

ФАЗОВЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ДОБРОТНОСТИ РЕЗОНАТОРОВ НА СВЕРХВЫСОКИХ ЧАСТОТАХ

М. М. Карлинер

Приведено описание метода и установки для измерения нагруженной и собственной добротности полых резонаторов. Метод основан на измерении сдвига фазы огибающей амплитудно-модулированного сигнала, прошедшего через резонатор или отраженного от него.

Установка дает возможность непосредственного отсчета измеряемой добротности на стрелочном приборе. Систематическая погрешность по расчетам не превышает 4%, случайная—менее 6,5%. Экспериментальная проверка в трехсантиметровом диапазоне подтвердила правильность расчетов.

Метод может быть применен для исследования физических свойств различных образцов вещества, помещаемых в резонатор, так как позволяет удобно измерять малые изменения добротности.

Многие электромагнитные методы исследования свойств вещества связаны с измерением добротности резонатора, в который введен исследуемый образец. В связи с этим методы измерения добротности резонансных систем получили значительное развитие. Большая часть этих методов связана с амплитудными измерениями по резонансной кривой. Фазовые методы разработаны значительно слабее.

Почти все применяемые на сверхвысоких частотах методы измерения добротности имеют следующие недостатки:

а) Для каждого измерения необходимо произвести несколько отсчетов той или иной вспомогательной величины, после чего по результатам этих отсчетов может быть вычислена добротность. Вследствие этого измерения добротности не обладают наглядностью, т. е. не дают возможности непосредственно наблюдать изменения измеряемой величины.

б) Недостаточная точность измерений. Исследуемый эффект часто очень мал и вызывает незначительное изменение добротности. Чтобы разность двух измерений имела достаточную точность, должна быть обеспечена такая высокая точность отдельных измерений, которая практически оказывается недостижимой.

Известно, что наибольшей точности можно достичь, если имеется возможность непосредственно измерять изменение добротности. Применяемые в настоящее время методы не дают такой возможности. Предлагаемый в данной работе фазовый метод [1] позволяет до некоторой степени устранить указанные недостатки.

1. СУЩНОСТЬ ФАЗОВОГО МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ ДОБРОТНОСТИ

В основу описываемого фазового метода положена одна из особенностей резонатора как накопителя энергии. Наличие в возбужденном резонаторе запаса электромагнитной энергии, величина которого не может изменяться мгновенно, приводит к запаздыва-

нию сигнала, проходящего через резонатор. В частности, огибающая синусоидально модулированного по амплитуде сигнала резонансной частоты после прохождения через резонатор оказывается сдвинутой по фазе. Сдвиг фазы Φ связан с добротностью резонатора Q простым соотношением

$$Q = \frac{f_0}{2F} \operatorname{tg} \Phi, \quad (1)$$

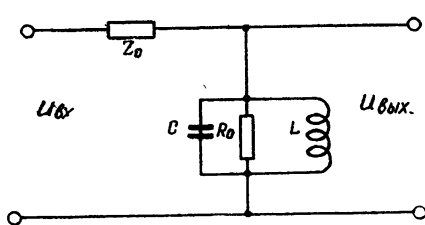


Рис. 1.

где f_0 — резонансная частота, F — частота модуляции.

Для того, чтобы убедиться в этом, рассмотрим простейшую эквивалентную схему резонатора (рис. 1). Коэффициент передачи такой системы может быть записан в виде:

$$k_{12} = \frac{k_0}{1 + jQ_n x}, \quad (2)$$

где $k_0 = \frac{R_0}{R_0 + Z_0}$ — коэффициент передачи при резонансе, $Q_n = \frac{Z_0 R_0}{Z_0 + R_0} \sqrt{\frac{C}{L}}$ — нагруженная добротность резонатора с учетом потерь как в R_0 , так и в Z_0 , $x = \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}$ — относительная расстройка и ω_0 — круговая резонансная частота. Как следует из (2), сдвиг фазы выходного напряжения для произвольной частоты определяется соотношением

$$\operatorname{tg} \varphi = -Q_n x. \quad (3)$$

Для малых расстроек $\Delta\omega$

$$\operatorname{tg} \varphi \cong -Q_n \frac{2\Delta\omega}{\omega_0}. \quad (4)$$

Рассмотрим воздействие на резонансный контур модулированного по амплитуде напряжения

$$\begin{aligned} u_{\text{вх}} &= U_m (1 + m \cos \Omega t) \cos \omega_0 t = \\ &= U_m \left[\cos \omega_0 t + \frac{m}{2} \cos (\omega_0 + \Omega) t + \frac{m}{2} \cos (\omega_0 - \Omega) t \right] \end{aligned} \quad (5)$$

(m — глубина модуляции).

Предположим, что частота ω_0 совпадает с резонансной частотой резонатора. Тогда выходное напряжение может быть записано следующим образом:

$$\begin{aligned} u_{\text{вых}} &= k_0 U_m \left\{ \cos \omega_0 t + \frac{m_1}{2} \cos [(\omega_0 + \Omega)t + \Phi] + \frac{m_1}{2} \cos [(\omega_0 - \Omega)t - \Phi] \right\} = \\ &= k_0 U_m \{ 1 + m_1 \cos (\Omega t + \Phi) \} \cos \omega_0 t, \end{aligned} \quad (6)$$

где Φ — угол сдвига фазы, соответствующий расстройке Ω . Этот угол определяется равенством (4):

$$\Phi = \varphi_{|\Delta\omega = \Omega} = -\operatorname{arctg} \left(Q_n \frac{2\Omega}{\omega_0} \right). \quad (7)$$

Добротность Q_n может быть выражена через Φ из (7):

$$Q_n = \frac{\omega_0}{2\Omega} \operatorname{tg} |\Phi| = \frac{f_0}{2F} \operatorname{tg} |\Phi|, \quad (8)$$

что совпадает с (1).

Таким образом, подавая на резонатор амплитудно-модулированное напряжение и измеряя сдвиг фазы огибающей, можно определить добротность резонатора. Если угол мал (не более $10\text{--}15^\circ$), то с достаточной точностью можно считать добротность пропорциональной сдвигу фазы огибающей:

$$Q_n \cong \frac{f_0}{2F} |\Phi|. \quad (9)$$

2. СХЕМА УСТАНОВКИ

Схема установки, в которой применен фазовый метод для измерения добротности, приведена на рис. 2. Установка предназначена для измерения добротности резонаторов, имеющих одну связь

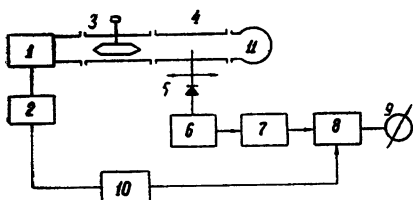


Рис. 2. Схема установки для измерения добротности фазовым методом:

1—генератор АМ СВЧ колебаний; 2—генератор модулирующего напряжения; 3—развязывающий аттенюатор; 4—измерительная линия с подвижным зондом; 5—кристаллический детектор; 6—усилитель; 7—фазовращатель; 8—фазометр; 9—индикатор фазометра; 10—фазовращатель; 11—измеряемый резонатор.

с внешней цепью. Генератор амплитудно-модулированных СВЧ колебаний 1 через развязывающий аттенюатор 3 и измерительную линию 4 подает СВЧ колебания на резонатор 11. Для измерения добротности зонд линии 4 должен быть установлен в такой плоскости, в которой эквивалентная схема системы справа от зонда может быть представлена в виде параллельного колебательного контура. Тогда эквивалентная схема всей установки совпадает с изображенной на рис. 1, причем Z_0 в данном случае соответствует волновому сопротивлению линии, к которой присоединен резонатор. Сигнал зонда, установленного таким образом, пропорционален напряжению на контуре. Этот сигнал детектируется детектором 5. Выделенная огибающая затем усиливается и подается на фазометр 8, где сравнивается по фазе с опорным напряжением. В качестве последнего используется напряжение, вырабатываемое генератором модулирующего напряжения. Измеренная разность фаз дает возможность вычислить нагруженную добротность с помощью соотношений (1) или (8).

3. ИЗМЕРЕНИЕ СОБСТВЕННОЙ ДОБРОТНОСТИ

Установка, схема которой приведена на рис. 2, позволяет измерять не только нагруженную, но также и собственную добротность резонатора. Для этого достаточно сдвинуть зонд измерительной линии на четверть волны от его положения при измерении нагруженной добротности и измерить сдвиг фазы огибающей Φ' в этом положении.

Коэффициент передачи такой системы, как нетрудно показать, равен

$$k'_{12} = \frac{1 - k_0 + jQ_n x}{1 + jQ_n x}. \quad (10)$$

Фазовый угол коэффициента передачи определяется соотношением:

$$\varphi' = \text{arctg} \frac{Q_n x}{1 - k_0} - \text{arctg} Q_n x. \quad (11)$$

Выполнив те же преобразования, что и при выводе (8), получим, что сдвиг фазы огибающей в этом случае будет равен

$$\Phi' = \operatorname{arctg} \left(-\frac{Q_n}{1-k_0} \frac{2F}{f_0} \right) - \operatorname{arctg} \left(Q_n \frac{2F}{f_0} \right). \quad (12)$$

Первый член в правой части равенства может быть преобразован:

$$\operatorname{arctg} \left(-\frac{Q_n}{1-k_0} \frac{2F}{f_0} \right) = \operatorname{arctg} \left(\frac{\frac{Z_0 R_0}{Z_0 + R_0} \sqrt{\frac{C}{L}}}{1 - \frac{R_0}{Z_0 + R_0}} \frac{2F}{f_0} \right) = \operatorname{arctg} \left(Q_0 \frac{2F}{f_0} \right).$$

Здесь $Q_0 = R_0 \sqrt{\frac{C}{L}}$ — собственная добротность резонатора, учитывающая потери лишь в R_0 . Кроме того, согласно (7),

$$\operatorname{arctg} \left(Q_n \frac{2F}{f_0} \right) = -\Phi$$

и, следовательно,

$$\Phi' = \operatorname{arctg} \left(Q_0 \frac{2F}{f_0} \right) + \Phi. \quad (13)$$

Из последнего соотношения находим

$$Q_0 = \frac{f_0}{2F} \operatorname{tg}(\Phi' - \Phi). \quad (14)$$

Как показывает сравнение (7) и (13), угол Φ' положителен, в то время как Φ — отрицателен, т. е. Φ' соответствует опережению огибающей, а угол Φ — отставанию. С учетом знака Φ имеем:

$$Q_0 = \frac{f_0}{2F} \operatorname{tg}(\Phi' + |\Phi|), \quad (15)$$

так что для определения Q_0 достаточно двух измерений.

4. ПРОЦЕСС ИЗМЕРЕНИЯ

Как видно из предыдущего, для измерения Q_n и Q_0 необходимо настроить генератор и резонатор так, чтобы частота несущей амплитудно-модулированных колебаний совпала с резонансной частотой резонатора. Кроме того, необходимо установить зонд измерительной линии в определенное положение.

Рассмотрим более детально процесс измерения Q_n и Q_0 и выясним, как производится соответствующая настройка прибора перед измерением.

В зависимости от конструкции измеряемого резонатора удобно применять различную методику настройки.

Вначале предположим, что резонатор может перестраиваться в достаточно широком диапазоне частот. На рис. 3 изображена схема, представляющая соединение такого резонатора с отрезком линии, снабженной подвижным зондом. На сверхвысоких частотах плоскость, соответствующая точкам АВ эквивалентной схемы резонатора, обычно недоступна для помещения в нее зонда. Поэтому зонд приходится устанавливать на расстоянии целого числа полуволн от плоскости АВ. Поскольку положение этой плоскости точно не известно, то для нахождения нужного

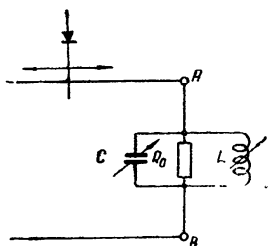


Рис. 3. Эквивалентная схема резонатора, присоединенного к линии с подвижным зондом.

положения зонда применяется следующий прием. Резонатор расстраивают так, чтобы его резонансная частота была далека от частоты колебаний генератора; тогда сопротивление резонатора в плоскости АВ приближается к короткому замыканию. В линии образуется стоячая волна напряжения, один из узлов которой находится в плоскости АВ. Остальные узлы находятся на расстоянии целого числа полуволн от плоскости АВ. Теперь достаточно установить зонд в ближайший к АВ доступный минимум напряжения, после чего резонатор должен быть настроен в резонанс. Настройка в резонанс производится с индикацией по фазометру, так как при резонансе сдвиг фазы огибающей достигает максимума. Затем с помощью фазометра измеряется угол Φ и находится нагруженная добротность по формуле (1).

Перед измерениями необходимо установить нулевой начальный сдвиг фазы. Для этого после расстройки резонатора зонд измерительной линии следует сначала поставить в максимум стоячей волны и с помощью одного из фазовращателей 7 или 10 (рис. 2) установить нулевую разность фаз. При этом автоматически вводится поправка на отрезок линии между зондом и плоскостью АВ резонатора. Отсчет угла Φ может быть сделан либо непосредственно по показанию индикатора фазометра, либо с помощью градуированного фазовращателя. В последнем случае фазовращателем компенсируют измеряемую разность фаз и производят отсчет угла Φ , пользуясь градуировкой фазовращателя.

Для получения величины собственной добротности Q_0 необходимо измерить угол Φ' , передвинув зонд на расстояние четверти волны от его положения при измерении Q_n . Можно, однако, непосредственно получить сумму углов $\Phi' + |\Phi|$, необходимую для вычисления Q_0 . Для этой цели после измерения Q_n одним из фазовращателей вводят сдвиг фазы, необходимый для компенсации угла Φ . Затем зонд перемещают на четверть волны. При этом в схему уже введен сдвиг фаз, равный Φ . Из этого сдвига вычитается угол Φ' ; так как углы Φ и Φ' имеют противоположные знаки, то общий сдвиг фазы, который получается в результате, будет равен $\Phi' + |\Phi|$.

Если резонатор имеет фиксированную настройку, то процесс измерения будет иным: приходится расстраивать не резонатор, а генератор. Поскольку при перестройке генератора электрическая длина отрезка линии от плоскости АВ несколько изменяется, то положение зонда, найденное, как описано выше, оказывается неточным. Поэтому генератор не следует слишком сильно расстраивать относительно резонансной частоты резонатора. Кроме того, после настройки генератора в резонанс приходится вновь уточнить положение зонда, добываясь максимального показания фазометра. Измерение Q_0 производится так же, как и в предыдущем случае.

Установка, в которой применен фазовый метод измерения добротности, позволяет наблюдать малые изменения нагруженной добротности и измерять их с большой точностью. С этой целью после того, как установка настроена для измерения Q_n , фазовращателем компенсируют возникший сдвиг фазы Φ . После компенсации можно увеличить чувствительность фазометра и наблюдать изменения добротности на растянутой шкале индикатора фазометра. Таким способом исключается или уменьшается ряд погрешностей измерения, благодаря чему малые разности добротностей измеряются с более высокой точностью.

5. ПОГРЕШНОСТИ МЕТОДА

Рассмотрим возможные погрешности метода. Часть из них свойственна также многим амплитудным методам; другие присущи только описываемому фазовому методу. Из первой группы погрешностей следует назвать систематическую погрешность за счет наличия между зондом и резонатором отрезка линии конечной длины, а также ошибку, возникающую вследствие отражений от генератора. Абсолютная величина первой ошибки равна

$$\Delta Q_H = \pi n \left(\frac{\lambda_B}{\lambda} \right)^2,$$

где n — число волн, укладываемых в отрезке линии между резонатором и зондом, λ_B — длина волны в этой линии, λ — длина волны в свободном пространстве. Эта погрешность может быть значительно уменьшена путем введения поправки в результат измерения. При внесении поправки погрешность не превышает 1%. Как было указано выше, поправка вносится автоматически при установке нуля фазы.

Относительная ошибка вследствие отражения от генератора не превосходит величины $\rho - 1$, где ρ — КСВН развязки и генератора. Если $\rho = 1,03$, то эта погрешность может быть доведена до величины, меньшей 3%.

К первой группе ошибок относятся также случайные ошибки, возникающие благодаря неточной настройке в резонанс и неточной установке зонда в нужное положение. Пользуясь методом медленно меняющихся амплитуд [2], можно показать, что ошибка из-за неточной настройки равна

$$\frac{\Delta Q_H}{Q_H} = \left(\frac{2\Delta f}{\Delta f_{\frac{1}{2}}} \right)^2,$$

где Δf — ошибка в настройке в резонанс, $\Delta f_{\frac{1}{2}}$ — полоса пропускания резонатора, измеренная между точками половинной мощности. Если принять, что ошибка в настройке составляет 5% от полосы пропускания, то погрешность не превышает 1%.

Ошибка за счет неточной установки зонда, как можно показать, равна

$$\frac{\Delta Q_H}{Q_H} = \left(\frac{2\pi l}{\lambda_B} \right)^2 \rho_0 + 1,$$

где l — смещение зонда от правильного положения, ρ_0 — КСВН резонатора при резонансе.

Величина ρ_0 обычно бывает довольно большой — порядка 3–5. Если $\frac{2\pi l}{\lambda_B} < 0,17$ (т. е. меньше 10°), то погрешность не превышает 1,5%. При меньших значениях ρ_0 погрешность, вычисленная по приведенной формуле, возрастает. Однако следует иметь в виду, что установка зонда производится по максимальному показанию фазометра. Поэтому с уменьшением ρ_0 возрастает точность установки зонда в нужное положение, так как меньшим сдвигам зонда соответствует большее изменение показаний фазометра. Погрешность остается при этом примерно постоянной, порядка 1–1,5%.

Специфичными для фазового метода являются следующие источники погрешностей: а) погрешность измерения фазы, б) погрешность за счет неточной настройки модулятора. Погрешность измерения добротности за счет ошибки измерения фазы равна

$$\frac{\Delta Q_H}{Q_H} = \frac{2\Phi}{\sin 2\Phi} \frac{\Delta\Phi}{\Phi}.$$

Если $\Phi \leq \pi/4$, то $\Delta Q_n/Q_n \leq 1,57 \Delta\Phi/\Phi$. При ошибке $\Delta\Phi/\Phi = 2\%$ это дает для $\Delta Q_n/Q_n$ величину около 3%.

При неточной настройке модулятора амплитудно-модулированное напряжение содержит также паразитную фазовую модуляцию. Фазовая модуляция сказывается в том, что векторы боковых частот, хотя и равны по величине, но расположены несимметрично относительно вектора несущей частоты. Если отклонение вектора несущей частоты от биссектрисы угла между боковыми частотами равно φ , то погрешность определяется равенством $\Delta Q_n/Q_n = \varphi^2/2$. При $\varphi \leq 8^\circ$ (что, как показал опыт, вполне достижимо) погрешность $\Delta Q_n/Q_n \leq 1\%$.

В итоге суммарная систематическая погрешность не превышает 4%, случайная погрешность не превышает 6,5%. Таким образом, общая погрешность менее 10,5%; вероятная ошибка — около 8,5%.

При измерении малых изменений добротности ряд погрешностей исключается или значительно уменьшается. Так, погрешность за счет отрезка линии между резонатором и зондом исчезает. Абсолютная величина погрешности за счет отражения от генератора значительно уменьшается. То же относится к погрешности за счет неточной установки зонда. Значительно уменьшается также погрешность измерения фазы.

Заметим, что погрешность за счет неточной настройки в резонанс исключается, если изменение добротности не связано с изменением резонансной частоты. В противном случае необходима дополнительная подстройка, вследствие чего может возникнуть некоторая дополнительная ошибка.

В результате исключения или значительного уменьшения ряда ошибок общая погрешность измерения разности добротностей может быть доведена до величины $10 \div 15\%$ (при величине разности, составляющей 10% от начального значения измеряемой добротности).

6. НЕКОТОРЫЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКЕ

Практически осуществленный вариант установки предназначен для измерения добротности резонаторов трехсантиметрового диапазона. Блок-схема этой установки приведена на рис. 2. В качестве измерительной линии использована волноводная измерительная линия типа 33 И (канал 10×23). Узкополосный зонд этой линии заменен широкополосным. Для амплитудной модуляции применен кристаллический модулятор. Схема модулятора приведена на рис. 4. Основой модулятора является согласованный двойной тройник 2. К его Н-плечу присоединен кристаллический детектор 3, настраиваемый короткозамыкающим поршнем 4. К Е-плечу присоединен второй короткозамыкающий поршень 1. В одно боковое плечо подается СВЧ сигнал, который делится поровну между Н- и Е-плечами. На кристаллический детектор подается также модулирующее напряжение, благодаря чему коэффициент отражения детектора периодически меняется. Это приводит

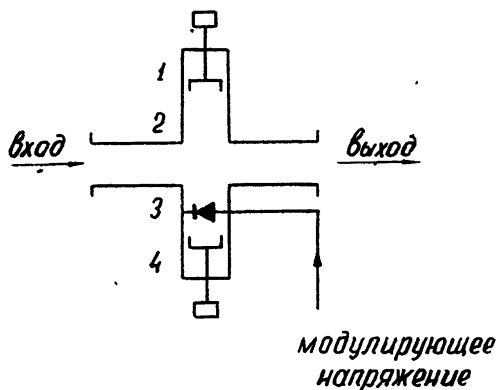


Рис. 4. Схема модулятора.

к амплитудной модуляции напряжения на выходе модулятора. С помощью перемещения поршня I может быть уничтожена паразитная фазовая модуляция. Для развязки между генератором и модулятором включен аттенуатор.

Электронная схема, предназначенная для измерения фазы, позволяет измерять разность фаз на выбранной частоте модулирующего напряжения, равной 5 мгц. При питании от внешнего генератора частота модулирующего напряжения может меняться в пределах от 2,5 мгц до $15 \div 20$ мгц. Фазометр работает на фиксированной частоте 500 кгц, к которой преобразуется сигнал и опорное напряжение.

Измерения разности фаз могут производиться как путем отсчета по градуированному фазовращателю, так и по стрелочному индикатору фазометра. Показания последнего в широких пределах не зависят от амплитуды сигнала.

Фазометр имеет 4 шкалы: 0—90°, 0—30°, 0—10° и индикаторную шкалу, соответствующую максимальной чувствительности. Погрешность измерения разности фаз до 30° не превышает 2%, до 75° — менее 3%.

Подробное описание электронных схем выходит за пределы настоящей статьи.

7. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ПРОВЕРКИ МЕТОДА

Проверка фазового метода производилась путем измерения добротности короткозамкнутых отрезков волноводов, а также нескольких резонаторов. Добротность отрезков волноводов вычислялась с учетом потерь в стенках по формуле

$$Q_n = \frac{\rho - 1}{\rho} \pi n \left(\frac{\lambda_B}{\lambda} \right)^2,$$

где ρ — КСВН отрезка волновода, n — число волн, укладываемых в отрезке волновода.

Для измерений использовались два отрезка волновода: один длиной в 1 м, другой — 2 м.

Усредненные результаты измерения приведены в таблице 1.

Таблица 1

№№ отрезка	Длина	ρ	Q_n расчетная	Q_n измеренная	Ошибка
1	1 м	19	125	124	— 0,8%
2	2 м	10	238	240	+ 0,84%

Разброс измеренных значений вследствие тщательной настройки оказался меньше приведенных ранее максимальных оценок и составил $1,5 \div 2\%$.

Кроме определения добротности отрезков волноводов, на установке производились измерения добротности пяти резонаторов. Резонаторы представляли собой короткозамкнутые отрезки волноводов с индуктивной диафрагмой на входе. Добротность резонаторов предварительно измерялась по наклону кривой, изображающей частотную зависимость положения минимума стоячей волны в измерительной линии [3]*. Измерения производились несколько

* Указанный метод является наиболее точным из всех известных методов для резонаторов с сильной связью (с большим КСВН при резонансе).

раз, после чего бралось среднее значение. Среднеквадратичное отклонение от среднего и систематическая ошибка измерений по расчетам не превышали 2%.

Усредненные результаты измерений добротности Q_n по наклону кривой соответствующей частотной зависимости положения минимума стоячей волны и фазовым методом приведены в таблице 2.

Таблица 2

Метод измерения \ №№ резонаторов	1	2	3	4	5
По наклону кривой положения минимума	230	278	380	325	236
Фазовый метод	231	270	365	315	224
Разность в %	0,5	2,9	4	3	5

Заметим, что разработанный метод особенно удобен для исследования электромагнитных свойств различных материалов, так как позволяет удобно и точно измерять малые изменения добротности. В частности, предполагается применить этот метод для исследования ферромагнитного резонанса в никеле и ферритах.

В заключение приношу благодарность И. А. Шехтману за полезную дискуссию, а также А. А. Морозову, выполнившему значительную часть трудоемкой работы по измерению резонаторов различными методами.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. М. М. Карлинер, Г. В. Кириллов, Авт. свид. № 02361 (1954).
2. С. И. Евтянов, Переходные процессы в приемно-усилительных схемах, Связь-издат, М., 1948.
3. Магнетроны сантиметрового диапазона, ч. II, изд. Сов. радио, М., 1951.

Поступила в редакцию
13 ноября 1957 г.