

NGHIÊN CỨU ỨNG DỤNG CÔNG NGHỆ FPGA ĐỂ THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN CHO VI ĐỘNG CƠ TỪ TRỞ CHUYỂN MẠCH HAI PHA

RESEARCH ON THE APPLICATION OF FPGA TO CONTROLLER DESIGN FOR THE TWO-PHASE MICRO SWITCHED RELUCTANCE MOTOR

Võ Như Thành¹, Đặng Phước Vinh¹, Ngô Thanh Nghị¹, Nguyễn Đăng Trình¹, Đoàn Lê Anh²

¹Trường Đại học Bách khoa, Đại học Đà Nẵng;

Email: thanhvous@gmail.com, dangphuocvinh@gmail.com, thanhnghipy@gmail.com, trinhmeiko@gmail.com

²Trường Cao đẳng Công nghệ, Đại học Đà Nẵng; Email: doanleanh024@gmail.com

Tóm tắt - Mục đích của bài báo này là đề xuất thiết kế bộ điều khiển cho vi động cơ có đường kính 1mm hai pha dựa vào công nghệ FPGA. Thiết kế bộ điều khiển cho vi động cơ như vậy gặp khó khăn do kích thước quá nhỏ và tần số yêu cầu của tín hiệu điều khiển cho động cơ phải cao. Công nghệ FPGA với khả năng xuất tín hiệu nhanh do tốc độ điều xung rất lớn (lên tới 200MHz), có thể được lập trình để tạo ra tín hiệu điều khiển cho động cơ này ở chế độ nguyên bước, hoặc chế độ nửa bước, hoặc chế độ vi bước được đề xuất. Bộ điều khiển được lập trình bằng VHDL là ngôn ngữ phổ biến để lập trình FPGA. Trong bài báo, tác giả trình bày về cách cấu hình và lập trình trên bo mạch Xilinx-XC3S700AN cho 3 chế độ điều khiển trên; kết quả mô phỏng tín hiệu điều khiển cho thấy tính khả thi của việc ứng dụng công nghệ FPGA trong điều khiển các loại động cơ có yêu cầu tần số tín hiệu điều khiển cao.

Từ khóa - FPGA; VHDL; vi động cơ hai pha; chế độ nguyên bước; chế độ nửa bước; chế độ vi bước.

Abstract - The purpose of this paper is proposing a controller design for a 1mm-diameter two-phase micro switched reluctance motor based on field programmable gate array (FPGA) technology. It is very difficult to design a controller for such micro motor due to its extremely small size and also the requirement of high speed control signal. FPGA technology with high speed clocking signal (up to 200MHz) and ability to config to generate motor signal in full step mode, or half step mode, or micro step mode is put into consideration. This FPGA based controller was programmed by VHSIC Hardware Description Language (VHDL) which is a common FPGA programming language. Within this paper, the authors present the configuration and programming on Xilinx-XC3S700AN FPGA board for 3 control modes mentioned above; the simulation results show the feasibility of FPGA technology in designing controllers that require high frequency signal.

Key words - FPGA; VHDL; two-phase micro motor; full step mode; half stepmode; micro stepmode.

1. Đặt vấn đề

Động cơ từ trở chuyển mạch (ĐCTTCM) là loại động cơ có kết cấu đơn giản và cấu tạo chắc chắn được sử dụng nhiều ở những ứng dụng với nhiều mức điện áp, nhiều cấp tốc độ dưới nhiều loại có hình dáng và kết cấu hình học khác nhau. Với những ứng dụng yêu cầu về khối lượng và kích thước nhỏ như những thiết bị dùng trong phẫu thuật, các rô le và các công tắc mini... thì loại động cơ này càng thể hiện được ưu điểm của nó. Tuy nhiên, đối với vi động cơ 2 pha thì việc điều xung để điều khiển cho động cơ hoạt động ổn định và chính xác thì không dễ dàng vì kích thước nhỏ, tốc độ cao và các ảnh hưởng của nhiễu lớn đến quá trình làm việc của động cơ.

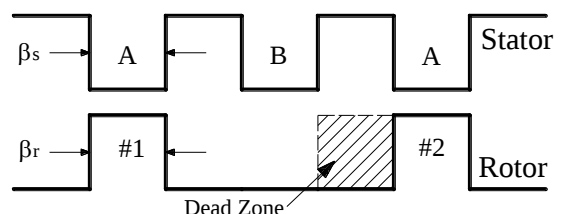
FPGA (Field-Programmable Gate Array) là công nghệ tiên tiến trong việc thiết kế các thiết bị điện tử như bộ điều khiển, thiết bị truyền thông. Các mạch logic ICs rất thích hợp để xây dựng phần điều khiển cho các loại động cơ nói chung và vi động cơ đề cập trong bài báo này nói riêng vì khả năng cấu hình linh hoạt và tốc độ xử lý tín hiệu rất nhanh. Các bo mạch FPGA có thể được lập trình và sử dụng như một vi điều khiển, vi xử lý, hoặc như một mô-đun có chức năng riêng biệt tùy theo yêu cầu của hệ thống. Thông thường, khi cấu hình và lập trình cho các card FPGA người ta sử dụng ngôn ngữ VHDL (VHSIC(Very High Speed Intergrated Circuit) Hardware Description Language). Đây là ngôn ngữ mạnh mẽ để lập trình cho các hệ thống kỹ thuật số. Ngày nay nó đã trở thành một trong những ngôn ngữ tiêu chuẩn cho công nghiệp lập trình phân cứng do tương đối giống với ngôn ngữ C và sự linh hoạt của cấu trúc khi lập trình. Sự khác biệt cơ bản giữa ngôn ngữ VHDL và C đó là ngôn ngữ C giải quyết chương trình theo trình tự,

trong khi VHDL giải quyết chương trình song song, nghĩa là các chương trình con trong VHDL lập trình cho FPGA được xử lý đồng thời. Đây cũng là điểm mạnh của VHDL trong lập trình cho các card FPGA trong việc xử lý các tín hiệu phức tạp. Do đó, việc đề xuất thiết kế bộ điều khiển cho vi động cơ từ trở chuyển mạch sử dụng công nghệ FPGA theo các chế độ linh hoạt (nguyên bước, nửa bước hoặc vi bước) được quan tâm nghiên cứu và trình bày trong bài báo này.

2. Vi động cơ từ trở chuyển mạch hai pha

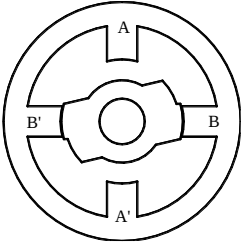
2.1. Khái quát về vi ĐCTTCM hai pha

Với loại động cơ hai pha 4/2 (4 cực stator và 2 cực rotor) cơ bản như hình 2 [1], pha A bao gồm hai cuộn dây quấn quanh cực 1 và 3 và pha B bao gồm hai cực 2 và 4. Loại động cơ này không thể hoạt động được nếu không có cơ cấu truyền động bằng tay hay những dạng hỗ trợ khởi động khác. Nhược điểm của loại động cơ này là có 2 vùng chết (điểm mà có momen xoắn bằng 0). Vùng chết (Hình 1) sẽ xuất hiện khi ta không đặt cuộn dây pha nghiêng với độ tự cảm dương hoặc không có momen xoắn ở trục ra của động cơ. Vùng chết này có thể được giảm đi nhiều khi hình dáng hình học của rotor được cải tiến.

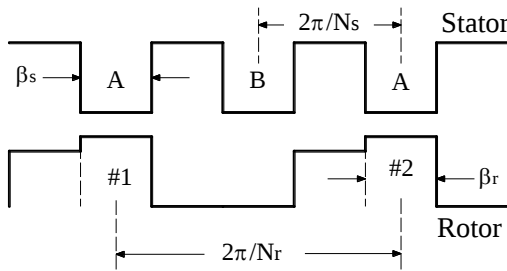


Hình 1. Các vùng chết của động cơ hai pha [1]

Giải pháp đơn giản nhất để khắc phục vấn đề này là mở rộng cung tròn của rotor. Một số giải pháp được đề xuất đó là rotor có dạng cam xoắn ốc, cơ cấu truyền động bằng tay hay là động cơ có khe hở giữa rotor và stator dạng bậc. Đối với loại dạng bậc (Hình 2) thì độ tự cảm khi thẳng hàng lớn hơn so với loại động cơ cơ bản ở hình 1. Tuy nhiên độ tự cảm khi không thẳng hàng cũng tăng nhiều. Ở loại này thì vùng chết gần vị trí không thẳng hàng đã giảm đi nhiều.



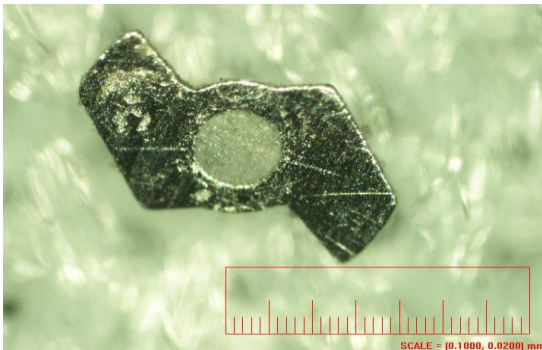
Hình 2. Cấu trúc của vi ĐCTTCM hai pha dạng bậc



Hình 3. Cấu trúc dạng bậc đã loại bỏ vùng chết

2.2. Vi ĐCTTCM hai pha với đường kính 1mm

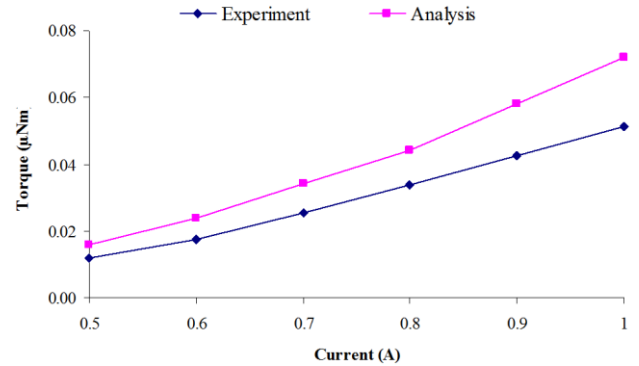
Để tránh được vùng không khởi động của động cơ hai pha thì rotor nên có hình dạng không đối xứng. Bằng cách sử dụng phương pháp tối ưu hình học Topo, hình dạng tối ưu của rotor (Hình 4) sẽ được xác định qua 6 bước với các tiêu chí và ràng buộc đã được trình bày trong bài báo trước của nhóm tác giả [1].



Hình 4. Cấu trúc của rotor vi ĐCTTCM hai pha

Động cơ có thể quay được mà không cần cơ cấu quay tay hay các hỗ trợ ban đầu với tốc độ tối đa là 9800 vòng/phút và momen xoắn tối đa là 0.0719 μNm khi cấp dòng điện 1A. Đường đặc trưng giữa dòng điện và momen xoắn của động cơ giữa lý thuyết và thực nghiệm được thể hiện rõ ở hình 5. Tuy nhiên ở nghiên cứu trước [1], tín hiệu xung điều khiển cho vi động cơ này được tạo ra từ mạch IC-HA17555 và bộ chia PMM-8713PT cho kết quả chưa được như mong muốn. Bộ điều khiển sử dụng các IC tuy đơn giản và dễ ứng dụng nhưng có nhược điểm là tốc độ

cấp xung chưa cao và sai số còn lớn. Do vậy, bộ điều khiển trên nền FPGA được đề xuất thay thế để đạt được kết quả tốt hơn so với khi sử dụng các IC thông dụng.



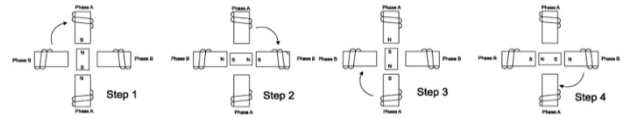
Hình 5. Đặc trưng giữa dòng điện và momen xoắn của động cơ giữa lý thuyết và thực nghiệm

3. Thiết kế bộ điều khiển trên nền FPGA

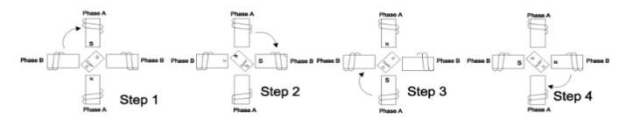
Phần này giới thiệu các phương thức điều khiển động cơ hai pha. Các phương thức này sẽ được lập trình vào bộ điều khiển FPGA bằng ngôn ngữ lập trình VHDL.

3.1. Điều khiển nguyên bước

Đây là phương thức điều khiển động cơ 2 pha cấp đơn giản nhất bằng cách cấp xung cho 2 stators theo thứ tự, trong điều khiển nguyên bước có 2 kiểu hay gặp đó là điều khiển theo mô men cao và mô men thấp như hình 6 và 7.



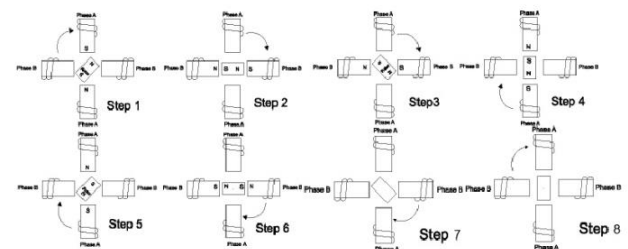
Hình 6. Điều khiển nguyên bước momen cao



Hình 7. Điều khiển nguyên bước momen thấp

3.2. Điều khiển nửa bước

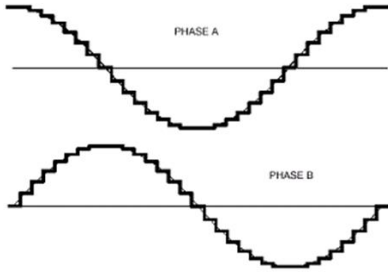
Trong chế độ hoạt động này số lượng các bước mỗi vòng sẽ được tăng gấp đôi. Vì vậy, nó sẽ giúp tăng khả năng kiểm soát tốc độ, tuy nhiên mô men không ổn định bởi vì một nửa bước là sự kết hợp giữa điều khiển nguyên bước mô men cao và mô men thấp. Trong thực tế mô-men bị giảm từ 15% đến 30%, tùy thuộc vào tốc độ của động cơ.[9]



Hình 8. Hệ thống điều khiển nửa bước

3.3. Điều khiển vi bước

Đây là trường hợp mà các xung cấp cho 2 pha của động cơ có dạng sóng hình sin với góc lệch pha 90 độ. Tùy theo tốc độ xuất tín hiệu của bộ điều khiển, có thể chia các xung hình sin thành các vi bước theo tỉ lệ khác nhau. Các xung càng nhỏ thì động cơ hoạt động càng trơn tru, tuy nhiên khi chia các vi bước quá nhỏ sẽ ảnh hưởng đến mô men của động cơ.



Hình 9. Hệ thống điều khiển vi bước

3.4. So sánh các kiểu điều khiển

Không dễ dàng để có thể lựa chọn hoặc quyết định kiểu điều khiển nào là tối ưu nhất vì nó phụ thuộc vào yêu cầu thiết kế của hệ thống. Có thể dựa vào bảng các tác giả tổng hợp thông tin từ [3],[5],[9] để có thể lựa chọn được kiểu điều khiển thích hợp nhất.

Bảng 1. Các thông số các chế độ điều khiển

	Kỹ thuật	Mô men	Nhiều	Ổn định
Nguyên bước	Dễ	Cao	Cao	Không tốt
Nửa bước	Dễ	Vừa	Vừa	Vừa phải
Vi bước	Khó	Thấp	Thấp	Tốt

3.5. Thiết kế và mô phỏng tín hiệu của bộ điều khiển

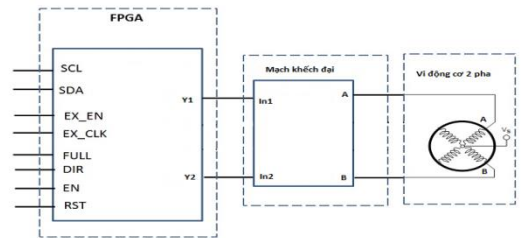
Tín hiệu điều khiển của vi động cơ sẽ được cấp xung từ FPGA sang mạch khuếch đại rồi vào 2 cực A và B của vi động cơ như hình 10. Trong bài báo này sẽ thiết kế bộ điều khiển dựa trên bo mạch Xilinx XC3S700AN FPGA. Card này có thể hoạt động cao nhất ở tần số 133MHz, tuy nhiên để điều khiển cho vi động cơ hai pha này, các tác giả chỉ sử dụng xung có tần số 50MHz cho dễ dàng tính toán và tránh được tình trạng quá tải của mạch.

Mô hình điều khiển và sơ đồ khối của bộ điều khiển thể hiện ở hình 10 và hình 11.

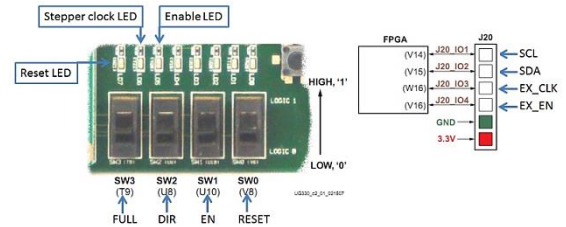
Trong đó SCL: Ngõ cấp xung vào; SDA: Ngõ dữ liệu; EX CLK: Ngõ cấp xung ngoài (50MHz); EN: Tín hiệu kích hoạt; DIR: Tín hiệu khi chạy với xung cấp ngoài; FULL: Chạy theo chế độ nguyên bước hoặc nửa bước với xung cấp ngoài (bằng 1 hay 0); RST: Khởi tạo lại; Y1: Tín hiệu vào cực A; Y2: Tín hiệu vào cực B.



Hình 10. Mô hình của bộ điều khiển

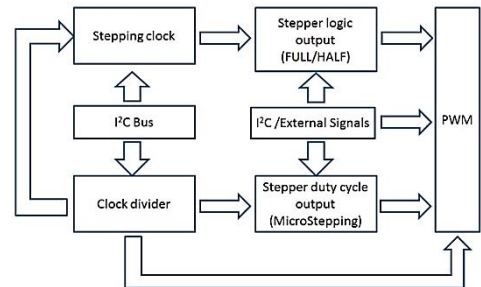


Hình 11. Mô hình của bộ điều khiển với các ngõ vào cần thiết của FPGA



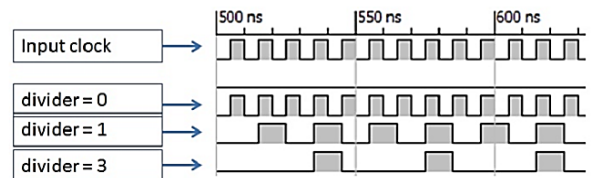
Hình 12. Pin V14, V15, W16, V16 cho các ngõ SCL, SDA, EX_CLK, và EX_EN

Tiếp theo là phần giới thiệu chức năng của các mô-đun cũng như kết nối giữa chúng bao gồm các mô-đun sau: mô-đun chia xung (clock divider), mô-đun bước (stepper logic), mô-đun xung đếm bước (stepping clock), mô-đun vi bước (micro stepping), mô-đun PWM (pulse width modulation).



Hình 13. Sơ đồ khối của bộ điều khiển

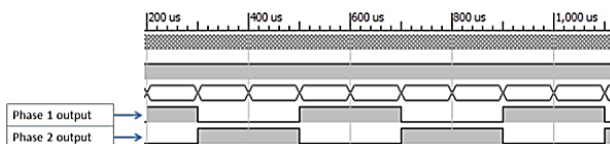
Mô-đun chia xung (clock divider): FPGA chạy ở tần số 50MHz không thích hợp cho điều khiển động cơ trực tiếp do vậy mô-đun chia xung sẽ cung cấp các xung cơ sở cho các mô-đun khác. Giá trị chia được lưu trữ trong một thanh ghi có thể được sửa đổi qua giao tiếp I2C. Bộ chia xung thực tế hoạt động như là một bộ đếm và khi vượt quá giá trị cần đếm thì sẽ xuất xung cao hoặc thấp. Nhờ mô-đun chia xung này mà vi động cơ có thể được điều chỉnh xung vào ở 2 pha một cách linh hoạt, phù hợp với từng loại ứng dụng và từng loại động cơ khác nếu cần thiết. Các chế độ chia xung khác nhau được thể hiện trên hình 14.



Hình 14. Kết quả mô phỏng mô-đun chia xung

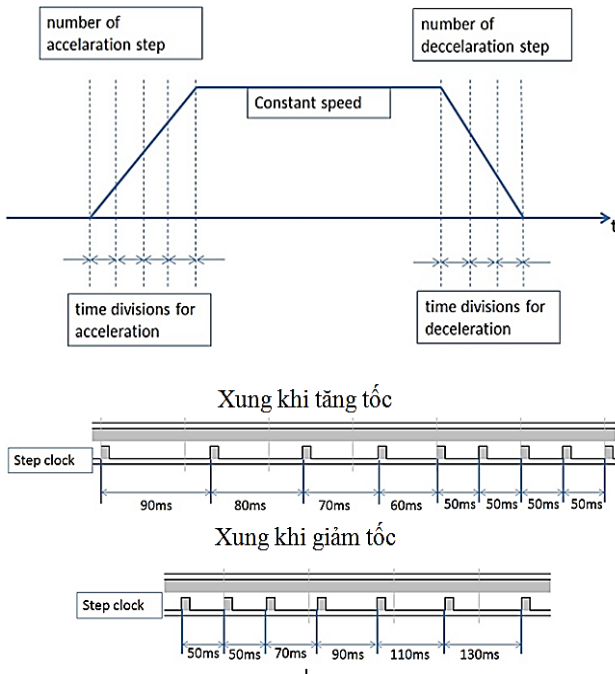
Mô-đun bước (stepper logic): Mô-đun này cung cấp tín hiệu điều khiển (tín hiệu vào 2 pha) cho vi động cơ. Tín

hiệu điều khiển vào 2 pha của vi động cơ sẽ điều khiển động cơ quay thuận hay nghịch theo chế độ nguyên bước hoặc nửa bước tùy thuộc vào chế độ hoạt động cần thiết. Hình 15 thể hiện tín hiệu vào cho pha 1 và 2 của động cơ khi điều khiển.



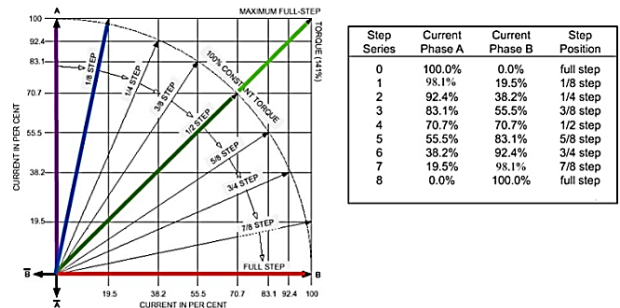
Hình 15. Kết quả mô phỏng mô-đun bước

Mô-đun xung đếm bước (stepping clock): Mô-đun này để điều chỉnh sự tăng và giảm tốc độ động cơ với dữ liệu đầu vào từ giao tiếp I²C. Các dữ liệu bao gồm tổng số bước, số bước tăng tốc, số bước giảm tốc và cơ sở chia xung. Tín hiệu đầu ra của mô-đun này là xung tín hiệu được cung cấp cho mô-đun bước. Các giá trị này được lưu trữ trong thanh ghi và có thể thay đổi qua giao tiếp I²C. Khi tăng tốc thì các tốc độ xung phải tăng dần vì tốc độ ban đầu thấp cho đến khi đạt được tốc độ ổn định, và ngược lại khi giảm tốc thì giảm dần vì tốc độ từ cao sẽ chuyển về thấp thể hiện ở Hình 16.



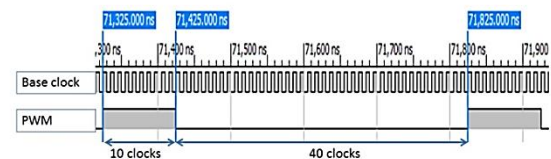
Hình 16. Kết quả mô phỏng mô-đun xung đếm bước

Mô-đun vi bước (Micro Stepping): Chế độ vi bước được xây dựng dưới dạng mô-đun riêng rẽ và được kích hoạt qua giao tiếp I²C. Tuy nhiên, chế độ vi bước vẫn có thể hoạt động được với xung cấp ngoài. Thay vì điều khiển vi động cơ bằng cách chia xung với giá trị xác định như ở chế độ nguyên bước thì chế độ vi bước chỉ cập nhật giá trị của tín hiệu điều khiển sau mỗi xung của FPGA. Tùy vào vị trí của rotor so với stator mà giá trị của xung trong 2 cuộn dây khác nhau. Trong trường hợp này vi bước được chia nhỏ 8 lần từ nguyên bước thể hiện ở Hình 17. Mặc dù mô-đun này có những hạn chế như hoạt động ở tần số PWM cố định và 1/8 lần nguyên bước, nhưng nó vẫn giúp vi động cơ có thể chạy trơn tru hơn. Các thông số về cường độ của cuộn A và B được thể hiện bên phải của Hình 17.



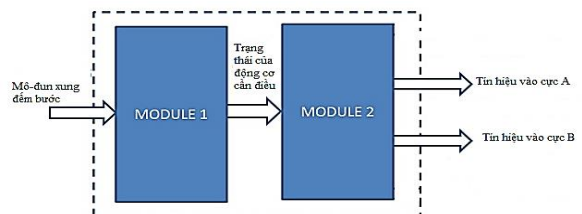
Hình 17. Tín hiệu vi bước 8 lần từ nguyên bước

Mô-đun PWM (pulse width modulation): Mô-đun này là một phần quan trọng nhất khi điều khiển vi động cơ 2 pha. Mô-đun PWM ban đầu làm việc với các giá trị cài đặt sẵn trong thanh ghi, tuy nhiên các giá trị này có thể được thay đổi qua giao tiếp I²C tùy theo các chế độ hoạt động của động cơ. Do đó, bộ điều khiển này ngoài khả năng điều khiển cho vi động cơ 2 pha còn có khả năng làm việc với nhiều loại động cơ bước có điện áp hoặc số pha khác nhau. Mô-đun PWM được sử dụng để tạo các xung mà mô-đun chia xung không thực hiện được như tín hiệu xung mô phỏng ở Hình 18.



Hình 18. Tín hiệu PWM mô phỏng

Các mô-đun vi bước có hai mô-đun phụ. Mô-đun 1 nhận xung từ mô-đun xung đếm bước hoặc xung ngoài và cho biết trạng thái của động cơ cần điều chỉnh. Sau đó trạng thái này sẽ là tín hiệu vào cho mô-đun 2 để điều chỉnh các tín hiệu PWM.



Hình 19. Mô-đun phụ của mô-đun PWM

Giao tiếp I²C được sử dụng trong thí nghiệm cũng được dựa trên bo mạch Xilinx XC3S700AN FPGA. Giao tiếp I²C được tích hợp trong bộ điều khiển khi ENABLE pin được set về 0. Địa chỉ của bộ điều khiển động cơ được cố định ở thanh ghi 0x5F-16 bits, các dữ liệu được lưu trữ trên thanh ghi có thể được điều chỉnh giá trị bằng vi điều khiển hoặc máy tính.

4. Kết luận

Trong nghiên cứu này, tác giả đã đề xuất thiết kế bộ điều khiển cho vi động cơ từ trở chuyển mạch hai pha dựa vào công nghệ FPGA được lập trình bằng ngôn ngữ VHDL với kết quả mô phỏng tín hiệu điều khiển khá tốt. Bộ điều khiển gồm 3 chế độ hoạt động linh hoạt là nguyên bước, nửa bước và vi bước. Bộ điều khiển có khả năng xuất tín

hiệu trơn tru, điều chỉnh được điện năng vào động cơ qua mô-đun PWM. Tuy vậy vẫn còn một số nhược điểm cần điều chỉnh như là trong chế độ vi bước tần số PWM và số lượng bước chia nhỏ là cố định, bộ chia xung còn chưa linh hoạt và khó điều chỉnh, dòng điện cung cấp bởi FPGA tương đối thấp. Hướng mở rộng nghiên cứu là tối ưu hóa mã lập trình VHDL để bộ điều khiển linh hoạt hơn và có thể sử dụng được cho các loại vi động cơ, hoặc động cơ khác nhau. Ngoài ra, khi hoạt động ở chế độ vi bước bộ điều khiển có thể tự động chia bước và thiết lập tần số PWM thích hợp để có được kết quả tối ưu nhất. Khả năng ứng dụng linh hoạt và quá trình xử lý dữ liệu song song công nghệ FPGA rất thích hợp để điều khiển các mạch động cơ phức tạp hoặc mạng lưới các động cơ hoạt động song song với nhau.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Đặng Phước Vinh, Ngô Thanh Nghị, Võ Như Thành, Đoàn Lê Anh, "Thiết kế và chế tạo vi động cơ từ trở chuyển mạch hai pha". Tạp chí tự động hóa ngày nay, trang 3-10, chuyên san số 8, tháng 12/2013.
- [2] C. Liu and T. Chiang, "On the Magnetic Saturation Analyses of a Micro Linear Switched-Reluctance Motor". *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 40, No. 4, 2004.
- [3] E. Afiei, B. Mazloomnezhad, and A. Seyadatan, "A Novel Two Phase Configuration for Switched Reluctance Motor with High Starting Torque". Proceedings of International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, pp. 1049-1052, 2008.
- [4] C. Liu, Y. Chen, and D. Pang, "Optimal Design of a Micro Axial Flux Switched-reluctance Motor". *IEEE Transactions of Energy Conversion*, pp. 1130-1134, 2005.
- [5] T. J. E. Miller, "Switched Reluctance Motor and Their Control". Magna Physics Publishing/Clarendon Press, Oxford, 1993
- [6] G. CrCiunaD, "Field oriented control of a two phase induction motor". International Symposium on System Theory, XI Edition, Craiova, 2003, pp.28-31.
- [7] G. CrCiunaD, "Two-phase induction machine behavior at transient regime running", International Symposium on System Theory, XII Edition, Craiova, 2005, pp. 333-336.
- [8] P. C. Krause, "Analysis of Electric Machinery". IEEE Press, 1995
- [9] Douglas W. Jones, "Control of Stepping Motors". The University of Iowa, Department of Computer Science. Received from <http://homepage.cs.uiowa.edu/~jones/step/>
- [10] Pong P. Chu, "FPGA prototyping by VHDL examples Xilinx Spartan TM -3 Version", John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2008
- [11] Xilinx, "Spartan-3A/3AN FPGA Starter Kit Board User Guide", June 19th, 2008
- [12] Ngoc Quy Le and Jae Wook Jeon, "An Open-loop Stepper Motor Driver Based on FPGA", International Conference on Control, Automation and Systems, October 2007.
- [13] Đặng Phước Vinh, Võ Như Thành, Ngô Thanh Nghị, Đoàn Lê Anh, "Thiết kế và chế tạo vi động cơ từ trở tích hợp cảm biến dòng điện Eddy". Hội nghị toàn quốc Điều khiển và Tự động hóa, 2013.

(BBT nhận bài: 02/04/2014, phản biện xong: 26/05/2014)