THIẾT KẾ BÀI THÍ NGHIỆM CHỈNH LƯU DÙNG SCR THEO TRÌNH TỰ DỰ ĐOÁN - MÔ PHỎNG - ĐO - GIẢI THÍCH

Phan Thị Cẩm Trang, Trịnh Bích Ngọc
Trường Đại học Xây dựng Hà Nội
Email: trangptc@huce.edu.vn, ngoctb@huce.edu.vn

***Tóm tắt**: Tài liệu của nhà cung cấp mô-đun cho bài thí nghiệm chỉnh lưu dùng thyristor (SCR) chủ yếu yêu cầu sinh viên nối mạch và vẽ dạng sóng. Tài liệu năm 2025 của Bộ môn Điện kỹ thuật, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội đã thêm tính toán, mô phỏng và so sánh sai số, nhưng chưa yêu cầu dự đoán trước khi đo hay giải thích sai lệch có căn cứ. Bài viết đề xuất trình tự dự đoán - mô phỏng - đo - giải thích. Số đo của một đề tài nghiên cứu khoa học sinh viên lệch so với giá trị tính đến khoảng 9%. Ảnh đo trên máy hiện sóng gợi ra các giả thuyết về góc mở thực của SCR, nhiễu xung kích và cách máy đo tính trị số; các giả thuyết này được dùng làm đề bài cho bước giải thích. Hiệu quả với người học chưa được đánh giá.*

***Từ khóa:** điện tử công suất; thí nghiệm; mô phỏng; dự đoán - quan sát - giải thích; chỉnh lưu dùng SCR.*

DESIGNING AN SCR RECTIFIER LABORATORY EXPERIMENT AROUND A PREDICT-SIMULATE-MEASURE-EXPLAIN SEQUENCE

***Abstract:** The supplier's guide for a thyristor (SCR) rectifier experiment mainly asks students to wire circuits and sketch waveforms. A 2025 departmental guide at Hanoi University of Civil Engineering added calculation, simulation and error tables, but no prediction before measuring and no evidence-based explanation. This paper proposes a predict-simulate-measure-explain sequence for the experiment. Measurements from a student research project deviate from calculated values by up to about 9%. Oscilloscope screenshots suggest hypotheses about the actual firing angle, gate-pulse noise and the oscilloscope's measurement method; these serve as the task for the explanation step. Effects on learning have not been evaluated.*

***Keywords:** power electronics; laboratory; simulation; predict-observe-explain; SCR rectifier.*

Nhận bài: 17/09/2026 Phản biện: 17/10/2026 Duyệt đăng: 20/10/2026

I. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong các mục tiêu thí nghiệm kỹ thuật do hội thảo ABET/Sloan đề xuất, mục tiêu Mô hình (Models) yêu cầu người học "nhận ra điểm mạnh và giới hạn của các mô hình lý thuyết khi dùng để dự đoán hành vi thực tế" (nhóm tác giả dịch). Tại Trường Đại học Xây dựng Hà Nội, bài thí nghiệm chỉnh lưu dùng thyristor (Silicon Controlled Rectifier - SCR) của học phần Điện tử công suất (ĐTCS) đã chuyển từ tài liệu của nhà cung cấp mô-đun sang tài liệu năm 2025 của Bộ môn, có tính toán, mô phỏng và so sánh sai số. Tuy vậy, sinh viên chưa phải dự đoán trước khi đo hay giải thích vì sao số đo lệch. Bài viết đề xuất trình tự dự đoán - mô phỏng - đo - giải thích cho bài thí nghiệm này, minh họa bằng số đo và ảnh đo của một đề tài sinh viên.

II. CƠ SỞ LÝ LUẬN VÀ THỰC TIỄN

2.1. Thí nghiệm thực và mô phỏng

Tổng quan của Ma và Nickerson cho thấy các so sánh, phần lớn quy mô nhỏ, nhìn chung không thấy khác biệt nhất quán giữa thí nghiệm thực, mô phỏng và điều khiển từ xa. Trong nghiên cứu của Finkelstein và cộng sự, sinh viên vật lý đại cương học mạch một chiều bằng mô phỏng còn trả lời câu hỏi khái niệm tốt hơn nhóm dùng thiết bị. Tuy vậy, lợi ích riêng của thiết bị thực không được đo. Feisel và Rosa ghi nhận mô phỏng có thể dùng làm phần chuẩn bị trước giờ thí nghiệm; đồng thời, theo ý kiến chung mà hai tác giả nêu, mô phỏng hiện chưa thể thay hoàn toàn thí nghiệm thực. Trong ĐTCS, Thompson giao phần tính lý thuyết và mô phỏng trước buổi thí nghiệm, sau đó sinh viên đo trên bộ huấn luyện. Ba loại giá trị thường khớp trong khoảng 5%, có khi tới 10%. Tác giả coi đó là lý do để lý thuyết kết hợp với mô phỏng có thể thay thiết bị ở nơi thiếu kinh phí. Độ lệch ở đây dùng để đánh giá độ khớp, chưa trở thành nội dung để sinh viên phân tích.

2.2. Dự đoán và giải thích sai lệch

Theo Kearney và Treagust, chiến lược dự đoán - quan sát - giải thích (Predict-Observe-Explain, POE) do White và Gunstone đề xuất gồm việc người học "dự đoán kết quả của thí nghiệm biểu diễn, cam kết với một lý do cho dự đoán, quan sát thí nghiệm, và cuối cùng giải thích mọi chỗ khác nhau giữa dự đoán và quan sát" nhóm tác giả dịch). Chương trình POE của hai tác giả không cho người học sửa dự đoán sau khi đã xem video thí nghiệm. Hai tác giả cũng cho rằng bước giải thích của POE "có lẽ là giai đoạn khó nhất với

sinh viên". Holmes và cộng sự so sánh hai lớp sinh viên thí nghiệm vật lý năm thứ nhất. Một lớp làm theo cách truyền thống; lớp kia được hướng dẫn và chấm điểm việc đối chiếu số liệu với mô hình rồi tự quyết định bước tiếp theo. Khi hướng dẫn được rút dần, lớp thứ hai vẫn chủ động sửa cách đo và chỉ ra chỗ mô hình không còn phù hợp với số liệu của mình thường xuyên hơn hẳn lớp truyền thống. Các bằng chứng trên đều thuộc môn vật lý, riêng chỉ là một đợt thử nghiệm định tính, nên bài viết chỉ dùng chúng làm căn cứ thiết kế, chưa coi là bằng chứng về hiệu quả.

2.3. Bối cảnh trong nước và khoảng trống

Trong nước, Nguyễn Trọng Dũng minh họa vai trò của mô phỏng trong dạy ĐTCS bằng mạch chỉnh lưu ba pha trên Simulink và lưu ý kết quả mô phỏng cần đem "kiểm chứng với kết quả thực nghiệm". Hoàng Thị Thơm và Nguyễn Văn Lợi cho rằng thiết bị thực hành ĐTCS "còn nhiều thiếu thốn" và chế tạo mô-đun dạng mở, cho phép sinh viên tự nối mạch bằng jack cắm. Trong các tài liệu đã tổng quan, có ba khoảng trống. Thứ nhất, các bảng đối chiếu lý thuyết - mô phỏng - đo trong thí nghiệm ĐTCS, gồm và báo cáo, dùng sai số để xác nhận mô hình, chưa phân tích nguyên nhân. Thứ hai, POE và việc đối chiếu dữ liệu với mô hình mới có bằng chứng trong môn vật lý. Thứ ba, hai bài trong nước chưa có số đo trên thiết bị.

III. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Bài viết thuộc loại đề xuất thiết kế, chưa đánh giá trên người học, nhằm trả lời ba câu hỏi: tài liệu hướng dẫn hiện có của bài thí nghiệm đáp ứng đến đâu các mục tiêu thí nghiệm kỹ thuật; cần thêm hoạt động gì để bài thí nghiệm đi theo trình tự bốn bước; số đo và ảnh đo của gợi ra những giả thuyết nào cho bước giải thích. Dữ liệu gồm ba nguồn. (1) Tài liệu hướng dẫn bài Chỉnh lưu dùng SCR (mã EXPE.0026.00) của Công ty Cổ phần Tự động hóa Tân Phát, nhà cung cấp mô-đun, sau đây gọi là tài liệu nhà cung cấp. (2) Tài liệu hướng dẫn thí nghiệm Điện tử công suất của Bộ môn Điện kỹ thuật, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (năm 2025), sau đây gọi là tài liệu năm 2025 của Bộ môn. (3) Số đo và ảnh đo trên máy hiện sóng trong báo cáo đề tài nghiên cứu khoa học sinh viên CK-2024-08. Theo, mạch dùng nguồn xoay chiều 24 V, tải đèn sợi đốt R = 23,04 Ω; số đo lấy bằng chức năng đo tự động trị trung bình (Vavg) và trị hiệu dụng (Vrms) của máy hiện sóng Agilent DSO1012A, thang 10 V/div, mỗi góc một lần. Vì vậy, trong bài, góc kích 0°, 45°, 90° là góc danh nghĩa; góc mở thực là thời điểm SCR bắt đầu dẫn, đọc trên ảnh đo. Giá trị mô phỏng được tính số bằng một chương trình Python dùng thư viện mã nguồn mở: dạng sóng lý tưởng (nguồn hình sin trị hiệu dụng 24 V, 50 Hz; SCR dẫn từ góc kích tới cuối nửa chu kỳ, không sụt áp) được lấy mẫu 200.000 điểm mỗi chu kỳ rồi tích phân số, và kết quả được đối chiếu với công thức (1), (2) ở mục 4.3. Mô hình lý tưởng được chọn có chủ đích, để sinh viên thấy rõ phần nào của số đo nằm ngoài mô hình. Nhóm sinh viên của đề tài đã mô phỏng bằng phần mềm PSIM; bài viết không dùng kết quả đó.

IV. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VÀ THẢO LUẬN

4.1. Các tài liệu hướng dẫn hiện có

Tài liệu nhà cung cấp gồm phần nguyên lý và 28 bước thao tác cho nhiều cấu hình chỉnh lưu một pha và ba pha, lặp lại một trình tự: nối jack theo số cho sẵn, chỉnh biến trở của mạch tạo xung, quan sát trên máy hiện sóng rồi vẽ dạng sóng vào bảng. Câu hỏi chủ yếu là nhận dạng mạch hoặc so sánh định tính độ sáng của đèn. Tài liệu không có bước tính trước, không yêu cầu ghi góc kích hay trị số điện áp; mục kết quả là các dòng để trống. Đối chiếu với bộ mục tiêu của Feisel và Rosa, tài liệu này rèn cách dùng máy hiện sóng và có bước tắt nguồn sau mỗi cấu hình, nhưng chưa đáp ứng mục tiêu mô hình và mục tiêu phân tích dữ liệu. Tài liệu năm 2025 của Bộ môn thêm công thức tính, yêu cầu mô phỏng bằng PSIM, bảng điện áp đầu vào và đầu ra theo góc kích, bảng so sánh giá trị tính, mô phỏng, đo kèm sai số và mục nhận xét - đánh giá. Tuy nhiên, phần tính toán nằm trong phần báo cáo kết quả nên có thể làm sau khi đo, và tài liệu chưa nêu căn cứ để giải thích sai số. Sinh viên tính được sai số nhưng chưa phải ra quyết định từ dữ liệu, là yếu tố mà Holmes và cộng sự coi là cốt lõi để phát triển tư duy phản biện.

Bài viết thêm bốn điểm: phiếu dự đoán có lý do, khóa trước khi đo; dùng điện áp nguồn đo khi có tải và góc mở thực ở hai nửa chu kỳ làm căn cứ giải thích; danh mục nguyên nhân sai lệch; phép đo kiểm chứng cho mỗi giải thích.

4.2. Trình tự bốn bước đề xuất

Bảng 1. Trình tự dự đoán - mô phỏng - đo - giải thích cho bài thí nghiệm chỉnh lưu dùng SCR

Bước	Việc của sinh viên	Sản phẩm	Căn cứ
1. Dự đoán	Tính Ud, UR tại α = 0°, 45°, 90°; phác dạng sóng; viết lý do vì sao điện áp ra giảm khi α tăng	Phiếu dự đoán nộp trước buổi thí nghiệm, không sửa sau khi đo	[5, tr.65]; [5, tr.72]; [10]
2. Mô phỏng	Chạy mô hình lý tưởng cùng thông số, so với phép tính tay; liệt kê những gì mô hình bỏ qua	Bảng giá trị, đồ thị dạng sóng	[1, tr.125]
3. Đo	Nối mạch; giảng viên kiểm tra dây trước khi cấp điện; đo điện áp nguồn khi có tải, góc mở thực ở từng nửa chu kỳ, điện áp trên tải; lưu ảnh đo	Bảng số đo, ảnh đo	[1, tr.127]; [9, tr.11]
4. Giải thích	Lập bảng đối chiếu giá trị tính, mô phỏng và đo; nêu nguyên nhân có căn cứ và phép đo kiểm chứng	Bảng đối chiếu, đoạn giải thích	[4]; [5, tr.73]; [10]

Nguồn: nhóm tác giả đề xuất.

Ở bước 1, sinh viên phải viết lý do chứ không chỉ ghi con số, vì dự đoán đúng chưa chắc có lý do đúng; phiếu không được sửa sau khi đo, để giữ lại sai lệch giữa dự đoán và quan sát. Ở bước 2, mô phỏng giúp sinh viên đối chiếu phép tính tay và xem trước dạng sóng. Bước 4 ứng với bước giải thích của POE, bước có lẽ khó nhất với sinh viên; khi gặp sai lệch, sinh viên cũng dễ quy cho lỗi người làm hay cho thiết bị. Vì vậy mỗi nguyên nhân sinh viên nêu phải có căn cứ và một phép đo kiểm chứng. Danh mục gợi ý gồm: (a) điện áp nguồn thực khác danh định, kể cả do điện áp lưới thay đổi; (b) sụt áp trên SCR khi dẫn; (c) góc mở thực khác góc danh nghĩa, chẳng hạn do mạch tạo xung không đạt được góc kích nhỏ, hoặc do hai nửa chu kỳ mở không đều; (d) gai xung kích và nhiễu trên dạng sóng; (e) cách máy hiện sóng tính Vavg, Vrms khi cửa sổ đo không chứa số nguyên lần chu kỳ, và độ chính xác của máy đo. Với tải thuần trở, Ud và UR theo công thức (1), (2) ở mục 4.3 không phụ thuộc R; điện trở dây tóc đèn thay đổi theo nhiệt độ chỉ tác động gián tiếp, qua sụt áp trên nội trở biến áp và trên SCR.

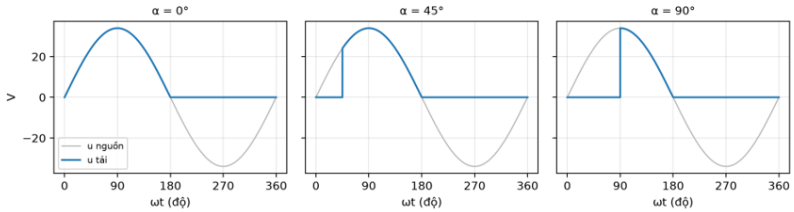
4.3. Minh họa với số đo của đề tài CK-2024-08

Hai mạch được minh họa là chỉnh lưu một pha nửa chu kỳ có điều khiển (gọi tắt là mạch nửa chu kỳ) và bộ biến đổi điện áp xoay chiều một pha (gọi tắt là mạch xoay chiều), tải thuần trở. Với nguồn có trị hiệu dụng U và góc kích α, trị trung bình Ud của mạch nửa chu kỳ và trị hiệu dụng UR của mạch xoay chiều tính theo:

$$Ud = (\sqrt{2}\cdot U/(2\pi))\cdot(1 + \cos\alpha) \quad (1)$$

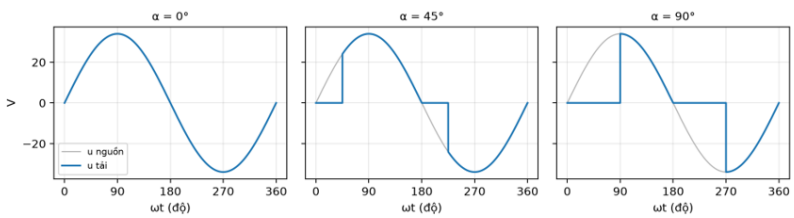
$$UR = U\cdot\sqrt{(1 - \alpha/\pi + \sin(2\alpha)/(2\pi))} \quad (2)$$

trong đó α ở (2) tính bằng radian. Hình 1, Hình 2 là dạng sóng mô phỏng; Bảng 2 đặt cạnh nhau giá trị tính, mô phỏng, đo và ảnh đo trong.



Hình 1. Dạng sóng mô phỏng của điện áp trên tải mạch nửa chu kỳ (U = 24 V, 50 Hz)

Nguồn: nhóm tác giả mô phỏng



Hình 2. Dạng sóng mô phỏng của điện áp trên tải mạch xoay chiều (U = 24 V, 50 Hz)

Nguồn: nhóm tác giả mô phỏng

Bảng 2. Giá trị tính, mô phỏng, đo và ảnh đo của hai mạch dùng SCR (U = 24 V, R = 23,04 Ω)

Mạch	α	Tính và mô phỏng (V)	Đo (V)	Độ lệch (%)	Ảnh đo cho thấy
Nửa chu kỳ, Ud	0°	10,80	10,2 (*)	-5,6	Vmax khoảng 33 V; đầu mỗi xung có bước nhảy khoảng 7 V; gai âm sau khi SCR tắt
	45°	9,22	9,19	-0,3	Vmax khoảng 34 V; gai âm sau khi SCR tắt
	90°	5,40	5,12	-5,2	Vmax khoảng 33 V; SCR mở gần đỉnh điện áp; gai âm nhỏ
Xoay chiều, UR	0°	24,00	25,1	+4,6	Vmax 34,4 V; Vmin khoảng -35 V
	45°	22,88	21,8	-4,7	Vmax 34,0 V
	90°	16,97	15,4	-9,3	Vmax 33,6 V

Nguồn: giá trị tính và mô phỏng do nhóm tác giả tính; cột Đo và cột Ảnh đo cho thấy theo ảnh đo trong, thang 5 ms/div (mạch nửa chu kỳ) và 10 ms/div (mạch xoay chiều); số chữ số thập phân giữ như trên ảnh đo. (*) Theo ảnh Hình 4.2 của; bảng số liệu của ghi 10,02 V. Độ lệch của số đo tính so với giá trị mô phỏng chưa làm tròn. Vì giá trị mô phỏng trùng giá trị tính theo (1), (2) đến hai chữ số thập phân, mô phỏng ở đây chỉ xác nhận phép tính tay và cho dạng sóng. Độ lệch của số đo có thể đến từ mạch thực khác mạch lý tưởng, cũng có thể đến từ phép đo. Ở mạch xoay chiều tại 0°, điện áp trên tải có Vmax 34,4 V; nếu là hình sin thì trị hiệu dụng khoảng 24,3-24,5 V, nhỏ hơn 25,1 V máy hiển thị. Vì vậy sinh viên cần xét cách máy hiện sóng tính Vrms trên cửa sổ đo, rồi kiểm chứng bằng đồng hồ đo trị hiệu dụng thực hoặc đổi thang thời gian và đo lại; điện áp nguồn khi có tải được đo riêng ở bước 3. Ở mạch nửa chu kỳ tại góc danh nghĩa 0°, điện áp tải nhảy lên khoảng 7 V ở đầu mỗi xung (đọc sơ bộ trên ảnh đo), tức SCR không mở đúng tại 0°. Theo tài liệu nhà cung cấp, xung kích được tạo từ một transistor một tiếp giáp (Unijunction Transistor - UJT); giả thuyết là mạch này có góc kích nhỏ nhất lớn hơn 0°, kiểm chứng bằng cách đọc góc mở thực khi chỉnh biến trở về tận cùng. Cả ba ảnh đo của mạch nửa chu kỳ có gai âm sau khi SCR tắt, gợi ý nhiễu từ mạch xung kích; vì gai rất hẹp, ảnh hưởng lên Vavg nhiều khả năng nhỏ, có thể kiểm tra bằng cách đổi thang thời gian. Cuối cùng, sụt áp trên SCR làm giảm điện áp tải ở mọi góc; vì giá trị lý tưởng giảm khi α tăng, một độ giảm gần như không đổi làm độ lệch tương đối tăng theo α, phù hợp một phần với số đo ở 45° và 90° của mạch xoay chiều. Mỗi giá trị ở cột Đo chỉ là một lần đo, nên nhóm tác giả không kết luận nguyên nhân mà dùng Bảng 2 làm đề bài cho bước 4.

4.4. Thảo luận và hạn chế

Độ lệch trong Bảng 2 tương đương mức Thompson nêu, nhưng các giả thuyết ở mục 4.3 đều cần đến ảnh đo thực, là những chi tiết mô phỏng lý tưởng không thể hiện được. Vì vậy bài viết không đi tới kết luận rằng lý thuyết kết hợp với mô phỏng có thể thay thiết bị ở nơi thiếu kinh phí. Nhận định này gần với gợi ý rằng thí nghiệm thực có thể quan trọng ở giai đoạn đầu để xác lập độ chính xác của mô phỏng. Bài viết giữ mô hình lý tưởng, khác đề nghị đưa dao động của thông số thực vào mô phỏng; sau bước 4, sinh viên có thể tự thêm các yếu tố đã đo vào mô hình. Bài viết có các hạn chế sau. Trình tự chưa được áp dụng với lớp học nên chưa có dữ liệu về người học, trong khi một bài thí nghiệm mới cần được đánh giá bằng việc người học có đạt mục tiêu đã nêu hay không. Số đo lấy từ một nhóm sinh viên, mỗi góc một lần đo, không kèm điện áp nguồn và góc mở thực. Bảng số liệu của có một giá trị ghi không khớp với ảnh đo; bài viết đã đối chiếu cả sáu số đo với ảnh. Nhóm tác giả hướng dẫn đề tài và cũng là người phân tích số liệu của đề tài, nên việc đánh giá chưa độc lập. Hướng tiếp theo là áp dụng thử trong một học kỳ, chấm phiếu dự đoán và bảng giải thích theo tiêu chí như cách Holmes và cộng sự chấm sổ thí nghiệm , rồi mở rộng sang các bài thí nghiệm khác.

V. KẾT LUẬN

Tài liệu nhà cung cấp rèn thao tác nối mạch và dùng máy hiện sóng; tài liệu năm 2025 của Bộ môn thêm tính toán, mô phỏng và so sánh sai số. Cả hai chưa yêu cầu dự đoán trước khi đo và giải thích sai lệch có căn cứ. Bài viết đề xuất trình tự bốn bước: dự đoán có lý do và khóa phiếu trước khi đo, mô phỏng mạch lý tưởng, đo có ghi điện áp nguồn và góc mở thực, giải thích sai lệch kèm phép đo kiểm chứng. Số đo của đề tài CK-2024-08 lệch so với giá trị tính đến khoảng 9%, và ảnh đo gợi ra các giả thuyết cụ thể cho bước giải thích. Hiệu quả với người học cần được đánh giá trong nghiên cứu tiếp theo.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

Feisel, L. D., & Rosa, A. J. (2005). The role of the laboratory in undergraduate engineering education (Vai trò của phòng thí nghiệm trong đào tạo kỹ sư bậc đại học). Journal of Engineering Education, 94(1), 121-130. https://doi.org/10.1002/j.2168-9830.2005.tb00833.x

Finkelstein, N. D., Adams, W. K., Keller, C. J., Kohl, P. B., Perkins, K. K., Podolefsky, N. S., Reid, S., & LeMaster, R. (2005). When learning about the real world is better done virtually: A study of substituting computer simulations for laboratory equipment. Physical Review Special Topics - Physics Education Research, 1(1), 010103. https://doi.org/10.1103/PhysRevSTPER.1.010103

Hoàng Thị Thơm, Nguyễn Văn Lợi (2024), Thiết kế, chế tạo bộ thực hành điện tử công suất, Tạp chí Thiết bị Giáo dục, số 307, kì 2, tháng 2/2024, tr.120-122.

Holmes, N. G., Wieman, C. E., & Bonn, D. A. (2015). Teaching critical thinking (Dạy tư duy phản biện). Proceedings of the National Academy of Sciences, 112(36), 11199-11204. https://doi.org/10.1073/pnas.1505329112

Kearney, M., & Treagust, D. F. (2001). Constructivism as a referent in the design and development of a computer program using interactive digital video to enhance learning in physics. Australian Journal of Educational Technology, 17(1), 64-79. https://doi.org/10.14742/ajet.1773

Ma, J., & Nickerson, J. V. (2006). Hands-on, simulated, and remote laboratories: A comparative literature review (Phòng thí nghiệm thực hành trực tiếp, mô phỏng và điều khiển từ xa: Tổng quan tài liệu so sánh). ACM Computing Surveys, 38(3), Article 7, 1-24. https://doi.org/10.1145/1132960.1132961

Nguyễn Trọng Dũng (2015), Vai trò của mô phỏng trong hoạt động nghiên cứu khoa học và giảng dạy chuyên ngành điện tử công suất, Tạp chí Khoa học Trường Đại học Sư phạm Thành phố Hồ Chí Minh, số 6(72), tr.49-55.

Nguyễn Văn Đạt, Bùi Xuân Thành, Hà Quỳnh Nga, Đàm Minh Quân, Nguyễn Quang Minh (2024), Nghiên cứu, xây dựng các bài thí nghiệm điện tử công suất cơ bản, Báo cáo tổng kết đề tài nghiên cứu khoa học sinh viên, mã số CK-2024-08, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội.

Thompson, E. A. (2024). Use of simulation and power electronics hardware trainer for teaching an introductory undergraduate power electronics course. 2024 ASEE North Central Section Conference, Kalamazoo, Michigan, 22-23/3/2024, Paper ID #44574. https://doi.org/10.18260/1-2--45647

Võ Minh Chính, Phạm Quốc Hải, Trần Trọng Minh (2004), Điện tử công suất, NXB Khoa học và Kỹ thuật, Hà Nội.