

LXVI OLIMPIADA FIZYCZNA

ZAWODY II STOPNIA

CZEŚĆ DOŚWIADCZALNA

Za zadanie doświadczalne można otrzymać maksymalnie 40 punktów.

Zadanie D.

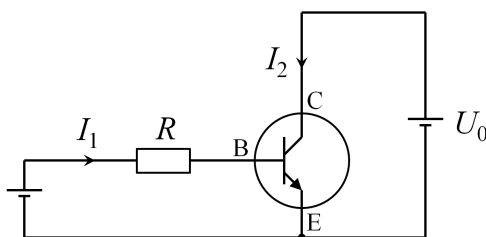
Mając do dyspozycji:

- opornik o nieznanym, bardzo dużym oporze R_0 ,
- 5 jednakowych baterii, każda o sile elektromotorycznej $(1,55 \pm 0,03) \text{ V}$,
- tranzystor bipolarny,
- amperomierz na zakres mili- i mikroamperów,
- przewody i zaciski umożliwiające zestawienie układu pomiarowego,
- spinacz (klamerkę) do bielizny,

wyznacz wartość oporu R_0 .

Uwagi:

1. Tranzystor bipolarny to element półprzewodnikowy o trzech wyprowadzeniach, oznaczonych przez B, C i E na rysunku poniżej, w którym natężenie prądu płynącego przez wyprowadzenie C zależy liniowo od natężenia prądu płynącego przez wyprowadzenie B. Dokładniej, w obwodzie przedstawionym na poniższym rysunku:



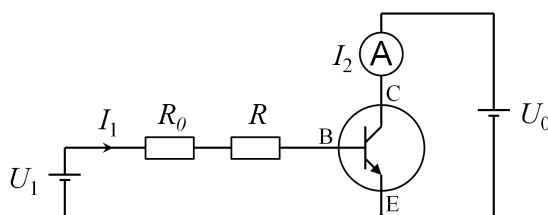
spełniona jest zależność: $I_2 = \beta I_1$, gdzie β jest pewnym współczynnikiem, znacznie większym od jedności, który zależy od wartości napięcia U_0 .

2. Przy przepływie prądu między wyprowadzeniami B i E występuje między nimi niewielki spadek napięcia o wartości niezależnej od natężenia tego prądu.
3. Do wyprowadzenia B tranzystora, którym dysponujesz, dołączony jest opornik o nieznanym oporze R znacznie mniejszym od R_0 i znacznie większym od oporu wewnętrznego amperomierza. Opornik ten zabezpiecza tranzystor przed przypadkowym uszkodzeniem.

Rozwiązanie zadania D.

Część teoretyczna

Szukaną wartość oporu R_0 można wyznaczyć mierząc natężenie prądu płynącego przez dany opornik przy znanym napięciu pomiędzy jego wyprowadzeniami. Jak jednak łatwo sprawdzić, ze względu na zbyt dużą wartość R_0 bezpośredni pomiar tego natężenia nie jest możliwy przy użyciu dostępnego mikroamperomierza, nawet jeśli źródło prądu w obwodzie stanowią wszystkie dostępne baterie połączone szeregowo. Dlatego, aby pomiar natężenia był możliwy, należy je wzmocnić (zwiększyć) – można tego dokonać przy użyciu dostępnego tranzystora w układzie przedstawionym na Rys. 1.



Rys. 1. Schemat układu pomiarowego umożliwiającego wyznaczenie oporu R_0 .

W układzie takim spełniona jest zależność:

$$R_0 = \frac{U_{R_0}}{I_1} = \frac{\beta U_{R_0}}{I_2}, \quad (1)$$

gdzie U_{R_0} to napięcie między wyprowadzeniami opornika o oporze R_0 . Oznaczmy przez U_{BE} spadek napięcia między wyprowadzeniami B i E tranzystora, a przez U_R spadek napięcia między wyprowadzeniami opornika o oporze R . Wtedy:

$$U_{R_0} = U_1 - U_R - U_{BE} \approx U_1 - U_{BE}, \quad (2)$$

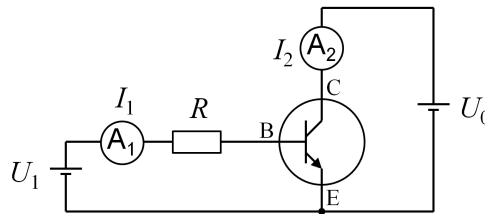
gdzie skorzystaliśmy z zależności: $R \ll R_0$ (a zatem: $U_R \ll U_{R_0}$). Stąd:

$$R_0 = \frac{\beta U_{R_0}}{I_2} = \frac{\beta (U_1 - U_{BE})}{I_2}, \quad (3)$$

czyli:

$$U_1 = I_2 \frac{R_0}{\beta} + U_{BE}. \quad (4)$$

Jeśli więc zmierzmy wartość I_2 dla różnych wartości U_1 , to do zależności U_1 od I_2 będziemy mogli dopasować prostą o nachyleniu $\frac{R_0}{\beta}$. Aby możliwe było wyznaczenie oporu R_0 potrzebna jest jeszcze znajomość współczynnika β . Wyznaczyć go można w układzie przedstawionym na Rys. 2.



Rys. 2. Schemat układu pomiarowego umożliwiającego wyznaczenie wartości współczynnika β .

W takim układzie możemy zmierzyć wartości natężeń I_1 i I_2 dla ustalonej wartości U_0 (tej samej, która była użyta w układzie przedstawionym na Rys. 1) i różnych wartości U_1 , a następnie do zależności I_2 od I_1 dopasować prostą o współczynniku kierunkowym β . Ponieważ w układzie doświadczalnym mamy do dyspozycji tylko jeden miernik natężenia prądu, musimy umieszczać go naprzemiennie w miejscach oznaczonych na Rys. 2 przez A_1 i A_2 . Ponieważ jednak opór R jest dużo większy od oporu wewnętrznego amperomierza, to natężenia prądu I_1 i I_2 dla ustalonej wartości U_1 będą praktycznie takie same, niezależnie od umieszczenia w obwodzie lub usunięcia z obwodu amperomierza.

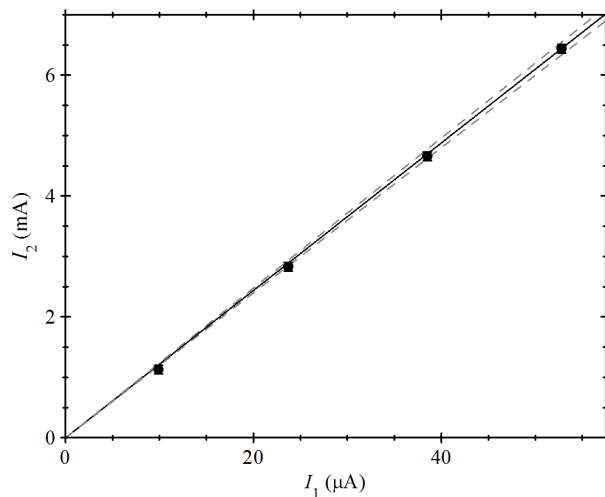
Część doświadczalna

W pierwszej części doświadczenia wyznaczono wartość współczynnika β w układzie przedstawionym na Rys. 2. Aby mieć możliwość wykonania pomiarów dla jak największej liczby różnych wartości U_1 , jako źródła napięcia U_0 użyto jednej z dostępnych baterii, natomiast źródło napięcia U_1 stanowił układ od jednej do czterech baterii połączonych szeregowo. W celu zapewnienia prawidłowego kontaktu elektrycznego między bateriami, jak i pomiędzy bateriami i podłączonymi doń przewodami, stos baterii wraz z przewodami spięto spinaczem (klamerką) do białej tkaniny. W takim układzie zmierzono natężenia I_1 oraz I_2 , powtarzając pomiar dla każdej wartości U_1 trzykrotnie. Wyniki pomiarów zebrano w Tab. 1:

U_1 (V)	I_1 (μ A)			I_{1sr} (μ A)	ΔI_1 (μ A)	I_2 (mA)			I_{2sr} (mA)	ΔI_2 (mA)
$1,55 \pm 0,03$	9,8	10,0	9,9	9,9	0,2	1,14	1,15	1,09	1,13	0,06
$3,10 \pm 0,06$	23,6	23,8	23,5	23,6	0,3	2,80	2,87	2,81	2,83	0,07
$4,65 \pm 0,09$	38,6	38,4	38,5	38,5	0,2	4,70	4,62	4,67	4,66	0,08
$6,20 \pm 0,12$	52,9	52,6	52,8	52,8	0,3	6,49	6,42	6,47	6,46	0,07

Tab. 1. Wyniki pomiarów natężeń I_1 oraz I_2 dla różnych wartości napięcia U_1 , średnie wartości tych natężeń (odpowiednio I_{1sr} oraz I_{2sr}) oraz różnice pomiędzy maksymalnymi i minimalnymi zmierzonymi wartościami natężeń (odpowiednio ΔI_1 oraz ΔI_2), będące oszacowaniem niepewności wartości I_{1sr} oraz I_{2sr} .

Zależność średniej wartości I_2 od średniej wartości I_1 wykreślono wraz z dopasowaną prostą na Rys. 3:



Rys. 3. Zależność natężenia prądu I_2 od natężenia I_1 wraz z dopasowaną prostą (linia ciągła). Linie przerywane odpowiadają prostym o możliwie najmniejszym i największym nachyleniu.

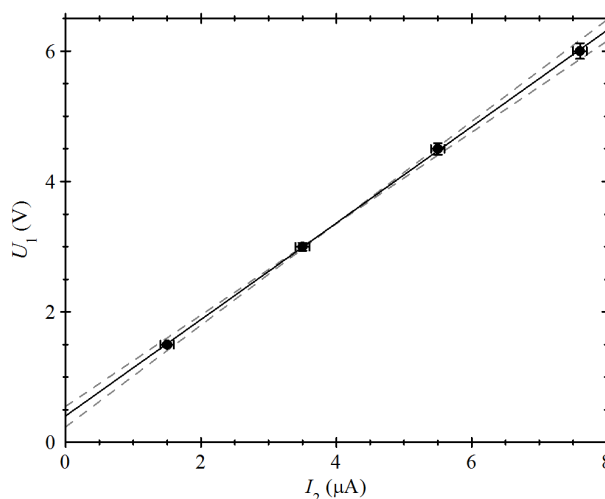
Współczynnik kierunkowy dopasowanej prostej wynosi $\beta = 122 \pm 2$.

Następnie zestawiono obwód według schematu przedstawionego na Rys. 1, używając takich samych źródeł napięcia U_0 i U_1 jak w pierwszej części doświadczenia. Dla każdej wartości U_1 trzykrotnie zmierzono wartość natężenia I_2 , a otrzymane wyniki zebrano w Tab. 2:

U_1 (V)	I_2 (μ A)			$I_{2\text{sr}}$ (μ A)	ΔI_2 (μ A)
$1,55 \pm 0,03$	1,5	1,5	1,6	1,53	0,1
$3,10 \pm 0,06$	3,6	3,5	3,5	3,53	0,1
$4,65 \pm 0,09$	5,6	5,6	5,5	5,57	0,1
$6,20 \pm 0,12$	7,7	7,6	7,7	7,67	0,1

Tab. 2. Wyniki pomiarów natężenia I_2 dla różnych wartości napięcia U_1 , średnia wartość tego natężenia ($I_{2\text{sr}}$) oraz różnica pomiędzy maksymalną i minimalną zmierzoną wartością natężenia (ΔI_2), będąca oszacowaniem niepewności wartości $I_{2\text{sr}}$.

Zależność napięcia U_1 od natężenia I_2 wykreślono wraz z dopasowaną prostą na Rys. 4:



Rys. 4. Zależność napięcia U_1 od natężenia I_2 wraz z dopasowaną prostą (linia ciągła). Linie przerywane odpowiadają prostym o możliwie najmniejszym i największym nachyleniu.

Współczynnik kierunkowy dopasowanej prostej wynosi $\frac{R_0}{\beta} = (0,74 \pm 0,04) \text{ M}\Omega$.

Ostatecznie szukana wartość oporu wynosi:

$$R_0 = (90,3 \pm 6,4) \text{ M}\Omega.$$

Głównym źródłem niepewności otrzymanego wyniku jest niepewność wyznaczenia współczynnika kierunkowego zależności U_1 od I_2 , na którą w podobnym stopniu wpływa niepewność siły elektromotorycznej użytych baterii oraz niepewność pomiaru I_2 .

Komentarz do zadania:

W przypadku rzeczywistych tranzystorów współczynnik β zależy nie tylko od napięcia U_0 , ale również (najczęściej nieznacznie) od natężenia prądu płynącego przez wyprowadzenie B (I_1). Tak też było w przypadku tranzystora, który zawodnicy otrzymali w czasie zawodów. Z tego powodu wartość oporu R_0 otrzymana w wyniku pomiaru odbiegała od nominalnej wartości 62 M Ω .

Punktacja zadania D.

Część teoretyczna

Pomysł na wyznaczenie oporu R_0 przez wzmocnienie płynącego przezeń prądu przy użyciu tranzystora – 2 pkt.

Pomysł na wyznaczenie współczynnika β – 1 pkt

Wzór (4) lub równoważny – 2 pkt.

Część doświadczalna

Zestawienie i opis układu umożliwiającego poprawne wyznaczenie współczynnika β – 2 pkt.

Wykonanie pomiarów I_1 i I_2 dla co najmniej 3 różnych napięć U_1 i wyznaczenie β z dopasowania odpowiedniej prostej – 3 pkt.

Co najmniej trzykrotne powtórzenie każdego pomiaru I_1 i I_2 – 1 pkt

Zestawienie i opis układu umożliwiającego poprawne wyznaczenie oporu R_0 – 2 pkt.

Wykonanie pomiarów I_2 dla co najmniej 3 różnych napięć U_1 i wyznaczenie R_0 z dopasowania odpowiedniej prostej – 3 pkt.

Co najmniej trzykrotne powtórzenie każdego pomiaru I_2 – 1 pkt

Wynik liczbowy – 1 pkt

Oszacowanie niepewności β oraz R_0 – 1 pkt

Wskazanie głównych źródeł niepewności – 1 pkt