

М. П. КУХТИН, В. П. ЛОБАЧЕВ, канд. физ.-мат. наук

### ВЛИЯНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ НА ИЗМЕРЕНИЕ ДОВРОТНОСТИ СВЧ-РЕЗОНАТОРОВ ДЕКРЕМЕНТНЫМ МЕТОДОМ

При производстве измерений добротности СВЧ-резонаторов методом декремента затухания основными источниками случайных погрешностей измерений являются: нестабильность частоты СВЧ-источника, точность определения временного интервала и отношений уровней мощности, связанные выражением [1]

$$\frac{\delta Q}{Q} = \frac{\delta f_0}{f_0} + \frac{\delta \tau}{\tau} \frac{1}{\ln \frac{P_1}{P_2}} \frac{P_1}{P_2} \delta \left( \frac{P_1}{P_2} \right), \quad (1)$$

где  $\frac{\delta Q}{Q}$ ,  $\frac{\delta f_0}{f_0}$ ,  $\delta \left( \frac{P_1}{P_2} \right)$ ,  $\frac{\delta \tau}{\tau}$  — относительные погрешности измерения добротности, резонансной частоты, уровней мощности и временного интервала.

С другой стороны, известно, что метод декремента имеет ограничение снизу на значение измеряемой добротности. Это ограничение связано с длительностью процесса затухания измеряемого ре-

зонатора  $\Delta t$ , которая должна быть примерно на порядок выше длительности переходных процессов  $\Delta t$  в измерительной установке. При отклонении от этого условия появляются источники систематических погрешностей, и оценка погрешности измерения установки по (1) дает заниженные значения ее реальной величины.

Анализу соотношения между длительностью процесса затухания измеряемого резонатора и длительностью переходного процесса в измерительной установке, характеру и величине систематической погрешности и выработке рекомендаций по выбору параметров устройства для снижения систематической погрешности посвящена настоящая работа.

При «мгновенном» выключении источника СВЧ-колебаний огибающая затухающего процесса имеет вид экспоненты. Связь между стационарным значением энергии  $\omega_0$ , частотой  $\omega$ , добротностью  $Q$  и временем  $t$  имеет вид [2]  $\omega(t) = \omega_0 e^{-\omega/Qt}$  (2).

В реальной измерительной установке время выключения имеет конечную величину, конкретную для данной установки и определяемую параметрами ее переключающих элементов. Поэтому энергия накачки резонатора  $\omega_0$  исчезает не сразу, а продолжает действовать на колебательную систему в течение некоторого времени  $\Delta t$  с момента начала затухающего процесса, т. е. фактически начало затухающего процесса растянуто во времени на величину  $\Delta t$ . Если  $\Delta t \ll \Delta \tau$ , влиянием переходного процесса можно пренебречь, считая выключение источника квазимгновенным. Если это условие не выполняется, характер затухающего процесса будет искажаться.

Технически выключение источника, как правило клистрона, осуществляется наложением импульса с крутым фронтом на отражатель клистрона. Крутизна фронта импульса совместно с наличием паразитных емкостей фактически определяют  $\Delta t$ . Растянута во времени момента выключения можно представить как процесс быстрого прохождения частоты генератора через полосу резонатора.

Для количественной оценки искажений затухающих колебаний можно воспользоваться математическим выражением, описывающим затухающий процесс в резонаторе при быстром прохождении частоты генератора через полосу резонатора [3].

Модуль отраженной от резонатора волны в этом случае имеет вид

$$|B|^2 = 1 + 2\sqrt{\pi}(2C - D) \cos\left(\theta^2 - \frac{\pi}{4}\right) e^{-x} + (2C - D)^2/4\theta^2 - \\ - (2C - D)^2\sqrt{\pi} \cos\left(\theta^2 - \frac{\pi}{4}\right) e^{-x/\theta} - \pi(2C - D)^2 e^{-2x}, \quad (3)$$

где  $\theta = \sqrt{at}$ ;  $D = \omega_0/2\theta\sqrt{a}$ ;  $C = 1/Q$ ,  $x = D\theta$ ;

$\omega_0$  — резонансная частота резонатора.

Это выражение описывает колебания промежуточной частоты (ПЧ), выделяющееся на детекторе при быстром прохождении час-

тоты генератора через полосу резонатора. Анализ выражения показывает, что колебания ПЧ имеют переменный период из-за квадратичной зависимости аргумента косинуса и несимметричный вид из-за наличия двух времязависимых членов (не считая единицы), имеющих непериодичный характер и входящих в выражение (3) с разными знаками.

Графики затухающих колебаний для  $\alpha = 10^{14} \text{ с}^{-2}$  и трех значений добротности представлены на рис. 1. Оба колебательных про-

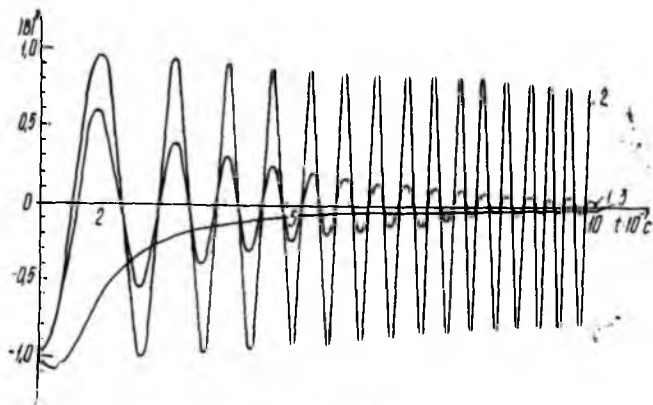


Рис. 1

цесса имеют переменный период ПЧ. Но если на колебательном процессе 1, соответствующем нагруженной добротности  $Q=10^4$  и резонансной частоте  $f_0=9,845 \cdot 10^9$  Гц хорошо видна асимметрия колебаний ПЧ, то на колебательном процессе 2, соответствующем большей добротности ( $Q=10^5$ ), асимметрия выражена слабо.

Анализ составляющих выражения (3) показал, что с ростом  $Q$  значение аperiодических членов, ответственных за асимметрию, быстро уменьшается и при  $Q=10^8$  по порядку величины составляет  $10^{-12}$  и  $10^{-9}$ .

Скорость выключения  $\alpha = d\omega/dt$  обратно пропорциональна времени выключения  $\Delta t$ . Расчет показал, что при увеличении скорости переключения на порядок ( $\alpha=10^{15} \text{ с}^{-2}$ ) асимметрия затухающих колебаний графика 1 уменьшилась до асимметрии графика 2. При этом период ПЧ-колебаний уменьшился почти на порядок.

Наличие асимметрии приводит к появлению систематических погрешностей, которые, как известно, ранее не учитывались. В этой связи был проведен расчет степени отклонения огибающей затухающих колебаний от экспоненты. Экспонента  $e^{-x}$  нормировалась на амплитуду огибающей в начале координат. Результаты расчета приведены на рис. 2. Кривая 1 представляет расчетную экспоненту, а кривая 2 — нижнюю огибающую затухающих колебаний для  $\alpha=10^{14} \text{ с}^{-2}$  при добротности  $Q=10^4$ . Кривыми 3—5 представлена степень отклонения  $\sigma = \frac{e^{-x} - |B|^2}{-x}$  (в процентах) огибающих от экс-

поенты для различных значений  $\alpha$ . Из рис. 2 видно, что  $\sigma$  существенно зависит от скорости выключения источника.

Экспериментальная проверка результатов расчета была выполнена на установке, описанной в работе [4]. В качестве резонатора использован цилиндрический резонатор с нагруженной добротностью  $Q=11000$  и резонансной частотой  $f_0=9,845 \cdot 10^9$  Гц. Использование в оконечном каскаде детектора пересечения нулевого уровня и сумматоре микросхем серии К 574 УД1 и К544 УД1 позволило достигнуть скорости выключения  $\alpha=3 \cdot 10^{14} \text{ с}^{-2}$ . Форма кривой затухающего процесса, наблюдаемая на экране осциллографа, была близка к графику 1 (рис. 1), т. е. имела явно выраженную асимметрию и переменный период колебаний ПЧ, что указывает на правильность выбора модели оценки искажений, внося-

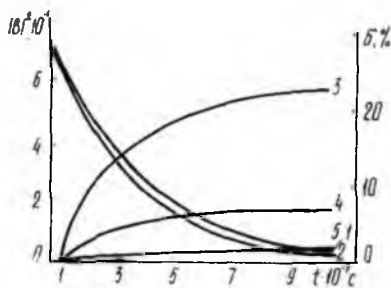


Рис. 2

мых конечностью времени выключения.

Таким образом, при проведении измерений добротности СВЧ-резонаторов методом декремента затухания для получения достоверных результатов измерения следует обращать внимание на соотношение между интервалами времени  $\Delta t$  и  $\Delta t$ . Условным критерием достоверности результатов измерений с точки зрения влияния систематических погрешностей можно, по-видимому, считать наличие симметрии в колебаниях ПЧ. Кроме того, как показывают расчеты, нижнюю границу достоверно измеряемых добротностей можно понизить за счет уменьшения  $\Delta t$ . Однако успех в этом направлении будет определяться развитием элементной базы (микросхем, транзисторов) с высокой скоростью нарастания выходного сигнала.

Оценка систематической погрешности предлагаемым способом может быть произведена по семейству кривых на графиках, аналогичных приведенным на рис. 2, у которых  $\alpha$  и  $\omega_0$  известны, а  $Q$  является параметром семейства ( $Q$  выбирается из области ожидаемых значений).

Окончательный вывод о значении суммарной погрешности измерения составляется таким образом после оценки случайной погрешности по (1) и систематической погрешности по семейству кривых расчетных графиков. В проведенном эксперименте систематическая погрешность уменьшила значение измеряемой добротности приблизительно на 10 %.

**Список литературы:** 1. Пудалов В. М. Измерение добротности сверхпроводящих сверхвысокочастотных резонаторов методом декремента // Приборы и техника эксперим. 1982. № 4. С. 160—163. 2. Тишер Ф. Техника измерений на сверхвысоких частотах. М., 1963. 367 с. 3. Вятчанин С. П., Тимашов Л. В. Простой метод измерения высоких добротностей сверхпроводящих резонаторов // Приборы и техника эксперим. 1983. № 4. С. 145—146. 4. Устройство для измерения вы-

соких добротностей методом декремента затухания/А. И. Кочержин, М. П. Кухтин, В. П. Лобачев, Н. С. Репалов//Приборы и техника эксперим. 1988. № 2. С. 195—197.

*Поступила в редакцию 25.09.89*