

В работе рассмотрены принципы действия, устройство и применение измерителей добротности и рефлектометров. Приведены примеры типовых приборов. Дан анализ их погрешностей.

В настоящем учебном пособии изложена теоретическая часть к лабораторным работам № 4 и 6 (см. Д.Б. Владимиров и др. "Руководство к лабораторным работам по курсу "Электрические и радиотехнические измерения". - МАИ, 1975). Пособие предназначено для самостоятельной проработки студентами третьего курса факультета радиозлектроники летательных аппаратов в процессе подготовки к указанным лабораторным работам.

Глава 1. ИЗМЕРИТЕЛИ ДОБРОТНОСТИ

1.1. Эквивалентные схемы катушки индуктивности и конденсатора на радиочастотах

Каждый элемент радиотехнической цепи - резистор, конденсатор, катушка индуктивности - обладает определенными геометрическими размерами и, когда он находится под током высокой частоты, в пространстве внутри и вне его образуется электромагнитное поле. При этом поле каждого элемента имеет обе составляющие - как электрическую, так и магнитную, но в конденсаторах главная часть энергии сконцентрирована в электрическом поле, а в катушках индуктивности - в магнитном.

В теории электрических цепей действие полей учитывается понятиями индуктивности и емкости: в конденсаторах емкость является главным параметром, а индуктивность - побочным; в катушках индуктивности - наоборот.

Часть энергии электрического поля каждого элемента цепи рассеивается в виде тепла. Для учета потерь энергии служит понятие активного сопротивления. В радиочастотных конденсаторах и катушках индуктивности рассеяние энергии обычно мало и их активное сопротивление тоже является побочным параметром.

(С) Московский авиационный институт, 1980 г.

Влияние побочных параметров на работу катушки индуктивности и конденсатора рассчитывается с помощью эквивалентных схем. Для катушки индуктивности применяется схема, изображенная на рис.1.1,а.

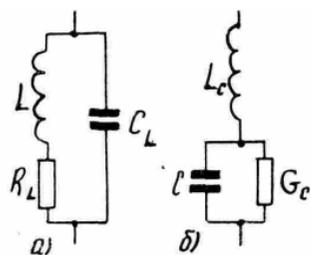


Рис.1.1

Основной параметр - индуктивность обозначен буквой L ; побочные параметры: R_L - сопротивление потерь и C_L - собственная емкость катушки.

Из-за собственной емкости проводимость катушки

$$\frac{1}{X_L} = \frac{1}{\omega L} (1 - \omega^2 LC_L),$$

где ω - рабочая частота. Следовательно, из-за собственной емкости индуктивность катушки

"кажется" несколько больше действительного значения:

$$L_{КАЖ} = L \frac{1}{1 - \omega^2 LC_L} \approx L(1 + \omega^2 LC_L). \quad (1.1)$$

Из эквивалентной схемы (рис. 1.1, а) видно, что катушка индуктивности должна иметь собственную резонансную частоту ω_L , поскольку представляет собою параллельное соединение L и C_L . Однако сама собственная емкость катушки зависит от частоты, особенно вблизи собственного резонанса. Поэтому считают приближенное представление катушки в виде параллельного соединения постоянных L и C_L правомерным только при $\omega \leq \frac{1}{3}\omega_L$. Отсюда же следует, что $\omega_L \neq \frac{1}{\sqrt{LC_L}}$, где C_L - значение собственной емкости катушки, полученное для указанного диапазона частот.

Сопротивление потерь R_L в катушке тоже зависит от частоты. Кроме того, оно зависит и от индуктивности: чем больше L , тем больше число витков, длина провода, которым намотана катушка, и сопротивление этого провода. Поэтому более удобно оценивать качество катушки не сопротивлением потерь, а значением добротности $Q_L = \frac{\omega L}{R_L}$, которое не так сильно зависит от

индуктивности и частоты, или затуханием $d_L = \frac{1}{Q_L} = \frac{R_L}{\omega L}$.

Добротность радиочастотной катушки бывает от нескольких десятков до нескольких сотен единиц.

Эквивалентная схема радиочастотного конденсатора представлена на рис. 1.1,б. Здесь буквами C обозначена емкость

конденсатора (главный параметр), G_c - проводимость потерь в конденсаторе и L_c - его собственная индуктивность.

Поскольку проводимость потерь в конденсаторе растет при увеличении емкости и частоты, для оценки качества конденсаторов

пользуются понятием угла потерь $\delta \approx \operatorname{tg} \delta = \frac{G_c}{\omega C}$

или добротности конденсатора $Q_c = \frac{1}{\operatorname{tg} \delta} = \frac{\omega C}{G_c}$.

Добротность радиочастотных конденсаторов по крайней мере на порядок выше добротности катушек индуктивности. Поэтому добротность колебательного контура, состоящего из катушки индуктивности и конденсатора, обычно приравнивается к добротности катушки.

Собственная индуктивность радиочастотного конденсатора определяется главным образом индуктивностью его выводных проводников. Из схемы рис. 1.1,б находим входное сопротивление конденсатора

$$X_c = \frac{1}{\omega C} (1 - \omega^2 L_c C) \quad (1.2)$$

отсюда кажущаяся емкость конденсатора

$$C_{КАЖ} = C \frac{1}{1 - \omega^2 L_c C} \approx C(1 + \omega^2 L_c C) \quad (1.3)$$

несколько больше истинной.

Из формулы (1.2) видно, что при повышении частоты сопротивление конденсатора сначала уменьшается, затем обращается в нуль, а при дальнейшем увеличении частоты изменяет свой знак и растет. Следовательно, на верхних частотах такой конденсатор ведет себя не как емкость, а как индуктивность.

Конденсаторы с большой собственной индуктивностью непригодны для работы в качестве фильтрующих элементов и для ряда других целей. Поэтому конструкторы высокочастотной радиоаппаратуры стараются уменьшить собственную индуктивность конденсаторов, укорачивая до минимума длину их выводных проводников при монтаже.

1.2. Резонансные методы измерения индуктивности катушек и емкости конденсаторов

При измерении индуктивности резонансным методом катушку присоединяют к измерительному конденсатору, емкость которого известна, и получившийся контур слабо связывают с измерительным генератором. Для индикации резонанса к контуру присоединяют электронный вольтметр (рис. 1.2,а).

Изменением емкости конденсатора или частоты генератора добиваются резонанса (по максимуму показаний вольтметра). Зная емкость конденсатора C_o и частоту резонанса ω_p , можно вычислить измеряемую (кажущуюся) индуктивность катушки по формуле

$$L_{КАЖ} = \frac{1}{\omega_p^2 C_o}. \quad (1.4)$$

Значения ω_p отсчитывают обычно по шкале генератора, а C_o - по шкале измерительного конденсатора.

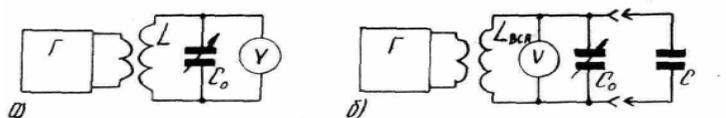


Рис. 1.2

Чтобы обойтись без вычислений, одну из величин, входящих в правую часть формулы (1.4) (ω_p или C_o), выбирают постоянной и тогда искомая индуктивность становится функцией только одной переменной: например, при $\omega_o = const$ $L_{КАЖ} = f(C_o)$. Шкалу отсчета этой переменной градуируют не в единицах ее измерения (емкости или частоты), а непосредственно в значениях измеряемой индуктивности.

Если в схеме, изображенной на рис. 1.2,а, вместо L включить измерительную катушку, индуктивность которой L_o известна, а вместо C_o присоединить измеряемый конденсатор C , то эту схему можно было бы использовать для измерения емкости

конденсатора: $C_{КАЖ} = \frac{1}{\omega_p^2 L_o}$. Однако точность и постоянство

параметров у измерительных катушек значительно хуже, чем у измерительных конденсаторов. Чтобы получить более высокую точность при измерении емкости конденсаторов, используется метод замещения. Схема соединения приборов для этого случая изображена на рис. 1.2,б. Измерения производятся с помощью измерительного контура, состоящего из вспомогательной катушки $L_{всп}$ и измерительного конденсатора. Присоединив измеряемый конденсатор C и установив значение емкости измерительного конденсатора C_o , близкое к его начальной емкости, изменяют частоту генератора до тех пор, пока не будет найден резонанс. Затем отключают конденсатор C и, оставив частоту генератора неизменной, увеличивают емкость измерительного конденсатора,

снова добиваясь резонанса, который наступит при емкости C_{o2}

Кажущаяся емкость измеряемого конденсатора $C_{КАЖ} = C_{o2} - C_{o1}$. Этот способ пригоден, когда емкость измеряемых конденсаторов меньше максимального изменения емкости измерительного конденсатора $C_{o_{max}} - C_{o_{min}}$. Если же емкость измеряемого конденсатора больше этого значения, то его включают в контур последовательно. Результат измерения в этом случае рассчитывается по формуле

$$\frac{1}{C_{каж}} = \frac{1}{C_{o2}} - \frac{1}{C_{o1}}$$

1.3 Погрешности и поправки при измерении индуктивности катушек и емкости конденсаторов резонансным методом

Погрешность измерения индуктивности при резонансном методе зависит от следующих причин:

- погрешности частоты генератора и емкости образцового конденсатора;
- неточности настройки измерительного контура в резонанс;
- остаточной индуктивности измерительного контура;
- влияния элементов связи с генератором и входного сопротивления вольтметра;
- собственной емкости измеряемой катушки.

Погрешности частоты генератора δ_ω и емкости измерительного конденсатора δ_c обычно указываются в паспорте приборов. Они имеют случайный характер и распределение, близкое к нормальному. Погрешность измерения индуктивности от этих составляющих может быть вычислена по следующей формуле: $\delta_1^{(L)} = \sqrt{(2\delta_\omega)^2 + \delta_c^2}$.

Неточность настройки в резонанс рассмотрим с помощью рис. 1.3, на котором изображена резонансная кривая колебательного контура. Из этого рисунка видно, что вблизи резонанса напряжение на контуре изменяется мало, вследствие чего нельзя точно определить значение резонансной частоты. Поэтому за резонансную частоту будет принята одна из частот полосы, в пределах которой напряжение на контуре отличается от максимума не более, чем на погрешность ΔU .

Воспользуемся уравнением резонансной кривой колебательного контура

$$\frac{U}{U_p} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(Q \frac{2\Delta\omega}{\omega_p}\right)^2}}, \quad (1.5)$$

где U_p и U - напряжение на конденсаторе контура при резонансной частоте ω_p и при расстройке на $\Delta\omega$. Положим в уравнении (1.5)

$U = U_p - \Delta U$. Подставляя в (1.5) и возводя правую и левую части

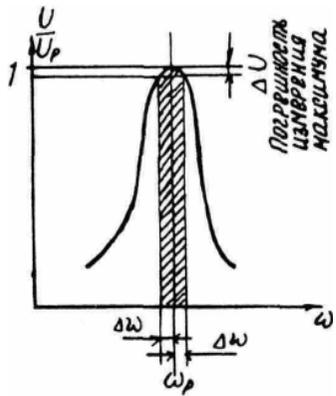


Рис. 1.3

полученного выражения в квадрат, находим

$$1 - \frac{2\Delta U}{U_p} \approx \frac{1}{1 + \left(Q \frac{2\Delta\omega}{\omega_p} \right)^2}$$

Отсюда получаем погрешность определения резонансной частоты контура

$$\frac{\Delta\omega}{\omega_p} \approx \frac{1}{2Q} \sqrt{2 \frac{\Delta U}{U_p}}$$

Погрешность измерения индуктивности в два раза больше погрешности резонансной частоты. Следовательно,

$$\delta_2^{(L)} \approx \frac{1}{Q} \sqrt{2 \frac{\Delta U}{U_p}} \quad (1.6)$$

Эта погрешность тоже имеет случайный характер. У стрелочных измерительных приборов $\Delta U = \delta_U U_{ном}$, где δ_U - основная погрешность и $U_{ном}$ - верхний предел измерения. Допустим, что

$\delta_U = 0,5\% U_{раб} \approx U_{ном}$. Тогда $\Delta U / U_p \approx 5 \cdot 10^{-3}$ и $\delta_2^{(L)} \approx 1/10Q$. Как видим, эта составляющая погрешности существенна только при малых значениях добротности измерительного контура; при $Q \geq 100$ ее можно не учитывать.

Остаточной индуктивностью называется суммарная индуктивность всех соединительных проводников, при помощи которых образуется измерительный контур. В процессе разработки измерителей индуктивности катушек принимают особые меры по уменьшению остаточной индуктивности: уменьшают длину соединительных проводников, выполняют их в виде широких плоских шин. В измерительных конденсаторах применяют специальный (гребенчатый) токосъем. В результате удается снизить остаточную индуктивность $L_{ост}$ до 0,01-0,02 мкГ. При измерениях остаточная индуктивность добавляется к измеряемой так, что в результате

$L_{КАЖ} + L_{ост} = 1/\omega_p^2 C_o$. Погрешность от остаточной индуктивности имеет систематический характер и ее можно исключить, введя поправку:

$$L_{КАЖ} = \frac{1}{\omega_p^2 C_o} - L_{ост}. \text{Эту поправку целесообразно вводить только при}$$

измерении малых индуктивностей.

Рассмотрим влияние элементов связи измерительного контура с генератором. Описание метода измерения индуктивности было дано на примере с индуктивной связью (см.рис. 1.2,а). Для более общего случая на рис. 1.4,а приведена схема связи с помощью комплексного сопротивления $\dot{Z}_{св}$. Применяя теорему об эквивалентном генераторе, эту схему можно привести к виду, представленному на рис. 1.4,б, где

$$E' = E \frac{\dot{Z}_{св}}{\dot{Z}_r + \dot{Z}_{св}}, \text{ а } \dot{Z}_3 = \frac{\dot{Z}_{св} Z_r}{\dot{Z}_{св} + \dot{Z}_r}.$$

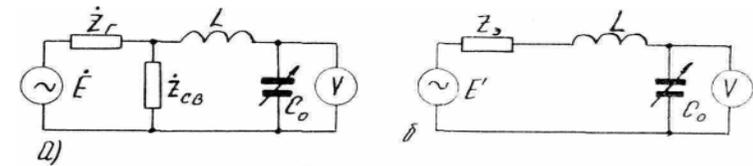


Рис. 1.4

При резонансных измерениях обычно используется слабая связь. Следовательно, $|\dot{Z}_{св}| \ll |\dot{Z}_r|$ и $\dot{Z}_3 \approx \dot{Z}_{св}$. Если $\dot{Z}_{св} = R_{св} + jX_{св}$, то из-за $R_{св}$ ухудшается острота резонансной кривой измерительного контура (падает его добротность), а $X_{св}$ вносит расстройку, так что резонанс будет иметь место не при условии (1.4), а при $L_{КАЖ} = \frac{1}{\omega_p^2 C_o} - \frac{X_{св}}{\omega_p}$.

Таким образом, неучет $X_{св}$ приводит к дополнительной погрешности $\Delta L = X_{св} / \omega_p$. Аналогично влияет и входная проводимость вольтметра, используемого в качестве индикатора резонанса. Активная составляющая вносит в контур дополнительное затухание, а входная емкость вольтметра прибавляется к емкости измерительного конденсатора, из-за чего получается неправильный отсчет C_o . Действие входной емкости вольтметра можно учесть, если шкалу измерительного конденсатора градуировать при подключенном вольтметре.

Из-за собственной емкости катушки в результате измерений получается недействительное значение индуктивности, а кажущееся. Действительное значение L можно вычислить, несколько преобразовав формулу (1.1):

$$L = L_{КАЖ} (1 - \omega^2 L C_L).$$

Так как $\omega_p^2 L \approx \omega_p^2 L_{каж} = \frac{1}{C_0}$, то, заменяя в (1.7) $\omega^2 L$ на $\frac{1}{C_0}$,

получаем
$$L = L_{каж} \left(1 - \frac{C_L}{C_0}\right). \quad (1.8)$$

Для введения этой поправки надо знать значение собственной емкости катушки C_L .

Следует отметить также, что результат измерения индуктивности неэкранированной катушки в значительной степени зависит от близости ее к корпусу измерительного прибора и других предметов, рук экспериментатора и т.п. За всеми подобными влияниями необходимо следить при выполнении экспериментов и по возможности стремиться их устранять.

Погрешность измерения емкости при – методе замещения обусловлена следующими причинами:

- а) неточностью измерительного конденсатора;
- б) неточностью настройки в резонанс;
- в) изменениями частоты за время измерения;
- г) собственной индуктивностью исследуемого конденсатора.

Значение первой составляющей δ_c берется из паспорта

измерительного конденсатора. Вторую составляющую можно определить аналогично (1.6):

$$\delta_{срез} = \frac{1}{Q} \sqrt{2 \frac{\Delta U_r}{U_p}}$$

В сумме эти две составляющие образуют полную относительную погрешность измерительного конденсатора для одной настройки в резонанс:

$$\delta_{CO} = \sqrt{\delta_c^2 + \delta_{срез}^2}.$$

Полная абсолютная погрешность измерительного конденсатора для одной настройки $\Delta C_0 = \delta_{CO} C_0$. Так как результат измерения при параллельном

подключении измеряемого конденсатора определяется как разность двух резонансных значений емкости измерительного конденсатора

$C_{каж} = C_{02} - C_{01}$, то погрешность измеренного значения $C_{каж}$ от

первых
двух причин

$$\Delta C_{каж1} = \sqrt{(\Delta C_{01})^2 + (\Delta C_{02})^2} = \sqrt{(\delta_{C01} C_{01})^2 + (\delta_{C02} C_{02})^2}.$$

При последовательном подключении измеряемого конденсатора погрешность от первых двух причин вычисляется аналогично. Только

вместо абсолютных погрешностей ΔC_{01} и ΔC_{02} надо находить

абсолютные

погрешности обратных величин $\Delta\left(\frac{1}{C_{01}}\right)$ и $\Delta\left(\frac{1}{C_{02}}\right)$

Изменение частоты генератора на $\frac{\Delta \omega_r}{\omega_r}$ за время между первой и второй

настройками вызовет погрешность в определении емкости C_{02} а значит, и в значении измеряемой емкости:

$$\Delta C_{02\omega} = 2 \frac{\Delta \omega_r}{\omega_r} C_{02} = -\Delta C_{каж2}$$

Частота генератора может изменяться из-за изменения питающих напряжений и температуры. Чтобы уменьшить уход частоты, следует перед измерением дать прибору прогреться при включенном питании в течение 15-20 минут. Кроме того, измерение надо выполнять быстро.

Как было показано в разд. 1.1, из-за собственной индуктивности конденсатора его емкость при измерениях представляется несколько завышенной. Из формулы (1.8) найдем действительное значение емкости конденсатора

$$C = C_{каж} \left(1 - \omega^2 L_c C\right) \approx C_{каж} \left(1 - \omega^2 L_c C_{каж}\right) \quad (1.9)$$

На высоких частотах разница между C и $C_{каж}$ может быть

довольно большой. Например, при измерении емкости конденсатора $C=100\text{пФ}$, присоединенного к измерительному контуру двумя проводниками диаметром 0,5 мм и длиной по 5 см каждый на частоте 15 МГц, эта разница достигает 9%.

1.4. Резонансные методы измерения добротности и сопротивления потерь

От добротности зависит усиление напряжения колебательным контуром и форма его резонансной кривой (ширина полосы пропускания). На использовании этих зависимостей основаны следующие методы измерения добротности:

- 1) метод резонансного усиления;
- 2) метод вариации частоты;
- 3) метод вариации емкости;
- 4) метод вариации активного сопротивления.

На рис. 1.5 представлена схема, иллюстрирующая метод резонансного усиления. ЭДС E вводится в последовательный контур, состоящий из L , C и сопротивления потерь R . При резонансе напряжение на конденсаторе $U_C = QE$, где Q - добротность контура.

Если E задано, а U_C измерено с помощью вольтметра, то

$$Q = \frac{U_C}{E} \quad (1.10)$$

При постоянном значении E шкала вольтметра может быть проградуирована прямо в значениях добротности. Такой метод очень удобен, что и послужило поводом к созданию специальных измерительных приборов (Q -метров, основанных на нем.

Метод вариации частоты основан на зависимости

$$Q = \frac{\omega_r}{2\Delta\omega} \sqrt{\left(\frac{U_p}{U}\right)^2 - 1} = \frac{f_p}{2\Delta f} \sqrt{\left(\frac{U_p}{U}\right)^2 - 1}, \quad (1.11)$$

которая легко может быть получена из уравнения резонансной кривой колебательного контура (1.5). В качестве измерительной схемы можно взять представленную на рис. 1.2,а или какую либо подобную ей. Изменением частоты генератора находят резонанс (по максимуму показаний вольтметра). Записав значения U_p и f_p , изменяют частоту генератора в обе стороны от резонансной, следя за тем, чтобы вольтметр при обеих расстройках давал одинаковые показания, равные некоторому значению U_1 . Фиксируют соответствующие ему значения частот f_1 и f_2 . После этого вычисляют добротность по формуле

$$Q = \frac{f_p}{f_2 - f_1} \sqrt{\left(\frac{U_p}{U_1}\right)^2 - 1} \quad (1.11)$$

Метод вариации емкости отличается от предыдущего тем, что расстройка выполняется не изменением частоты генератора, а изменением емкости самого контура, для чего в нем должен быть проградуированный конденсатор переменной емкости. Добротность вычисляется по следующей формуле:

$$Q = \frac{2C_p}{C_2 - C_1} \sqrt{\left(\frac{U_p}{U_1}\right)^2 - 1}, \quad (1.13)$$

где C_p - емкость контура при резонансе, а C_1 и C_2 - при расстройке.

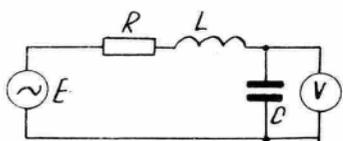


Рис. 1.5

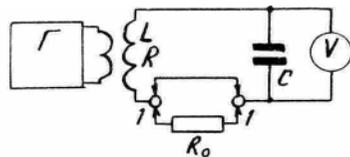


Рис. 1.6

Вычисления при методах вариации частоты и емкости можно упростить, если напряжение при расстройке $U_1 = \frac{U_p}{\sqrt{2}}$

Тогда из формул (1.12) и (1.13) получаем $Q = \frac{f_p}{f_2 - f_1}$; $Q = \frac{2C_p}{C_2 - C_1}$

В методе вариации активного сопротивления (рис. 1.6) в контур, настроенный в резонанс, вместо переключки, соединяющей гнезда 1, вводится измерительный резистор R_0 с известным сопротивлением. От этого добротность контура уменьшится и напряжение, показываемое вольтметром, упадет со значения U_p до U_p^1 . Отношение показаний

$$\text{вольтметра} \quad \frac{U_p^1}{U_p} = \frac{Q^1}{Q} = \frac{R}{R + R_0},$$

где Q^1 - добротность контура, нагруженного резистором R_0 . Из этого выражения можно определить значение сопротивления потерь контура: $R = \frac{R_0}{(U_p/U_p^1) - 1}$. Зная L , R и ω , нетрудно вычислить

добротность контура по формуле $Q = \frac{\omega L}{R}$.

Из описанных четырех методов измерения добротности наиболее удобен метод резонансного усиления, так как только он позволяет получить непосредственный отсчет. В защиту методов вариации частоты и емкости можно отметить, что они появились задолго до изобретения Q -метров и благодаря своей универсальности и гибкости успешно применяются в настоящее время в тех частотных диапазонах, где Q -метров, основанных на принципе резонансного усиления, еще нет (например, в диапазоне сверхвысоких частот при измерении добротности колебательных систем с распределенными постоянными).

1.5. Разновидности Q -метров

На рис. 1.7 приведена обобщенная структурная схема Q -метра. Она состоит из следующих основных частей: генератора высокой частоты, устройства связи генератора с измерительным контуром, измерителя напряжения связи E , вводимого в контур (см. разд. 1.4), измерительного конденсатора переменной емкости C_0 и электронного вольтметра, измеряющего напряжение на этом конденсаторе. Измеряемая катушка присоединяется к зажимам 1—2. Разница между Q -метрами различных моделей заключается главным образом в принципах создания связи измерительного контура с генератором и измерения напряжения связи.

Основные требования к этим устройствам заключаются в следующем:

1. Устройство связи должно исключать влияние измерительного контура на генератор, т.е. связь между этими частями Q-метра должна быть очень слабой.

2. Активное и реактивное сопротивления, вносимые блоком связи в контур, должны быть значительно меньше сопротивления потерь и характеристического сопротивления контура, соответственно.

3. Напряжение связи E должно быть порядка десятков милливольт, чтобы напряжение на контуре U_c не превышало нескольких вольт. Большие значения U_c нежелательны, так как конструкции испытываемых катушек могут быть не рассчитаны на них.

4. Напряжение связи E должно точно устанавливаться. Для этой цели в Q-метре должен быть орган регулировки этого напряжения и измерительный прибор для его контроля.

Рассмотрим реализацию этих требований на примерах некоторых типовых Q-метров.

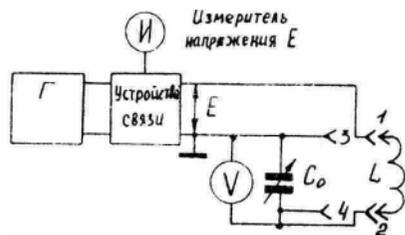


Рис. 1.7

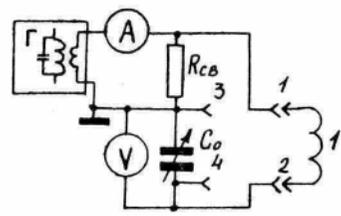


Рис. 1.8

Q-метр Е4-1 (КВ-1) измеряет добротности от 30 до 625 в диапазоне частот от 50 кГц до 50 МГц. Функциональная схема Q-метра Е9-1 приведена на рис. 1.8. Ток высокой частоты I с выхода генератора протекает через резистор связи $R_{св}$ и создает на нем падение напряжения $E = IR_{св}$. Значение тока I измеряется амперметром А; значение $R_{св} = 0,04$ Ом. При номинальном токе 0,5 А на резисторе связи образуется падение высокочастотного напряжения 20 мВ.

Резистор связи имеет сопротивление, не зависящее ни от частоты, ни от изменений температуры. В противном случае, на сколько изменилось бы сопротивление связи, на столько же изменилось бы вводимое в контур напряжение, а вместе с ним и показание Q-метра.

Чтобы сопротивление резистора связи не зависело от температуры, его изготавливают из сплава с малым температурным коэффициентом сопротивления (константана). Для ослабления поверхностного эффекта резистор связи выполняется в виде очень тонкой полоски (толщиной 35 мкм). Эта полоска имеет длину около 9 мм и ширину около 3 мм'. В целях уменьшения индуктивности полоска зажата по всей плоскости между двумя массивными пластинами, изолированными от полоски тонкими слюдяными прокладками. К одной из пластин припаян "земляной" конец резистора. Вся конструкция напоминает сплюснутую коаксиальную линию с очень малым волновым сопротивлением, из-за чего и уменьшается индуктивность резистора.

В качестве амперметра используется прибор термоэлектрической системы, состоящий из магнитоэлектрического измерителя и термоэлектрического преобразователя. Напомним принцип действия последнего. Он состоит (рис. 1.9) из нагревателя Н, выполненного из тонкой нихромовой проволоки и термопары, прикрепленной к нагревателю. Термопара представляет собою спай двух тонких проволок из разных сплавов, например, из манганина МП и константана КП. Свободные концы термопары соединяются с измерителем. Нагреватель включается в цепь, где надо измерить ток.

Измеряемый ток, проходя по нагревателю, вызывает его нагрев, который передается спаю термопары. При нагреве в спае образуется термо-ЭДС. Последняя создает постоянный ток в цепи нагревателя, от которого происходит отклонение стрелки. Ток в сопротивлении связи регулируется изменением анодного напряжения генератора.

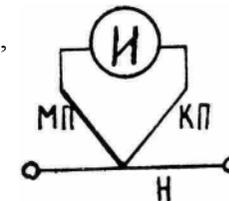


Рис. 1.9

Напряжение U_c в Q-метре Е4-1 измеряется триодным ламповым вольтметром, у которого детектирование происходит на нелинейном участке характеристики анодного тока. В цепи сетки, которая присоединена к колебательному контуру, ток отсутствует благодаря отрицательному смещению. Этим достигается высокое входное сопротивление вольтметра. Вольтметр рассчитан на номинальное напряжение 5 В, но шкала его проградуирована в значениях добротности, причем верхний предел равен 250.

При измерении добротностей до 250 в сопротивлении связи устанавливают максимальный ток, равный 0,5 А. Если из-

меряемая добротность больше 250, то, чтобы не было зашкаливания стрелки вольтметра, измерения проводят при меньшем токе. Например, при добротности 625 и $U_C = 5$ В (верхний предел вольтметра) напряжение на сопротивлении связи должно быть $E = \frac{U_C}{Q} = \frac{5}{625} = 0.008$ В = 8 мВ, что соответствует току в сопротивлении связи $I = \frac{E}{R_{CB}} = \frac{8 \cdot 10^{-3}}{4 \cdot 10^{-2}} = 0.2$ А.

Чтобы показание вольтметра при уменьшенном токе соответствовало измеряемой добротности, его нужно умножить на коэффициент уменьшения тока. В рассмотренном примере этот коэффициент равен $\frac{0.5}{0.2} = 2.5$. Для удобства расчетов шкала термоамперметра проградуирована не в значениях тока, а в значениях множителя Q.

Q-метр Е4-4 (Е9-4). Этот прибор имеет примерно такие же технические данные, как и Е4-1. Функциональная схема Q-метра Е4-4 изображена на рис. 1.10. Напряжение связи E образуется при помощи емкостного делителя $C_1 = 100$ пф и $C_{CB} = 10000$ пф.

Следовательно, сопротивление связи $X_{CB} = -\frac{1}{\omega C_{CB}}$ имеет емкостной характер. На нижней частоте Q-метра значение сопротивления связи достигает 318 Ом.

Напряжение связи контролируется вольтметром уровня V_1 , на входе делителя. При $E = 50$ мВ напряжение на вольтметре уровня равно 5 В. Этому значению напряжения на шкале вольтметра соответствует контрольная отметка (красная риска), на которую перед началом измерения надо установить стрелку, регулируя анодное напряжение генератора.

Вольтметр добротности V_2 присоединен не прямо к конденсатору C_0 , а через делитель C_2, C_3 , чтобы уменьшить потери, вносимые вольтметром. Градуировка вольтметра V_2 выполнена в значениях добротности. Q-метр ЕК—4 имеет 3 верхних предела измерения добротности, 60, 200 и 600. Переход от одного предела измерений к другому выполняется переключением пределов измерения вольтметра. Пределу измерений 600 соответствует напряжение на вольтметре 6 В. На измерительном контуре при этом получается напряжение 80 В. Напряжение связи E одинаково при всех пределах измерения добротности.

Оба вольтметра, примененные в приборе Е4-4, ламповые с пиковым диодным детектором и усилителем постоянного тока.

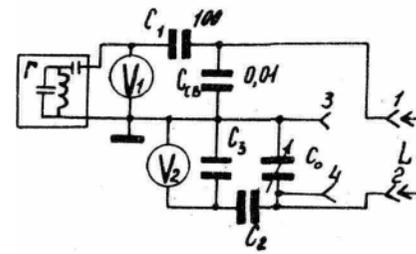


Рис. 1.10

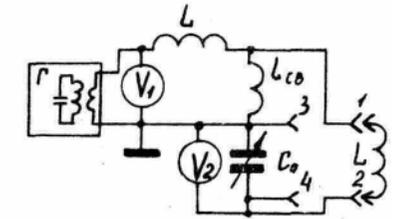


Рис. 1.11

Q-метр Е4-5 (Е9-5). Прибор Е4-5 (Е9-5) предназначен для измерения добротностей от 5 до 1200 на частотах от 15 до 250 МГц.

В этом Q-метре напряжение связи E вырабатывается при помощи индуктивного делителя L_1, L_{CB} (рис. 1.11) и составляет 10 мВ. При этом напряжение на вольтметре уровня равно 0,85 В, что соответствует контрольному значению. Вольтметр уровня с преобразователем амплитудных значений на полупроводниковом диоде без усилителя постоянного тока. Вольтметр добротности V_2 — обычный ламповый, имеет два верхних предела измерений 1 и 4 В, что соответствует добротностям 100 и 400. Расширение диапазона измерений добротности до 1200 достигается соответствующим уменьшением напряжения связи.

Сравнивая рассмотренные модели Q-метров, можем отметить:

1. Резистивная связь, примененная в Q-метре Е4-1, не вносит расстройки в измерительный контур и поэтому несомненно лучше, чем индуктивная и емкостная связи.
2. Термоэлектрический метод измерения тока в резисторе обеспечивает точное измерение среднего квадратического значения тока. Как будет показано в разд. 1.6, при таком методе контроля напряжения связи получается более высокая точность измерения добротности, если напряжение генератора не чисто синусоидально.
3. Термоэлектрический амперметр проще по устройству, чем электронные вольтметры, не требует источников питания и регулярной проверки и установки нуля. Но, к сожалению, он менее стоек по отношению к перегрузкам. Термоэлектрические преобразователи выпускаются мелкими сериями и редко бывают в продаже, что вызывает большие трудности при замене вышедших из строя.

По-видимому, по этой причине в более поздних моделях Q-метров отказались от резистивной связи и перешли к применению емкостных и индуктивных делителей.

1.6. Погрешности Q-метров при измерении добротности катушек.

Поправки.

Погрешности Q-метров, возникающие при измерении добротности, вызваны следующими причинами:

- а) погрешностями измерительных приборов - контролирующих напряжение связи и вольтметров добротности;
- б) потерями высокочастотной энергии в элементах измерительного контура и вносимыми в него из других цепей Q-метра;
- в) изменением параметров элементов связи при изменении частоты;
- г) паразитными связями измерительного контура с генератором;
- д) наличием гармоник в напряжении генератора;
- е) влиянием собственной емкости измеряемой катушки индуктивности.

Учет погрешностей измерительных приборов ведется обычным порядком. Например, в случае Q-метра Е4-1, обозначив основные погрешности вольтметра добротности и амперметра δ_U и δ_I и их верхние пределы измерений $U_{ном}$ и $I_{ном}$, находим следующие выражения для относительных погрешностей измерения тока и напряжения:

$$\frac{U_{ном}}{U} \delta_{01} \text{ и } \frac{I_{ном}}{I} \delta_I.$$

Погрешность измерения добротности, вызванная погрешностями приборов будет равна

$$\delta_Q = \sqrt{\left(\frac{U_{ном}}{U} \delta_U\right)^2 + \left(\frac{I_{ном}}{I} \delta_I\right)^2}.$$

Основные погрешности у приборов Q-метра Е4—1 $\delta_U = \delta_I = 1.5\%$

При измерении добротностей порядка 200-250 $\frac{I_{ном}}{I} = 1$ и $\frac{U_{ном}}{U} \approx 1$.

Следовательно, $\delta_Q \approx 2\%$. При уменьшении измеряемой добротности уменьшается показание вольтметра. Например, при Q=100

$$\frac{U_{ном}}{U} = \frac{250}{100} = 2.5 \text{ и } \delta_Q = \sqrt{(2.5 \cdot 1.5)^2 + 1.5^2} \cong 4\%.$$

При измеряемой добротности Q=625 приходится ток связи уменьшать с 0.5 до 0.2 А, т.е. в 2.5 раза. От этого

погрешность измерения добротности тоже возрастает:

$$\delta_Q = \sqrt{1.5^2 + (2.5 \cdot 1.5)^2} \approx 4\%.$$

Измеренное Q-метром значение добротности относится ко всему измерительному контуру, а не к одной катушке индуктивности, так как потери высокочастотной энергии происходят не только в ней, но и в других элементах контура: измерительном конденсаторе, входном сопротивлении вольтметра и элементах связи. Принимая измеренную добротность контура за добротность катушки, мы преуменьшаем значение последней, тем самым допуская ошибку.

Полное затухание измерительного контура состоит из следующих слагаемых:

$$d = d_L + d_{C0} + d_B + d_{св} \quad (1.14)$$

где $d = \frac{1}{Q}$ - затухание всего измерительного контура;

$d_L = \frac{1}{Q_L} = \frac{R_L}{\omega L}$ - затухание измеряемой катушки индуктивности;

$d_{C0} = \frac{1}{Q_{C0}} = \frac{G_C}{\omega C_0}$ - затухание измерительного конденсатора; d_B -

затухание, вносимое вольтметром; $d_{св}$ - затухание, вносимое элементами связи.

Затухание, вносимое вольтметром, можно выразить через его

входную проводимость $G_{вх} = \frac{1}{R_{вх}}$ следующим образом:

$d_B = \frac{G_{вх}}{\omega C_0} = \frac{1}{R_{вх} \omega C_0}$. Затухание от сопротивления связи найдем с

помощью его активной составляющей $R_{св}$: $d_{св} = \frac{R_{св}}{\omega L}$. Подставляя в формулу (1.14) значения составляющих затухания, а также используя формулу для резонансного сопротивления параллельного контура $R_{рез} = \frac{L}{C_0 R_L}$, получим следующее выражение для добротности катушки через измеренную добротность контура:

$$Q_L = Q \left(1 + \frac{Q_L}{Q_{C0}} + \frac{R_{PEZ}}{R_{BX}} + \frac{C_{CB}}{R_L} \right). \quad (1.15)$$

формула (1.15) позволяет учесть влияние потерь в элементах измерительного контура Q-метра. Роль потерь в измерительном конденсаторе оценивает слагаемое $\frac{Q_L}{Q_{C0}}$. Пластины измерительного конденсатора изготавливаются из чистой красной меди и покрыты слоем серебра. Для крепления неподвижных пластин к корпусу применяется диэлектрик нан-

высшего качества (слюда, фторопласт или радиочастотная керамика). Благодаря принятым мерам угол потерь измерительного конденсатора Q-метра при нормальных условиях составляет не более 10^{-6} . Следовательно, поправкой на потери в нем можно пренебречь. Потери, вносимые вольтметром добротности, учитываются слагаемым R_{PE3}/R_{BX} . Физический смысл этой поправки понятен, если сравнить ее с погрешностью от шунтирующего действия

вольтметра $\delta_{III} = -\frac{R_{\text{Э}}}{R_B}$ ([3], стр. 57). Напряжение на контуре при

резонансе снижается от шунтирующего действия вольтметра так же, как и в любой другой цепи, в зависимости от значений эквивалентного сопротивления цепи (в данном случае - резонансного сопротивления контура) и сопротивления вольтметра R_{BX} . Меры, принимаемые для увеличения входного сопротивления вольтметра или для уменьшения его шунтирующего действия включением через емкостной делитель, были описаны в разд. 1.5. В результате их применения погрешность от шунтирующего действия вольтметра добротности снижена настолько, что ее обычно также не учитывают. Последнее слагаемое в формуле (1.15) учитывает влияние активной составляющей сопротивления связи. В Q-метре Е4-1

сопротивление связи R_{CB} равно 0,04 Ом, его учитывают, только в тех случаях, когда сопротивление потерь катушки индуктивности невелико, т.е. при измерении катушек с малым числом витков, рассчитанных на работу при частотах порядка десятков мегагерц. Сопротивление потерь в таких катушках менее 1 Ом и поправка R_{CB}/R_L составляет несколько процентов.

В Q-метрах с емкостным делителем активной составляющей

сопротивления связи $R_{ce} = \frac{1}{\omega C_{ce}} tg \delta$. У радиочастотных

конденсаторов $tg \delta = (0.5...1)10^{-3}$. Активное сопротивление конденсатора емкостью 10000 пф (см. описание Q-метра Е4-4) равно $R_{ce} = 318 \cdot 1 \cdot 10^{-3} \approx 0.3$ Ом. на частоте 50 кГц. Активное сопротивление у катушек индуктивности, работающих на таких низких частотах, исчисляются десятками или сотнями Ом. Поэтому погрешность от сравнительно большого R_{ce} на низких частотах незначительна. С ростом частоты R_{ce} уменьшается обратно пропорционально частоте. Таким образом, погрешностью от потерь в элементах емкостного делителя тоже можно пренебречь.

20

Более важен вопрос о погрешности из-за изменения параметров элементов связи от частоты. В приборе с резистивной связью важно обеспечить постоянство сопротивления резистора R_{ce} и это достигнуто специальной конструкцией резистора (см. разд. 1.5). У прибора с емкостным или индуктивным делителем необходимо стабилизировать коэффициент деления делителя. В емкостном делителе, например, коэффициент деления может изменяться на верхних частотах за счет собственных индуктивностей конденсаторов делителя $L_{c1} u L_{Cce}$ (рис.1.12).

Коэффициент деления не будет зависеть от частоты только в том случае, если значения этих индуктивностей будут обратно

пропорциональны значениям емкостей делителя, т.е. $\frac{L_{c1}}{L_{Cce}} = \frac{C_{ce}}{C_1}$.

Для коррекции делителя в приборе Е4-4 применена переменная подгоночная индуктивность, включенная последовательно с C_1 . Ее регулировкой достигается выравнивание частотной характеристики делителя на верхних частотах диапазона Q-метра.

Работа Q-метра основана на том, что связь измерительного контура с генератором осуществляется только через блок связи. Лишь при строгом соблюдении этого условия можно считать, что напряжение, вводимое в контур, известно. Между тем, при близком взаимном расположении может возникнуть дополнительная паразитная связь генератора с измерительным контуром (индуктивная или емкостная). Напряжение на контуре генератора достигает сотни вольт (у лампового генератора), а напряжение связи составляет только десятки милливольт, т.е. в тысячи раз меньше. Поэтому даже при слабой паразитной связи в контур может попасть дополнительное напряжение, соизмеримое с напряжением связи. Погрешность, вызванная дополнительным напряжением, не может быть учтена. Единственным способом борьбы с нею является тщательная экранировка генератора и цепи сопротивления связи.

При наличии гармоник в выходном напряжении генератора они будут присутствовать и в напряжении связи и будут влиять на показания приборов контроля этого напряжения.

Для наглядности рассмотрим следующий пример. Пусть напряжение на входе делителя связи в приборе Е4-4 выражаются следующей формулой:

$$U = U_{1m} \cos \omega t + U_{3m} \cos 3\omega t,$$

где U_{1m} и U_{3m} - амплитуды напряжений основной частоты и третьей гармоники.

Вольтметр уровня в приборе Е4-4 имеет преобразователь амплитудных значений. Поэтому его показание будет равно

$$U = \frac{1}{\sqrt{2}}(U_{1m} + U_{3m}) = U_1 + U_3,$$

где U_1 и U_3 - средние квадратические значения напряжений основной частоты и третьей гармоники. Если по этому вольтметру установить $U=5В$ (красная отметка), то напряжение основной частоты будет не 5 В, а меньше: $U_1 = U - U_3$.

Напряжение основной частоты на конденсаторе C_{ce} тоже будет меньше ожидаемых 50 мВ: $E_1 = E - E_3$. Благодаря фильтрующему действию измерительного контура напряжение на нем U_c содержит только составляющую основной частоты: $U_c = QE_1 = Q(E - E_3)$. Следовательно, измеренное значение добротности будет

$$Q' = \frac{U_c}{E} = Q \frac{E_1}{E_1 + E_3} = Q \frac{1}{1 + \frac{E_3}{E_1}}.$$

Так, если $U_3 = 0.1U_1$, то погрешность в измерении добротности за счет гармоник будет 10%.

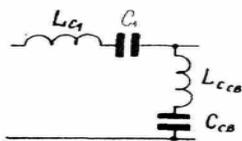


Рис. 1.12

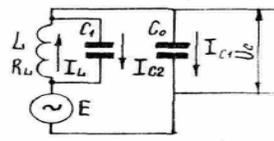


Рис. 1.13

В приборе Е4-1 для контроля напряжения связи применен термоэлектрический амперметр. Его показание в аналогичном случае

$$I = \sqrt{I_1^2 + I_3^2} \approx I_1 \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{I_3}{I_1} \right)^2 \right],$$

где I, I_1, I_3 - средние квадратические значения тока в резисторе связи и его составляющих основной частоты и третьей гармоники. Измеренное значение добротности в случае Q - метра Е4-1

$$Q' = \frac{U_c}{E} = Q \frac{1}{1 + \frac{1}{2} \left(\frac{E_3}{E_1} \right)^2}$$

При 10%-ном содержании гармоник в токе связи Q - метра Е4-1 погрешность измерения составляет только 0,5%.

Следовательно, погрешность от гармоник в Q - метре Е4-1 меньше, чем в приборах Е4-4 или Е4-5.

Влияние собственной емкости катушки рассмотрим с помощью рис.

1.13. Из рисунка видно, что не весь ток катушки I_1 протекает через источник ЭДС: часть I_L ответвляется через собственную емкость. Из-за этого ответвления формула (1.10) неточна. Воспользуемся для вычисления поправки выражением добротности через мощность:

$$Q_L = \frac{U_L I_L}{P_L}. \quad (1.16)$$

При резонансе $U_L = U_C$, $I_L = I_{C1} + I_{C2} = U_C \omega C_0 + U_C \omega C_L$. Потери мощности будем считать сосредоточенными в катушке.

Следовательно, $P_L = EI_{C1} = EU_C \omega C_0$. Подставляя полученные выражения в формулу (1.16), находим:

$$Q_L = \frac{U_C}{E} \left(1 + \frac{C_L}{C_0} \right) = Q \left(1 + \frac{C_L}{C_0} \right).$$

Собственная емкость катушки составляет единицы пикофард. Поправка существенна, когда измерение проводится при небольших значениях емкости измерительного конденсатора (порядка десятков пикофард).

1.7. Другие применения Q - метров

Q - метром можно измерять добротность также методами вариации частоты и емкости. Для последнего в нем предусмотрен нониусный конденсатор, с помощью которого можно изменять емкость измерительного контура на ± 5 пФ. На схемах рис. 1.8, 1.10 и 1.11 нониусный конденсатор не показан, но он подключен параллельно измерительному конденсатору.

Кроме своего основного назначения - измерения добротности катушек индуктивности Q-метр может быть использован для ряда других измерений: значений индуктивности катушек, емкости конденсаторов, а также полных сопротивлений различных двухполосников.

При измерении индуктивности катушка присоединяется к зажимам 1-2 (рис.1.8, 1.10 и 1.11), нониусный конденсатор Q-метра устанавливается на нуль, а дальше процесс измерений протекает, как было описано в разд. 1.2.

Если измерения производятся при помощи Q-метров Е4-1 или Е4-4, то надо настроить генератор на одну из частот, рекомендованных в таблице. Только на этих частотах можно пользоваться шкалой индуктивностей, нанесенной на лимбе измерительного конденсатора. При других значениях частоты генератора следует определять индуктивность измеряемой катушки расчетным путем по формуле (1.4) (в случае Q-метра Е4-1). Для Q-метра Е4-4 нужно учесть поправку от конденсатора связи. Этот конденсатор включен последовательно с измерительным конденсатором. Значит, в формулу (1.4) нужно подставлять не C_0 .

$$а \quad C_3 = \frac{C_0 C_{св}}{C_0 + C_{св}} = \frac{C_0}{1 + C_0 / C_{св}}$$

Частоты	Пределы измерения индуктивности	Множитель шкалы
76 кГц	10-100 мГн	10 мГн
240 кГц	1-10 мГн	1 мГн
760 кГц	0,1-1 мГн	0,1 мГн
2,4 МГц	10-100 мкГн	10 мкГн
7,6 МГц	1-10 мкГн	1 мкГн
24 МГц	0,1-1 мкГн	0,1 мкГн

Так как емкость конденсатора связи $C_{св} = 10000$ пФ, то, подставляя это значение в формулу для C_3 , получаем:

$$C_3 = \frac{C_0}{1 + C_0 \cdot 10^{-4}}$$

Поправка, как видим, не очень существенна. При измерении емкости конденсаторов к зажимам 1-2 присоединяется вспомогательная катушка, комплект которых прилагается к Q-метру. Измерения выполняются методом замещения, как было изложено в разд. 1.2. Для параллельного подключения измеряемого конденсатора используются зажимы 3—4 (см. рис. 1.8, 1.10, 1-11).

Метод измерения полного сопротивления двухполюсников в принципе следующий. К зажимам 1-2 присоединяется вспомогательная катушка. Контур Q-метра настраивается в резонанс на частоте измерения. Определяются значения резонансной емкости $C01$ и добротности $Q1$. Затем присоединяется исследуемый двухполюсник к зажимам 3-4 (при параллельном включении) или между зажимом 1 и выводом вспомогательной катушки (при последовательном включении). Контур вторично настраивается в резонанс на той же частоте изменением емкости измерительного конденсатора. Определяются новые значения емкости измерительного конденсатора $C02$ и добротности

Q2. Зная $C01$, $C02$, $Q1$, $Q2$ и f , можно рассчитать активную и реактивную составляющие проводимости двухполюсника при параллельном подсоединении его к измерительному контуру или его сопротивлению при последовательном включении.

1.8. Измерение собственной емкости и собственной частоты катушки индуктивности

С учетом собственной емкости катушки резонансная частота колебательного контура равна $\omega = \frac{1}{\sqrt{L(C_L + C_0)}}$, где C_0 - емкость измерительного конденсатора. Из этого выражения легко получить следующее уравнение: $1/\omega_p^2 = LC_0 + LC_L$, которое представляет собою уравнение прямой линии относительно переменных C_0 и $1/\omega_p^2$. Эта прямая MN (рис. 1.14) имеет угловой коэффициент, равный L , и отсекает на отрицательной полуоси отрезок MO , который равен собственной емкости C_L .

Для измерения собственной емкости используются те же приборы, при помощи которых измеряется индуктивность. Исследуемая катушка присоединяется к измерительному конденсатору, емкости которого дается ряд значений. Измеряя резонансные частоты контура и нанося данные на график $1/\omega_p^2 = f(C_0)$, получим ряд точек 1,2,3,4 (рис. 1.14). Через эти точки проводится прямая MN до пересечения с горизонтальной осью, после этого можно по графику определить $MO = C_L$. Из-за погрешности измерительного конденсатора, частоты генератора, неточности настройки в резонанс и других причин точки на графике не обязательно попадут на прямую. Но при большом числе таких точек и более или менее равномерном их распределении вдоль, прямой удастся провести ее между точками так, что погрешность измерения собственной емкости катушки будет не более 10%.

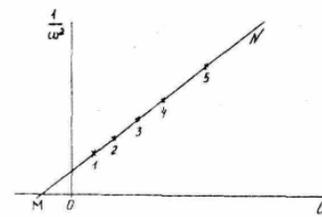


Рис. 1.14

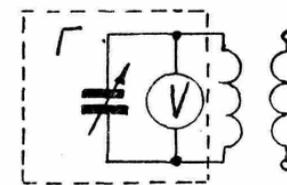


Рис. 1.15

Измерение собственной резонансной частоты катушки удобно выполнять по следующей схеме (рис.1.15). Катушка слабо связывается с контуром генератора высокой частоты, в котором должен быть индикатор колебаний (например, вольтметр, присоединенный параллельно контуру). Частоту генератора нужно плавно изменять. При частоте собственного резонанса катушка ведет себя как настроенный колебательный контур и вносит в цепь генератора наибольшее затухание. Этот момент легко заметить по резкому спаданию показаний вольтметра.

С помощью Q -метра тоже можно измерить собственную частоту катушки, но процесс измерения в этом случае более трудоемок и длителен. Для измерений к Q -метру (зажимы 1-2) присоединяется вспомогательная катушка и измерительный контур настраивается в резонанс на произвольно выбранную частоту генератора. Затем к настроенному контуру присоединяется параллельно испытываемая катушка (к зажимам 3—4), после чего следует проверить, сохранилась ли настройка контура.

Входное сопротивление исследуемой катушки при частоте собственного резонанса активно и поэтому, если частота генератора оказалась такой же, то от подключения катушки измерительный контур не расстроится. Произойдет лишь некоторое уменьшение напряжения на контуре, вызванное шунтированием. Если же обнаружится необходимость подстраивать контур, то это будет означать, что во входном сопротивлении подключенной катушки имеется реактивная составляющая, так как частота генератора не равна собственной частоте катушки. В таком случае надо изменить частоту генератора и проделать измерение снова, повторяя этот процесс до тех пор, пока не будет найдена частота генератора, при которой подключение катушки не вызывает расстройки.

Проверка настройки выполняется изменением емкости измерительного конденсатора в обе стороны от того положения, где был резонанс; если максимум показаний вольтметра соответствует прежнему значению емкости, значит, настройка сохранилась.

Для ускорения измерений можно воспользоваться следующими дополнительными указаниями. Индуктивность вспомогательной катушки должна быть в 15-20 раз меньше индуктивности исследуемой, чтобы иметь достаточно высокую резонансную частоту измерительного контура. Направление изменения частоты генератора можно определить по тому, в какую сторону приходится изменять емкость контура при подстройке.

Уменьшать емкость конденсатора приходится тогда, когда присоединяемая катушка ведет себя как емкость, т.е. когда частота генератора выше ее собственной частоты. При слишком низкой частоте генератора исследуемая катушка ведет себя как индуктивность. Общая индуктивность контура при ее подключении (параллельном) уменьшается, и для подстройки приходится емкость измерительного конденсатора увеличивать. Итак, если емкость измерительного конденсатора для подстройки приходится увеличивать, значит, частоту генератора надо увеличить, а если емкость конденсатора приходится уменьшать, значит, частоту генератора тоже надо уменьшить,

Собственная емкость и собственная частота катушки зависят от того, как она включена и расположена относительно земли, корпуса прибора или других окружающих предметов. Эти условия при измерениях должны максимально соответствовать рабочим,

ЛИТЕРАТУРА

1. Момот Е.Г. Радиотехнические измерения. М,-Л.,ГЭИ, 1957.
2. Осипов К.Д. и Пасынков В.В. Справочник по радиоизмерительным приборам. Ч. 1. - М.: Советское радио, 1960.
3. Страусов Б.Г. Конспект лекций по курсу *Электрические и радиотехнические измерения". Элементы теории ошибок. -М.: МАИ, 1974.