

СЗУ.1а

3-265

СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

26/01-72

Дубна

2179/2-72

13 - 6319



В.Н.Замрий, Ю.М.Останевич

ЛАБОРАТОРИЯ НЕЙТРОННОЙ ФИЗИКИ

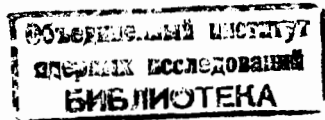
МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ МАЛЫХ ТОКОВ

1972

13 - 6319

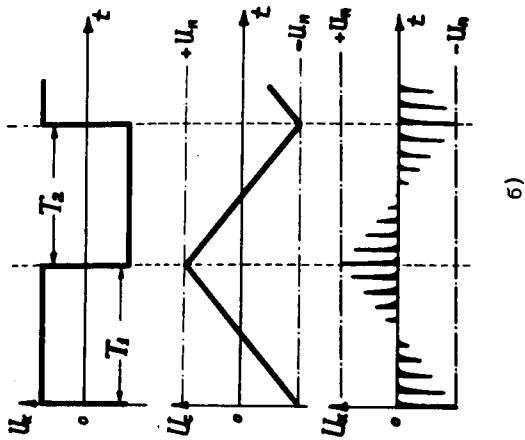
В.Н.Замрий, Ю.М.Останевич

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ МАЛЫХ ТОКОВ

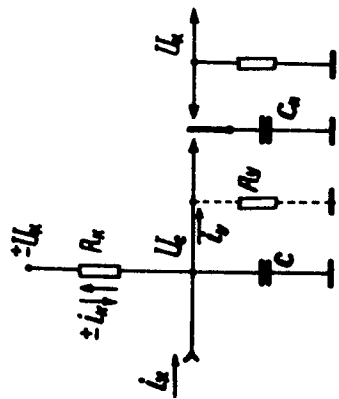


Прецизионное измерение малых токов (зарядов) является актуальной проблемой. Задача измерения токов в диапазоне до  $10^{-10}$  -  $10^{-9}$  а с точностью порядка 0,01 - 0,1% возникла при исследованиях критического состояния вещества. Для измерения малых токов широкое распространение получили методы интегрирования измеряемого тока, обеспечивающие точность порядка 1% <sup>/1/</sup>. В интеграторах тока с аналого-цифровым преобразованием точность может быть повышена <sup>/2,3/</sup>, но область их применения ограничена сравнительно большими токами. Высокую точность измерения можно было бы достичь применением компенсационного метода с нуль-индикатором, однако, применение метода ограничено из-за трудностей создания стабильных генераторов регулируемого малого тока <sup>/1/</sup>. Существенным источником погрешности приборов, использующих эти методы, является нестабильность характеристик измерительного порогового устройства.

Описываемый метод измерений с нерегулируемым компенсационным током заданной величины позволяет существенно ослабить влияние нестабильности порогового напряжения, а также токов утечки. Сущность метода поясняют схема и временная диаграмма, приведенные на рисунке 1. Во время измерения ток ионизационной камеры  $i_x$  заряжает емкость  $C$ , а компенсирующий ток  $i_k$  большей величины заряжает эту емкость либо разряжает ее. Направление тока  $i_k$  изменяют, когда напряжение на емкости достигает порогового уровня  $+U_n$  или  $-U_n$ . Таким образом, в течение некоторого времени  $T_1$  происходит заряд емкости током  $i_x + i_k$ , а в течение времени  $T_2$  - разряд током  $i_k - i_x$ . При достаточно боль-



б)



а)

Рис. 1. Измерительная ячейка.  
а) Принципиальная схема.  
б) Временная диаграмма работы.

ших токах (когда токами утечки можно пренебречь) с известным приближением можно записать:

$$T_1 = C \frac{(+U_n) - (-U_n)}{i_x + i_k} = C \frac{2U_n}{i_k + i_x}, \quad T_2 = C \frac{(-U_n) - (+U_n)}{i_x - i_k} = C \frac{2U_n}{i_k - i_x}. \quad (1)$$

Отсюда непосредственно можно найти:

$$i_x = i_k \frac{T_2 - T_1}{T_2 + T_1}. \quad (2)$$

В рассмотренном "идеальном" случае величина пороговых напряжений и емкости исключены из формулы, по которой определяется измеряемый ток. Отношение двух токов может быть определено с точностью измерения временных интервалов  $T_1$  и  $T_2$ , которая может быть лучше требуемой точности прибора. Для абсолютных измерений тока  $i_x$  необходимо иметь компенсационный ток известным с точностью, выше требуемой точности измерений.

Анализ работы устройства с учетом реальных характеристик позволяет оценить влияние токов утечки и возможного неравенства ("несимметрии") пороговых напряжений и компенсирующих токов и их нестабильности. Процессы перезаряда емкости  $C$  обуславливаются действием тока ионизационной камеры  $i_x$ , компенсирующего тока, равного  $\frac{U_k - U_c}{R_k}$ , и токов утечки  $i = \frac{U_c}{R_y}$ , где  $U_c$  - напряжение на емкости  $C$ ,  $U_k$  - напряжение источника тока  $i_k$ ,  $R_y$  - сопротивление, учитывающее токи утечки через изоляцию конденсатора и входную цепь измерительной схемы. Соответствующее дифференциальное уравнение

$$\frac{dU_c}{dt} = -\frac{U_c}{RC} + \frac{i_x + i_k}{C}, \quad (3)$$

где обозначено  $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_k} + \frac{1}{R_y}$  и  $i_k = \frac{U_k}{R_k}$ , имеет решение

$$U_c = U_n \cdot e^{-\frac{t}{RC}} + (i_x + i_k) R (1 - e^{-\frac{t}{RC}}). \quad (4)$$

Решение (4) получено в предположении, что в начальный момент времени  $U_c$  равно одному из пороговых напряжений. Будем считать, что процесс заряда начинается при  $U_c = U_n^-$  и заканчивается при  $U_c = U_n^+$ , а процесс разряда начинается при  $U_c = U_n^+$  и заканчивается при  $U_c = U_n^-$ . Тогда выражение (4) для заряда и разряда имеет вид:

$$U_n^+ = U_n^- \cdot e^{-\frac{T_1}{RC} + (i_x + i_k^+) R (1 - e^{-\frac{T_1}{RC}})}, \quad (5a)$$

$$U_n^- = U_n^+ \cdot e^{-\frac{T_2}{RC} + (i_x + i_k^-) R (1 - e^{-\frac{T_2}{RC}})}, \quad (5б)$$

где использовано алгебраическое значение компенсирующего тока и порогового напряжения. Подставим значения  $U_n^+ = U_n$ ,  $U_n^- = -U_n(1+\epsilon)$  и  $i_k^+ = i_k$ ,  $i_k^- = -i_k(1 + \delta)$ , где коэффициенты  $\epsilon$  и  $\delta$  характеризуют относительное неравенство ("несимметрию") или относительную нестабильность соответствующих параметров устройства, затем делим уравнение (5а) на (5б), тем самым исключая величину  $U_n$  и основную зависимость от  $R$ , и находим отношение

$$i_x : i_k = [(1 + \delta) \frac{1 + (1 + \epsilon)e^{-\frac{T_1}{RC}}}{1 + \epsilon + e^{-\frac{T_2}{RC}}} - \frac{1 - e^{-\frac{T_1}{RC}}}{1 - e^{-\frac{T_2}{RC}}}] : [\frac{1 + (1 + \epsilon)e^{-\frac{T_1}{RC}}}{1 + \epsilon + e^{-\frac{T_2}{RC}}} + \frac{1 - e^{-\frac{T_1}{RC}}}{1 - e^{-\frac{T_2}{RC}}}] \quad (6)$$

Учитывая первые члены разложения экспоненты, получим:

$$\frac{i_x}{i_k} = \frac{T_2(1 + \delta) - T_1}{T_2 + T_1} - \frac{T_1 \cdot T_2}{RC(T_1 + T_2)} \cdot \frac{\epsilon + \delta + \epsilon \delta}{\epsilon + 2} \quad (7)$$

Отсюда видно, что влияние неравенства или нестабильности пороговых напряжений, а также сопротивления  $R = \frac{R_y \cdot R_k}{R_y + R_k}$  содержится во втором

члене (7). Для оценки второго члена воспользуемся линейным приближением (1), тогда

$$T_1 = \frac{CU_n(2 + \epsilon)}{i_k + i_x} \leq \frac{CU_n(2 + \epsilon)}{i_k} = \frac{R_k CU_n(2 + \epsilon)}{U_k}, \quad \text{и учтем,}$$

что всегда  $\frac{T_2}{T_1 + T_2} < 1$ . Поэтому

$$\frac{T_1 \cdot T_2}{RC(T_1 + T_2)} \cdot \frac{\epsilon + \delta + \epsilon \delta}{\epsilon + 2} < \frac{U_n}{U_k} \cdot \frac{R_k}{R} (\epsilon + \delta + \epsilon \delta). \quad (8)$$

Таким образом, видно, что влияние  $\epsilon$  и  $R$  ослаблено в  $\frac{n}{U_k}$  раз. Реально вносимая погрешность порядка 0,01% при  $\frac{U_n}{U_k} < 10^{-3}$  и  $\frac{R_k}{R} = 1 + 2$ . Приведенные формулы позволяют оценить влияние нестабильности пороговых напряжений и сопротивления утечки, если величина  $\epsilon$  характеризует относительную нестабильность пороговых напряжений, а в  $R$  включить диапазон возможных нестабильностей сопротивлений утечки  $R_y$  устройства. Влияние  $\delta$  оказывается более существенным. Этот параметр в устройстве можно определить непосредственно при измерении величин  $T_1$  и  $T_2$  для случая  $i_x = 0$ , пренебрегая поправочным членом формулы (7). Таким же путем можно выполнить "симметрирование" токов  $i_k$ , т.е. приблизить  $\delta$  к 0 при настройке "нуля" измерительного устройства. При определенных условиях выражение для определения токов (6), (7) может быть сведено к более простой формуле (2).

Отметим возможные разновидности рассматриваемого метода: 1) непосредственное однократное измерение  $T_1$  и  $T_2$  в одном цикле перезарядки (результат можно находить не только по разложению (7), но и из точного выражения (6)); 2) многократное повторение измерений с суммированием соответствующих времен:

$$\bar{i}_x = i_k \frac{\sum_{j=1}^n T_{2j} - \sum_{j=1}^n T_{1j}}{\sum_{j=1}^n T_{2j} + \sum_{j=1}^n T_{1j}}, \quad (9)$$

где  $\bar{i}_x$  означает усредненный по  $n$  измерениям ток (суммирование необходимо для определения полного заряда или для определения среднего значения флуктуирующих токов при измерении за достаточно большое время); 3) измерение за каждый цикл перезарядки разности  $T_2 - T_1$  и суммы  $T_2 + T_1$  с последующим суммированием (или без него). Если при этом аппаратно фиксировать сумму  $\sum_{j=1}^n (T_2 + T_1)_j$ , равную полной длительности измерений, то измерение тока сводится к измерению ему прямо пропорциональной величины  $\sum_{j=1}^n (T_2 - T_1)_j$ , которая допускает удобное аппаратное

представление в цифровой форме. Последнее может быть реализовано, например, при помощи преобразования напряжения  $U_c$  в импульсы с пропорциональной амплитудой  $U_x$  (рис. 1), усиления и дискриминации их, и подсчета числа импульсов  $N_1$  и  $N_2$ , поступающих за время  $T_1$  и  $T_2$ , или разности чисел  $N_2 - N_1$ .

Результаты испытаний устройства подтвердили возможность применения описываемого метода для прецизионных измерений малых токов (зарядов).

#### Литература

1. В.С.Александров, В.А.Прянишников "Приборы для измерения малых напряжений и токов". Л., "Энергия", 1971.
2. В.М.Борзов, А.М.Илюкович "Измерительная техника", 1968, №2, 8.
3. E.J.Rogers. The Review of Scientific Instruments, V.34, No 6, 660 (1963).

Рукопись поступила в издательский отдел  
7 марта 1972 года.