

## ИЗМЕРЕНИЕ ДЕКРЕМЕНТА ЗАТУХАНИЯ ВЫСОКОДОБОТНЫХ РЕЗОНАТОРОВ НА СВЧ

*М. И. Хейфец, Б. Р. Князев, А. И. Зыков*

Харьков

В данной статье производится оценка методов измерения декрементов затухания с целью выбора наиболее удобного и точного метода его измерения при определении нагруженной добротности  $Q_n$  сверхпроводящего резонатора.

Обычно для определения нагруженной добротности высокочастотных резонаторов измеряют декремент затухания СВЧ мощности в резонаторе. Воспользовавшись результатами этих измерений,  $Q_n$  можно определить по формуле

$$Q_n = 2\pi f_0 \tau, \quad (1)$$

где  $f_0$  — резонансная частота;

$\tau$  — время, по истечению которого амплитуда колебаний уменьшается в  $e$  раз.

Погрешность в определении  $Q_n$  связана с погрешностью измерения времени  $\tau$  (1). Если используется осциллограф, то с помощью калиброванных меток и масштабной сетки  $\tau$  можно определить с ошибкой  $\pm 5\%$ , однако точность измерений может быть существенно повышена, что необходимо при исследовании свойств покрытий сверхпроводящих резонаторов и в ряде других случаев. Для этого используются приведенные ниже методы.

### Затемнение части измеряемого импульса

Данный метод заключается в затемнении на экране осциллографа части кривой, характеризующей затухание СВЧ колебаний в резонаторе. Для этого используется генератор прямоугольных импульсов,

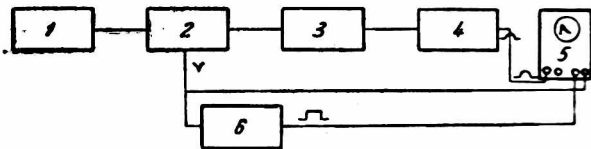


Рис. 1. Блок-схема измерения  $\tau$  методом затемнения части импульса:

1 — СВЧ генератор; 2 — модулятор мощности СВЧ колебаний; 3 — исследуемый резонатор; 4 — кристаллический детектор на выходе резонатора; 5 — осциллограф; 6 — генератор прямоугольных импульсов.

одиночные импульсы соответствующей полярности с которого подаются на управляющий электрод электронно-лучевой трубки или на вход «модуляция луча по яркости» измерительного осциллографа. При проведении измерений начало прямоугольного импульса с генератора должно совпадать с моментом начала развертки луча на экране осциллографа и, кроме того, к этому времени уже должна быть закончена подача СВЧ мощности в резонатор. Исходя из этих условий, измерительная схема должна иметь вид, изображенный на рис. 1. Принцип ее работы следующий: в момент прекращения подачи СВЧ мощность в резонатор с модулятора прямоугольных импульсов и осциллограф подается син-

хроимпульс для одновременного их запуска. В соответствии с длительностью прямоугольного импульса на экране осциллографа затемняется определенная часть в начале кривой (рис. 2). Наиболее удобно затемнить начальную часть экспоненты до полувысоты. Если длительность импульса генератора при этом  $T_{И}$ , то:

$$Q_H = \frac{2\pi f_0 T_{И}}{\ln 2} \quad (2)$$

Погрешность измерения по этому методу определяется ошибкой измерения времени, соответствующей затемненной части импульса  $\Delta\tau_1$ , и ошибкой, определяемой измерением полувысоты экспоненты  $\Delta\tau_2$ :

$$\Delta\tau = \Delta\tau_1 + \Delta\tau_2.$$

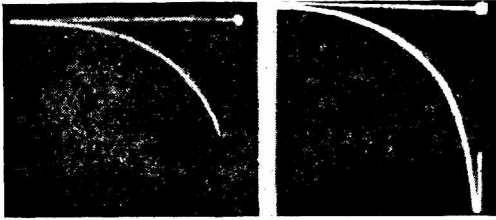


Рис. 2. Осциллограммы импульсов при измерении  $\tau$ :

- а — по полной кривой затухания СВЧ мощности в резонаторе;  
б — с затемнением части импульса.

Время, соответствующее затемненной части импульса, определяется измерением частоты с помощью электронно-счетного частотомера. Погрешность измерения при этом не более  $\pm 0,1\%$ .

Практически погрешность определяется ошибкой измерения полувысоты экспоненты при совмещении начала луча с тонкой линией масштабной сетки осциллографа значение полувысоты определяется с ошибкой  $\pm 1,5 \div 2\%$ .

Авторы при измерениях пользовались осциллографом С1-19, генератором импульсов 15-6А, который калибровался с помощью генератора образцовых частот 41-9 и электронно-счетного частотомера 43-4М.

#### Метод наложения экспоненты.

Метод наложения резонансных кривых для измерения добротностей резонаторов при комнатной температуре использовался в работе [2] и дал высокую точность измерений. Ошибка, вводимая при наложении, составляет  $\pm 1\%$ , а общая ошибка измерения  $\pm 3\%$ .

При измерениях добротности сверхпроводящих резонаторов на экране осциллографа мы используем не изображение резонансной кривой, а экспоненту затухания «звучащего» резонатора. В связи с этим интересно оценить погрешность измерения времени  $\tau$  при наложении двух экспонент.

Постоянная времени затухания может быть определена посредством подачи импульсного напряжения на интегрирующую цепочку  $RC$  и одновременного наблюдения переходной характеристики этой цепочки и процесса затухания в исследуемом резонаторе [3]. Легко показать, что при совмещении этих двух затухающих кривых и использовании детектора с квадратичной характеристикой

$$Q_H = \omega RC$$

Схема измерений по методу совмещения экспонент показана на рис. 2. Прямоугольный импульс модулирующего устройства, переключающий мощность в СВЧ тракте на входе в исследуемый резонатор, подается одновременно на интегрирующую цепочку через эмиттерный повторитель с низкоомным выходным сопротивлением, служащим для

развязки разрядной цепи конденсатора  $C$  от внешней цепи. Синхроимпульсом от модулирующего устройства с прекращением подачи СВЧ мощности в резонатор запускается двухлучевой осциллограф, на экране которого совмещаются экспоненты при наборе соответствующих значений сопротивления и емкости магазинов, составляющих  $RC$  цепочку.

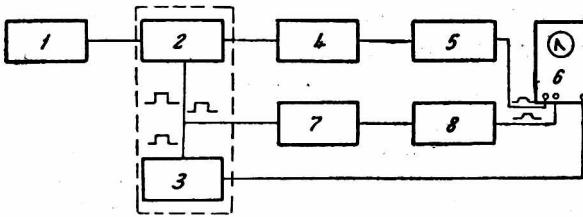


Рис. 3. Блок-схема измерения времени  $\tau$  методом наложения экспоненты:

1 — СВЧ генератор; 2 — переключатель СВЧ мощности модулятора; 3 — генератор прямоугольных импульсов модулятора; 4 — исследуемый резонатор; 5 — детектор на выходе резонатора; 6 — осциллограф; 7 — эмиттерный повторитель; 8 — цепочка  $RC$ .

Оценим ошибку, с которой определяется  $\tau$  по данному методу. Общая погрешность измерения  $\tau$  зависит от точности наложения экспоненты и погрешности определения  $R$  и  $C$ . Измерение  $R$  и  $C$  с необходимой степенью точности не представляют трудности. Относительная погрешность в определении положения экспоненты на экране при изменении напряжения на конденсаторе по закону:

$$U' = U_0 e^{-\frac{t}{RC}} \quad (3)$$

где  $U_0$  — амплитуда напряжения на конденсаторе до момента разряда,  $t$  — время разряда, определяется в виде

$$\frac{\Delta\tau}{\tau} = \frac{\Delta l}{l}. \quad (4)$$

Здесь  $l$  — расстояние, на котором экспонента убывает от своего максимального значения в  $\frac{U_0'}{U_0} = \frac{H_0}{H}$  раз (рис. 4),

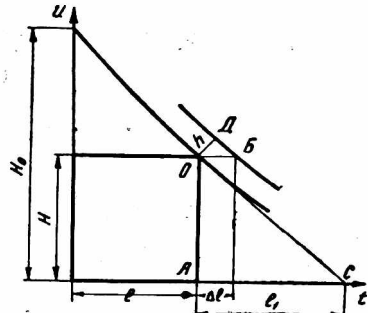


Рис. 4. Оценка погрешности измерения  $\tau$  при совмещении экспонент.

$\Delta l$  — ошибка в определении положения экспоненты по абсциссе. Согласно (3)  $l = l_1 \ln \frac{H_0}{H}$ , а  $\Delta l$  можно выразить через  $h$  (наблюдаемую ошибку), исходя из свойств подобных треугольников  $AOC$  и  $ODE$ :

$$\Delta l = h \left[ 1 + \left( \frac{l_1}{h} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (5)$$

Таким образом, воспользовавшись (5), из (4) имеем:

$$\frac{\Delta\tau}{\tau} = \frac{h}{l} \left[ 1 + \left( \frac{l_1}{\ln \frac{H_0}{H} \cdot H} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}.$$

Из данной формулы видно, что относительная погрешность при измерении  $\tau$  методом наложения экспоненты зависит от ширины луча ЭЛТ ( $h$ ), размера изображения импульса на экране осциллографа и отношения  $\frac{H_0}{H}$ . Например, при измерениях экспоненты на полувысоте  $\frac{H_0}{H} = 2$  и при изображении на экране осциллографа при  $l = 50$  мм,  $H = 25$  мм, толщине луча  $h = 1$  мм —  $\frac{\Delta\tau}{\tau} = 6\%$ ,  $h = 0,5$  мм,  $\frac{\Delta\tau}{\tau} = 3\%$ .

Таким образом, использование метода затемнения части импульса и совмещения кривых затухания цепочки  $RC$  и измеряемого генератора позволяют в 1,5–2 раза повысить точность измерения добротности, что существенно при исследовании свойств сверхпроводящих резонаторов. Метод наложения экспоненты прост по исполнению, но применим лишь при наличии осциллографа с малой толщиной луча. Метод затемнения части импульса значительно повышает точность измерений, но требует более сложной аппаратуры для калибровки генератора прямоугольных импульсов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Е. И. Куликов. «Измерительная техника», 55, № 6, 1959.
2. Le Cain. Proc IRE, 40 (2), 155, 1952.
3. Э. Л. Гинзтон. Измерения на сантиметровых волнах. Изд-во иностр. лит., 1960.