió, năng lượng thủy điện, năng lượng sinh khối... Các dạng năng lượng tái tạo này tận dụng từ thiên nhiên nên việc khai thác phụ thuộc vào điều kiện địa tự nhiên. Chính vì vậy ý tưởng về việc tái tạo năng lượng từ hoạt động của con người là một ý tưởng rất hay vì cứ nơi nào có con người là có thể khai thác được hệ thống. Một trong số đó là khả năng chuyển đổi năng lượng cơ học từ hoạt động đi hay chạy bộ của con người thành năng lượng điện nhờ loại vật liệu đặc biệt có tính chất áp điện [1-2].

Nghiên cứu chế tạo thiết bị thu thập năng lượng tái tạo xanh được quan tâm bởi các nhà khoa học trong nước như Đại học Bách khoa Hà Nội, Đại học Quốc gia TP. Hồ Chí Minh, Đại học Quốc gia Hà Nội, Viện Hàn lâm Khoa học Công nghệ Việt Nam, Trường Đại học Phenikaa [3-8]. Các nguồn năng lượng này được nghiên cứu để sử dụng cho thiết bị điện tử cá nhân, thấp sáng cung cấp điện cho căn hộ, hay tại các công trình công cộng. Bên cạnh đó, gạch lát sàn điện tử (hay còn gọi là gạch thu năng lượng- Energy harvesting tile) là cấu kiện xây dựng có khả năng phát điện dựa trên nguyên lý áp điện. Nhờ được tích hợp thêm lớp vật liệu áp điện như PZT, ZnO, PVDF, điện áp ngoài sẽ được sinh ra khi có lực tác động vào gạch. Khi kết hợp với các mạch nạp và chuyển đổi, gạch sẽ làm việc như một nguồn cấp điện [9]. Trên thế giới, sử dụng năng lượng tái tạo theo hướng này được quan tâm nghiên cứu bởi nhiều nhóm nghiên cứu tại Pháp, Nhật Bản, Hàn quốc, Hoa Kỳ cả trong nghiên cứu cơ bản [9-16] và công nghiệp [17-19]. Gạch lát sàn điện tử đã được sử dụng thí điểm thành công tại nhà ga Tokyo, đoạn phố đi bộ Bird Street, London, Anh và một số nhà ga tại Pháp. Khi hành khách đợi tàu hay di chuyển trong ga, một phần áp lực sinh ra bởi hành khách sẽ tác động lên lớp áp điện và sinh ra dòng điện. Dòng điện này được lưu tại bộ lưu điện và cấp nguồn cho các thiết bị như bộ sạc điện thoại cho hành khách, thiết bị chiếu sáng đèn LED công suất thấp tại nhà ga, hầm đi bộ, nơi không sử dụng được nguồn năng lượng mặt trời, năng lượng gió hay địa nhiệt.

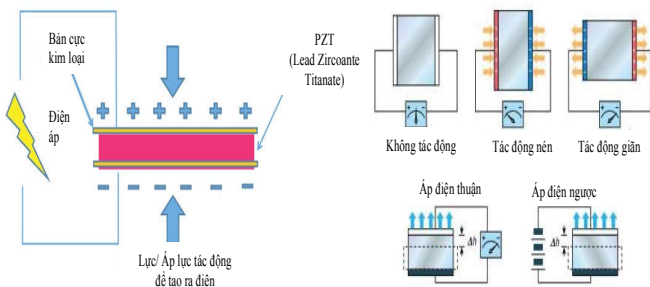
Do những yêu cầu đặt ra cấp thiết về nguồn năng lượng, cũng như những đặc tính đặc biệt của hiệu ứng áp điện, chúng tôi đề xuất nghiên cứu giải pháp tạo ra nguồn năng lượng sạch từ hiệu ứng áp điện. Cụ thể là tại Việt Nam

tốc độ đô thị hóa rất nhanh, hàng trăm nhà ga được phân bố trên các tuyến đường sắt đô thị; hàng trăm hầm đi bộ tại các thành phố với năng lực vận chuyển thiết kế tới vài triệu hành khách/ngày. Các hành khách thông thường di chuyển trên sân ga hay hầm với diện tích từ vài chục đến vài trăm m², đây chính là nguồn năng lượng dồi dào cần khai thác phục vụ việc tự cung cấp một phần năng lượng để thắp sáng nhằm giảm chi phí điện năng cho các công trình này.

Phần tiếp theo của bài báo này sẽ phân tích lý thuyết và đề xuất hệ thống thu thập năng lượng bước chân cũng như trình bày phần kết quả thực nghiệm đạt được.

2. NGUYÊN TẮC THU THẬP NĂNG LƯỢNG DỰA TRÊN HIỆU ỨNG ÁP ĐIỆN

Hiện tượng áp điện [20] là một hiện tượng khi lực tác động lên thạch anh hoặc một số tinh thể nhất định thì sẽ tạo ra điện tích trên bề mặt vật liệu đó (gọi là áp điện thuận). Ngược lại, khi đặt một điện áp lên bề mặt tấm tinh thể áp điện thì sẽ sinh ra công làm biến dạng bề mặt của nó (gọi là áp điện ngược). Một vật được cấu tạo bởi ba yếu tố PZT (chì Pb, Zorconi, Titan) sẽ có tính chất áp điện như mô tả trong hình 1.



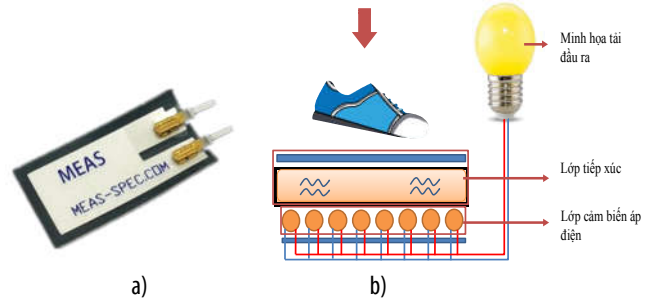
Hình 1. Mô tả hiện tượng áp điện thuận - ngược

Khi hai tấm điện cực mỏng chịu tác động bởi một lực ép/giãn nào đó và bị biến dạng Δh thì trên bề mặt hai tấm kim loại này sẽ hình thành điện tích trái dấu. Khi đặt điện áp lên hai tấm điện cực thì xuất hiện sự nén/giãn cơ học trên bề mặt. Từ hiện tượng trên có thể hiểu hiệu ứng áp điện như một máy biến đổi trực tiếp từ năng lượng cơ học sang năng lượng điện (áp điện thuận) hay biến đổi năng lượng điện sang năng lượng cơ học (áp điện ngược).

Một số polyme là những hợp chất cao phân tử tự nhiên (keratin, collagen, một số polypeptit) cũng có hiệu ứng áp điện nhưng rất nhẹ. Tới nay, những polyme áp điện duy nhất được sản xuất công nghiệp đó là những chất polyvinylidene difluoride (PVDF) và các copolyme của chúng với những triftoethylene và tetraftoethylene [12, 14, 16]. PVDF một phần là polyme tổng hợp kết tinh có công thức hoá học là (CH₂-CF₂)_n, được chế tạo ở dạng những màng mỏng kéo dọc theo mặt phẳng của màng và phân cực vuông góc với mặt phẳng này để tạo ra các tính chất áp điện. Một sản phẩm thương mại là cảm biến áp lực sử dụng PVDF được biểu diễn trong hình 2a).

Trong hoạt động đời sống của con người cũng như các hoạt động tự nhiên có rất nhiều hoạt động sinh công và có rất nhiều năng lượng dưới dạng công đã bị lãng phí hay

chưa được tận dụng để tái tạo lại nguồn năng lượng hữu ích như điện năng. Một trong những hoạt động phổ biến nhất của con người chính là hoạt động đi bộ hay chạy bộ. Vì thế dựa vào hiệu ứng áp điện có thể tái tạo và thu thập được rất nhiều năng lượng từ hoạt động đi bộ hàng ngày của mọi người như thể hiện trong hình 2b).



Hình 2. a) Ví dụ về một tấm áp điện PVDF [21] và b) Minh họa để xuất mô hình thu thập năng lượng từ bước chân

Khi đi bộ mỗi bước chân của con người đều có hai động tác là bước chân xuống và nhấc chân lên. Với động tác thứ nhất khi bước chân xuống sẽ tạo ra một lực tác động lên vật thể có hiệu ứng áp điện và vật thể áp điện sẽ bị nén lại. Ngược lại, đối với động tác thứ hai, trong quá trình nhấc chân lên thì lực tác động lên vật thể áp điện dần mất đi, vật thể trở về trạng thái ban đầu. Lúc này vật thể ở trạng thái nén trở về trạng thái bình thường, quá trình này xảy ra ngược lại so với quá trình nén.

3. ĐỀ XUẤT MÔ HÌNH HỆ THỐNG THU THẬP NĂNG LƯỢNG BƯỚC CHÂN

Với tính chất của vật thể áp điện, hai quá trình bước chân xuống và nhấc chân lên tương tự như hai quá trình nén và giãn vì thế trong hai quá trình này sẽ xuất hiện điện thế trái ngược nhau, tín hiệu điện lúc này có thể hiểu là tín hiệu điện xoay chiều. Lượng điện năng tạo ra sẽ phụ thuộc vào độ biến dạng của vật thể, độ biến dạng càng lớn trong thời gian càng ngắn thì lượng điện năng thu được sẽ càng lớn như mô tả trong Hình 3 khi cảm biến ở các trạng thái biến dạng khác nhau.

Năng lượng thu được sẽ tỉ lệ thuận với độ biến dạng của vật và tỉ lệ nghịch với thời gian tác động. Biểu thị mối quan hệ giữa các đại lượng trên theo biểu thức sau [22]:

$$\vec{V} = K \frac{\Delta h}{t} \quad (V) \tag{1}$$

Trong đó:

\vec{V} là điện áp thu được, (V)

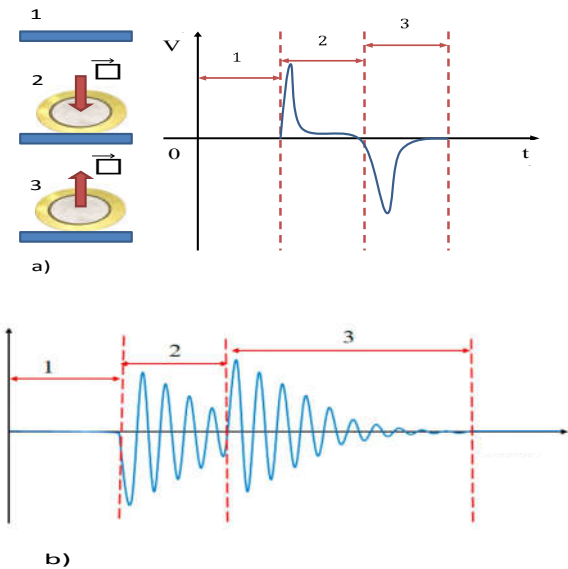
K là hệ số tỉ lệ (có giá trị khác nhau tùy theo loại vật liệu), (Vs/mm)

Δh là độ biến dạng của lớp vật liệu áp điện, (mm)

t là thời gian tác động, (s).

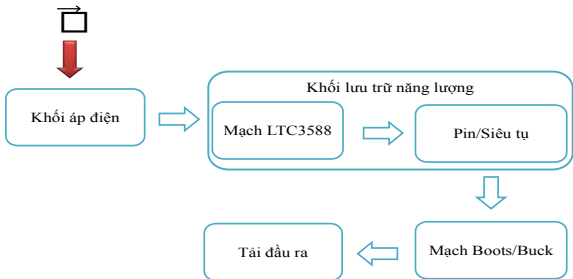
Hình 3a cho thấy rằng năng lượng xuất hiện nhiều nhất khi vừa bước chân xuống (giai đoạn 2) hoặc ngay vừa lúc nhấc chân lên (giai đoạn 3) vì trong những khoảng thời gian này lực tác động là lớn nhất và thời gian tác động cũng là ngắn nhất, vì thế điện áp xuất hiện là lớn hơn.

Trong thời gian bàn chân đặt lên trên cảm biến, mặc dù lúc này lực tác động vẫn rất lớn nhưng độ biến dạng của vật lại gần như bằng 0 vì thế điện áp thu được cũng gần như bằng 0. Tương tự như vậy, trong thời gian chân nhấc lên thì ngay lập tức cảm biến áp điện cũng giãn ra rất nhanh để trở về trạng thái ban đầu, quá trình biến dạng của vật lớn trong thời gian ngắn nên giá trị điện áp cũng đạt giá trị lớn nhất trong khoảng thời gian này và khoảng thời gian sau đó độ biến dạng của cảm biến rất ít nên điện áp do cảm biến áp điện tạo ra cũng rất thấp, gần như bằng 0.



Hình 3. Mô tả dạng điện áp tạo ra từ cảm biến áp điện trong các giai đoạn: 1) không tác động; 2) tác động nén và 3) tác động giãn với a) cấu trúc cảm biến một lớp và b) cấu trúc cảm biến có đệm truyền lực

Nếu như tấm thảm áp điện có lớp đệm truyền lực từ chân xuống phần cảm biến áp điện, lớp đệm này có tính chất đàn hồi, có thể dao động sẽ tăng khả năng sinh ra điện năng của cảm biến áp điện. Trong khoảng thời gian mà tấm áp điện không sinh ra điện tích ở giai đoạn 2 và 3 thì phần lớp đệm này sẽ dao động và liên tục tạo ra sự biến dạng đối với cảm biến áp điện và giúp tấm thảm có thể sản sinh ra thêm năng lượng và đạt hiệu quả cao hơn như minh họa trong hình 3b.

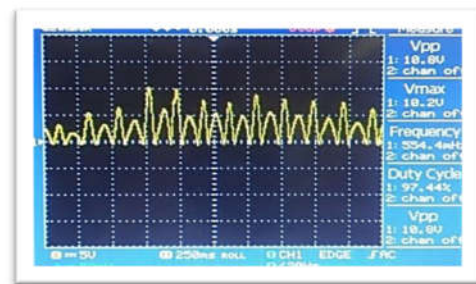
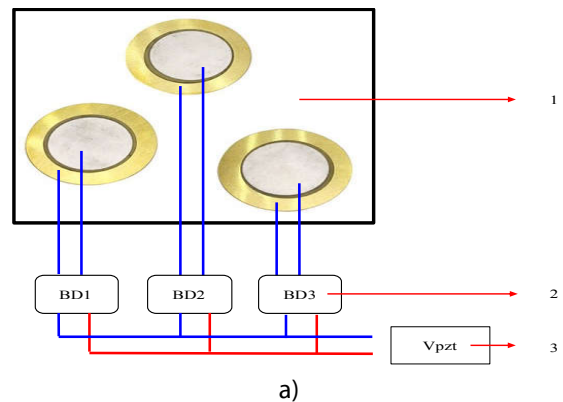


Hình 4. Sơ đồ khối để xuất cho hệ thống thu thập năng lượng từ bước chân

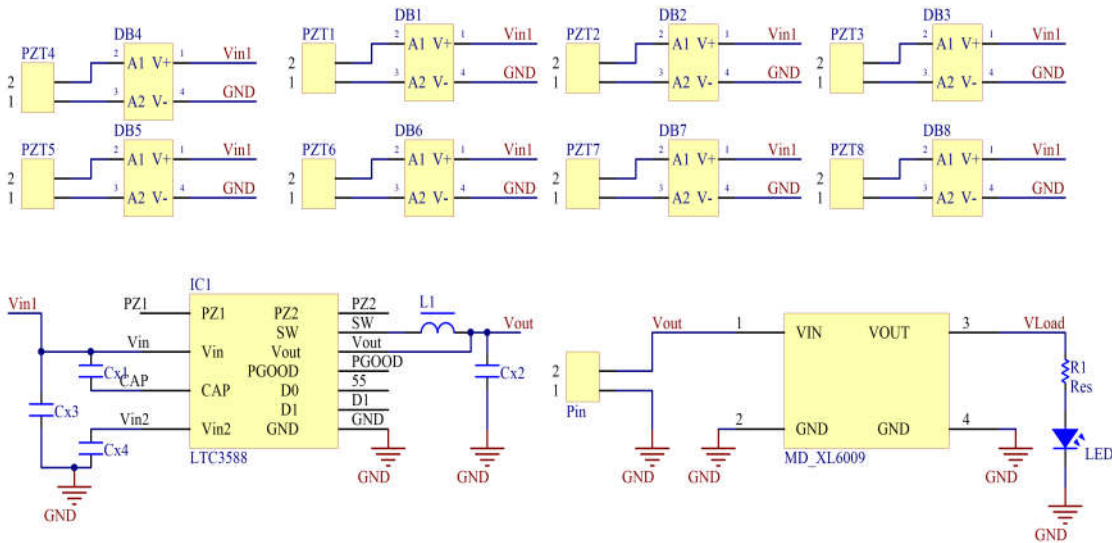
Hình 4 biểu diễn sơ đồ khối để xuất cho hệ thống thu thập năng lượng từ bước chân người đi bộ. Trọng lực \vec{P} (đại diện cho bước chân) tác động đến khối đầu tiên có cấu tạo từ cảm biến áp điện có chức năng chuyển đổi năng lượng khi có lực tác động thành điện năng.

Áp lực từ hoạt động đi hay chạy bộ tác động lên khối áp điện có cấu tạo gồm lớp trên, lớp đệm rung, lớp áp điện, lớp dưới. Lớp trên và lớp dưới làm bằng kim loại được coi như vỏ bọc cho khối áp điện, hai lớp này là hai lớp chịu lực tác động chính, bảo vệ cho các lớp phía trong. Lớp thứ hai chính là lớp đệm rung, lớp này có tính chất đàn hồi giúp lực tác động được duy trì liên tục, tăng thời gian và làm cho lớp áp điện có sự biến dạng liên tục. Lớp thứ hai có thể được làm từ những loại vật liệu có tính chất đàn hồi tốt như cao su, silicon hay được thiết kế như lớp đệm lò xo. Lớp thứ ba cũng là lớp quan trọng nhất của khối áp điện, đó chính là lớp chứa cảm biến áp điện, lớp này sẽ sinh ra dòng điện khi có lực tác động. Ở lớp áp điện có thể chứa nhiều miếng áp điện nhỏ để giúp lượng điện năng thu được lớn hơn. Cảm biến áp điện được sản xuất có tính năng phù hợp với ứng dụng này có hai loại thường thấy chính là cảm biến làm từ PZT và cảm biến được làm từ PVDF. Điện áp thu được sau khối áp điện có dạng xoay chiều như đã thể hiện trong hình 3, có tần số biến thiên và biên độ dao động phụ thuộc vào độ biến dạng và thời gian biến dạng của cảm biến, tức là phụ thuộc vào bước chân bắt đầu đặt xuống hay bắt đầu nhấc lên. Điện áp này được đưa tới bộ chỉnh lưu để chuyển về dạng một chiều trước khi đưa sang khối lưu trữ năng lượng gồm vi mạch LTC3588 là vi mạch thu thập năng lượng và điều khiển quá trình nạp cho pin hay siêu tụ điện [23]. Để có thể sử dụng được nguồn năng lượng cho nhiều loại tải đầu ra hoạt động, năng lượng được cung cấp từ bộ lưu trữ được đưa tới mạch Boost/Buck làm nhiệm vụ tăng áp hay giảm áp trước khi đưa tới tải.

4. THÍ NGHIỆM VÀ PHÂN TÍCH KẾT QUẢ

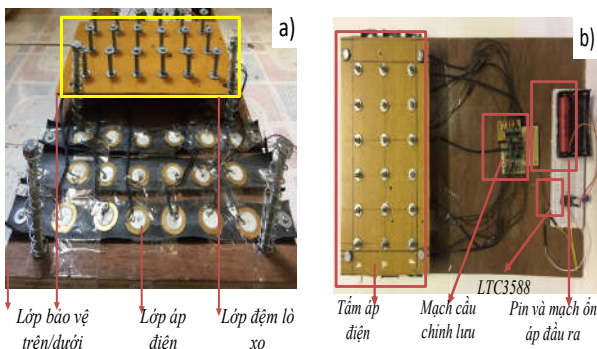


Hình 5. a) Mô tả ghép nối các tấm PZT với bộ chỉnh lưu cầu BD (Bridge Diode); b) Tín hiệu điện áp trên máy hiện sóng sau khi qua cầu diode.



Hình 6. Sơ đồ mạch điện của toàn mạch

Trong quá trình thực hiện thí nghiệm, chúng tôi nhận thấy năng lượng thu được từ một cảm biến là rất nhỏ; vì vậy cần mắc các cảm biến nối tiếp nhau để tăng giá trị điện áp và các dây này lại được mắc song song với nhau để tăng cường độ dòng điện nạp cho bộ lưu trữ. Tuy nhiên, khi mắc song song với nhau thì điện áp nhận được dường như yếu đi nhiều do tín hiệu nhận trên mỗi cảm biến có thể dương hay âm tùy vào việc lực tác động đang nén hay giãn, tức là chúng triệt tiêu nhau. Do đó chúng tôi đề xuất sử dụng mạch chỉnh lưu sau mỗi tấm PZT, nghĩa là chuyển tín hiệu điện thành một chiều trước khi đưa tới IC LTC3588. Khi này sẽ không còn hiện tượng điện áp tự triệt tiêu và nâng cao hiệu suất của các tấm PZT vì năng lượng thu được lúc này được lấy từ cả hai chiều dòng điện. Hình 5 thể hiện cách kết nối cảm biến với mạch chỉnh lưu và dạng điện áp hiển thị trên máy hiện sóng sau mạch chỉnh lưu cầu. Mặc dù ở phương pháp này vẫn còn một phần năng lượng tiêu hao bị mất đi ở các diode nhưng mỗi tấm PZT lại tạo ra điện áp lớn (hàng chục Volt) nên có thể bỏ qua.



Hình 7. a) Cấu tạo thực tế của khối áp điện; b) Kết nối toàn mạch

Tín hiệu điện áp sau khi qua mạch chỉnh lưu vẫn còn ở dạng sóng chưa bằng phẳng, vì vậy điện áp vẫn còn chưa ổn định nên ta có thể sử dụng các tụ điện ghép nối thêm sau mỗi mạch chỉnh lưu với nguyên lý hoạt động giống như các mạch ổn áp để điện áp trở nên ổn định hơn. Ngoài

ra, để đảm bảo cung cấp cho các tải đầu ra với điện áp khác nhau mạch được sử dụng thêm mạch buck-boost XL6009 [24], khi này sơ đồ mạch điện được thể hiện trong hình 6. Mạch thực tế chế tạo được trong nghiên cứu thể hiện trên hình 7 với tấm cảm biến và phần kết nối với mạch điện tử.

Mạch thu thập năng lượng bước chân có thể ứng dụng trong phục vụ các công trình công cộng như chiếu sáng khu mua sắm, trung tâm thương mại, các khu vực nhà ga, bến cảng... đây là những nơi có lượng người đi lại mỗi ngày rất lớn [15-16]. Tuy nhiên, trước khi có thể triển khai trong thực tế thì cần tính toán một số thông số cần thiết như số lượng tấm PZT cần sử dụng, thời gian thu thập và chiếu sáng. Trong điều kiện thực nghiệm được cho ở bảng 1, thời gian cần sử dụng để nạp đầy cho pin 1000mAh là 36.000h nếu sử dụng một miếng áp điện. Chính vì vậy để tăng thời gian nạp điện cần cải thiện diện tích của các tấm áp điện.

Bảng 1. Các thông số thực nghiệm chính

Thông số	Giá trị	Đơn vị
Dung lượng pin cần nạp	1000	mAh
Trọng lực P (đại diện áp lực bàn chân)	500	N
Tần số nhịp bước	1,6	Hz
Điện áp nạp ổn định	3,6	V
Bán kính phần áp điện	1	cm

Để tăng diện tích phần vật liệu áp điện tấm áp điện được chế tạo gồm 18 miếng áp điện đơn có đường kính 2,5cm, tính cả phần bảo vệ còn đường kính thực của mỗi miếng áp điện gồm thạch anh đang sử dụng cho phần áp điện chỉ là 1,0cm. Từ đây tính được phần diện tích áp điện cho mỗi tấm áp điện lớn được dùng là:

$$S = 18 \cdot \pi \left(\frac{1}{2} \cdot 10^{-2}\right)^2 = 1,413 \cdot 10^{-3} \text{ (m}^2\text{)} \quad (2)$$

Giả sử lực tác động là liên tục trong một ngày (24h), vậy số tấm áp điện tối thiểu cần sử dụng để nạp được 1000mAh trong một ngày là:

$$n \approx \frac{36000}{24} \approx 1500 \text{ (tấm)} \quad (3)$$

Khi đó diện tích phần áp điện tối thiểu cần để nạp được 1000mAh trong một ngày là:

$$S' = n \cdot S = 1500 \cdot 1,413 \cdot 10^{-3} \approx 2,2 \text{ (m}^2\text{)} \quad (4)$$

Như vậy cần tối thiểu diện tích 2,2m² áp điện để có thể cung cấp liên tục 1000mAh trong một ngày. Thông thường các cảm biến áp điện hiện nay có kích thước thường là những tấm nhỏ, nên diện tích thực tế yêu cầu sẽ là con số cao hơn. Chính vì vậy phần này cần tối ưu trong cách thiết kế, có thể tìm giải pháp xếp các tấm áp điện lên nhau thành từng lớp để tối ưu không gian và tăng hiệu quả của quá trình chuyển đổi.

5. KẾT LUẬN

Kết quả nghiên cứu này cho thấy tính khả thi khi áp dụng tính chất áp điện để thu thập và điều khiển năng lượng nhằm ứng dụng tại các khu vực công cộng. Bằng cách sử dụng vật liệu áp điện PZT và các mạch điện tử để thu thập năng lượng bước chân, với các thông số thực nghiệm đã mô tả ở trên cần 2,2m² diện tích áp điện để duy trì được 1000mAh cho tải nhẹ như chiếu sáng bằng LED.

Với kết cấu cơ khí đơn giản, nguyên vật liệu phổ biến như PZT hay PVDF, sử dụng module điều khiển chuyên dụng kích thước nhỏ và tiêu thụ năng lượng thấp việc hoàn thiện các tấm áp điện trên thành các viên gạch điện tử để lát sàn cho các địa điểm nhà ga, sân bay hay trung tâm thương mại là hoàn toàn có thể. Thậm chí nếu sử dụng vật liệu PVDF thì các viên gạch này còn có thể làm thành tấm lớn như trải thảm.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Bộ Giáo dục và Đào tạo (MOET) trong đề tài mã số: B2021-GHA-08

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Covaci C., Gontean A., 2020. *Piezoelectric energy harvesting solutions: A review*. Sensors, 20(12), 3512.
- [2]. Gholikhani M., Roshani H., Dessouky S., Papagiannakis A. T., 2020. *A critical review of roadway energy harvesting technologies*. Applied Energy, 261, 114388.
- [3]. <http://tphcm.chinhphu.vn/ky-niem-10-nam-thanh-lap-trung-tam-nghien-cuu-trien-khai-khu-cong-nghe-cao>, truy cập ngày 12/10/2022.
- [4]. https://repository.vnu.edu.vn/handle/VNU_123/40897, truy cập ngày 12/10/2022.
- [5]. https://bcee.phenikaa-uni.edu.vn/chitiet/sinh-vien-nckh_2019_2_13_9_57_872/sinh-vien-nckh-2019-2-21-2-12-593, truy cập ngày 12/10/2022.
- [6]. Van-Duong Dao, et al., 2020. *Plasma-processed CoSn/RGO nanocomposite: a low-cost and sustainable counter electrode for dye-sensitized solar cells*. Solar Energy, 201, 819-826.
- [7]. Tran Quoc Quan, et al, 2020. *Vibration and nonlinear dynamic response of imperfect sandwich piezoelectric auxetic plate*, Mechanics of Advanced Materials and Structures, 29, DOI - 10.1080/15376494.2020.1752864.
- [8]. Anh D. P., Tung V. T., 2020. *Preparation and characterization of PZT/PVDF composites films fabricated by electrospinning method*. arXiv preprint arXiv:2004.06928.
- [9]. Corina Covaci, Aurel Gontean, 2020. *Piezoelectric Energy Harvesting Solutions: A Review*. Sensors, 20, 3512.

- [10]. M. Gholikhani, 2020. *A critical review of roadway energy harvesting technologies*. Applied Energy, 261, 114388.
- [11]. Jianzhong Pei, et al., 2019. *e-Road: The largest energy supply of the future*. Applied Energy, 241, 174-183.
- [12]. ZhengbaoYang, et al, 2018. *High-Performance Piezoelectric Energy Harvesters and Their Applications*. Joule, 642-697.
- [13]. A. T. Papagiannakis, et al., 2017. *Development and Evaluation of Piezoelectric Prototypes for Roadway Energy Harvesting*. Journal of Energy Engineering, 143.
- [14]. Lu Z. Q., Shao D., Fang Z. W., Ding H., Chen L. Q., 2020. *Integrated vibration isolation and energy harvesting via a bistable piezo-composite plate*. Journal of Vibration and Control, 26(9-10), 779-789.
- [15]. C. Wang, et al., 2019. *Preparation and performance research of stacked piezoelectric energy-harvesting units for pavements*. Energy and Buildings, 183. DOI 10.1016/j.enbuild.2018.11.042.
- [16]. Action Nechibvute, et al, 2012. *Piezoelectric Energy Harvesting Devices: An Alternative Energy Source for Wireless Sensors*. Smart Materials Research. 13 pages. DOI - 10.1155/2012/853481.
- [17]. <https://www.ovoenery.com/blog/technology-and-innovation/kinetic-pavements-are-giving-a-whole-new-meaning-to-power-walking.html>, truy cập ngày 12/10/2022.
- [18]. <https://www.offgridenergyindependence.com/articles/7485/energy-harvesting-tiles-for-french-national-railway-company>, truy cập ngày 12/10/2022
- [19]. <https://blog.piezo.com/piezoelectric-floor-tiles-and-harvesting-energy-from-pedestrians>, truy cập ngày 12/10/2022.
- [20]. https://www.te.com/commerce/DocumentDelivery/DDEController?Action=showdoc&DocId=Data+Sheet%7FLDT_with_Crimps%7FA1%7Fpdf%7FEnglish%7FENG_DS_LDT_with_Crimps_A1.pdf%7FCAT-PFS0006, truy cập ngày 12/10/2022.
- [21]. Curie Jacques, Curie Pierre, 1880. *Développement par compression de l'électricité polaire dans les cristaux hémihédres à faces inclinées* [Development, via compression, of electric polarization in hemihedral crystals with inclined faces]. Bulletin de la Société Minérologique de France. 3 (4): 90-93.
- [22]. Yewang S., Canan D., Rui L., 2015, *Measured Output Voltages of Piezoelectric Devices Depend on the Resistance of Voltmeter*. Adv. Funct. Mater., 25, 5320-5325.
- [23]. Linear Technology. LTC3588 - 1 Nanopower Energy Harvesting Power Supply, Analog Device, <https://www.analog.com/en/products/ltc3588-1.html#product-overview>.
- [24]. <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/1132228/XLSEMI/XL6009.html>, truy cập ngày 12/10/2022.

AUTHORS INFORMATION

Pham Thanh Huyen¹, Ho Thanh Trung¹, Vu Ngoc Quy¹,
Khong Duc Chien², Nguyen Hoang Trung¹, Dao Thanh Toan¹

¹University of Transport and Communications

²Military Technology Academy