

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования

«Национальный исследовательский Нижегородский государственный  
университет им. Н.И. Лобачевского»

Радиофизический факультет

**ИЗМЕРЕНИЕ ЭДС  
КОМПЕНСАЦИОННЫМ МЕТОДОМ**

**Отчет по (учебной) практике**  
Студентов группы 427(0424С1ИБг1)  
2 курса специалитета  
Скороходов С.А., Степушов Г.С.

Основная образовательная программа  
подготовки по направлению  
10.05.02 «Информационная  
безопасность  
телекоммуникационных систем»  
(направленность «Системы  
подвижной цифровой  
защищенной связи»)

Нижний Новгород 2025

<b>I. Введение</b>	<b>2</b>
Цель . . . . .	2
Задачи . . . . .	2
Приборы и оборудование . . . . .	2
<b>II. Теоретическая часть</b>	<b>3</b>
1. Введение . . . . .	3
2. Измерение ЭДС при помощи вольтметра . . . . .	3
3. Метод компенсации . . . . .	4
4. Экспериментальная установка . . . . .	5
<b>III. Практическая часть</b>	<b>7</b>
1. Вычисление погрешностей . . . . .	7
<b>IV. Контрольные вопросы</b>	<b>9</b>
<b>V. Вывод</b>	<b>13</b>
<b>VI. Приложение</b>	<b>14</b>

# I. ВВЕДЕНИЕ

## Цель

Изучение метода компенсации для измерения электродвижущей силы (ЭДС) источников тока, сравнение его с прямым методом измерения с помощью вольтметра, а также приобретение практических навыков сборки электрических цепей и проведения измерений.

## Задачи

1. Ознакомиться с характеристиками и правилами использования нормального элемента типа НЭ-65. Рассчитать величину защитного сопротивления  $R_3$  в схеме рис. 3 в наиболее неблагоприятном случае;
2. Измерить  $\mathcal{E}_x$  с помощью вольтметра;
3. Собрать схему, изображенную на рис. 3, и измерить  $\mathcal{E}_x$  методом компенсации. Перед измерениями целесообразно оценить  $R_{1X}$  и  $R_{1N}$ ;
4. Измерить  $\mathcal{E}_x$  с помощью промышленного компенсатора.

## Приборы и оборудование

- Блок питания БП-28;
- Нормальный элемент типа НЭ-65 класса 0,005 (эталонная ЭДС  $\mathcal{E}_N \approx 1,0186$  В);
- Два одинаковых штепсельных магазина сопротивлениями  $R_1$  и  $R_2$  ( $R_1 + R_2 = R$ );
- Защитный резистор  $R_3$ ;
- Нуль-гальванометр (НГ);
- Вольтметр;
- Источник с неизвестной ЭДС  $\mathcal{E}_x$ ;
- Промышленный компенсатор (готовый прибор для компенсации, например, потенциометр типа ПП-63 или аналогичный).
- Провода, переключатели (К1) и другие соединительные элементы.

## II. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

### 1. Введение

Стационарный электрический ток в замкнутой цепи может существовать благодаря источникам тока, в которых на заряженные частицы (носители тока) действуют сторонние непотенциальные силы  $\vec{F}_{\text{ст}}$ . Электродвижущей силой (ЭДС) на участке цепи 1–2 называется работа сторонней силы, совершаемая при перемещении по этому участку единичного положительного заряда:

$$\mathcal{E}_{12} = \int_1^2 \vec{E}_{\text{ст}} d\vec{l}, \quad (1)$$

где  $\vec{E}_{\text{ст}}$  – напряженность поля сторонних сил.

Сторонние силы могут иметь различную природу. Так, например, в химических источниках тока стороннее силовое поле возникает в тонких контактных слоях между электродами и электролитом.

Под действием сторонних сил происходит разделение зарядов, в результате чего возникает кулоновское поле  $\vec{E}_{\text{кул}}$ . Работа кулоновской силы при перемещении единичного положительного заряда есть разность потенциалов:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \int_1^2 \vec{E}_{\text{кул}} \cdot d\vec{l}. \quad (2)$$

Кроме сторонних и кулоновских сил на носители тока действуют силы сопротивления. Поскольку алгебраическая сумма работ всех сил равна нулю, на любом участке цепи выполняется закон Ома:

$$IR_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 + \mathcal{E}_{12}. \quad (3)$$

### 2. Измерение ЭДС при помощи вольтметра

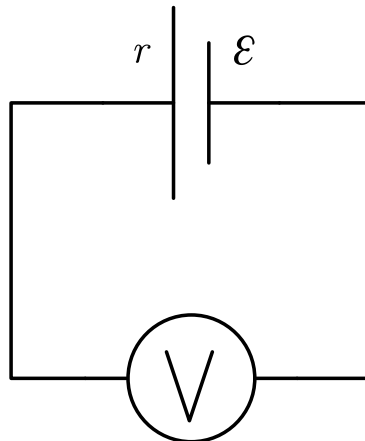


Рис. 1. Измерение ЭДС при помощи вольтметра.

При подключении вольтметра с сопротивлением  $R_v$  к батарее, имеющей ЭДС  $\mathcal{E}$  и внутреннее сопротивление  $r$  (Рис. 1), показания вольтметра:

$$U = IR_v = \frac{\mathcal{E} R_v}{R_v + r}. \quad (4)$$

Показания вольтметра отличаются от значения  $\mathcal{E}$  на величину

$$\mathcal{E} - U = Ir = \frac{\mathcal{E} r}{R_v + r}.$$

При  $R_v \gg r$  относительная ошибка измерения ЭДС становится малой:

$$\delta\mathcal{E} \approx \frac{r}{R_v}. \quad (5)$$

Для высокоомных вольтметров эта ошибка может быть незначительной, но для невысокоомных вольтметров измерение дает заметную погрешность. Более точное измерение обеспечивает метод компенсации.

### 3. Метод компенсации

Для пояснения идеи метода компенсации рассмотрим схему, приведенную на рис. 2.

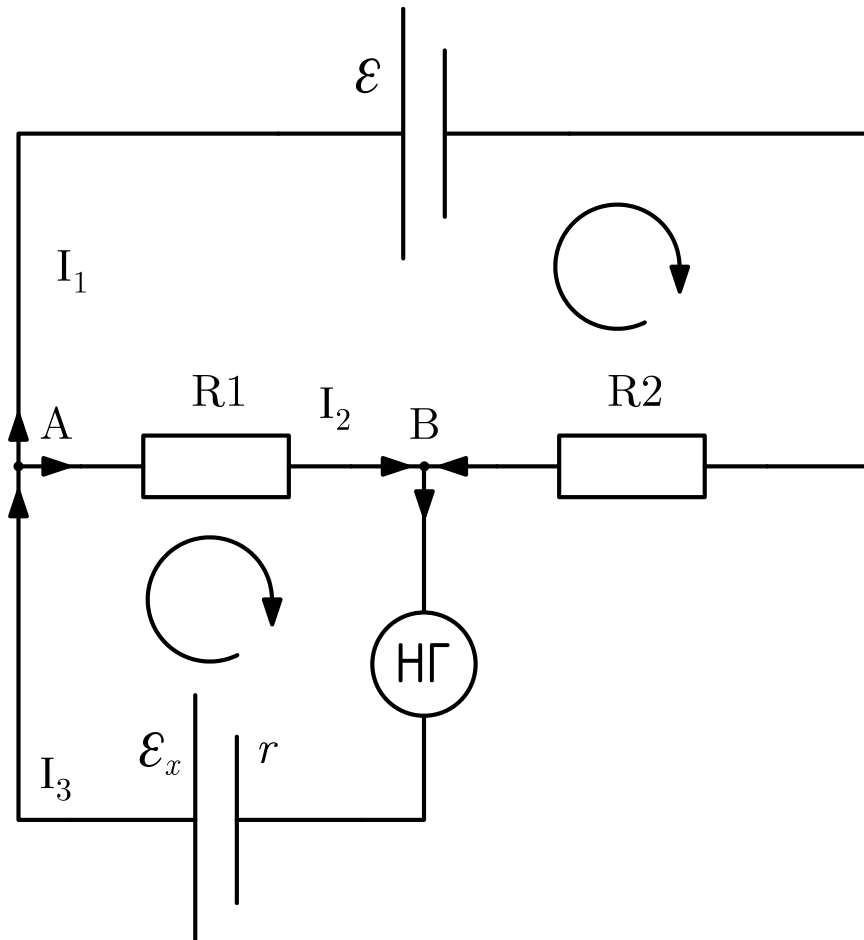


Рис. 2. Принципиальная схема измерения ЭДС методом компенсации.

Здесь  $\mathcal{E}_x$  – неизвестная ЭДС,  $\mathcal{E}$  – ЭДС источника питания ( $\mathcal{E} > \mathcal{E}_x$ ). Методика измерения состоит в подборе сопротивления  $R_1$  при неизменной сумме

$$R_1 + R_2 = R = \text{const}, \quad (6)$$

до достижения нулевого тока через нуль-гальванометр. Ток через гальванометр:

$$I_3 = \frac{\mathcal{E}R_1 - \mathcal{E}_xR}{rR + R_1R_2}. \quad (7)$$

При компенсации ( $I_3 = 0$ ) неизвестная ЭДС:

$$\mathcal{E}_x = \frac{R_{1x}}{R}\mathcal{E}, \quad (8)$$

где  $R_{1x}$  – значение  $R_1$  при компенсации.

Чтобы исключить  $\mathcal{E}$  из расчетов, проводят измерение с эталонной ЭДС  $\mathcal{E}_N$ :

$$\mathcal{E}_N = \frac{R_{1N}}{R}\mathcal{E}. \quad (9)$$

Из (8) и (9) получаем:

$$\mathcal{E}_x = \frac{R_{1x}}{R_{1N}}\mathcal{E}_N. \quad (10)$$

Таким образом, для измерения  $\mathcal{E}_x$  необходимо определить два значения сопротивления  $R_1$  при компенсации. ЭДС источника питания знать не требуется.

#### 4. Экспериментальная установка

Рабочая схема для измерения ЭДС методом компенсации приведена на рис. 3.

В качестве источника питания используется блок питания БП-28, эталонной ЭДС – нормальный элемент НЭ-65. Резисторы  $R_1$  и  $R_2$  – два одинаковых штепсельных магазина с постоянной суммой  $R = R_1 + R_2$ .

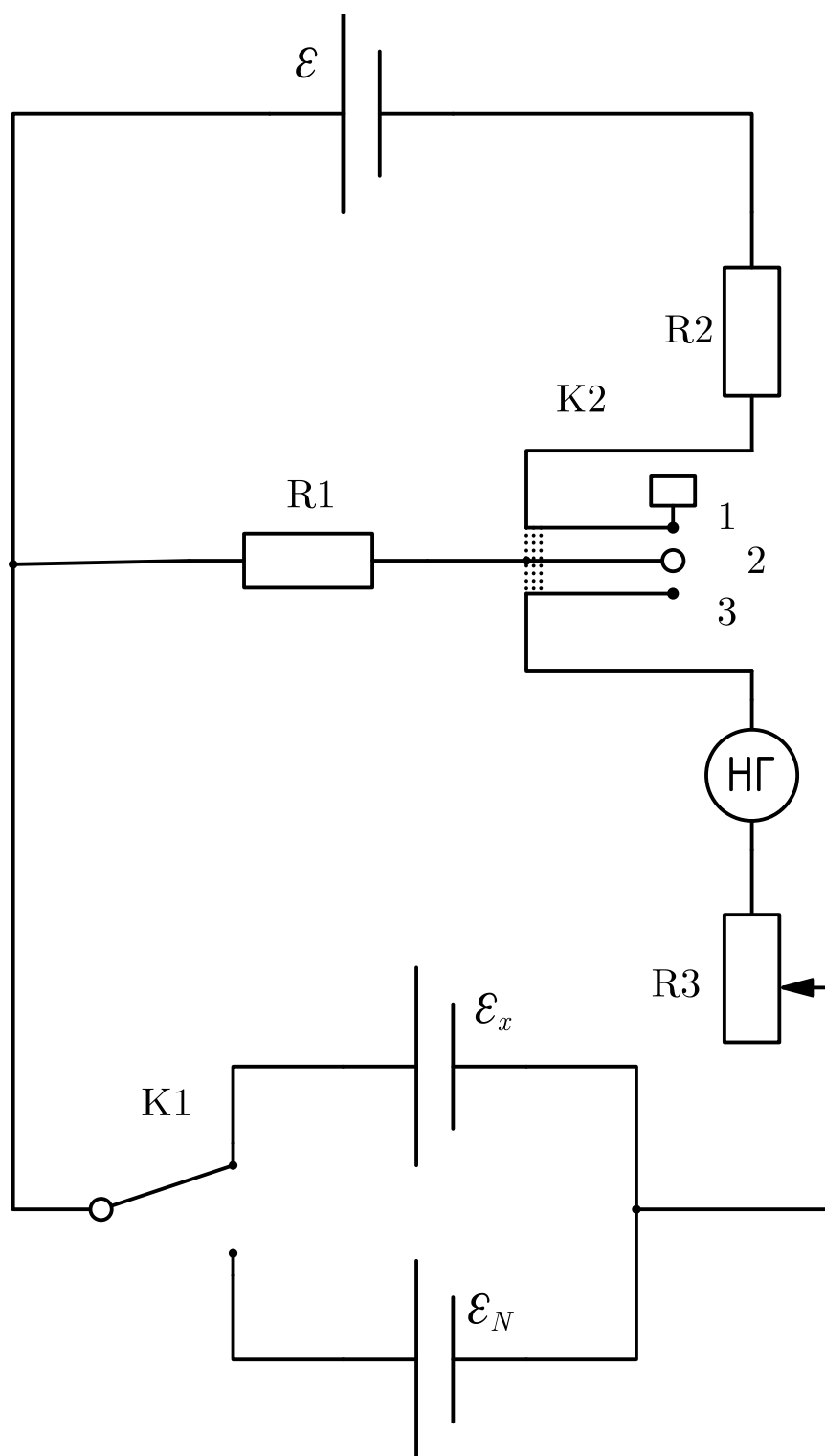


Рис. 3. Рабочая схема для определения ЭДС методом компенсации

Защитный резистор  $R_3$  предохраняет нормальный элемент и гальванометр от больших токов. Перед измерениями  $R_3$  вводят полностью, а при приближении к компенсации уменьшают до нуля.

Схема включается ключом  $K_2$  с последовательным замыканием цепей для защиты приборов. Сначала замыкается цепь питания, затем подключается ветвь с измеряемой ЭДС.

### III. ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

С помощью вольтметра измеряем ЭДС батарейки  $\mathcal{E}_x$ . Полученное значение:

$$\mathcal{E}_x = (1,461 \pm 0,262) \text{ В}$$

Собираем схему согласно рис. 3. Подключаем эталонный источник ЭДС  $\mathcal{E}_N = (1,018 \pm 0,005) \text{ В}$ , выставляем ЭДС источника питания  $\mathcal{E} = 3 \text{ В}$ , устанавливаем сопротивление  $R_3$  на максимальное значение и замыкаем ключ.

Методом подбора сопротивлений  $R_1$ ,  $R_2$  и постепенного уменьшения  $R_3$  находим значение  $R_1$ , при котором нуль-гальванометр показывает  $+1 \text{ мкА}$ , фиксируем  $R_1^+$ , затем находим  $R_1^-$  для  $-1 \text{ мкА}$ . Среднее значение вычисляем по формуле:

$$R_{1N} = \frac{R_1^+ + R_1^-}{2}$$

Аналогичные измерения проводим для ЭДС источника  $\mathcal{E} = 6 \text{ В}$  и для измеряемой батарейки  $\mathcal{E}_x$ . Все полученные данные заносим в табл. 1а и 1б.

Таблица 1: Результаты измерений компенсирующих сопротивлений

(а) Экспериментальные данные			(б) Теоретические данные		
$\mathcal{E}, \text{ В}$	3	6	$\mathcal{E}, \text{ В}$	3	6
$R_{1N_{\text{ср}}}, \text{ Ом}$	3 781,0	1 880,0	$R_{1N}, \text{ Ом}$	3 770	1 885
$R_{1x_{\text{ср}}}, \text{ Ом}$	5 425,0	2 707,5	$R_{1x}, \text{ Ом}$	5 411	2 706

Также вычислим  $R_{1N}$  и  $R_{1x}$  по формуле (7) полученная в ре... Далее вычислим  $\mathcal{E}_x$  по формуле (9), для всех случаев:

Таблица 2: Теоретические данные

	$\mathcal{E}, \text{ В}$	3	6
Метод компенсации	$\mathcal{E}_{xB}, \text{ В}$	1,461	1,460
Вольтметр	$\mathcal{E}_{xB}, \text{ В}$	1,461	1,461

#### 1. Вычисление погрешностей

Погрешность  $R_{1x}$  и  $R_{1N}$  из характеристик приборов:

$$\Delta R_{1x} = \Delta R_{1N} = \pm 11,1 \text{ Ом}$$

Приборная погрешность  $\Delta \mathcal{E}_{xB}$  из характеристик прибора:

$$\Delta \mathcal{E}_{xB} = \pm 0,18 \text{ В}$$



$$\Delta \mathcal{E}_{1N} = \pm 0,005 \text{ В}$$

$$\Delta R_{1x} = \pm (0,1 + 0,2)$$

Следовательно  $\mathcal{E}_x$  вычисленное методом компенсации имеет вид:

$$\mathcal{E}_x = (1,460 \pm 0,005) \text{ В}$$

Сравним: Абсолютная погрешность измерения методом компенсации меньше погрешности измерения вольтметром.

## IV. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Постройте качественный график зависимости относительной погрешности измерения ЭДС вольтметром от отношения внутреннего сопротивления источника и вольтметра.

2. Получите формулу (7).

Рассмотрим рис. 2 и расставим направления течения тока и обхода. Запишем первый и второй законы Кирхгофа:

$$\begin{cases} I_3 = I_1 + I_2 \\ -\mathcal{E}_x = I_3 r + I_2 R_1 \\ \mathcal{E} = I_1 R_2 - I_2 R_1 \end{cases} \quad (11)$$

Выведем силу тока на промежутке с нуль гальванометре ( $I_3$ ):

$$\begin{cases} I_3 = I_1 + I_2 \\ I_2 = \frac{\mathcal{E}_x}{R_1} - I_3 \frac{r}{R_1} \\ I_1 = I_2 \frac{R_1}{R_2} - \frac{\mathcal{E}}{R_2} = \left( \frac{\mathcal{E}_x}{R_1} - I_3 \frac{r}{R_1} \right) \frac{R_1}{R_2} - \frac{\mathcal{E}}{R_2} = \frac{\mathcal{E}_x - \mathcal{E}}{R_2} - I_3 \frac{r}{R_2} \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} I_3 &= \frac{\mathcal{E}_x - \mathcal{E}}{R_2} - I_3 \frac{r}{R_2} + \frac{\mathcal{E}_x}{R_1} - I_3 \frac{r}{R_1} \\ I_3 \left( 1 + \frac{r}{R_2} + \frac{r}{R_1} \right) &= \frac{\mathcal{E}_x - \mathcal{E}}{R_2} + \frac{\mathcal{E}_x}{R_1} \\ I_3 \frac{rR + R_1 R_2}{R_1 R_2} &= \frac{R_1 \mathcal{E} - R \mathcal{E}_x}{R_1 R_2} \end{aligned}$$

$$\boxed{I_3 = \frac{R_1 \mathcal{E} - R \mathcal{E}_x}{rR + R_1 R_2}} \quad (13)$$

3. Может ли разность потенциалов между полюсами источника тока, включенного в электрическую цепь, быть больше его ЭДС? Равна нулю?

Нет, разность потенциалов между полюсами, включенного в цепь, источника тока не может быть больше его ЭДС. Она может быть равной 0 только если источник имеет нулевое внутреннее сопротивление.

4. Укажите направления токов, вызванных каждым источником в отдельности и обоими источниками вместе во всех ветвях схемы рис. 2.

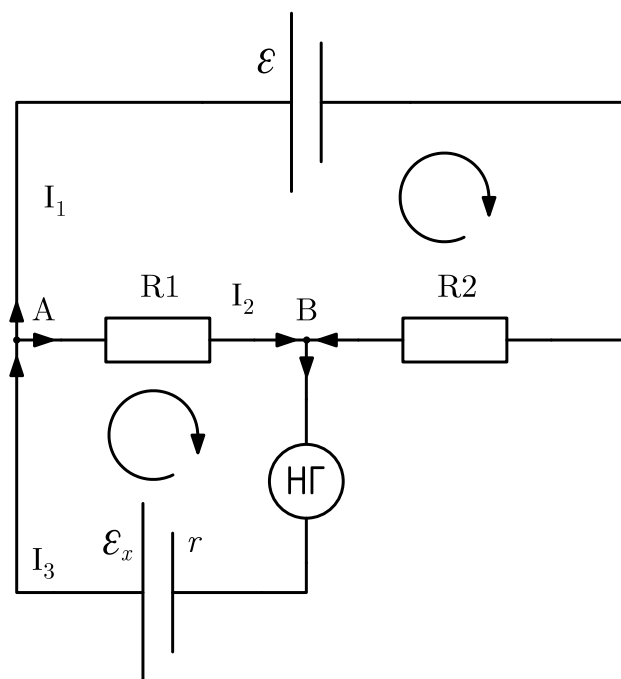


Рис. 4. Принципиальная схема измерения ЭДС методом компенсации.

5. Постройте качественный график зависимости тока через гальванометр от сопротивления  $R_1$ .

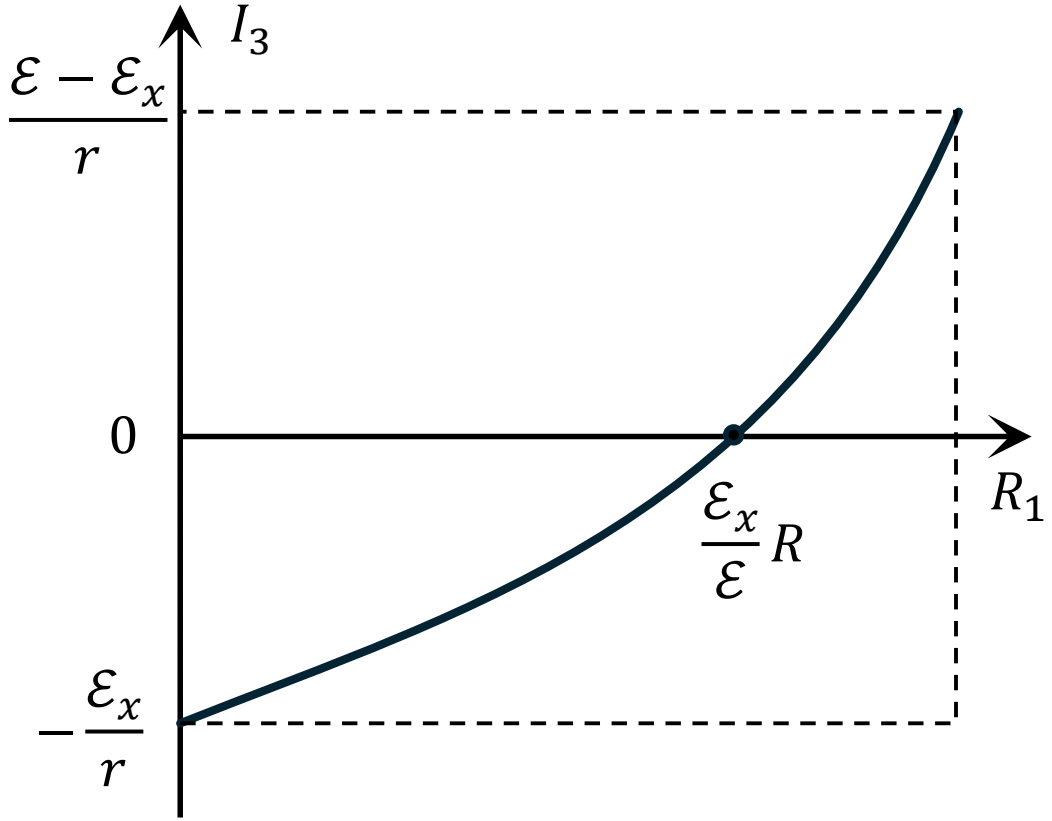


Рис. 5. Качественный график зависимости тока через гальванометр

Значение сопротивления резистора  $R_1$  может иметь значения только в диапазоне от 0 до  $R$  из условия (6). Рассмотрим значения силы тока  $I_3$  в этих точках по формуле (7):

$$I_3(R) = \frac{R_1 \mathcal{E} - R \mathcal{E}_x}{rR + R_1 R_2} = \frac{\mathcal{E} - \mathcal{E}_x}{r} \quad (14)$$

$$I_3(0) = -\frac{\mathcal{E}_x R}{rR} = -\frac{\mathcal{E}_x}{r} \quad (15)$$

Найдем точку пересечения графика с осью абсцисс:

$$0 = \frac{R_1 \mathcal{E} - R \mathcal{E}_x}{rR + R_1 R_2} \Rightarrow R_1(0) = \frac{\mathcal{E}_x}{\mathcal{E}} R \quad (16)$$

Найдем I и II производные формулы (7) для анализа формы графика:

$$\begin{aligned}
I'_3 &= \left( \frac{R_1 \mathcal{E} - R_1 \mathcal{E}_x - R_2 \mathcal{E}_x}{rR_1 + rR_2 + R_1R_2} \right)'_{R_1} = \\
&= \frac{(\mathcal{E} - \mathcal{E}_x)(rR_1 + rR_2 + R_1R_2) - (R_1 \mathcal{E} - R_1 \mathcal{E}_x - R_2 \mathcal{E}_x)(r + R_2)}{(rR_1 + rR_2 + R_1R_2)^2} = \\
&= \frac{\cancel{rR_1 \mathcal{E}} + rR_2 \mathcal{E} + \cancel{R_1R_2 \mathcal{E}} - \cancel{rR_1 \mathcal{E}_x} - \cancel{rR_2 \mathcal{E}_x} - \cancel{R_1R_2 \mathcal{E}_x}}{(rR_1 + rR_2 + R_1R_2)^2} - \\
&- \frac{\cancel{rR_1 \mathcal{E}_x} - \cancel{rR_1 \mathcal{E}_x} - \cancel{rR_2 \mathcal{E}_x} + \cancel{R_1R_2 \mathcal{E}} - \cancel{R_1R_2 \mathcal{E}_x} - R_2^2 \mathcal{E}_x}{(rR_1 + rR_2 + R_1R_2)^2} = \\
&= \boxed{R_2 \frac{r \mathcal{E} + R_2 \mathcal{E}_x}{(rR + R_1R_2)^2}} = R_2(r \mathcal{E}_x + R_2 \mathcal{E}_x)(rR_1 + rR_2 + R_1R_2)^{-2} \quad (17)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
I''_3 &= \left( R_2(r \mathcal{E}_x + R_2 \mathcal{E}_x)(rR_1 + rR_2 + R_1R_2)^{-2} \right)'_{R_1} = \\
&= -2R_2(r \mathcal{E} + R_2 \mathcal{E}_x)(rR_1 + rR_2 + R_1R_2)^{-3}(r + R_2) = \\
&= \boxed{-2R_2 \frac{(r \mathcal{E} + R_2 \mathcal{E}_x)(r + R_2)}{(rR + R_1R_2)^3}} \quad (18)
\end{aligned}$$

6. Как зависит чувствительность компенсационных измерений по схеме на рис. 3 от величины вспомогательной ЭДС  $\mathcal{E}$ ?

7. Как зависит чувствительность компенсационных измерений по схеме на рис. 3 от суммы  $R_1 + R_2 = R$ ?

Ни каким образом.

## V. ВЫВОД

Мы изучили метод компенсации для измерения ЭДС, сравнили его с методом прямого измерения вольтметром и показали, что он дает меньшую ошибку, чем прямое измерение.

## VI. ПРИЛОЖЕНИЕ