

# Измерение ЭДС методом компенсации

Александр Крупин

4 февраля 2021 г.

## 1 Подготовка к эксперименту

Измерение ЭДС неизвестного элемента вольтметром:  $\varepsilon_x = 1,58$  В.

Грубо оценим  $R_{1X}, R_{1N}$ . Для этого воспользуемся условием компенсации (см. рис. 1):

$$\varepsilon_{x,N} = \frac{R_{1X,1N}}{R} \varepsilon$$

Возьмем сопротивление магазина  $R = R_1 + R_2 \approx 11111$  Ом, напряжение источника  $\varepsilon \approx 3$  В, затем  $\varepsilon \approx 6$  В. Также знаем, что  $\varepsilon_N \approx 1,018$  В. Получим:

$\varepsilon$ , В	$R_{1X}$ , Ом	$R_{1N}$ , Ом
3	5550	3700
6	2780	1850

## 2 Метод компенсации

Определим сопротивления  $R_{1X}, R_{1N}$ , при которых наступает компенсация токов в ветви гальванометра. (см. таб. 1). Затем, чтобы найти ЭДС неизвестного элемента, воспользуемся формулой:

$$\varepsilon_x = \frac{R_{1X}}{R_{1N}} \varepsilon_N \quad (1)$$

$\varepsilon$ , В	$R_{1X}^{min}$ , Ом	$R_{1X}^{max}$ , Ом	$\delta R_{1X}$	$R_{1N}^{min}$ , Ом	$R_{1N}^{max}$ , Ом	$\delta R_{1N}$
3	5605	5609	$7 \cdot 10^{-4}$	3662	3665	$8 \cdot 10^{-4}$
6	2897	2898	$3 \cdot 10^{-4}$	1892	1894	$5 \cdot 10^{-4}$

Таблица 1: Определение  $R_{1X}, R_{1N}$

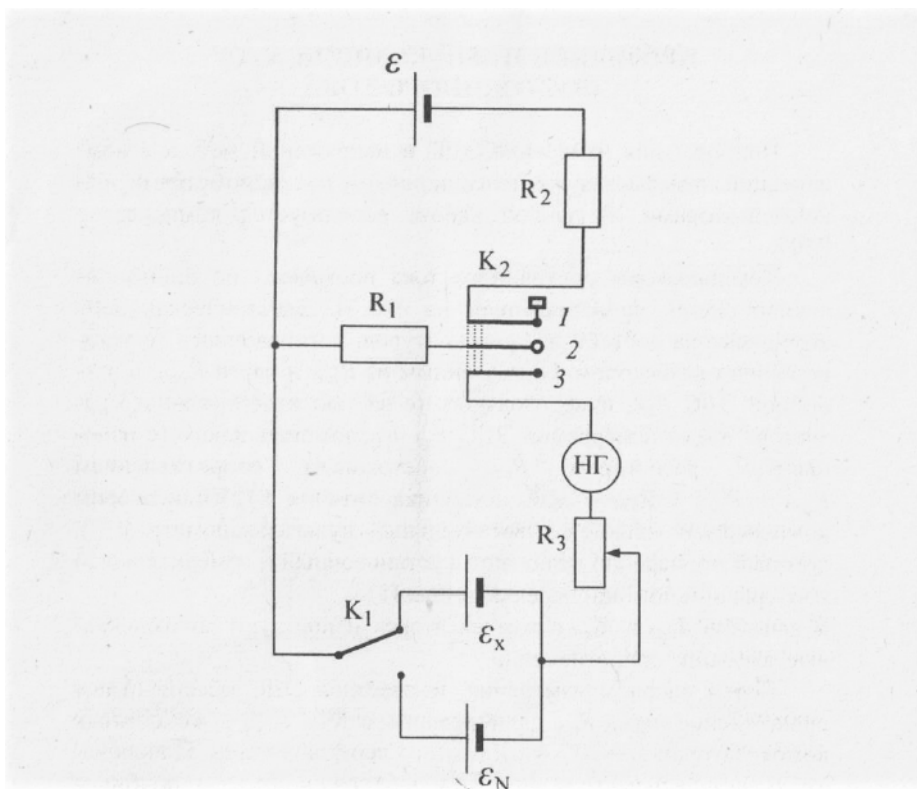


Рис. 1

Из формулы (1) находим:

$\varepsilon$ , В	$\varepsilon_x$ , В
3	1,55805
6	1,55819

Также из формулы (1) оценим максимальную относительную ошибку определения  $\varepsilon_x$ :

$$\delta\varepsilon_x = \delta\varepsilon_N + \delta R_{1X} + \delta R_{1N} \quad (2)$$

Из рис.(2) возьмем точные характеристики нормального элемента:

$$\delta\varepsilon_N = 1,018635 \text{ В} \pm (0,005)\%$$

$$\varepsilon = 3 \text{ В} : \delta\varepsilon_x = 5 \cdot 10^{-5} + 7 \cdot 10^{-4} + 8 \cdot 10^{-4} = 1,5 \cdot 10^{-3}$$

$$\varepsilon = 6 \text{ В} : \delta\varepsilon_x = 5 \cdot 10^{-5} + 3 \cdot 10^{-4} + 5 \cdot 10^{-4} = 0,8 \cdot 10^{-3}$$

**Окончательно получаем:**  $(\varepsilon_x = 1,558 \text{ В}) \pm (0,1)\%$

Класс точности - 0,005;

Значение ЭДС изделия **нормальный элемент НЭ-65** при температуре 20°C:

- при выпуске из производства - от 1,018590В до 1,018700В;

- при эксплуатации - от 1,018540В до 1,018730В;

Отклонение ЭДС за 1 год - не более 50мкВ;

Рис. 2

### 3 Итоги

Действительно, измерение ЭДС неизвестного элемента с помощью метода компенсации оказалось сильно точнее, чем измерение вольтметром напрямую.

#### 3.1 Детальное исследование точности

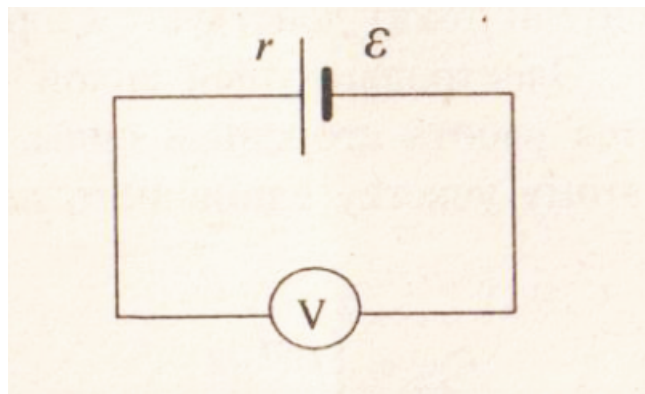


Рис. 3

Ошибка измерения ЭДС вольтметром считается просто (см. рис. (3)):

$$U = \frac{\varepsilon R_V}{R_V + r}$$

$$\Delta\varepsilon = \varepsilon - U = \varepsilon \left( 1 - \frac{R_V}{R_V + r} \right)$$

$$\delta\varepsilon = \left( \frac{\frac{r}{R_V}}{1 + \frac{r}{R_V}} \right) \quad (3)$$

Теперь посмотрим, как выглядит теоретическая ошибка измерения ЭДС методом компенсации. Используя рис.(4) и правила Кирхгофа, нетрудно установить,

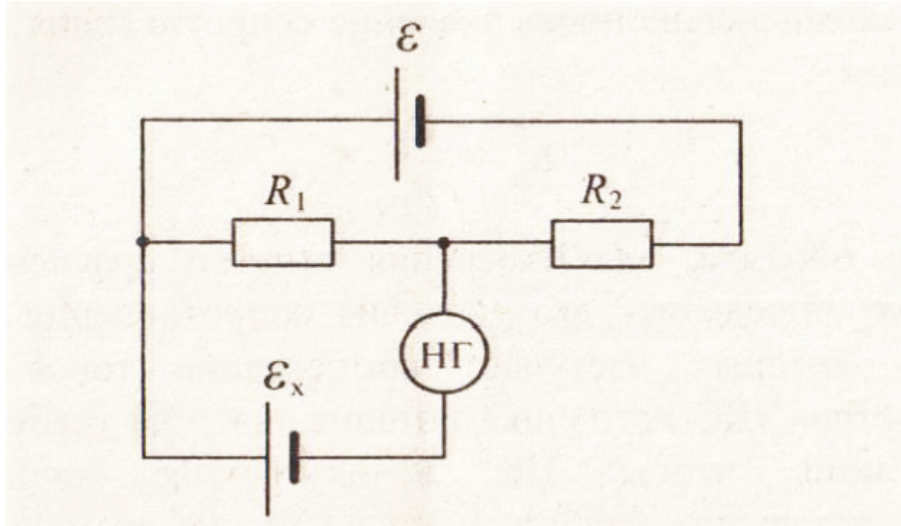


Рис. 4

что ток через гальванометр вычисляется по следующей формуле:

$$I_g = \frac{\varepsilon R_1 - \varepsilon_x R}{rR + R_1 R_2}$$

$r$  – суммарное внутреннее сопротивление элементов.

Далее, представим  $R_1$  в виде:  $R_1 = R_1^* + \Delta R_1 = R_1^*(1 + \delta R_1)$ , где  $R_1^*$  сопротивление, при котором строго  $I_g = 0$ . Произведем разложение  $I_g$  в окрестности значения  $R_1^*$  и установим, что:

$$\delta R_1 = \left( \frac{rR + R_1^* R_2}{R_1^* \varepsilon} \right) \Delta I_g$$

Точность прибора составляет  $0.3 \text{ мкА/дел} \Rightarrow \Delta I_g \approx 10^{-7} \text{ А}$ ;  $r \approx 100 \text{ Ом}$ .

Оценим порядок  $\delta R_1$ . В качестве  $R_1^*$  будем брать средние значения из таб.(1), остальные величины нам известны.

$\varepsilon, \text{ В}$	$R_{1X}^*, \text{ Ом}$	$\delta R_{1X}$	$R_{1N}^*, \text{ Ом}$	$\delta R_{1N}$
3	5607	$1,9 \cdot 10^{-4}$	3664	$2,6 \cdot 10^{-4}$
6	2898	$1,4 \cdot 10^{-4}$	1893	$1,6 \cdot 10^{-4}$

Таблица 2: Определение  $\delta R_1$  теоретически

Согласно таб.(2) порядки величин совпадают, что радует. Возвращаясь к формуле (2), получаем, вообще говоря, большую точность метода:  $\delta \varepsilon_x \approx 3,8 \cdot 10^{-4}$ . К тому же, стоит не забывать, что формула (2) отражает верхнюю грань, которая достигается крайне редко.

Посмотрим на графике (5), при каких сопротивлениях вольтметра, измерение методом компенсации точнее. Используем для этого полученную практически

способом теоретическую ошибку измерения методом компенсации  $\delta\varepsilon_x$  и ранее выведенную формулу (3) для относительной погрешности измерения вольтметром. Видно, что при  $R_V \approx 10^4$  Ом ошибки практически одинаковые. При сопротивлениях  $> 10^4$  Ом наблюдается рост точности измерений с помощью вольтметра. Если не забыть про собственную погрешность вольтметра, то, кажется, что все сходится!

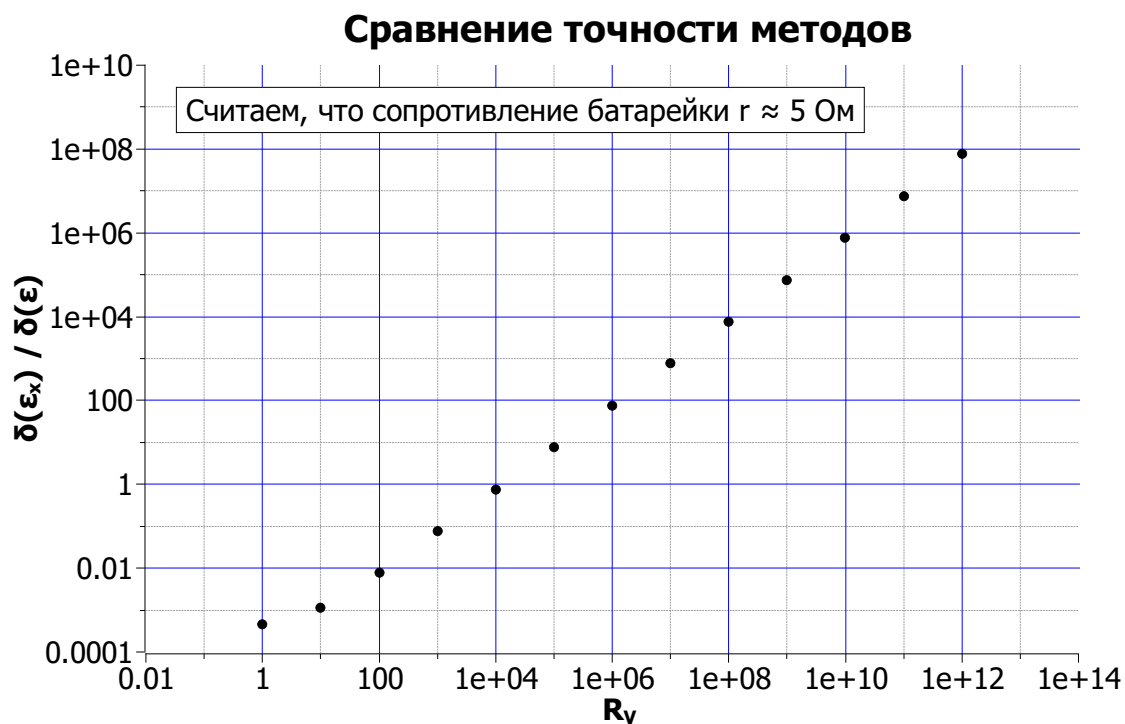


Рис. 5