

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
“Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет “ЛЭТИ”
им. В.И.Ульянова (Ленина)” (СПбГЭТУ)

Кафедра теоретических основ радиотехники

А.А.ДАНИЛИН

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
к выполнению лабораторной работы по дисциплине
“Приборы и техника радиоизмерений”

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТНЫХ ПАРАМЕТРОВ LCR-КОМПОНЕНТОВ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СХЕМ

Санкт-Петербург

2010 г.

В работе изучаются методы измерения параметров компонентов радиоэлектронных схем в диапазоне частот. Используется автоматизированный прибор LCR -821, позволяющий определить параметры катушек индуктивностей, конденсаторов и резисторов с учетом паразитных элементов их эквивалентной схемы. Измеряются параметры коаксиальной линии – волновое сопротивление, затухание и постоянная распространения.

1. Параметры сосредоточенных элементов электрических схем

Электрические схемы на относительно низких частотах включают в себя компоненты с сосредоточенными постоянными – катушки индуктивности, конденсаторы и резисторы (LCR-элементы). Эти элементы являются двухполюсниками (имеют два вывода). Более сложные блоки (с тремя, четырьмя и более выводами) часто описывают схемами замещения, состоящими из двухполюсных элементов.

При работе схемы с гармоническими сигналами свойства двухполюсников описывают с помощью *полного комплексного сопротивления* (импеданса) Z . (рис.1).

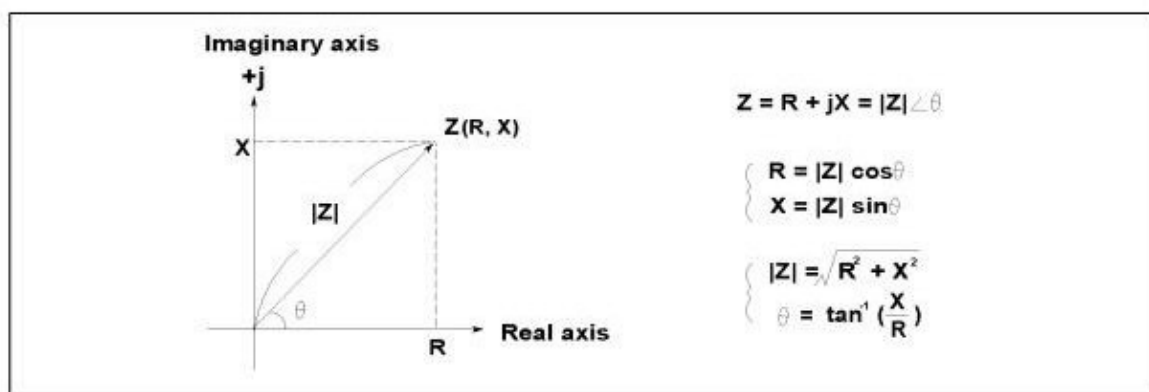


Рис. 1. Векторная диаграмма полного импеданса

Векторная диаграмма импеданса показывает соотношение между вещественной (R) и мнимой (X) частями, а также модулем и фазой полного сопротивления.

В ряде случаев используют обратную величину - *полную проводимость* (адмиттанс) Y . Импеданс измеряется в Омах, а адмиттанс – в величинах, обратных Ому – Сименсах (См). В измерительной практике встречается общий термин «иммитанс» для понятий "импеданс" (сопротивление) и "адмиттанс" (проводимость). Соотношения между импедансом и адмиттансом для двухполюсников индуктивного и емкостного типов приведены на рис.2

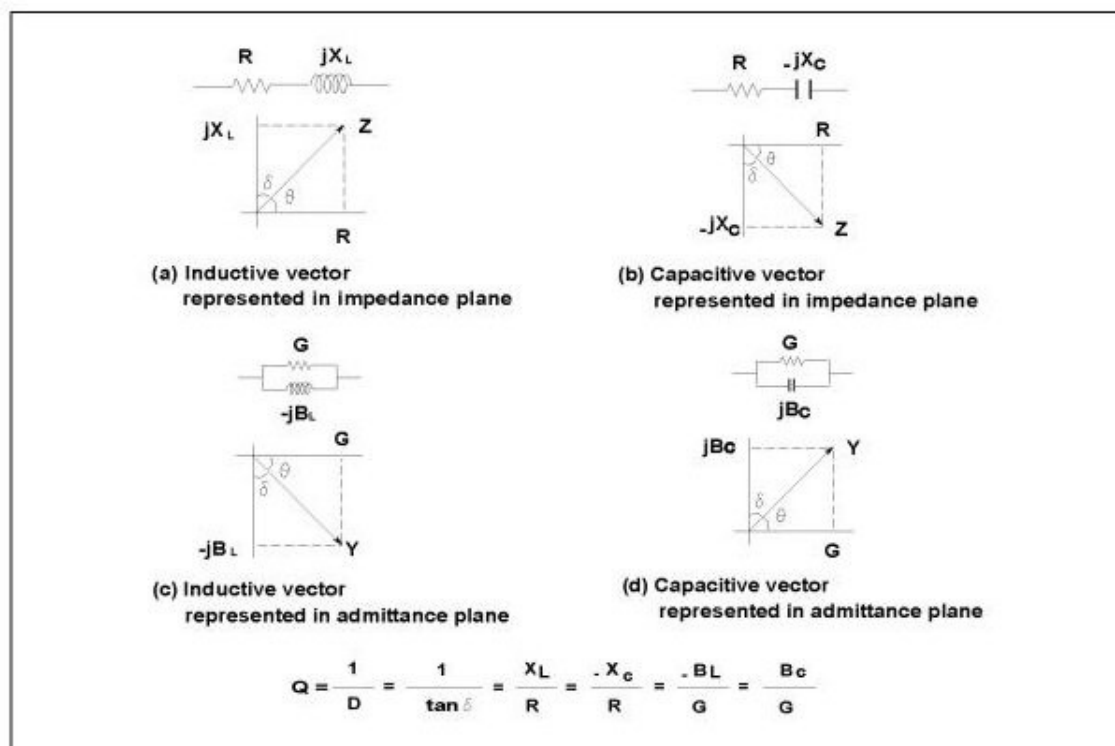


Рис. 2. Соотношение между импедансом и адмиттансом индуктивного (a,c) и емкостного (b,d) типов

Двухполюсные элементы электрической цепи представляют в виде последовательной (рис. 2 a,b) или параллельной (рис. 2 c,d) схем замещения. При последовательной схеме элемент характеризуют активным R и реактивным X сопротивлениями, а при параллельной схеме - G и реактивной B проводимостями.

Полное сопротивление Z двухполюсника определяется законом Ома для комплексных амплитуд напряжения \dot{U} и тока \dot{I} . В декартовых координатах комплексной плоскости оно записывается через активное R и реактивное X сопротивления:

$$Z = R + jX = \frac{\dot{U}}{\dot{I}}, \quad (1)$$

в полярных координатах - через модуль и фазу:

$$Z = |Z| \exp(j\theta), \text{ где } |Z| = \sqrt{R^2 + X^2}, \theta = \arctg\left(\frac{X}{R}\right),$$

$$R = |Z| \cos(\theta), X = |Z| \sin(\theta) \quad (2).$$

Полную проводимость Y элемента для параллельной схемы замещения определяют по обратному соотношению:

$$Y = G + jB = \frac{\dot{I}}{\dot{U}} = Z^{-1} \quad (3)$$

Любой из пассивных двухполюсных элементов можно представить как последовательной, так и параллельной схемами замещения. Эти схемы замещения эквивалентны при условии, что параметры элементов связаны формулами

$$R = \frac{G}{G^2 + B^2}; X = \frac{B}{G^2 + B^2}; \quad (4)$$

$$G = \frac{R}{R^2 + X^2}; B = \frac{X}{R^2 + X^2}. \quad (5)$$

При известных параметрах одной из схем замещения можно рассчитать параметры другой схемы. Выбор той или иной схемы замещения определяется выбором метода измерения, удобством представления результата измерения и др.

Существует два типа реактивного иммитанса – емкостной и индуктивный. Реактивное сопротивление индуктивного типа зависит от частоты f по линейному закону $X = 2\pi fL$, где L – индуктивность элемента (выражается в Генри - [Гн]), f – частота входного гармонического сигнала. Фазовый угол импеданса индуктивного типа положителен. Для емкостного типа импеданса $X = -\frac{1}{2\pi fC}$, где C - емкость элемента (в Фарадах – [Ф]), а угол - отрицателен.

Рассмотрим схемы замещения типовых LCR-элементов. Для резистора, кроме активного сопротивления, необходимо учитывать также его реактивные параметры (рис.3). Если резистор сделан из отрезка проволоки с высоким удельным сопротивлением, то он обычно имеет заметную паразитную индуктивность. На

высоких частотах будет сказываться также паразитная емкость резистора, которая характерна для пленочных резисторов с высоким сопротивлением.

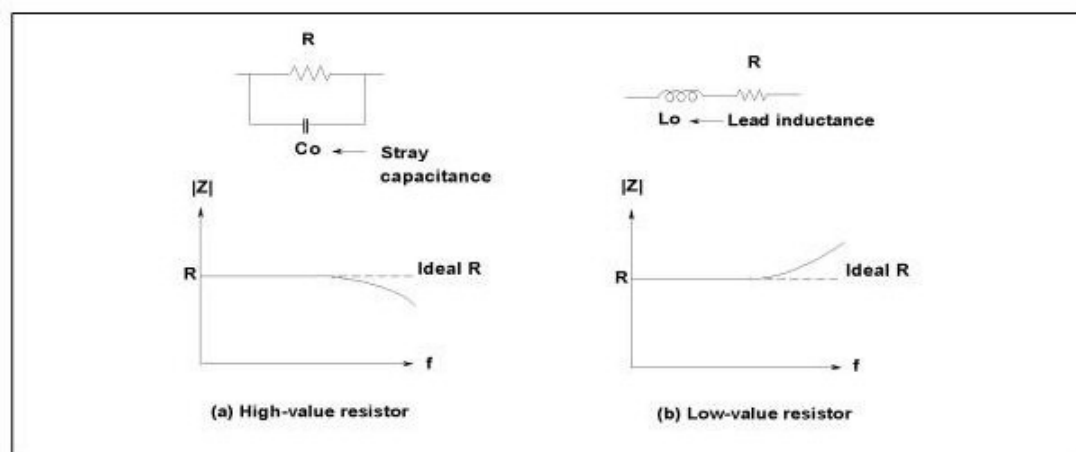


Рис. 3. Схема замещения активного резистора

Частотная характеристика модуля $|Z|$ резистора на высоких частотах будет иметь отклонение от постоянного значения R (см. рис. 3).

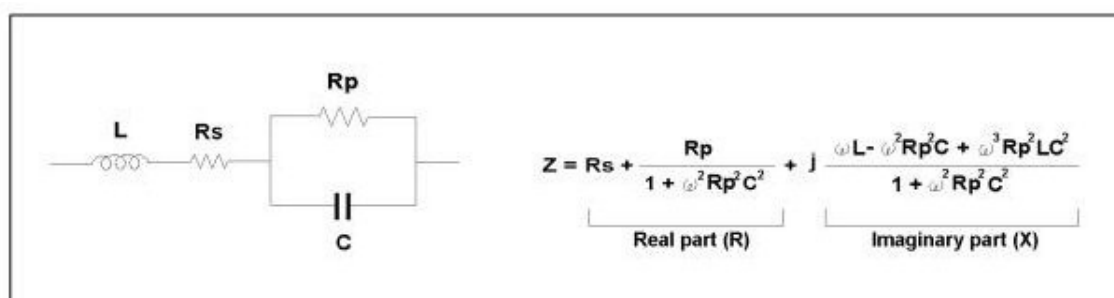


Рис. 4. Схема замещения реального конденсатора

На рис. 4 приведены схемы замещения реального конденсатора с емкостью C . Активные потери учитывают шунтирующим сопротивлением утечки R_p для параллельной схемы и сопротивлением потерь R_s для последовательной схемы замещения. Для высокочастотных керамических конденсаторов основным паразит-

ным параметром является параллельное сопротивление утечки. На низких частотах у конденсаторов большой емкости сильнее влияет последовательное сопротивление потерь. Особенно это проявляется у электролитических конденсаторов большой емкости, у которых эквивалентное последовательное сопротивление (ESR – Equivalent Series Resistance) в ряде случаев соизмеримо с емкостным сопротивлением конденсатора и даже может его превосходить. Это часто приводит к неработоспособности таких конденсаторов в фильтрах импульсных помех, сглаживающих цепях блоков питания и пр. На высоких частотах необходимо учитывать также индуктивность выводов конденсатора L .

На рис. 5 приведены схемы замещения реальной катушки индуктивности с индуктивностью L . Паразитные параметры катушки – это сопротивление R_s для последовательной схемы замещения (рис.5,б), сопротивление потерь в ферромагнитном сердечнике R_p для параллельной схемы (рис.5,а) и межвитковая емкость катушки C . Потери в катушках складываются из потерь в ее проводе, потерь в сердечнике (который применяют в катушках большой индуктивности) и потерь в экране (для экранированных катушек). Межвитковая емкость заметна в многослойных катушках с большим количеством витков.

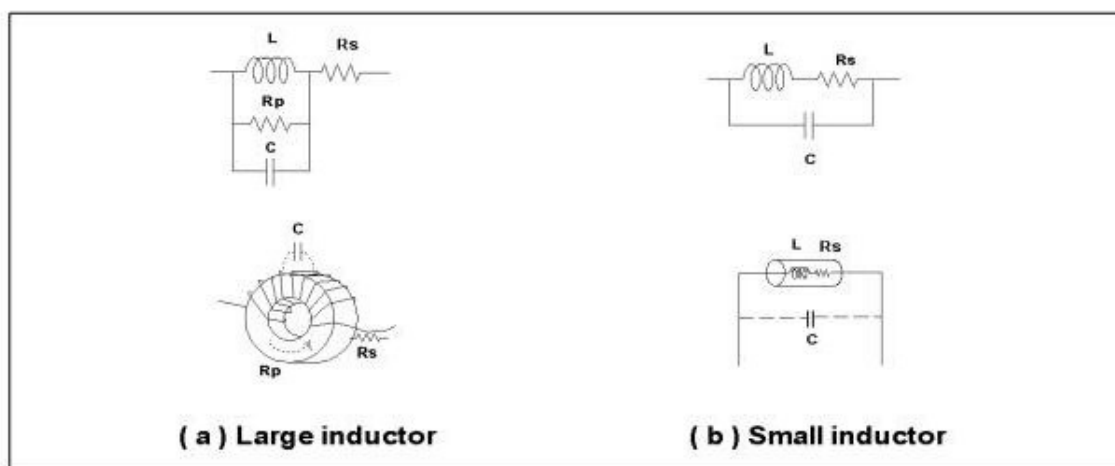


Рис. 5. Схемы замещения катушек индуктивностей

Для оценки качества элементов электрической цепи на сравнительно низких частотах используют соотношение эквивалентных реактивных и активных сопротивлений последовательной схемы замещения (или отношение проводимостей

параллельной схемы замещения). Так, качество катушек индуктивности обычно характеризуют *добротностью*

$$Q_L = \frac{X}{R} = \frac{2\pi fL}{R_s} \quad (6)$$

Она равна отношению энергии, запасенной в реактивном элементе, к мощности потерь в нем.

Качество конденсаторов обычно оценивают обратной величиной - *тангенсом угла потерь D* (фактор потерь):

$$D = \operatorname{tg} \delta = \frac{G}{B} = \frac{1}{2\pi fCR_p} = \frac{1}{Q} \quad (7)$$

где - δ - угол потерь, определяемый из векторных диаграмм рис.1,а и 2,б. Он дополняет фазовый угол полного сопротивления конденсатора до 90° . Фактор потерь используют для элементов с малым активным сопротивлением.

На высоких частотах используют трехэлементные схемы замещения элементов электрических цепей, приведенные на рис.4 и рис.5,б.

Измерители комплексных сопротивлений и проводимостей (измерители иммитанса) определяют полное сопротивление исследуемого компонента на разных частотах. Наличие паразитных реактивных параметров у реальных компонентов приводит к тому, что частотная зависимость реактивной составляющей импеданса или адмиттанса отличаются от линейной. Поэтому измерители иммитанса определяют *действующие* значения параметров компонентов на каждой частоте.

Действующие значения индуктивности и емкости вводят из условия равенства реактивных сопротивлений (проводимостей) реального элемента и эквивалентной индуктивности (емкости) на частоте измерения. Действующее значение индуктивности L_d (см. рис. 5,б) в предположении малых потерь ($R_s \ll \omega L$) задают формулой

$$L_d = \frac{L}{1 - 2\pi fLC} = \frac{L}{1 - (\frac{f}{f_L})^2}, \quad (8)$$

где f_L – собственная резонансная частота катушки $f_L = 1/(2\pi \sqrt{LC})$. Частотная зависимость модуля полного сопротивления катушки отличается от линейной в

области малых частот - из-за сопротивления потерь,- и в области больших частот -из-за межвитковой емкости (рис.6).

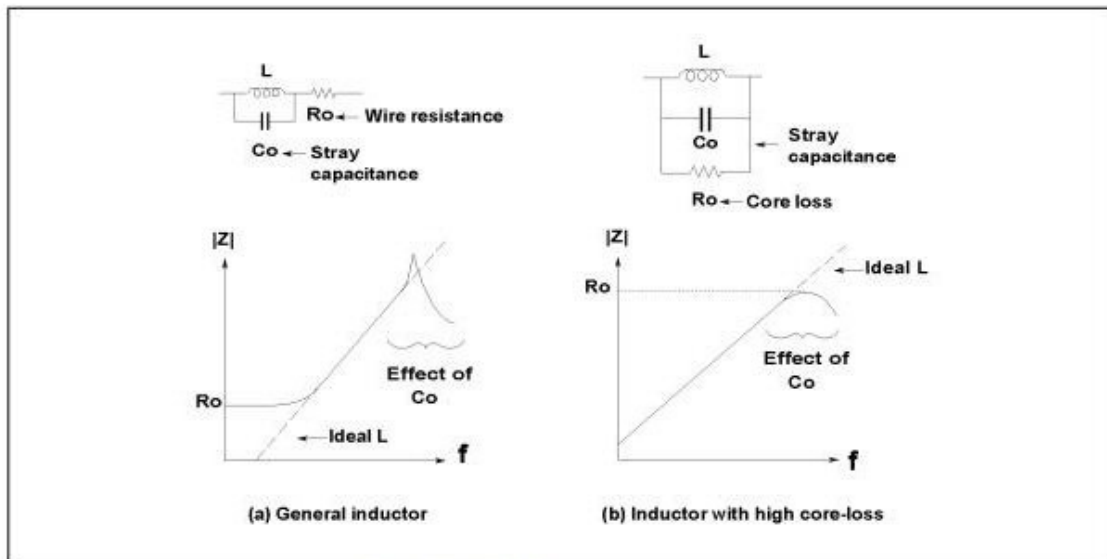


Рис. 6. Частотные зависимости полного сопротивления реальной катушки индуктивности

Для трехэлементной схемы замещения конденсатора (рис. 4) при малых потерях ($R_p \gg \frac{1}{\omega C}$) действующее значение определяется аналогичной формулой

$$C_d = \frac{C}{1 - 2\pi f L C} = \frac{C}{1 - \left(\frac{f}{f_c}\right)^2}, \quad (9)$$

где f_c – собственная резонансная частота конденсатора $f_c = 1/(2\pi \sqrt{LC})$. Частотная зависимость модуля полного импеданса в логарифмическом масштабе линейна практически до частоты собственного резонанса конденсатора.

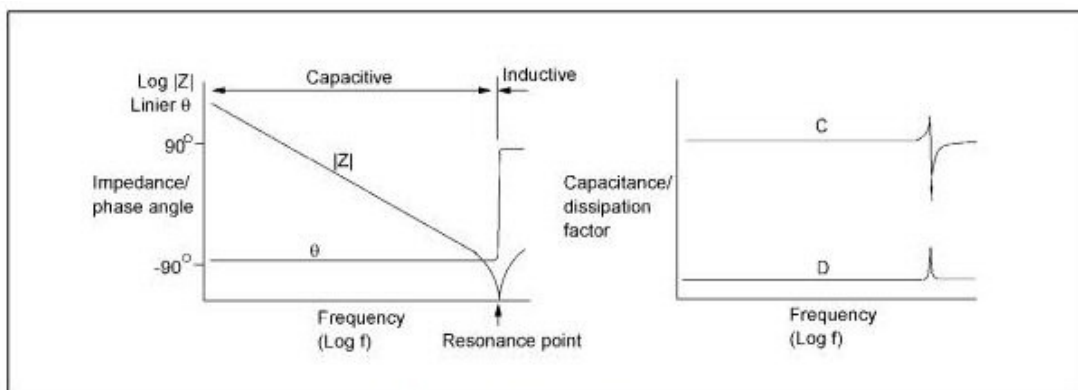


Рис. 7. Частотная зависимость импеданса реального конденсатора

Таким образом, реальные катушка индуктивности и конденсатор имеют паразитный резонанс на частоте $f_p = 1/(2\pi \sqrt{LC})$. При этом характер реактивности элемента на частотах $f < f_p$ соответствует названию элемента (например, для конденсатора характер реактивности - емкостной), а на частотах $f > f_p$ характер реактивности меняется на противоположный (для конденсатора – на индуктивный, а для индуктивности – на емкостной). На резонансной частоте каждый элемент представляет собой колебательный контур параллельного (для катушки) или последовательного (для конденсатора) типов с активным сопротивлением.

Для измерения трех параметров схемы замещения катушки и конденсатора недостаточно определить вещественную и мнимую части полного иммитанса – требуется знать их зависимость от частоты. Значения паразитных реактивностей катушки и конденсатора находятся затем расчетным путем по результатам измерений действующих значений их индуктивностей (емкостей), как минимум, на двух частотах.

Измерение собственной индуктивности и паразитной емкости катушки.

Пусть L_{x1} и L_{x2} – действующие значения индуктивности катушки, измеренные на частотах f_1 и f_2 соответственно. В этом случае на основании эквивалентной схемы катушки (рис. 6, а), можно записать следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} \frac{1}{j2\pi f_1 L_{x1}} = \frac{1}{j2\pi f_1 L} + j2\pi f_1 C, \\ \frac{1}{j2\pi f_2 L_{x2}} = \frac{1}{j2\pi f_2 L} + j2\pi f_2 C, \end{cases} \quad (10)$$

где L и C – неизвестные значения собственной индуктивности и межвитковой емкости катушки. Решение системы (10) имеет следующий вид:

$$\begin{cases} L = \frac{f_1^2 - f_2^2}{\left(f_1^2/L_{x2}\right) - \left(f_2^2/L_{x1}\right)}, \\ C = \left(\frac{1}{L_{x2}} - \frac{1}{L_{x1}}\right) \cdot \left((2\pi f_1)^2 - (2\pi f_2)^2\right)^{-1}. \end{cases} \quad (11)$$

Измерение собственной емкости и паразитной конденсатора. Пусть на двух частотах f_1 и f_2 измерены действующие значения емкости конденсатора C_{x1} и C_{x2} соответственно. На основании эквивалентной схемы (рис. 5, б) для этого случая можно записать следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} \frac{1}{j2\pi f_1 C_{x_1}} = \frac{1}{j2\pi f_1 C} + j2\pi f_1 L, \\ \frac{1}{j2\pi f_2 C_{x_2}} = \frac{1}{j2\pi f_2 C} + j2\pi f_2 L, \end{cases} \quad (12)$$

где L и C – неизвестные значения собственной емкости и паразитной индуктивности конденсатора. Решение системы (12) имеет следующий вид:

$$\begin{cases} L = \frac{C_{x_2} - C_{x_1}}{(2\pi)^2 C_{x_1} C_{x_2} (f_2^2 - f_1^2)}, \\ C = \frac{C_{x_1}}{1 + (2\pi f_1)^2 L C_{x_1}}. \end{cases} \quad (13)$$

Выбор частот измерения необходимо сделать на участках максимального изменения действующих значений параметров (вблизи их резонансных частот).

2. Параметры распределенных линий передачи

На высоких частотах в схемах применяют распределенные компоненты – отрезки линий передачи. Эквивалентная схема таких элементов – «длинная линия», представляющая собой бесконечную цепочку погонных индуктивностей L_n и емкостей C_n . Отношение погонных параметров определяет *волновое* (или *характеристическое*) сопротивление линии передачи Z_0 .

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L_n}{C_n}},$$

а их произведение – *коэффициент распространения* $\beta = 2\pi \cdot f \sqrt{L_n C_n}$

Этот коэффициент определяет фазовую скорость волны в линии передачи без потерь и, следовательно, фазовый набег сигнала на единицу длины. От него зависит *электрическая длина* линии передачи с геометрической длиной l :

$$\theta = \beta \cdot l.$$

Для линии с потерями (например, для коаксиального кабеля) погонные параметры включают последовательное и параллельное сопротивления потерь. Коэффициент распространения в реальной линии передачи будет комплексным $\gamma = \alpha + i \cdot \beta$. Он имеет вещественную часть – *коэффициент затухания* α и мнимую часть – *коэффициент фазы* β .

Определение волнового сопротивления и постоянной распространения кабеля можно выполнить с использованием измерителей иммитанса. Для этого определяют комплексное входное сопротивление отрезка кабеля при различных нагрузках на его конце. Наиболее часто используют короткозамкнутую нагрузку (КЗ) и нагрузку холостого хода (ХХ). Теория длинных линий дает следующие значения для входных сопротивлений в этих случаях:

$$Z_{KЗ} = Z_0 \cdot \operatorname{th}(\gamma \cdot l) = |Z_{KЗ}| \exp(\theta_{KЗ}), \quad Z_{ХХ} = \frac{Z_0}{\operatorname{th}(\gamma \cdot l)} = |Z_{ХХ}| \exp(\theta_{ХХ}), \quad (14)$$

где l – геометрическая длина отрезка линии, $\operatorname{th}(\gamma l)$ – гиперболический тангенс от комплексного аргумента, θ – фазовый угол входного импеданса.

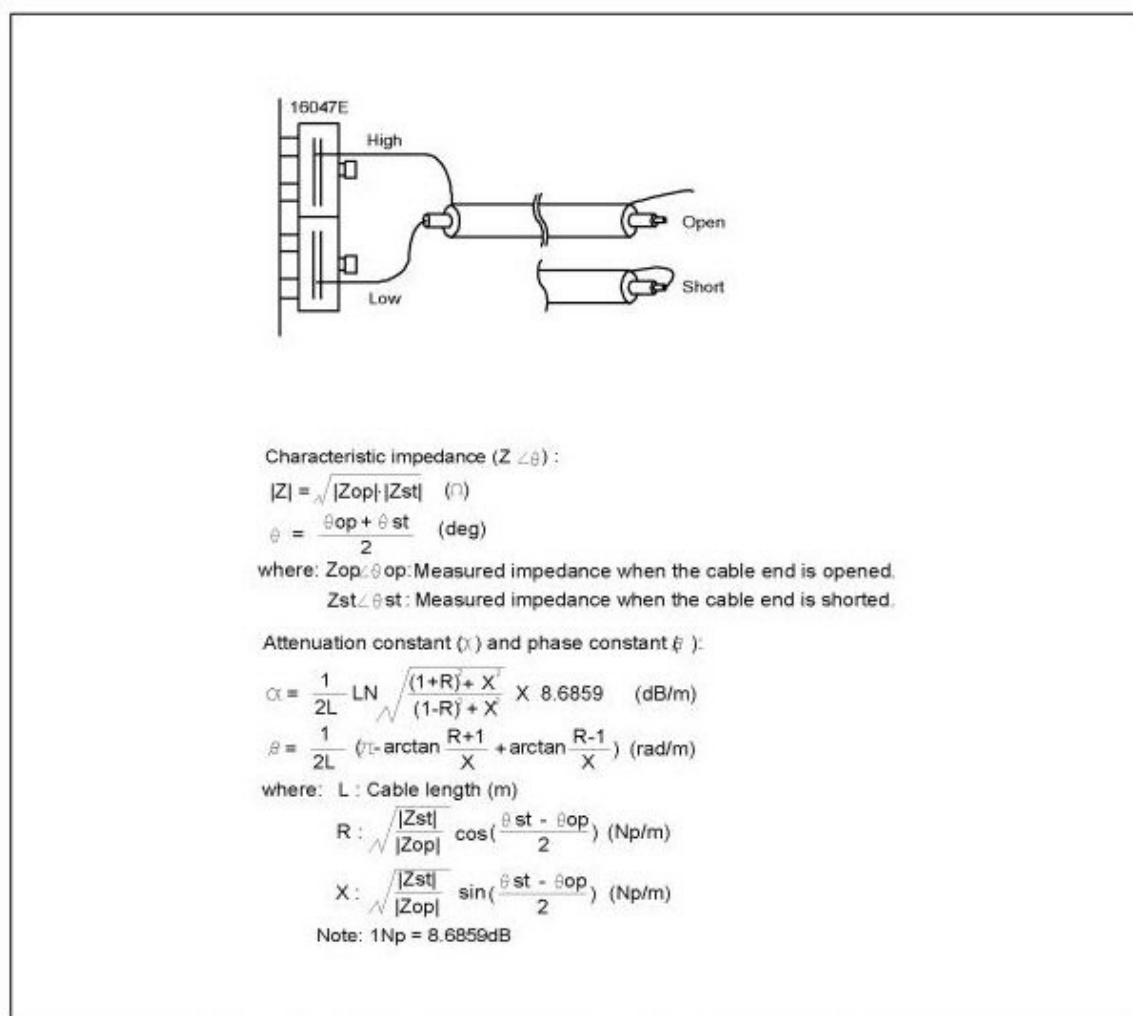


Рис. 8. Измерение параметров отрезка коаксиального кабеля

Из (14) определяют модуль волнового сопротивления

$$|Z_0| = \sqrt{Z_{кз} \cdot Z_{xx}} \quad (15)$$

и величину гиперболического тангенса

$$th(\gamma \cdot l) = \sqrt{\frac{Z_{кз}}{Z_{xx}}} \cdot \quad (16)$$

Выражение (16) дает расчетные формулы для коэффициента затухания отрезка линии длиной l

$$\alpha = 8.6859 \cdot \frac{1}{2l} \cdot \sqrt{\frac{(1+R)^2 + X^2}{(1-R)^2 + X^2}}, \text{ дБ/м} \quad (17)$$

и коэффициента фазы

$$\beta = \frac{1}{2l} \cdot (\pi - \arctg(\frac{R+1}{X}) + \arctg(\frac{R-1}{X})), \text{ рад/м}. \quad (18)$$

Здесь использованы обозначения R и X - вещественная и мнимая части $th(\gamma \cdot l)$:

$$R = \sqrt{\frac{|Z_{кз}|}{|Z_{xx}|}} \cos(\frac{\theta_{кз} - \theta_{xx}}{2}), \quad X = \sqrt{\frac{|Z_{кз}|}{|Z_{xx}|}} \sin(\frac{\theta_{кз} - \theta_{xx}}{2}) \quad (19)$$

Важным параметром коаксиального кабеля является *коэффициент укорочения* K_y . Он показывает, во сколько раз фазовая скорость в кабеле меньше скорости света в свободном пространстве:

$$K_y = 3 \cdot 10^8 \frac{\beta}{2\pi \cdot f} \quad (20)$$

Коэффициент укорочения определяет соотношение между электрической длиной исследуемого кабеля и электрической длиной линии передачи с воздушным заполнением. Его величина зависит, в основном, от параметров диэлектрического заполнения кабеля.

Коаксиальные кабели, применяемые для передачи телевизионных сигналов, имеют волновое сопротивление 75 Ом, коэффициент укорочения в пределах 1,4... 1,7 и постоянную затухания порядка долей дБ/м. В измерительной технике наибольшее распространение получили кабели с волновым сопротивлением 50 Ом.

3. Принцип действия и структурная схема измерителя LCR-821

Принцип действия прибора основан на измерении отношения комплексных амплитуд напряжения и тока на исследуемом компоненте. Напряжение с генератора гармонического сигнала подают на вход измеряемого элемента Z_x (Рис.9).

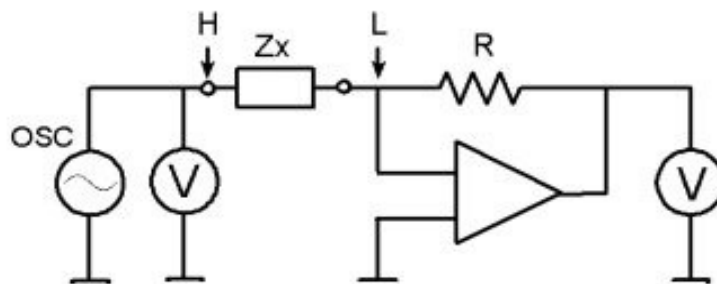


Рис. 9 Функциональная схема измерителя LCR-821.

Комплексная амплитуда напряжения на входном зажиме, обозначенном Н (высокий потенциал) U_U , измеряется вольтметром. Ток через исследуемый элемент Z_x поступает на вход операционного усилителя в точку низкого потенциала, обозначенную L. Усилитель имеет большой коэффициент передачи и охвачен обратной связью через резистор R. При этом выходное напряжение операционного усилителя практически равно отношению сопротивлений R/Z_x и, следовательно, пропорционально току через исследуемый компонент. Комплексная амплитуда выходного напряжения U_I фиксируется вторым вольтметром (или общим вольтметром с переключением точек измерения). Отношение двух напряжений дает величину искомого импеданса:

$$Z_x = R \frac{\dot{U}_U}{\dot{U}_I}.$$

Образцовый резистор R определяет коэффициент масштабирования преобразователя ток-напряжение. С его помощью переключают диапазон измерения прибора.

Для уменьшения влияния соединительных проводов в измерителе используют четырехзажимную схему подключения исследуемого элемента. На рис.10 показана упрощенная структурная схема прибора со входными клеммами и соединительными проводами.

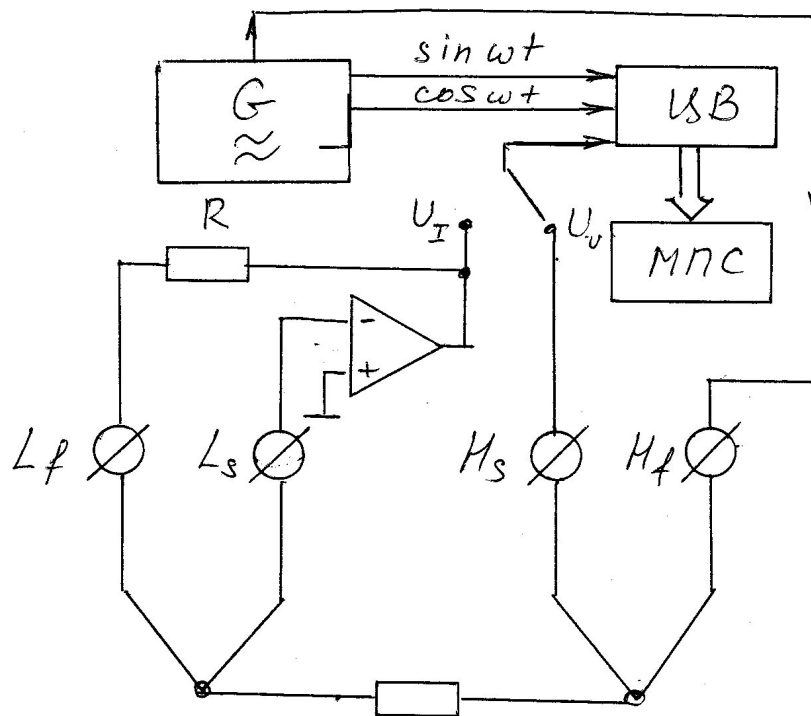


Рис. 10. Структурная схема измерителя LCR

В приборе предусмотрены два входа высокого потенциала (обозначенные H_{force} и H_{sense}) и два входа низкого потенциала (L_{force} и L_{sense}), которые соединяются

отдельными проводниками с разъемами типа «крокодил». Исследуемый элемент подключают к этим разъемам так, что соединение клемм H_{force} , H_{sense} и L_{force} , L_{sense} происходит непосредственно на его выводах. При этом исключается влияние сопротивления соединительных проводов на результат измерения. Действительно, входное сопротивление операционного усилителя велико, ток в проводнике L_s мал. Точки входа усилителя и точка подключения элемента H_s практически эквипотенциальны. Аналогично исключается и падение напряжения на проводнике, соединяющем высокоомный вольтметр и точку H_s .

В приборе использован один векторный (фазочувствительный) цифровой вольтметр. Напряжения U_U и U_I с помощью электронного коммутатора по очереди подают на его вход. Фазочувствительный вольтметр измеряет вещественную и мнимую части (квадратурные компоненты) комплексной амплитуды этих напряжений. Вольтметр работает следующим образом. Гармоническое напряжение $U_m \sin(\omega t + \varphi)$, пропорциональное напряжению U_U или току I_I , поступает на перемножитель. На второй вход перемножителя последовательно (с помощью электронного коммутатора) подают опорное напряжение с генератора: сначала $U_0 \sin(\omega t)$, затем $U_0 \cos(\omega t)$ (эти сигналы сдвинуты друг относительно друга на 90°). На выходе перемножителя последовательно получают напряжения

$$U_m \sin(\omega t + \varphi) \cdot U_0 \cos(\omega t) = \frac{U_0}{2} U_m \sin \varphi + \frac{U_0}{2} U_m \sin(2\omega t + \varphi);$$

$$U_m \sin(\omega t + \varphi) \cdot U_0 \sin(\omega t) = \frac{U_0}{2} U_m \cos \varphi - \frac{U_0}{2} U_m \cos(2\omega t + \varphi).$$

Гармонические составляющие с удвоенной частотой подавляются фильтром нижних частот. Постоянные напряжения, пропорциональные $U_m \cos \varphi$ и $U_m \sin \varphi$, представляют собой вещественную и мнимую части соответствующих комплексных амплитуд. Они измеряются поочередно цифровым вольтметром постоянного тока (АЦП двойного интегрирования). Результаты измерения (по 2 вещественных числа для каждого напряжения U_U или I_I) передаются в микропроцессорную систему (МПС), где производится расчет иммитанса, индуктивности и емкости, фактора потерь и добротности.

Технические характеристики измерителя LCR-821

Прибор предназначен для измерения сопротивления, ёмкости, индуктивности, тангенса угла потерь, добротности, эквивалентного последовательного или параллельного сопротивления, комплексного сопротивления (Z) и фазового сдвига между током и напряжением (θ). Запуск измерений - автоматический или ручной. В автоматическом режиме предусмотрено три скорости измерений – SLOW (порядка 1 измерения в сек), MEDIUM – 3 измерения/сек и FAST – более 7 измерений /сек. В приборе предусмотрен автоматический выбор предела измерения. Это несколько замедляет работу, поэтому при исследовании однотипных элементов (например партии резисторов) удобно использовать режим фиксации предела (RANGE HOLD), что несколько сокращает время измерения.

Базовая погрешность прибора не хуже: по R, L, C, Z: 0.05%, при измерении D, Q: 0.0005; погрешность измерения фазы θ : 0.03°

Частота тест-сигнала может устанавливаться в пределах 12 Гц - 200 кГц на 504 фиксированных частотах. Это позволяет проводить измерения не только на стандартных частотах (100Гц, 1 кГц, 10 кГц и 100 кГц), но и сформировать практически непрерывную сетку частот измерительного сигнала. Рабочая сетка частот устанавливается в приборе по следующему правилу

$$f = \begin{cases} \frac{3\text{кГц}}{n}, & n = 13...250 \\ \frac{60\text{кГц}}{n}, & n = 4...256 \\ \frac{200\text{кГц}}{n}, & n = 1..13 \end{cases},$$

где n- целое число. При наборе требуемой частоты с панели управления прибор округляет ее до ближайшего значения собственной сетки частот.

В приборе предусмотрена возможность подачи постоянного смещения (внутреннего или внешнего) на исследуемый компонент (конденсатор или индуктивность). Это необходимо при исследовании нелинейных компонентов - например, варикапов, емкость которых зависит от приложенного постоянного напряжения.

Уровень тест-сигнала, подаваемого на исследуемый компонент, регулируется в широких пределах с шагом 5 мВ. Выбор разного уровня сигнала необходим при измерении компонентов, параметры которых зависят от амплитуды. Преду-

смотрен режим постоянного уровня тест-сигнала (C.V.). При этом генератор прибора поддерживает на выходных зажимах постоянный уровень сигнала, мало зависящий от импеданса компонента.

Результаты выводятся на табло в абсолютных и относительных единицах (Δ -измерения). Режим усреднения результатов позволяет проводить многократные измерения. Установленные предварительно параметры прибора могут быть сохранены в энергонезависимой памяти прибора и вызваны при его следующем включении.

Основные технические параметры прибора LCR-821 приведены в таблице 1.

Таблица 1

ХАРАКТЕРИСТИКИ	ПАРАМЕТРЫ	ЗНАЧЕНИЯ
Диапазон индикации LCR	Сопротивление (R, ESR, Z)	0.00001 Ом - 99999 кОм
	Емкость (C)	0.00001 пФ - 99999 мкФ
	Индуктивность (L)	0.00001 мГн - 99999 Гн
	Добротность (Q)	0,0001 - 9999
	Тангенс угла потерь (D)	0,0001 - 9999
	Фазовый сдвиг (θ)	-180,00...180,00°
	Режимы измерения	R/Q, C/D, C/R, L/Q, L/R, Z/ θ
	Запуск измерений	Автоматический или ручной
	Схема измерения	Параллельная/последовательная
	Частота тест-сигнала	12 Гц - 200 кГц, 504 фиксированные частотные точки
ТОЧНОСТЬ	Базовая погрешность	$\pm 0.05\%$
СКОРОСТЬ ИЗМЕРЕНИЙ	Время одиночного измерения в режиме FAST	≤ 68 мс
ТЕСТ СИГНАЛ	Уровень тест-сигнала	5 мВ - 1,275 В (шаг 5 мВ)
ПОСТОЯННОЕ СМЕЩЕНИЕ	Внутренний источник	2 В
	Внешний источник	0 - 35 В (максимальный ток 200 мА)
	Режим индикации измерений	Абсолютное значение, Δ -измерение, Δ -измерение в %
ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ФУНКЦИИ	Режим усреднения	1...255 измерений
ДИСПЛЕЙ	Тип индикатора	ЖКИ матрица (240 x 128 точек) с подсветкой и регулировкой контрастности.
	Формат индикации	5 разрядов на основной шкале 4 разряда на дополнительной шкале

4. Описание лабораторной установки

В состав установки входит измеритель LCR -821, набор исследуемых компонентов, персональный компьютер, связанный с прибором последовательным интерфейсом по порту COM1. Прибор управляется кнопочной панелью - цифры 0..9, знак (-) и кнопки START, ENTER, а также с помощью экранного меню. Кнопочная панель имеет второй регистр для установки режима смещения (BIAS ON/OFF), режима постоянной амплитуды тест-сигнала (C.V.), режима фиксации диапазона измерения (R.H.). Установка частоты тест-сигнала производится нажатием кнопки FREQ, набором требуемого значения (в кГц) и подтверждением ввода кнопкой ENTER. Ручной запуск измерений производится кнопкой START. Перевод в автоматический режим (непрерывные измерения) производят длительным нажатием этой кнопки.

Экранное меню управляется кнопками F1...F5, расположенными справа от экрана. В меню предусмотрено переключение скорости измерений (F1), вида индикации результата (F2) - абсолютный - VALUE, относительный DELTA%, DELTA. Кнопкой F3 производится выбор режима измерений, кнопка F4 позволяет задать вид схемы замещения – параллельный или последовательный. Установки более сложных опций прибора (режимы памяти, усреднения, калибровки и пр.) производится в пункте MENU , выбираемым по кнопке F5.

В приборе LCR-821 предусмотрена возможность связи с персональным компьютером. Для этого используется последовательный интерфейс RS-232C (порт COM1) с фиксированной скоростью 38400 бит/с, длина пакета данных 8 бит, 1 стоповый бит, контроль четности отключен. Эти параметры необходимо установить в свойствах последовательного порта компьютера.

Программное обеспечение прибора позволяет полностью управлять его работой. Посылая по интерфейсу команды в виде текстовых строк, можно выполнять все операции управления, дублируя команды с кнопочной панели прибора. Кроме этого, по интерфейсу можно принимать результаты измерения в виде текстовых строк вида

```
MAIN:PRIM <1 значение (7 символов ASCII, включая размерность)> <LF>;  
MAIN:SECO <2 значение><LF>
```

Например, для режима L/Q первое значение – это индуктивность, а второе – добротность, <LF> - символ перевода строки (Hex 0A).

Фирменное программное обеспечение – это программа управления прибором LCR–Viewer (LCR800.exe). Она позволяет полностью дублировать все кнопочные команды управления прибором. При этом органы управления и дисплей блокируются. Кроме того, результаты измерения с дисплея выводятся в текстовый файл вида LCR_xxxx.txt, где xxxx – номер файла по порядку.

При выполнении лабораторной работы можно использовать как ручной способ управления прибором, так и программный способ управления прибором с помощью программы LCR-viewer.

Для измерения частотных характеристик эти режимы не совсем удобны, так как ввод частоты с помощью кнопочной панели занимает довольно много времени. Упростить работу с прибором и автоматизировать измерение частотных характеристик позволяет программа LCR-meter, написанная на графическом языке среды LabView 8.2. В ней предусмотрен выбор режима работы прибора, определение параметров компонентов в полном диапазоне частот (12Гц ...200 кГц), а также их измерение в отдельных частотных точках. Полученные результаты выводятся на графики, в таблицу и сохраняются в файле LCR-meter.xls (формат электронных таблиц Excel). В программе предусмотрен вывод файла помощи (задание к лабораторной работе).

Выбор порядка выполнения лабораторной работы – ручной, программный или автоматический режим измерения ЧХ производится по указанию преподавателя.

5. Задание и указания к выполнению лабораторной работы

1. Калибровка измерителя

Для исключения систематической погрешности перед проведением измерений прибор необходимо откалибровать. Калибровка прибора производится в ручном режиме управления. Проверьте установку режима, используемого в данной лабораторной работе:

- SPEED-FAST (период измерений порядка 70 мс);
- INT.B – OFF внутренний источник смещения отключен (источник выбирается кнопкой 7 – BIAS и включается/выключается кнопкой 8 - ON/OFF);
- C.V – OFF (режим поддержки постоянного уровня напряжения на измеряемом объекте отключен – кнопка 1- C.V);
- R.H – OFF – поддержка режима фиксированного диапазона измерения (RANGE HOLD) отключена – кнопка 0 - R.H);

Для калибровки разомкните клеммы L и H соединительного кабеля и включите режим калибровки холостого хода OPEN TEST (пункт MENU-OFFSET-CAP OFFSET). Дождитесь завершения процесса калибровки по слайд-индикатору на экране. Затем замкните клеммы L и H и проведите калибровку в режиме короткого замыкания SHORT TEST (MENU-OFFSET-R/L OFFSET).

Прибор откалиброван и готов к измерениям.

2. Измерение параметров катушки индуктивности в диапазоне частот

Исследуемая катушка представляет собой соленоид на ферромагнитном сердечнике и имеет большую индуктивность, значительное активное сопротивление и заметную межвитковую емкость. Резонансная частота катушки лежит в диапазоне рабочих частот прибора. Для ее оценки просмотрите зависимость фазового угла полного сопротивления (режим измерения Z/θ) в диапазоне частот 1 200 кГц . Используйте 3-5 точки в ручном режиме или запустите программу авто-

матического измерения частотных характеристик LCR-meter. По виду зависимости фазового угла приблизительно определите частоту резонанса катушки (на этой частоте фазовый угол близок к нулю).

Измерьте частотную характеристику действующего значения индуктивности катушки ее последовательное сопротивление и добротность в диапазоне частот ниже резонансной. Для измерения индуктивности и сопротивления используйте режим L/R , для добротности – режим L/Q . Фиксируйте также модуль и фазу полного сопротивления (режим Z/θ). Произведите измерения на частотах от 0,1 кГц до частоты порядка 0,8...0,9 от резонансной. В ручном режиме возьмите 5-6 частотных отметок, в автоматическом – во всех точках диапазона. Результаты занесите в таблицу по форме 1. Постройте частотные зависимости измеренных параметров.

Рассчитайте собственную индуктивность L_k и межвитковую емкость C_k катушки по формулам (11). Для этого выберите две частоты, на которых действующее значение индуктивности меняется достаточно резко (вблизи резонанса катушки).

3. Измерение параметров электролитического конденсатора

Исследуемый конденсатор имеет номинальную емкость 10 мкФ. Исследуйте частотную зависимость его параметров на частотах 0,1, 1, 10 и 100 и 200 кГц. На первом этапе используйте режим Z/θ для измерения модуля и фазы полного сопротивления конденсатора (последовательная схема замещения). Затем измерьте емкость C и угол диэлектрических потерь $\tan \delta$ (режим C/D). Дополнительно измерьте эквивалентное последовательное сопротивление конденсатора в режиме S/R . Занесите результаты в таблицу по форме 2. Постройте зависимости параметров конденсатора от частоты.

4. Измерение параметров коаксиального кабеля

В лабораторной работе измеряются параметры отрезка стандартного коаксиального кабеля длиной 4 м на частоте 200 кГц. Подключите кабель, разомкнутый на конце и измерьте его входное сопротивление Z_{xx} (используйте режим Z/θ). Затем закоротите конец кабеля и измерьте полное входное сопротивление $Z_{кз}$. По

формулам (15)...(20) рассчитайте волновое сопротивление кабеля, его постоянную затухания и коэффициент фазы. Рассчитайте также коэффициент укорочения кабеля. Запишите результаты измерений и расчетов в таблицу по форме 3.

5. Измерение параметров электродинамического громкоговорителя

Важной характеристикой электродинамического громкоговорителя является зависимость его полного сопротивления от частоты. По ней определяют собственную резонансную частоту подвижной части устройства, ниже которой использовать динамик затруднительно.

Исследуйте частотную зависимость модуля и фазы сопротивления динамика с использованием программы LCR-meter. Определите резонансную частоту динамика. Занесите результаты в таблицу. Постройте зависимости параметров динамика от частоты.

Содержание отчета по лабораторной работе

Отчет должен содержать структурную схему прибора, расчетные формулы, таблицы и графики данных измерений и расчетов, краткие выводы.

Список литературы

1. Дворяшин Б.В. Метрология и радиоизмерения / Учеб. Пособие для студентов ВУЗов, -М.: Издательский центр «Академия», 2005. - 304с
2. Метрология и радиоизмерения / Учебник для ВУЗов. /Под ред. В.И.Нефедова, -М.: Высшая школа, 2003.
3. Винокуров В.И., Каплин С.И., Петелин И.Г. Электрорадиоизмерения. - М.: Высш. шк., 1986.
4. Мирский Г.З. Электронные измерения. - М.: Радио и связь, 1986.

Рекомендуемые формы таблиц

Форма 1

Параметр	Частота, кГц				
L, мГн					
Q					
R _s , Ом					
Z , Ом					
θ, град					

Форма 2

Параметр	Частота, кГц				
C, мкФ					
D					
R _s , Ом					
Z , Ом					
θ, град					

Форма 3

f, кГц	Z _{xx} , Ом	θ _{xx} , град	Z _{k3} , Ом	θ _{k3} , град	Z ₀ , Ом	α, дБ/м	β, рад/м	K _y
200								