

Research on the BKE-020 experiment set to determine the electromotive force of a parallel power supply using the circuit method with two opposite polarity power

ABSTRACT

This paper presents a study on the improvement and design of physics experimental sets, an issue that is always necessary in improving the quality of teaching and learning in high schools. Specifically, we used the BKE-020 experimental set to determine the electromotive force (EMF) of a power source. Then, we designed and improved the experimental set to measure the EMF of parallel-connected power using the circuit method with two opposite polarity power. The results show that this method combined with a sensitive galvanometer and a standard voltage source, allows for accurate measurement of the EMF of parallel connected power sources with very small errors. The value of the research lies in demonstrating the feasibility of verifying theory by experiment, thereby stimulating interest and developing thinking for both students and physics teachers in high schools.

Keywords: *Physics experimental set, power source, opposite polarity, electromotive force, thinking.*

Nghiên cứu bộ thí nghiệm BKE-020 xác định suất điện động của bộ nguồn mắc song song bằng mạch xung đối

TÓM TẮT

Bài báo này trình bày một nghiên cứu về thiết kế và cải tiến bộ thí nghiệm vật lý, một vấn đề luôn mang tính cần thiết trong việc nâng cao chất lượng dạy và học ở trường trung học phổ thông. Cụ thể, chúng tôi đã sử dụng hệ thí nghiệm BKE-020 để xác định suất điện động của một nguồn điện. Sau đó, chúng tôi tiến hành thiết kế và cải tiến bộ thí nghiệm để đo được suất điện động của bộ nguồn mắc song song bằng phương pháp mạch xung đối. Kết quả cho thấy phương pháp này kết hợp với điện kế có độ nhạy dòng cao và nguồn điện chuẩn cho phép xác định suất điện động của bộ nguồn mắc song song với sai số rất nhỏ. Giá trị của nghiên cứu nằm ở việc chứng minh tính khả thi của việc kiểm nghiệm lý thuyết bằng thực nghiệm, từ đó khơi gợi hứng thú, phát triển tư duy cho cả học sinh và giáo viên vật lý ở các trường trung học phổ thông.

Từ khóa: Bộ thí nghiệm vật lý, nguồn điện, mạch xung đối, suất điện động, tư duy.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Khoa học Vật lý là khoa học thực nghiệm, kiến thức vật lý có liên hệ mật thiết với thực tiễn đời sống và phải được kiểm chứng bằng thí nghiệm. Vì vậy, việc sử dụng thí nghiệm trong quá trình dạy học là cần thiết và có vai trò rất quan trọng để nâng cao chất lượng dạy và học^{1, 2}. Thực nghiệm không chỉ làm tăng tính hấp dẫn của môn học, giúp học sinh hứng thú đồng thời hiểu sâu sắc hơn các kiến thức lý thuyết đã học và rèn luyện kỹ năng thực nghiệm của học sinh, mà còn từng bước tạo cho học sinh tư duy và trực giác nhạy bén đối với các hiện tượng vật lý.

Ở Việt Nam, phòng thí nghiệm Vật lý của các trường trung học phổ thông còn nhiều hạn chế, nhiều trường thậm chí còn không có hoặc ít khi sử dụng phòng thí nghiệm, do đó rất nhiều học sinh chủ yếu chỉ được học lý thuyết. Điều này ảnh hưởng lớn đến chất lượng dạy và học môn Vật lý³⁻⁵. Trong thời gian gần đây, các giáo viên và giảng viên Vật lý đã chú trọng nhiều đến các bài thí nghiệm và số liệu thực nghiệm cho bài giảng và nghiên cứu của mình. Mặc dù các thầy cô cũng có những trăn trở, tâm huyết với các bài thí nghiệm khi dạy học, tuy nhiên việc dạy thực nghiệm Vật lý ở các trường trung học phổ thông hiện nay vẫn còn gặp nhiều bất cập và chưa được thực hiện một cách đồng bộ trên cả nước².

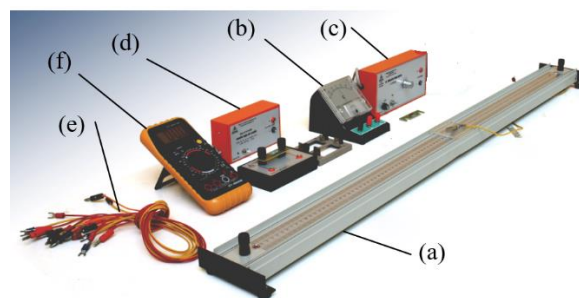
Thêm nữa, các nội dung liên quan tới phần điện học trong chương trình môn Vật lý có thể khai thác nhiều thí nghiệm, để hỗ trợ hiệu

quả cho quá trình dạy và học. Một số nghiên cứu trước đây đã đề cập tới việc xây dựng, cải tiến các thí nghiệm, bao gồm cả thí nghiệm ảo và thí nghiệm thực tế⁶⁻⁹ trong chương trình môn Vật lý từ bậc tiểu học¹⁰, trung học^{8,9} đến đại học⁷.

Từ những thực tế trình bày ở trên cho thấy, việc nghiên cứu cải tiến, thiết kế và chế tạo các bộ thí nghiệm luôn luôn là những vấn đề cấp thiết để góp phần nâng cao chất lượng dạy và học môn Vật lý²⁻⁵. Điều này đã thôi thúc chúng tôi sử dụng bộ thí nghiệm BKE-020 để đo suất điện động (SĐĐ) của một nguồn điện. Từ đó, với việc bổ sung thêm một số dụng cụ cần thiết, chúng tôi cải tiến, thiết kế bộ thí nghiệm để đo SĐĐ của bộ nguồn mắc song song và hướng tới đo SĐĐ các nguồn điện mắc hỗn hợp bằng mạch xung đối.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Bộ thí nghiệm BKE-020

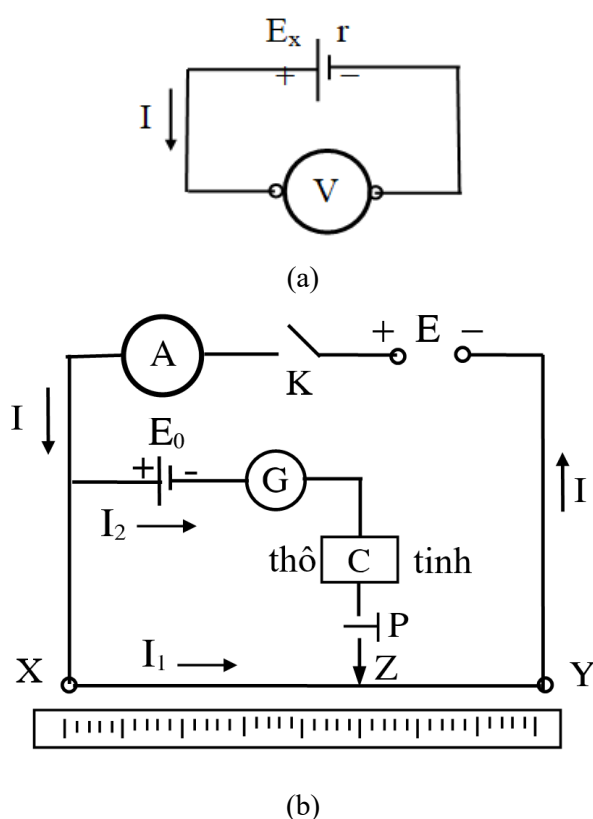


Hình 1. Bộ thí nghiệm BKE-020.

Hình 1 là bộ thí nghiệm BKE-020 gồm:

- (a) dây điện trở dài 1000mm, có con chạy;
- (b) điện kế với độ nhạy dòng $5 \cdot 10^{-6}$ A;
- (c) nguồn một chiều ($0 \div 6$ V; $50 \div 200$ mA);
- (d) nguồn điện chuẩn ($E_0 = 1,000 \pm 0,001$ V);
- (e) các dây nối điện;
- (f) đồng hồ đa năng.

2.2. Cơ sở lý thuyết



Hình 2. Sơ đồ mạch điện đo SĐĐ bằng vôn kế (a) và mạch xung đối (b).

Như chúng tôi được biết, để đo SĐĐ của nguồn điện, các phòng thí nghiệm Vật lý hiện nay thường sử dụng vôn kế đo trực tiếp SĐĐ của nguồn, như Hình 2a¹⁰.

Khi mạch kín và nguồn điện có điện trở trong r thì hiệu điện thế U giữa hai cực của nguồn điện được xác định bởi vôn kế V :

$$U = E_x - Ir \quad (1)$$

Do $I \neq 0$, $r \neq 0$, suy ra $U < E_x$. Điều đó có nghĩa đo SĐĐ của nguồn bằng vôn kế là không thật chính xác. Khi đó sai số của phép đo SĐĐ càng lớn nếu điện trở của vôn kế càng nhỏ và điện trở trong của nguồn điện càng lớn.

Ngoài ra, có thể sử dụng phương pháp mắc nguồn điện cần đo SĐĐ nối tiếp với 1 biến trở, một điện trở bảo vệ và 1 ampe kế; 1 vôn kế giữa 2 cực của nguồn điện. Sau đó, thay đổi giá trị của biến trở nói trên, dựa vào các số chỉ của ampe kế, vôn kế tương ứng ta tính toán được suất điện động của nguồn. Tuy nhiên, theo cách này sai số mắc phải cũng lớn, bao gồm sai số của điện trở, sai số của cường độ dòng điện và hiệu điện thế đo được.

Để khắc phục nhược điểm của các phương pháp trên, chúng tôi sử dụng phương pháp mạch điện “xung đối”. Đó là cách đối sánh SĐĐ của nguồn cần đo với SĐĐ của một nguồn chuẩn cho trước có giá trị chính xác đến $0,001$ V thông qua một sơ đồ mạch như Hình 2b: Nguồn điện E , $E > E_x$, $E > E_0$ tạo ra trong mạch dòng điện khoảng $100 \div 120$ mA; Một dây điện trở XY dài 1000 mm, có điện trở khoảng 18Ω ; Một điện kế G nhạy dòng điện (cỡ $5 \cdot 10^{-6}$ A), có điện trở R_G ; nút nhấn P và con chạy Z gắn trên dây; Một ampe kế A để đo dòng điện chạy trong mạch chính.

Như mô tả trên Hình 2b, nguồn điện áp E_0 (cũng có điện trở trong r) được mắc sao cho cực + của nó được nối với cực + của nguồn điện E ở vị trí X . Khi đó, dòng điện I_2 chạy trong mạch rẽ là tổng hợp của hai dòng điện chạy theo hai chiều ngược nhau: một dòng do nguồn E_0 tạo ra đi từ cực dương của nguồn E_0 đến vị trí X , một dòng do nguồn E tạo ra đi đến X rẽ vào mạch đi qua nguồn E_0 nên khử nhau.

Đóng khóa điện K của nguồn E và thiết lập dòng điện I khoảng 110 mA. Nhấn nút P , dòng I_2 chạy qua nguồn E_0 và điện kế G làm kim điện kế lệch vạch 0. Thay đổi vị trí của con chạy trên đoạn dây XY , chúng tôi tìm được vị trí của Z mà kim điện kế chỉ vạch 0. Ta có:

$$I_2 = 0; I_G = 0; I = I_1.$$

Nghĩa là dòng điện chạy qua dây điện trở XY bằng dòng điện do nguồn E cung cấp trong mạch. Từ định luật Kirchhoff cho mạch vòng XE_0GZX :

$$I_2(r + R_G) = 0 \quad (2)$$

Khi $I_2 = 0$; $I_G = 0$, $r = r_1$, (2) được viết lại:

$$U_{XZ} = IR_{XZ} = E_0 \quad (3)$$

Trong đó: U_{XZ} là độ sụt điện thế trên dây XZ .

Thay nguồn điện có SĐĐ cho trước E_0 bởi một nguồn cần xác định SĐĐ E_x . Như vậy chúng tôi cần thay đổi vị trí con chạy đến vị trí Z' để kim điện kế lại chỉ đúng vạch 0. Lúc này, dòng điện qua đoạn dây XY vẫn là I , (2) được viết lại:

$$U_{XZ'} = IR_{XZ'} = E_x \quad (4)$$

Chia phương trình (3) cho phương trình (4), suy ra: $E_x = E_0 \frac{R_{XZ}}{R_{XZ'}}$ (5)

Xem dây XY có dạng hình trụ, **tiết diện tại mọi điểm** như nhau và đồng chất nên ta biểu diễn lại (5) như sau: $E_x = E_0 \frac{l}{l_0}$ (6)

trong đó l, l_0 là độ dài tương ứng của các đoạn dây điện trở XZ' và XZ .

Khi biết SĐĐ E_0 và xác định được các đoạn l, l_0 tương ứng của điện trở XZ', XZ , chúng tôi tính được SĐĐ E_x của nguồn điện cần xác định theo công thức (6).

So sánh với các bài thí nghiệm xác định suất điện động của nguồn điện ở một số trường trung học phổ thông và trường Đại học hiện nay, phần lớn mạch điện đều gồm vôn kế, ampe kế và biến trở. Do đó việc đo suất điện động của nguồn điện đều dựa trên việc đọc số chỉ của vôn kế và ampe kế. Tuy nhiên, mạch điện ở Hình 2b trong bài này không có vôn kế và biến trở. Đây là những ưu điểm nổi trội của phương pháp mạch xung đối.

Thí nghiệm này xác định suất điện động của các nguồn điện có giá trị trong khoảng $(0 \div 6V)$.

2.3. Tiến hành thí nghiệm

Sử dụng các thiết bị như trong Bộ thí nghiệm BKE-020 và bổ sung các dụng cụ:

- Nguồn điện có SĐĐ $E_0 = 1,000 \pm 0,001 V$;
- Pin cần xác định SĐĐ E_x và giá đỡ pin.

2.3.1. Thiết lập mạch xung đối

Điều chỉnh núm chỉnh **tinh** của nguồn E về số 0. Thiết lập mạch điện để kết nối nguồn E với miliampe kế A , pin chuẩn E_0 điện kế G và dây điện trở XY như Hình 2b sao cho cực + của nguồn E_0 nối với cực + của nguồn E .

2.3.2. Xác định suất điện động E_{1x} và nguồn song song E_{2x} của pin

Bước 1: Điều chỉnh núm chỉnh mịn của nguồn E để thiết lập dòng điện không đổi qua miliampe

kế A khoảng **110 - 120mA**. Cố định một giá trị dòng điện trong khoảng này cho các bước sau. **Bởi vì, cường độ dòng điện nếu lớn sẽ dẫn tới sai số nhiều hơn, do hiệu ứng tỏa nhiệt Joule-Lenz, làm cho cầu dây giãn nở, hoặc giãn nở không đều trong toàn dây. Khi đó, chiều dài đo trên thước gắn cùng cầu dây không còn chính xác.**

Bước 2: Bật công tắc của nguồn điện chuẩn E_0 , nhấn nút P để con chạy tiếp xúc với dây điện trở XY ở điểm Z khoảng giữa thước đo. Kim điện kế sẽ lệch vạch 0. Thay đổi vị trí con chạy trên đoạn dây XY đến khi kim điện kế chỉ vạch 0 ($I_G = 0$). Lần lượt thao tác như trên, đồng thời ghi lại các giá trị của $l_0 = XZ$ trong 5 lần đo vào Bảng số liệu 1.

Lưu ý: xác định đúng vị trí Z trên cầu dây để dòng qua điện kế chính xác bằng 0 và lấy số liệu về chiều dài các đoạn dây cẩn thận, tránh sai số.

Bước 3: Tháo nguồn điện E_0 ra khỏi mạch và thay thế bởi nguồn cần đo SĐĐ E_x

Bước 4: Thực hiện như Bước 2 để tìm vị trí Z' của con chạy mà kim điện kế G lại quay về đúng số 0. Thực hiện 5 lần phép đo này. Ghi các giá trị tương ứng của độ dài $l_1 = XZ'$ trong mỗi lần đo vào Bảng 1.

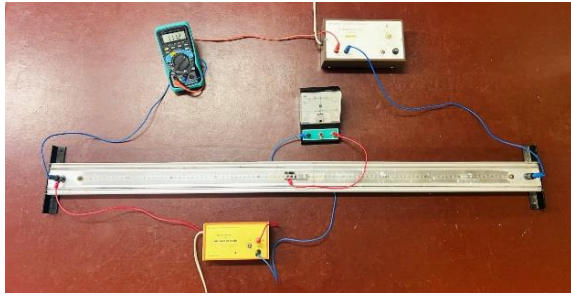
Bước 5: Tháo nguồn điện E_{1x} ra khỏi mạch điện và thay bằng **bộ nguồn song song** cần đo E_{2x}

Bước 6: Thực hiện như Bước 2 để tìm vị trí Z'' của con chạy trên đoạn dây XY mà kim điện kế chỉ vạch 0. Thao tác phép đo đồng thời ghi lại các giá trị của đoạn $l_2 = XZ''$ trong 5 lần đo vào Bảng số liệu 1.

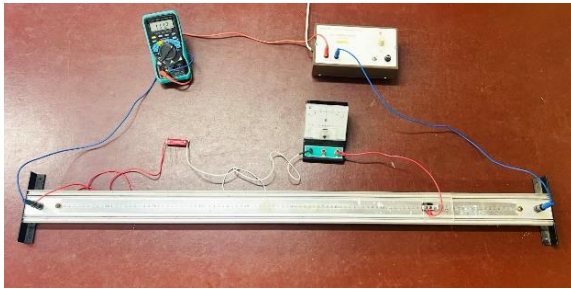
Bộ thí nghiệm có thể đo các suất điện động nhỏ hơn 2V. Với các suất điện động có giá trị lớn hơn thì cần thay nguồn điện chuẩn có giá trị bằng khoảng $\frac{1}{2}$ giá trị cần đo.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

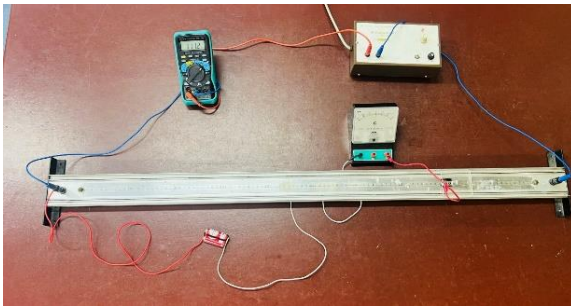
Với sinh viên các ngành Sư phạm Vật lý, Sư phạm Khoa học Tự nhiên trường Đại học Sư phạm Thái Nguyên, thí nghiệm này là một bài thực hành kiểm chứng lý thuyết và rèn luyện lý năng làm thực nghiệm sau khi học xong lý thuyết phần Điện và từ. Ngoài ra, thí nghiệm này có thể sử dụng cho học sinh lớp 11 thực hành sau khi học xong lý thuyết chương 4. **DÒNG ĐIỆN. MẠCH ĐIỆN**



(a)



(b)



(c)

Hình 3. Mạch điện với nguồn điện chuẩn E_0 (a); với một nguồn điện E_{1x} (b); với hai nguồn điện mắc song E_{2x} (c).

Bảng 1. Kết quả đo suất điện động, trong đó $l_0, \Delta l_0; l_1, \Delta l_1$ và $l_2, \Delta l_2$ lần lượt tương ứng là độ dài của đoạn dây điện trở XZ, XZ', XZ'' và sai số về độ dài của thước khi mắc nguồn E_0, E_{1x} và E_{2x} .

n	l_0 (mm)	Δl_0 (mm)	l_1 (mm)	Δl_1 (mm)	l_2 (mm)	Δl_2 (mm)
1	511	2	847	7	843	1
2	515	3	840	0	847	3
3	510	3	835	5	842	2
4	516	3	840	0	845	1
5	514	1	836	4	842	2
TB	$\bar{l}_0 =$ 513	$\overline{\Delta l_0} =$ 2	$\bar{l}_1 =$ 840	$\overline{\Delta l_1} =$ 3	$\bar{l}_2 =$ 844	$\overline{\Delta l_2} =$ 2

Ghi chú: n là số lần đo; TB là giá trị trung bình.

Thiết kế sơ đồ mạch điện thí nghiệm như Hình 3a, 3b, sơ đồ cải tiến mạch thí nghiệm như Hình 3c. Thực hiện các bước tiến hành thí nghiệm như được trình bày trong mục 2.3, chúng tôi nhận được một số kết quả như thấy trong Bảng 1. Trong đó: SĐĐ của nguồn chuẩn $E_0 = 1,000 \pm 0,001V$; Độ chính xác của thước thẳng $\Delta l_{dc} = 1mm$; Giá trị của cường độ dòng điện trong mạch chính $I = 111,2mA$.

Kết quả 1: Từ số liệu ở Bảng 1, các thông số về Bộ thí nghiệm BKE-020 đã cho và lý thuyết về sai số của phép đo gián tiếp, chúng tôi xác định được giá trị trung bình, sai số tỉ đối, sai số tuyệt đối và viết kết quả của phép đo SĐĐ của một nguồn E_{1x} như sau:

Sai số dụng cụ của thước đo chiều dài:

$$(\Delta l_0)_{dc} = (\Delta l_1)_{dc} = 1 \text{ mm}$$

Giá trị trung bình SĐĐ của một nguồn:

$$\overline{E_{1x}} = E_0 \cdot \frac{\bar{l}_1}{l_0} = 1,000 \cdot \frac{840}{513} = 1,637 \text{ V}$$

Sai số tỉ đối của phép đo SĐĐ của một nguồn:

$$\delta_1 = \frac{\Delta E_{1x}}{E_{1x}}, \text{ mặt khác:}$$

$$\delta_1 = \frac{\Delta E_0}{E_0} + \frac{\Delta l_0}{l_0} + \frac{\Delta l_1}{l_1} = \frac{0,001}{1,000} + \frac{3}{513} + \frac{4}{840} = 1,161\%$$

$$\text{với } \Delta l_0 = \overline{\Delta l_0} + (\Delta l_0)_{dc} = 2 + 1 = 3 \text{ mm},$$

$$\Delta l_1 = \overline{\Delta l_1} + (\Delta l_1)_{dc} = 3 + 1 = 4 \text{ mm},$$

Sai số tuyệt đối của phép đo SĐĐ của một nguồn:

$$\Delta E_{1x} = \delta_1 \cdot \overline{E_{1x}} = \frac{1,161}{100} \cdot 1,637 = 0,019 \text{ V}$$

Viết kết quả của phép đo SĐĐ của một nguồn

$$E_{1x} : E_{1x} = \overline{E_{1x}} \pm \Delta E_{1x} = 1,637 \pm 0,019 \text{ V}$$

Có thể thấy kết quả tính toán SĐĐ của một nguồn E_{1x} phù hợp tốt với giá trị của nguồn điện.

Kết quả 2: Tương tự như trên, từ số liệu ở Bảng 1, chúng tôi xác định được giá trị trung bình, sai số tuyệt đối, sai số tương đối của phép đo SĐĐ của hai nguồn mắc song E_{2x} như sau:

Sai số dụng cụ của thước đo chiều dài:

$$(\Delta l_0)_{dc} = (\Delta l_2)_{dc} = 1 \text{ mm}$$

Giá trị trung bình SĐĐ của hai nguồn mắc song:

$$\overline{E_{2x}} = E_0 \cdot \frac{\overline{I_2}}{I_0} = 1,000 \cdot \frac{844}{513} = 1,645 \text{ V}$$

Sai số tỉ đối của phép đo SĐĐ của hai nguồn mắc song song:

$$\delta_2 = \frac{\Delta E_{2x}}{E_{2x}}, \text{ mặt khác:}$$

$$\delta_2 = \frac{\Delta E_0}{E_0} + \frac{\Delta I_0}{I_0} + \frac{\Delta I_2}{I_2} = \frac{0,001}{1,000} + \frac{3}{513} + \frac{3}{844} = 1,040\%$$

$$\text{với } \Delta I_2 = \overline{\Delta I_2} + (\Delta I_2)_{dc} = 2 + 1 = 3 \text{ mm},$$

Sai số tuyệt đối của phép đo SĐĐ của hai nguồn mắc song song:

$$\Delta E_{2x} = \delta_2 \cdot \overline{E_{2x}} = \frac{1,040}{100} \cdot 1,645 = 0,017 \text{ V}$$

Viết kết quả của phép đo SĐĐ của hai nguồn

$$E_{2x} : \overline{E_{2x}} = \overline{E_{2x}} \pm \Delta E_{2x} = 1,645 \pm 0,017 \text{ V}$$

Như vậy, từ kết quả 1, đo SĐĐ của một nguồn

$$E_{1x} = \overline{E_{1x}} \pm \Delta E_{1x} = 1,637 \pm 0,019 \text{ V},$$

và kết quả 2, đo SĐĐ của hai nguồn mắc song

$$\text{song } E_{2x} = \overline{E_{2x}} \pm \Delta E_{2x} = 1,645 \pm 0,017 \text{ V}$$

có thể thấy rằng: $E_{2x} \approx E_{1x}$, điều này là phù hợp tốt với lý thuyết.

Chúng tôi có thể kết luận rằng bộ thí nghiệm BKE-020 có thể sử dụng để đo SĐĐ của nguồn điện với mức độ chính xác cao. Đồng thời, bộ thí nghiệm cải tiến nhằm kiểm chứng công thức suất điện động của bộ nguồn mắc song song. Cụ thể, chúng tôi đã vận dụng phương pháp mạch xung đối đo suất điện động của 2 nguồn mắc song song E_{2x} và so sánh với giá trị của một nguồn E_{1x} , kết quả cho thấy đúng với lý thuyết. Thêm nữa, bộ thí nghiệm này có thể tiếp tục cải tiến để đo chính xác SĐĐ của bộ nguồn gồm nhiều nguồn điện mắc hỗn hợp.

IV. KẾT LUẬN

Chúng tôi đã tiến hành hai thí nghiệm với bộ thí nghiệm BKE-020: đo SĐĐ của một nguồn điện đơn lẻ và đo SĐĐ của bộ nguồn mắc song song bằng phương pháp mạch xung đối. Bộ thí nghiệm này nổi bật với các ưu điểm sau: thao tác dễ dàng, thuận tiện; kết quả có tính thuyết phục cao, phù hợp với các tính toán lý thuyết; đáp ứng đầy đủ các tiêu chí của một bộ thí nghiệm chuẩn mực về tính khoa học, tính sư phạm và tính thẩm mỹ; Bộ thí nghiệm này đã được triển khai và áp dụng trong dạy học học phần Thí nghiệm Vật lý đại cương hàng năm. Kết quả cho

thấy, các sinh viên đều tiến hành thí nghiệm thuận lợi, thu được số liệu với độ chính xác cao, rèn luyện được kỹ năng thu thập và xử lý số liệu. Trong bối cảnh đổi mới giáo dục và phương pháp dạy học theo chương trình giáo dục phổ thông 2018, chúng tôi kỳ vọng bộ thí nghiệm này sẽ được triển khai rộng rãi trong dạy học Vật lý tại các trường THPT. Bộ thí nghiệm có thể dùng để thay thế cho bộ thí nghiệm trong bài: “Thực hành: Đo suất điện động và điện trở trong của pin điện hóa” (trong chương trình môn Vật lý lớp 11). Do bộ thí nghiệm cải tiến có một số ưu điểm nổi trội như kết quả có độ chính xác cao, có thể kiểm nghiệm được nhiều lý thuyết liên quan và rèn được kỹ năng thực hiện thí nghiệm và tư duy phản biện.

Tài liệu tham khảo

1. Nguyễn Đức Thâm, Nguyễn Ngọc Hưng. *Tổ chức hoạt động nhận thức cho học sinh trong dạy học Vật lý*, NXB Đại học Quốc gia Hà Nội, 1999.
2. Nguyễn Đức Thâm, Nguyễn Ngọc Hưng, Phạm Xuân Quế. *Phương pháp dạy học Vật lý ở trường phổ thông*, NXB Đại học Sư phạm, 2003.
3. Ngô Minh Nhựt, Mai Hoàng Phương. Xây dựng một số thí nghiệm sử dụng cảm biến siêu âm và phần mềm Labview để dạy học chương Động học - Vật lý 10, *Tạp chí Khoa học Trường Đại học Sư phạm TP Hồ Chí Minh*, **2019**, 8, 60-68.
4. Lê Thị Thúy Vân, Nguyễn Thị Thanh Bình, Nguyễn Thị Thanh Ngân. Xây dựng bài thí nghiệm ảo mạch điện ba pha trong giảng dạy kỹ thuật điện, *Journal of educational equipment: Education management*, **2024**, Volume 1, Issue 310.
5. Nguyễn Anh Tuấn. Xây dựng bài thí nghiệm ảo lý thuyết mạch trên máy tính bằng phần mềm EMTP/ATP, *Tạp chí Thiết bị giáo dục*, **2021**, số Đặc biệt tháng 10/2021, 146-148.
6. Farrokhnia, M. R., & Esmailpour, A. A study on the impact of real, virtual and comprehensive experimenting on students' conceptual understanding of DC electric circuits and their skills in undergraduate electricity laboratory. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, **2010**, 2(2), 5474-5482.
7. Tekbiyik, A., & Ercan, O. Effects of the physical laboratory versus the virtual laboratory in teaching simple electric circuits on conceptual achievement and attitudes towards the subject. *International Journal of Progressive Education*, **2015**, 11(3), 77-89.
8. Engelhardt, P. V., & Beichner, R. J. Students' understanding of direct current resistive electrical circuits. *American journal of physics*, **2004**, 72(1), 98-115.
9. Jaakkola, T., & Nurmi, S. Fostering elementary school students' understanding of simple electricity by combining simulation and laboratory activities.

Journal of Computer Assisted Learning, **2008**, 24(4), 271-283.

10. Đỗ Thùy Chi, Đỗ Thị Hiền. *Giáo trình Thí nghiệm vật lý đại cương, tập 2*, NXB Đại học Thái Nguyên, 2024.