

2. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИБОРОВ И МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДВУХПОЛЮСНИКОВ

Цель работы

Изучить мостовой и резонансный методы измерения параметров двухполюсников; ознакомиться с техническими характеристиками и схемами универсального моста и измерителя добротности.

Получить практические навыки измерений параметров двухполюсников и оценки погрешности таких измерений с использованием измерительного моста и измерителя добротности.

Используемые приборы

Измерительный мост (измеритель R, L, C универсальный) E7-11.

Измеритель добротности (куметр) E4-11.

Лабораторное задание

1. Измерить с помощью универсального моста E7-11 сопротивление резистора, индуктивность и добротность катушки индуктивности, емкость и тангенс угла потерь конденсатора. Оценить погрешности этих измерений, используя нормируемые метрологические характеристики моста.

2. Измерить с помощью измерителя добротности E4-11 индуктивность, добротность и собственную емкость катушки индуктивности, емкость, эквивалентное шунтирующее сопротивление и тангенс угла потерь конденсатора, сопротивление резистора и его паразитную емкость. Оценить погрешности измерений, используя нормируемые метрологические характеристики прибора для параметров, измеряемых непосредственно (прямые измерения) и формулы для погрешностей косвенных измерений для параметров, измеряемых косвенно.

3. Сравнить достоинства и недостатки мостового и резонансного методов измерений параметров двухполюсников.

Подготовка к работе (домашнее задание)

1. Изучить теоретический материал, относящийся к данной работе [1,2], конспект лекций и методические указания к настоящей работе.

2. Ознакомиться с метрологическими характеристиками исследуемых приборов (заполнив табл. 2.1). Сопоставить эти характеристики.

Сделать выводы об области применения исследуемых приборов с точки зрения:

- перечня измеряемых параметров двухполюсников,
- диапазона измеряемых значений параметров двухполюсников,
- диапазона рабочих частот,
- нормируемых погрешностей,
- способов оценки погрешностей измерений.

3. Изучить описание данной работы и заготовить в рабочей тетради формы таблиц в соответствии с указаниями к отчету.

Для самопроверки готовности к выполнению работы сформулировать ответы на следующие вопросы, которые могут быть заданы при допуске к работе и ее защите:

1. Принцип работы универсального моста.
2. Условия равновесия моста переменного тока.
3. Источники погрешностей измерения мостовым методом.
4. Принцип работы измерителя добротности.
5. Принципиальная схема измерителя добротности.
6. Источники погрешностей измерения резонансным методом.
7. Достоинства и недостатки мостового и резонансного методов.

Порядок выполнения работы и методические указания

1. Ознакомление с характеристиками исследуемых приборов и принципами их работы

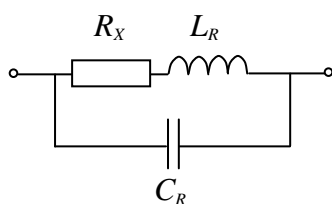
1.1. Показать преподавателю результаты выполнения домашнего задания - заполненную табл. 2.1 и получить допуск к работе.

Таблица 2.1

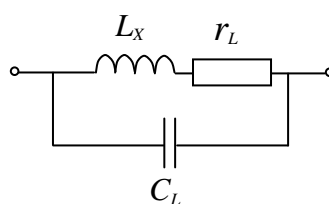
Основные метрологические характеристики приборов

Название и тип прибора	Диапазон рабочих частот, Гц	Измеряемые величины	Пределы измерения	Нормируемая основная погрешность
Универсальный мост (измеритель R, L, C) E7-11		R		
		L		
		C		
		$\operatorname{tg}\delta$		
		Q		
Измеритель добротности E4-11		Q		
		f		
		L_x		-
		C_x		-

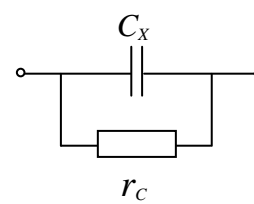
Указание. Двухполюсником называют элемент схемы, имеющий две точки для подключения в электрическую цепь. В лабораторной работе исследуются измерения параметров простейших (элементарных) пассивных двухполюсников: резистора R_x , катушки индуктивности L_x и конденсатора C_x . Однако на достаточно высоких частотах на свойства этих элементов электрических схем начинают влиять паразитные параметры, поэтому эквивалентные схемы таких двухполюсников следует представить следующим образом:



Резистор



Катушка индуктивности



Конденсатор

На частотах, меньших собственной резонансной частоты катушки индуктивности, ее можно представить в виде эквивалентной схемы, состоящей из последовательно включенных индуктивности с действующим значением L_D и резистора с действующим сопротивлением потерь R_D .

Качество катушки индуктивности принято оценивать ее добротностью $Q = \frac{\omega L_x}{r_L}$,

а качество конденсатора - тангенсом угла диэлектрических потерь

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{1}{\omega C_x r_c}$$

2. Измерение параметров двухполюсников с помощью универсального моста

2.1. Включить питание универсального моста Е7-11. Ознакомиться с его принципом действия, органами управления и отсчетным устройством.

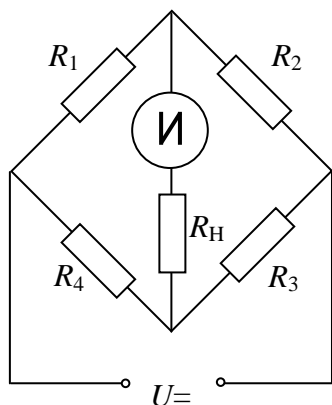


Рис. 2.1

Указания. Мостом называют электрическую цепь, показанную на рис. 2.1 и 2.2. Мосты реализуют измерения параметров цепей методом сравнения. Плечи моста постоянного тока (рис. 2.1) образованы четырьмя резисторами R_1-R_4 . В одну из диагоналей подается постоянное питающее напряжение, а в качестве индикатора **И** обычно используют чувствительный микроамперметр. Если регулировкой одного или нескольких сопротивлений плеч мост «уравновесить», т.е.

добиться состояния, при котором ток индикатора равен нулю, то будет справедливо соотношение $R_1R_3=R_2R_4$. Если сопротивление одного из резисторов неизвестно, например $R_1=R_x$, то его можно найти:

$$R_x = R_2R_4/R_3. \quad (2.1)$$

Формально мост постоянного тока можно уравновесить путем регулировки только одного эталонного сопротивления, однако практически используют три регулируемых элемента. Сначала переключением магазина сопротивлений устанавливают значение отношения R_4/R_3 . Так задают предел измерения. Далее мост уравновешивают, регулируя эталонный резистор R_2 , который обычно образован последовательно

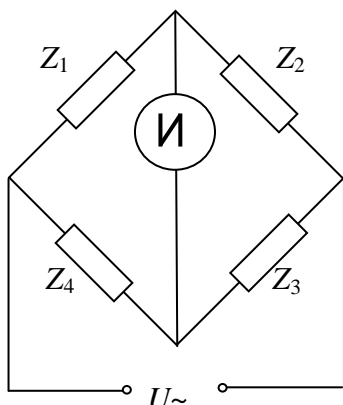


Рис. 2.2

включенным магазином сопротивлений (R_2 **Грубо**) и переменным резистором (R_2 **Плавно**). Отсчетное устройство построено таким образом, что показания измерительного моста снимаются как произведение предела измерений (отношение R_4/R_3) на множитель (резисторы R_2 **Грубо** и R_2 **Плавно**). Сначала мост балансируют при небольшом питающем

напряжении, по мере балансировки увеличивают напряжение с помощью регулятора

Чувствительность.

Плечи моста переменного тока образованы комплексными (полными) сопротивлениями Z_i ($i = 1, \dots, 4$) неизвестного и эталонных двухполюсников. Такой мост питается от генератора переменного напряжения.

Условие «равновесия» моста ($U_{II} = 0$):

$$Z_1 \cdot Z_3 = Z_2 \cdot Z_4. \quad (2.2)$$

Записав комплексное сопротивление Z в показательной форме, получим два условия равновесия:

$$\begin{cases} Z_1 \cdot Z_3 = Z_2 \cdot Z_4 & , \\ \varphi_1 + \varphi_3 = \varphi_2 + \varphi_4 & , \end{cases} \quad (2.3)$$

где Z_i - модули полных сопротивлений плеч, φ_i - фазовые сдвиги между током и напряжением в соответствующих плечах.

Из (2.3) следует, что для уравнивания моста переменного тока необходимо регулировать параметры не менее двух эталонных двухполюсников. Обычно в схемах универсальных мостов используют один нерегулируемый реактивный элемент - эталонный конденсатор постоянной емкости и 4 регулируемых эталонных резистора. Один из эталонных резисторов, выполненный в виде магазина сопротивлений, используют для выбора предела измерения, второй (тоже магазин) - для «грубого» уравнивания моста, третий (переменный эталонный резистор) - для точного уравнивания, четвертый (также переменный эталонный резистор) - для регулировки баланса фаз. Регулировка производится методом **последовательного приближения**, так как нужно добиться одновременного выполнения условий равновесия по модулям и фазам. Отсчетные устройства мостов построены таким образом, что реализуются прямые измерения параметров двухполюсников.

Для измерения параметров различных двухполюсников (R , C , L) используется различное соединение плеч моста, коммутация плеч осуществляется переключателем **L, C, R₊, R₋**.

Основная погрешность измерительных мостов, указываемая в их нормируемых метрологических характеристиках, задается, как правило, с помощью двухчленной формулы и определяется следующими составляющими:

- погрешностью эталонных элементов моста (активных и реактивных),
- чувствительностью моста,
- переходными сопротивлениями контактов.

2.2. Измерить сопротивление резистора R_x на постоянном токе.

Установить переключатель моста в положение **R_±**. Подключить измеряемый резистор к зажимам соединительного кабеля. Нажать кнопку **Выбор предела** и переключателем **Пределы** найти такое положение, при котором стрелка индикатора переходит через нуль.

Уравновесить мост регулировкой **Множитель** при постепенном увеличении чувствительности индикатора. Записать в табл. 2.2 установленный предел и полученное в результате уравнивания значение множителя. Вычислить значение измеренного сопротивления R_x .

Используя формулу для нормируемой основной относительной погрешности моста, оценить абсолютную погрешность измерения сопротивления резистора ΔR , округлить ее значение до одной-двух значащих цифр, записать полученное значение погрешности в табл. 2.2. Округлить измеренное значение сопротивления таким образом, чтобы его младший разряд был таким же, как и младший разряд округленного значения погрешности. Записать округленный результат измерения в табл. 2.2.

2.3. Измерить индуктивность L_x и добротность Q_x катушки индуктивности.

Подключить измеряемую катушку к зажимам соединительного кабеля прибора. Установить переключатели моста в положение **L** и **Q>0,5**. Установить частоту напряжения питания моста 1 кГц.

Установить переключатель **Пределы** в крайнее левое положение. Нажать кнопку **Выбор предела** и переключателем **Пределы** найти такое положение, при котором стрелка индикатора переходит через нуль.

Уравновесить мост путем последовательной подстройки регуляторов **Множитель** и **Q** при постепенном увеличении чувствительности индикатора. Полученные в результате уравнивания значения установленного предела, множителя и показателя шкалы добротности записать в табл. 2.2. Вычислить значение измеренной индуктивности L_x и записать результат измерения в табл. 2.2.

Используя данные для нормируемых основных относительных погрешностей моста, оценить абсолютные погрешности измерения индуктивности ΔL и добротности ΔQ , округлить их значения до одной-двух значащих цифр и записать в табл. 2.2. Записать в таблицу окончательные результаты измерения L_x и Q_x , записав их таким образом, чтобы младший разряд результата соответствовал младшему разряду полученного значения погрешности.

2.4. Измерить емкость C_x и тангенс угла потерь конденсатора.

Подключить измеряемый конденсатор к зажимам соединительного кабеля. Установить переключатели моста в положение С и $\text{tg } \delta$. Уравновесить мост путем последовательной подстройки регуляторов **Множитель** и $\text{tg } \delta$ при постепенном увеличении чувствительности индикатора. Записать в табл.2.2 полученные в результате уравновешивания значения установленного предела, множителя и показателя шкалы $\text{tg } \delta$. Вычислить значение измеренной емкости C_x и записать результат измерения в табл. 2.2.

Используя данные для нормируемых основных относительных погрешностей моста, оценить абсолютные погрешности ΔC и $\Delta \text{tg } \delta$, округлить их значения до одной-двух значащих цифр и занести в табл. 2.2. Записать в таблицу окончательные результаты измерения C_x и $\text{tg } \delta$ таким образом, чтобы их младшие разряды соответствовали младшим разрядам погрешностей.

Таблица 2.2

Результаты измерений $R_x, L_x, C_x, Q_x, \text{tg} \delta$ с использованием моста

Объект измерения		Предел	Множитель	Измеренное значение	Абсолютная погрешность	Результат измерения
Резистор	R_x					
Катушка индуктивности	L_x					
	Q_x					
Конденсатор	C_x					
	$\text{tg} \delta$					

3. Измерение параметров двухполюсников

с помощью измерителя добротности

3.1. Включить питание прибора Е4-11. Ознакомиться с его органами управления, схемой и расположением клемм для подключения измеряемых элементов. В соответствии с требованиями технического описания прибора установить переключатель **ПРЕДЕЛЫ Q** в положение **НУЛЬ Q** и его регулировкой установить нуль на шкале **Q**. Установить частоту 30 МГц (первый поддиапазон 30-50 МГц), установить переключатель **ПРЕДЕЛЫ Q** в положение **КАЛИБР. Q** и его регулировкой ручкой установить стрелку шкалы **Q** на знак .

Указание. Измеритель добротности (куметр) реализует резонансный метод измерения параметров двухполюсников (рис. 2.3).

В измерительный контур, образованный $L_{обр}$ и $C_{обр}$ через емкостный делитель C_1 , C_2 вводится напряжение U_0 , контролируемое вольтметром V_1 . Вольтметр V_2 служит индикатором резонанса.

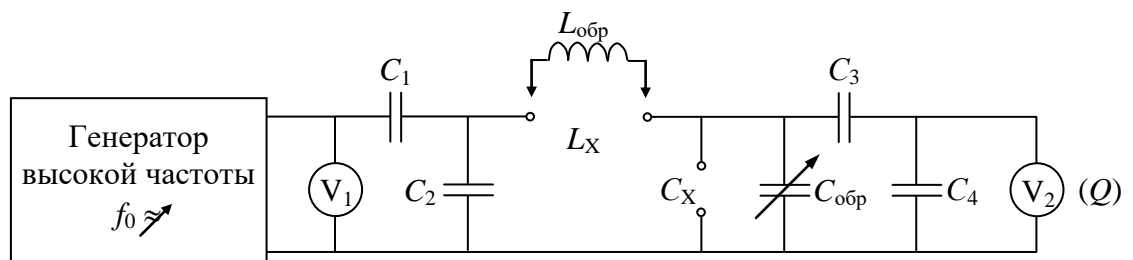


Рис. 2.3. Упрощенная структурная схема измерителя добротности

Поскольку при резонансе если $Q > 10$, имеет место равенство

$$Q = \frac{U_{с\ обр}}{U_0}, \quad (2.4)$$

а величина U_0 поддерживается постоянной, то можно проградуировать шкалу вольтметра V_2 в единицах Q . В результате получим прямые измерения добротности.

При резонансе справедливо соотношение

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_0}}, \quad (2.5)$$

поэтому, зная частоту генератора f_0 и емкость колебательного контура C_0 , можно оценить неизвестное значение индуктивности L . Такие измерения называют косвенными.

С помощью куметра можно реализовать на заданной и достаточно высокой частоте также косвенные измерения емкости C_x , сопротивления потерь конденсаторов R_C , $\text{tg}\delta$, R_x и т.п. Такие измерения, как правило, проводятся в два этапа. Сначала колебательный контур прибора настраивают в резонанс и оценивают его характеристики в исходном состоянии. Затем в контур подключают исследуемый двухполюсник и по изменению характеристик контура оценивают параметры подключенного двухполюсника, используя формулы (2.6) - (2.16).

3.2. Измерить действующие значения индуктивности L_d и добротности Q_d катушки индуктивности.

Подключить измеряемую катушку к зажимам L_x , расположенным на верхней панели измерителя добротности. Установить частоту генератора измерителя добротности, значение которой f_1 указано на корпусе измеряемой катушки индуктивности. Настроить измерительный контур в резонанс на частоте f_1 регулировкой емкости образцового конденсатора по максимуму показания вольтметра, градуированного в значениях Q .

Записать значения установленной частоты f_1 , емкости образцового конденсатора $C_{об1}$ и добротности $Q_{д1}$ на частоте f_1 в табл. 2.3. ($C_{об1} = C_{об}(f_1)$, $Q_{д1} = Q_d(f_1)$). Значение $C_{об1}$ следует записать с учетом разрешающей способности шкалы образцового конденсатора 0,01 пФ.

Таблица 2.3

Результаты оценки параметров катушки индуктивности

Частота, МГц	Q_d	$C_{об},$ пФ	$L_d,$ мкГн	$R_d,$ Ом	C_L пФ	$L_x,$ мкГн	Q_x	$R_L,$ Ом	f_L МГц
f_1									
f_2									

Вычислить и записать в табл. 2.3 действующее значение индуктивности

$$L_d = \frac{1}{4\pi^2 f_1^2 C_{об1}} \quad (2.6)$$

и действующее сопротивление потерь в измеряемой катушке

$$R_d = \frac{X_{d1}}{Q_{d1}} = \frac{2\pi f_1 L_d}{Q_{d1}} . \quad (2.7)$$

3.3. Оценить паразитную емкость, которую катушка индуктивности вносит в колебательный контур.

Установить частоту генератора $f_2 = 2f_1$. Настроить измерительный контур в резонанс и записать в табл. 2.3 полученные значения f_2 , $C_{об2}$ и $Q_{д2}$.

Вычислить собственную емкость катушки C_L из (2.9) или (2.10), результат внести в табл. 2.3. Оценить истинное значение индуктивности по формуле (2.11) и ее собственную резонансную частоту по формуле (2.12).

Указание. Истинное значение индуктивности отличается от действующего вследствие того, что катушка вносит в контур паразитную емкость C_L , которую можно оценить по результатам настройки измерительного контура в резонанс на двух частотах путем решения системы двух уравнений с двумя неизвестными

$$f_1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_x(C_{об1} + C_L)}} , \quad (2.8)$$

$$f_2 = nf_1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_x(C_{об2} + C_L)}} ,$$

где $C_{об1}$, $C_{об2}$ - показания шкалы образцового конденсатора при резонансе на частотах f_1 и f_2 , соответственно. Решая систему уравнений относительно C_L , получаем:

$$C_L = \frac{f_1^2 C_{об1} - f_2^2 C_{об2}}{f_2^2 - f_1^2} = \frac{C_{об1} - n^2 C_{об2}}{n^2 - 1} . \quad (2.9)$$

Удобно выбрать $n = 2$, тогда (2.9) упрощается:

$$C_L = \frac{C_{об1} - 4C_{об2}}{3} . \quad (2.10)$$

Теперь можно оценить истинное значение индуктивности

$$L_x = \frac{1}{4\pi^2 f_1^2 (C_{об1} + C_L)} . \quad (2.11)$$

Для проверки корректности этого результата следует повторить расчет L_x , подставив в (2.11) значения f_2 и C_{062} . Два полученных значения L_x должны совпадать в пределах погрешностей косвенных измерений индуктивности (п.3.4).

Полученное значение C_L позволяет оценить собственную резонансную частоту исследуемой катушки индуктивности

$$f_L = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_x C_L}}. \quad (2.12)$$

3.4. Измерить емкость конденсатора C_x и тангенс угла потерь.

Подключить к зажимам L_x штатную катушку индуктивности, входящую в комплект прибора Е4-11. Установить частоту генератора измерителя добротности, значение которой f_1 указано на корпусе измеряемой катушки индуктивности. Настроить измерительный контур в резонанс на частоте f_1 регулировкой емкости образцового конденсатора по максимуму показания вольтметра, градуированного в значениях Q . Записать значения установленной емкости C_{061} , резонансной частоты f , и добротности Q_1 в табл. 2.4.

Таблица 2.4

Результаты измерений параметров конденсатора и резистора

Объект измерения	f , МГц	C_{061} , пФ	Q_1	C_{062} , пФ	Q_2	C_x , пФ	$\text{tg}\delta$	R_x , Ом	C_R , пФ
Конденсатор								-	-
Резистор						-	-		

Подключить к зажимам C_x измеряемый конденсатор (параллельно образцовому конденсатору) и изменением емкости образцового конденсатора восстановить резонанс на частоте f . Записать новые значения C_{062} и Q_2 в табл.2.4. Вычислить и поместить в табл. 2.4 результаты косвенных измерений емкости конденсатора

$$C_x = C_{061} - C_{062} \quad (2.13)$$

и тангенса угла потерь
$$\operatorname{tg} \delta = \frac{C_{\text{об1}}(Q_1 - Q_2)}{C_x Q_1 Q_2}.$$

(2.14)

Указание. Чем больше установленное значение начальной емкости $C_{\text{об1}}$, тем шире диапазон измерения неизвестной емкости C_x . Поскольку нормируемая погрешность образцового конденсатора имеет существенную мультипликативную составляющую, при измерении емкости C_x целесообразно устанавливать минимально возможное значение начальной емкости $C_{\text{об1}}$.

3.5. Измерить сопротивление резистора и его паразитную емкость.

Указание. Эквивалентные схемы конденсатора и резистора на высоких частотах одинаковы, поэтому процедура измерения параметров резистора не отличается от процедуры измерения параметров конденсатора.

После выполнения двух настроек в резонанс (без измеряемого резистора и при его подключении) записать полученные значения f , $C_{\text{об1}}$, Q_1 , $C_{\text{об2}}$ и Q_2 в табл. 2.4 и вычислить сопротивление резистора

$$R_x = \frac{Q_1 Q_2}{2\pi f C_{\text{об1}}(Q_1 - Q_2)} \quad (2.15)$$

и его паразитную емкость
$$C_R = C_{\text{об1}} - C_{\text{об2}}.$$

(2.16)

3.6. Вывести формулы для оценки абсолютных ΔL_x , ΔC_x , ΔR_x или относительных δ_L , δ_c , δ_R погрешностей косвенных измерений индуктивности катушки, емкости конденсатора и сопротивления резистора с помощью измерителя добротности на основе функциональных зависимостей (2.6), (2.13), (2.15), определяющих измеряемые параметры (результаты расчета поместить в табл. 2.5).

Таблица 2.5

Оценка основной абсолютной погрешности измерения параметров двухполюсников с помощью измерителя добротности

Измеряемая величина	Полученное значение	Относительная погрешность, %	Абсолютная погрешность	Результат измерения
L_x , нГн				
Q				
C_x , пФ				

R_C , кОм				
R_x , кОм				
C_R , пФ				

Указание. Главными источниками погрешностей косвенных измерений параметров двухполюсников с помощью куметра являются погрешности входящих в соответствующие формулы аргументов, которые оценивают с помощью прямых измерений - по шкалам Q , f и C_0 этого прибора:

- погрешность измерения добротности Δ_Q ,
- погрешность установки частоты генератора Δ_f ,
- погрешность градуировки образцового конденсатора Δ_C .

Эти погрешности указаны в метрологических характеристиках прибора.

Если Y - искомая величина, связанная функциональной зависимостью

$$Y = F(x_1, \dots, x_i, \dots, x_n)$$

с величинами x_i ($i=1, \dots, n$), которые измеряют непосредственно, то соотношение

$$\Delta_i = \frac{\partial F}{\partial x_i} \Delta x_i \quad (2.17)$$

позволяет оценить частную абсолютную погрешность косвенного измерения величины Y , обусловленную погрешностью Δx_i аргумента x_i .

Выражение для абсолютной погрешности косвенного измерения, полученное путем дифференцирования, в некоторых случаях может получиться достаточно громоздким. Тогда целесообразно использовать выражение для частной относительной погрешности косвенного измерения

$$\delta_i = \frac{\partial F}{\partial x_i} \frac{\Delta x_i}{Y} \quad (2.18)$$

При этом формулы значительно упрощаются (сокращаются постоянные коэффициенты).

Способ оценки результирующей (суммарной) погрешности косвенного измерения при наличии нескольких аргументов зависит от свойств исходных погрешностей Δx_i .

Если это систематические погрешности, то частные погрешности косвенных измерений складывают алгебраически с учетом знака. При этом отдельные систематические погрешности косвенных измерений могут друг друга частично компенсировать.

Если погрешности исходных величин носят случайный характер, взаимонезависимы и известны их средние квадратические отклонения, то абсолютная средняя квадратическая погрешность косвенного измерения определяется соотношением

$$\sigma_y = \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial x_1}\right)^2 \sigma_{x_1}^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial x_2}\right)^2 \sigma_{x_2}^2 + \dots + \left(\frac{\partial F}{\partial x_n}\right)^2 \sigma_{x_n}^2}. \quad (2.19)$$

Погрешности прямых измерений с помощью куметра (Δ_Q , Δ_f , Δ_C) обычно задают симметричными интервалами как пределы неисключенных систематических погрешностей. В этом случае предельную погрешность косвенного измерения при количестве составляющих не более 3 принято определять путем суммирования модулей соответствующих частных абсолютных или относительных погрешностей

$$\Delta_y = \pm \left(\left| \frac{\partial F}{\partial x_1} \Delta x_1 \right| + \left| \frac{\partial F}{\partial x_2} \Delta x_2 \right| + \left| \frac{\partial F}{\partial x_3} \Delta x_3 \right| \right). \quad (2.20)$$

$$\delta_y = \pm \left(\left| \frac{\partial F}{\partial x_1} \frac{\Delta x_1}{Y} \right| + \left| \frac{\partial F}{\partial x_2} \frac{\Delta x_2}{Y} \right| + \left| \frac{\partial F}{\partial x_3} \frac{\Delta x_3}{Y} \right| \right). \quad (2.21)$$

Например, если частная относительная составляют, соответственно, $\delta_1 = \pm 1\%$, $\delta_2 = \pm 2\%$, $\delta_3 = \pm 3\%$ то результирующая предельная погрешность косвенного измерения будет находиться в пределах $\pm 6\%$.

4. Сравнить мостовой и резонансный методы измерения параметров двухполюсников с точки зрения:

- диапазона частот, на которых можно измерять параметры;
- точности измерений;
- быстродействия и удобства в работе

и сделать выводы об их достоинствах и недостатках.

Отчет должен содержать:

- 1) номер и наименование работы;
 - 2) цель работы;
 - 3) заполненные таблицы с их заголовками;
 - 4) принципиальные схемы мостов постоянного и переменного тока;
 - 5) функциональную схему измерителя добротности;
- б) выводы по п. 4.