

А. И. ФЮРСТЕНБЕРГ

**ЛАМПОЧКА НАКАЛИВАНИЯ КАК ИНДИКАТОР РАВЕНСТВА
ТОКОВ В ДВУХ ЦЕПЯХ И ПРИМЕНЕНИЕ ЕЕ ДЛЯ ТОЧНЫХ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ**

(Представлено академиком С. И. Вавиловым 7 VIII 1944)

В лампочке накаливания с металлической нитью появление едва заметного свечения нити, определяемое визуально, весьма чувствительно характеризует ток подогрева. То обстоятельство, что в режиме исчезающе малого свечения нити небольшие приращения тока, проходящего через лампочку, приводят к значительным изменениям яркости, представляет несомненный интерес для метрологии.

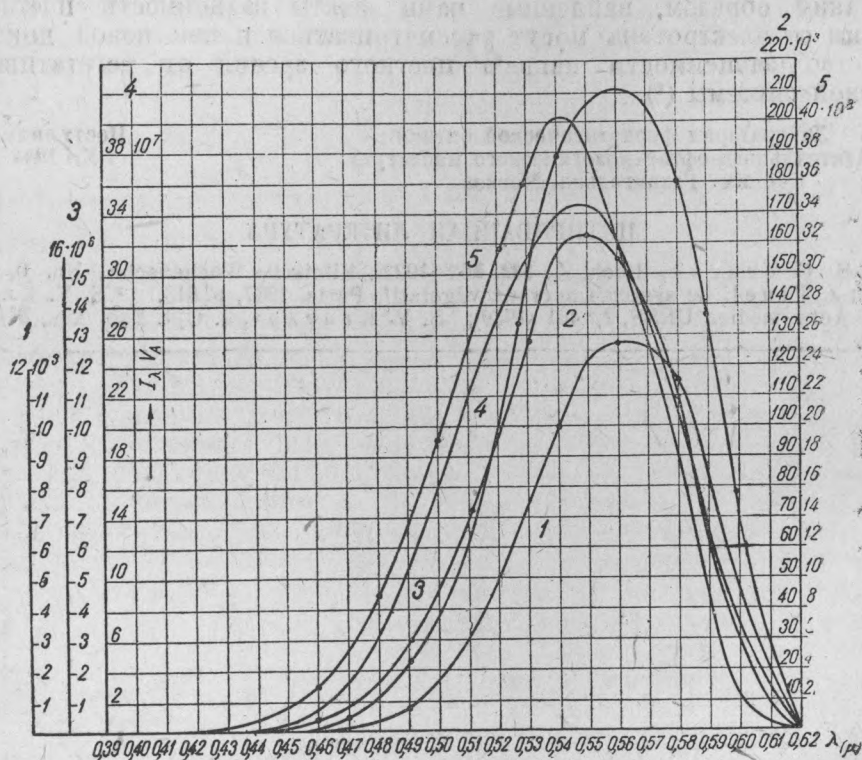


Рис. 1. 1 — $T = 900^{\circ} \text{K}$; 2 — $T = 1000^{\circ} \text{K}$; 3 — $T = 1200^{\circ} \text{K}$; 4 — $T = 1400^{\circ} \text{K}$; 5 — $T = 1600^{\circ} \text{K}$

На рис. 1 показано семейство кривых $I_{\lambda} V_{\lambda} = f(\lambda)$ для различных значений температуры для абсолютно черного тела (I_{λ} — монохроматическая интенсивность излучения, V_{λ} — коэффициент относительной видимости). Площади этих кривых пропорциональны значениям яркости при соответствующей температуре.

На рис. 2 изображена полученная экспериментально зависимости температуры T_n центральной части нити 2,5-вольтовой лампочки накаливания от силы тока. На основании данных рис. 1 и кривой T_n рис. 2 построена зависимость яркости нити накаливания от силы тока (кривая $\log B$ рис. 2). Как видно из рис. 2, вблизи «порога зажигания» ($T = 900 - 1000^\circ \text{K}$) увеличение силы тока на $\pm 0,50\%$ влечет за собой изменение яркости на $\pm 50\%$.

Измерение абсолютных значений силы переменного тока и напряжения помощью визуального определения «начала свечения нити» затрудняется, прежде

всего, тем, что величина «порога излучения видимого света» подвержена значительным индивидуальным колебаниям, а также зависит от большого числа не поддающихся учету факторов. Один и тот же наблюдатель, адаптировавшись в течение 10 минут на темноту, при установке силы тока может достигать точности порядка $\pm 0,01\%$. Однако воспроизводимость показаний уже спустя несколько часов относительно невысока. Наибольший разброс средних значений силы тока у 12 лиц, участвовавших в экспериментах, составлял $0,95\%$ измеряемой величины.

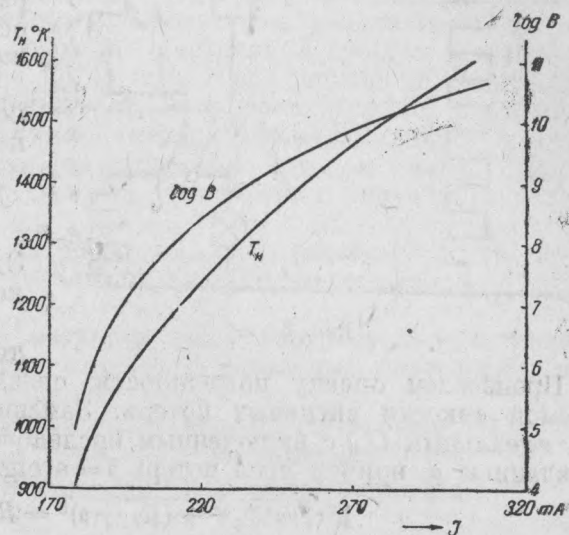


Рис. 2

составлял $0,95\%$ измеряемой величины.

Несравненно большие возможности открывает метод сравнения, при котором с помощью лампочки определяется равенство токов в двух цепях (рис. 3). Метод измерения заключается в установлении одинаковой силы тока во включенных параллельно измеряемой и образцовой цепях. Помощью переключателя лампочка или ее эквивалент могут быть включены либо в цепь, импеданс которой измеряется, либо в цепь образцового сопротивления. Сначала переключатель ставится в левое положение. Регулировкой напряжения добиваются чрезвычайно слабого свечения лампочки. Затем переводят переключатель направо и регулировкой величины образцового сопротивления получают такое же свечение нити лампочки. При равенстве токов в правой и левой ветвях, очевидно,

$$\bar{Z}_x + \bar{R}_n = R_N + R_n. \quad (1)$$

Здесь: Z_x — измеряемое полное сопротивление в омах; R_n — сопротивление лампочки в рабочем режиме в омах; R_N — сопротивление магазина в омах.

Для того, чтобы определить величину субъективной погрешности при сравнении близких по величине токов на равенство помощью лампочки накаливания, был поставлен эксперимент, в котором участвовали 10 человек. Производилось многократное измерение одной и той же строго постоянной величины (100-омное образцовое сопротивление завода «Эталон»). Лампочка помещалась в окрашенный черной матовой краской цилиндр, снабженный наглазником, предохраняющим глаза от действия внешнего освещения. Эксперимент показал, что вероятная погрешность арифметического среднего из

5 измерений одной и той же величины ни у одного из наблюдателей не превысила $\pm 0,03\%$.

Рассмотрим кратко погрешности, возникающие при измерении емкости и индуктивности при сравнении их описываемым методом

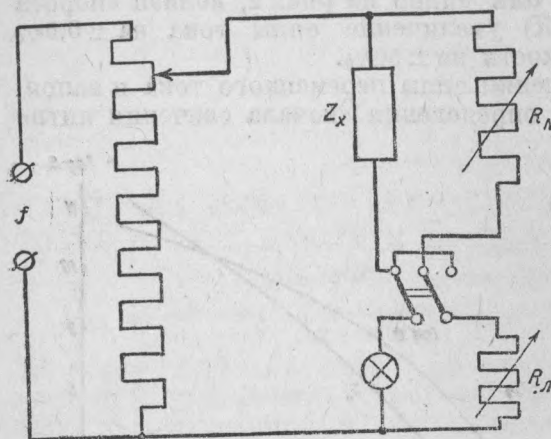


Рис. 3

с активным сопротивлением и частотой. Случаи измерения частоты, импеданца, реактанца, активного сопротивления и т. п. могут быть разобраны аналогично на основании излагаемого ниже.

Из соотношения (1) для конденсатора без потерь получим

$$C_x = \frac{1}{\omega \sqrt{R_N^2 + 2R_N R_L}} \quad (2)$$

Здесь: C_x — измеряемая емкость в фарадах; ω — круговая частота переменного тока в рад/сек.

Произведем оценку погрешности, связанной с наличием в измеряемой емкости активных потерь. Заменяв реальный конденсатор C_x идеальным C'_x с включенным последовательно активным сопротивлением ρ , причем угол потерь $\delta = \text{arctg } \omega C'_x \rho$, получим:

$$\sqrt{(1/\omega C'_x)^2 + (R_x + \rho)^2} = R_N + R_L$$

После несложных вычислений имеем:

$$\delta_\rho = \frac{\Delta C_x}{C_x} \cong \frac{R_L}{R_N} \text{tg } \delta = 100 \frac{R_L}{R_N} \text{tg } \delta (\%) \quad (3)$$

Изменение сопротивления лампочки под влиянием непостоянства «тока зажигания» приводит к погрешности δ_{R_L} .

Положим, что сопротивление лампочки изменилось от величины R_L до $R_L + \Delta R_L$. Тогда выражение (2) примет вид

$$C_x + \Delta C_x = \frac{1}{\omega \sqrt{R_N^2 + 2R_N(R_L + \Delta R_L)}} \quad (4)$$

После разложения радикалов формул (2) и (4) в ряд и пренебрежения членами выше второго, относительная погрешность может быть вычислена следующим образом:

$$\delta_{R_L} = \frac{\Delta C_x}{C_x} \cong \frac{\Delta R_L}{R_N} 100\% \quad (5)$$

Для того чтобы свести к минимуму указанную погрешность, нужно производить измерение сопротивления лампочки в данном режиме непосредственно вслед за балансировкой схемы.

Колебание частоты источника, как это следует из выражения (2), приводит к аналогичным (но с обратным знаком) погрешностям по измеряемой емкости

$$\delta_f = \pm \Delta f / f = \mp \Delta C_x / C_x \quad (6)$$

При применении в качестве источника энергии камертонного генератора с усилителем, питающихся от аккумуляторов или от стабилизатора напряжения, можно получить без особенных трудностей $\Delta f \approx (1 \div 3) \cdot 10^{-3} \%$ при хорошем постоянстве амплитуды напряжения, что также весьма существенно.

Влияние гармоник кривой напряжения источника энергии может быть учтено при помощи следующей формулы:

$$\delta_{\text{гарм}} = \frac{\Delta C_x}{C_x} \left[\sqrt{\frac{1 + 4(U_2/U_1)^2 + 9(U_3/U_1)^2 + \dots}{1 + (U_2/U_1)^2 + (U_3/U_1)^2 + \dots}} - 1 \right] 100\%. \quad (7)$$

Здесь U_1 — амплитуда напряжения основной частоты; U_n — амплитуда напряжения гармоники номер n .

Помощью фильтра может быть получена $\delta_{\text{гарм}} \approx (2 \div 5) \cdot 10^{-3} \%$. Погрешность магазина сопротивления при пользовании поправочными таблицами имеет порядок $\pm 0,01\%$. Остаточная реактивность современных магазинов настолько мала (постоянная времени $\tau \approx 10^{-7} \div 10^{-8}$ сек.), что в диапазоне до 10 кГц с ней можно не считаться. Таким образом при измерении емкости сравнительно простыми средствами может быть получена точность порядка $\pm (0,05 \div 0,1) \%$.

Измерение индуктивности описываемым методом имеет много общего с измерением емкости. При выполнении описанного ранее балансирования схемы

$$L_f = \frac{1}{\omega} \sqrt{R_N^2 + 2R_N R_L - R_f^2 - 2R_f R_L}. \quad (8)$$

Здесь: L_f — индуктивность катушки при частоте f ; R_f — активное сопротивление катушки при частоте f . Остальные обозначения те же, что и употреблявшиеся ранее.

В соответствии со сказанным выше, непостоянство сопротивления лампочки является причиной появления погрешности δ_{R_L} .

Если сопротивление лампочки получило приращение ΔR_L , то

$$\delta_{R_L} = \frac{\Delta L_f}{L_f} \approx \frac{\Delta R_L}{R_N} 100\%. \quad (9)$$

Для уменьшения δ_{R_L} при измерении малых индуктивностей с высокой точностью необходимо пользоваться низкоомными лампочками.

Влияние гармоник в составе питающего схему напряжения намного меньше, чем в случае измерения емкости, а именно:

$$\delta_{\text{гарм}} = \frac{\Delta L_x}{L_x} \left[\sqrt{\frac{1 + \left(\frac{U_2}{U_1}\right)^2 + \left(\frac{U_3}{U_1}\right)^2 + \dots}{1 + \frac{1}{4}\left(\frac{U_2}{U_1}\right)^2 + \frac{1}{9}\left(\frac{U_3}{U_1}\right)^2 + \dots}} - 1 \right] 100\%. \quad (10)$$

Другие источники погрешности рассмотрены выше. Суммарная погрешность измерения может быть сделана порядка $\pm (0,05 \div 0,1) \%$.

Данный метод измерения отличается большой универсальностью и может быть использован и как абсолютный метод высокой точности, и как простой абсолютный метод измерения со средней точностью, и в качестве весьма простого метода сравнения (по образцовым мерам емкости и индуктивности).

В заключение автор пользуется случаем горячо поблагодарить академика С. И. Вавилова за интерес к работе и ценные указания, а также выразить свою признательность члену-корреспонденту АН СССР Г. С. Ландсбергу и доктору физико-математических наук Л. А. Тумерману.

Московский государственный институт
мер и измерительных приборов

Поступило
1 VIII 1944