

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ КОМПОНЕНТОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучить методы измерения параметров компонентов электрических цепей. Научиться с помощью амперметра, вольтметра, резонансных и мостовых схем измерять параметры конденсаторов и катушек индуктивности и проводить обработку результатов измерения.

2. КРАТКИЕ ПОЯСНЕНИЯ К РАБОТЕ

2.1. Общие сведения.

Основными компонентами электрических цепей являются линейные пассивные двухполюсники - резисторы, конденсаторы и катушки индуктивности.

Для резистора основным параметром является сопротивление электрическому току R , которое чаще всего измеряется методом непосредственной оценки электронными или цифровыми омметрами. Для измерения с высокой точностью применяют мосты постоянного тока, которые в диапазоне $1 - 10^6$ Ом имеют относительную погрешность $\pm 0,005$.

Основной параметр конденсатора - ёмкость C , а паразитный - сопротивление потерь R_C , главным образом в диэлектрике (рис. 1, а). Комплексное сопротивление конденсатора $Z_C = R_C + 1/j\omega C$ и тангенс угла потерь $\operatorname{tg}\delta = \omega R_C C$, где $\omega = 2\pi f$, а f - рабочая частота в электрической цепи.



Рис. 1. Эквивалентные схемы на низких частотах конденсатора и катушки индуктивности

Для катушки индуктивности (рис. 1, б) основным параметром является индуктивность L , а паразитным - сопротивление потерь R_L . Комплексное сопротивление катушки индуктивности $Z_L = R_L + j\omega L$. Важной характеристикой катушки является её добротность. $Q = \omega L / R_L$.

Для измерения параметров конденсаторов и катушек индуктивности наибольшее применение получили методы вольтметра-амперметра, мостовой и резонансный.

2.2. Метод вольтметра-амперметра.

Метод вольтметра-амперметра является косвенным, так как сводится к измерению тока и напряжения в цепи с измеряемым объектом и последующим расчетом его параметров по закону Ома.

2.2.1. Измерение полного сопротивления. Схемы для измерения полного сопротивления Z приведены на рис. 2. Измерительная цепь питается переменным током частотой f .

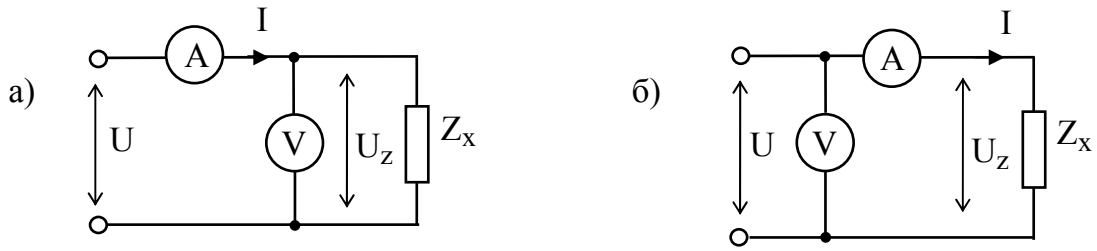


Рис 2. Схемы измерения полного сопротивления методом вольтметра-амперметра.

По показаниям вольтметра и амперметра определяют модуль полного сопротивления

$$|Z_x| = \frac{U_Z}{I} = \sqrt{(R_Z^2 + X_Z^2)},$$

где U_Z и I -показания вольтметра и амперметра: R_Z , X_Z - активная и реактивная составляющие полного сопротивления. Так как R_Z и X_Z неизвестны, то фазовый сдвиг $\varphi = \arctg(X_Z / R_Z)$ при таком измерении установить невозможно.

Для уменьшения погрешности, обусловленной собственным потреблением энергии приборами, схему на рис. 2, а необходимо применять при значениях $Z_x < Z_B$, а схему на рис. 2, б при $Z_x > Z_B$, где Z_B - полное сопротивление вольтметра.

2.2.2. Измерение ёмкости и индуктивности может быть проведено по схемам, представленным на рис. 3. В этих схемах ток I определяется по падению напряжения U_R на активном образцовом резисторе R_1 .

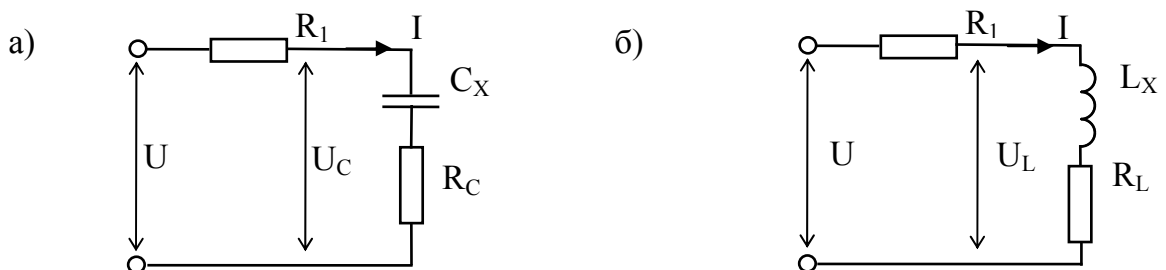


Рис. 3. Схемы для измерения ёмкости (а) и индуктивности (б) методом вольтметра-амперметра.

Ёмкостное сопротивление конденсатора $X_C = 1 / \omega C_x = U_C / I = U_C R_1 / U_R$, где U_R падение напряжения на образцовом резисторе R_1 . При этом

$$C_x = \frac{I}{\omega U_C} = \frac{U_R}{\omega U_C R_1}.$$

Следовательно при измерении ёмкости этим методом необходимо знать частоту источника питания. Этим методом определяют ёмкость конденсаторов с малыми потерями ($R_C \ll Z_C$).

При измерении индуктивности катушки методом вольтметра-амперметра (рис. 3, б) необходимо, чтобы её активное сопротивление R_L было значительно меньше реактивного сопротивления X_L .

При этом по закону Ома $I = U_L / \omega L_X$, откуда $L_X = U_L / \omega I$. Измеряя напряжение U_R на образцовом резисторе R_1 , получим

$$L_{X1} = \frac{U_L R_1}{\omega U_R}$$

Если требуется получить более точный результат, то необходимо учесть активное сопротивление катушки, так как

$$Z_1 = \frac{U_L}{I} = \sqrt{(R_L^2 + \omega^2 L_X^2)}, \text{ откуда } L_X = \frac{1}{\omega} \sqrt{(Z_1^2 - R_L^2)}$$

С увеличением частоты точность измерения уменьшается вследствие влияния собственной ёмкости C_K катушки индуктивности и входной ёмкости C_B вольтметра, которые суммируются $C = C_K + C_B$. Ёмкость C и измеряемая индуктивность L_X образуют параллельный контур, сопротивление которого при приближении частоты источника питания f к частоте собственных колебаний контура f_K возрастает. Поэтому значение индуктивности, полученное результате измерения, будет больше действительного значения.

К недостаткам метода вольтметра-амперметра можно отнести сравнительно небольшую точность (0,5 - 2%) и возможность применения лишь на низких частотах.

Преимуществом метода является то, что через измеряемый объект можно пропустить такой же ток, как и в реальных условиях его работы.

2.3. Резонансный метод.

Принцип резонансного метода заключается в определении резонансной частоты колебательного контура, состоящего из образцового и измеряемого элементов. Значение измеряемого параметра вычисляется из формулы

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

Наибольшее практическое применение получили измерители добротности - куметры (рис. 4).

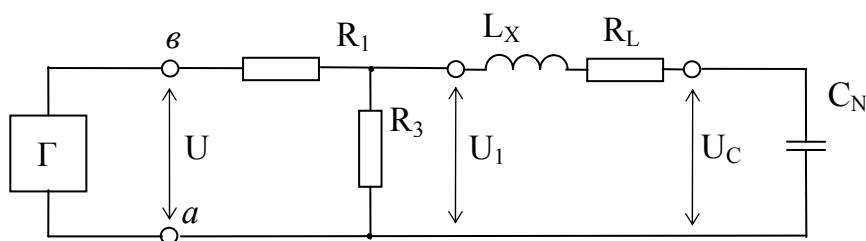


Рис. 4. Схема измерения индуктивности методом куметра.

Измеритель добротности состоит из генератора Γ , измерительного контура и индикатора резонанса - электронного вольтметра. Генератор позволяет устанавливать нужное значение частоты. Измерительный контур образуется исследуемой катушкой L_X и образцовым конденсатором C_N . В измерительный контур через делитель напряжения вводят последовательно небольшую известную часть U_1 выходного напряжения генератора U .

В момент резонанса напряжение на конденсаторе достигает максимума, а отношение напряжений $U_C/U_1 = 1/\omega C_N R_L = \omega L_X/R_L = Q$, где Q - добротность контура.

Искомую индуктивность L_X и активное сопротивление R_L рассчитывают по формулам

$$L_X = \frac{1}{\omega^2 C_N}, \quad \text{а} \quad R_L = \frac{\omega L_X}{Q}.$$

2.4. Мостовой метод

Мосты используют для измерения сопротивления, емкости, добротности и угла потерь.

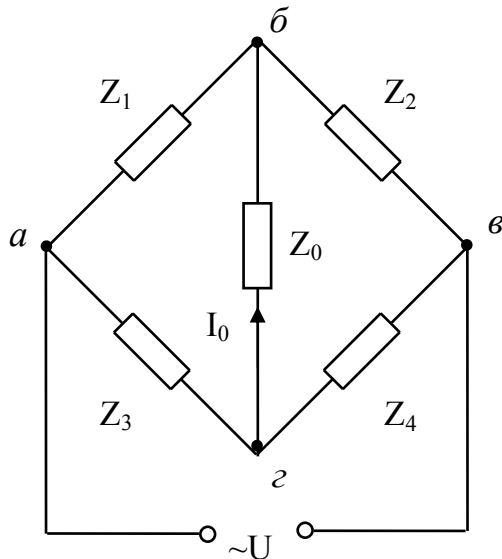


Рис.5 Схема одинарного моста

Схема одинарного моста переменного тока приведена на рис. 5. Плечи моста в общем случае содержат комплексные сопротивления $Z_1 - Z_4$. В диагональ $б - г$, называемую выходной, включается нагрузка (в частном случае - нуль индикатор) с сопротивлением Z_0 .

Равновесие моста имеет место при таком подборе параметров плеч, чтобы $I_0 = 0$ т. е. при $Z_1 Z_4 = Z_2 Z_3$.

В развернутой форме выражения полных сопротивлений плеч имеют вид:

$$Z_i = R_i + jX_i.$$

Равновесие моста для мнимых и вещественных членов:

$$R_1 R_4 - X_1 X_4 = R_2 R_3 - X_2 X_3$$

$$R_1 X_4 + R_4 X_1 = R_2 X_3 + R_3 X_2$$

Наличие двух уравнений равновесия означает необходимость регулировки не менее двух параметров моста переменного тока для достижения равновесия. Два независимых уравнения равновесия дают возможность определить мостом переменного тока одновременно две независимые величины.

В мостах переменного тока часто применяют электронные нуль-индикаторы (НИ), входное сопротивление которых приблизительно можно считать равным бесконечности. Для этого случая напряжение между точками $б$ и $г$ можно определить по формуле

$$U_{б-г} = U(Z_1 Z_4 - Z_2 Z_3) / (Z_1 + Z_2)(Z_3 + Z_4).$$

2.4.1. Мосты для измерения емкости и угла потерь. При измерении емкости исследуемого объекта, например конденсатора, следует учесть, что он обычно обладает потерями, т. е. в нем поглощается активная мощность. Реальный конденсатор представляется в виде последовательно соединенных идеальной емкости и сопротивления потерь (рис. 2, а).

Ток в цепи такого конденсатора опережает напряжение на угол φ , меньший 90° (Рис. 6). Из векторной диаграммы конденсатора с потерями следует, что $\tan \delta = \omega C R$, где δ - угол потерь.

Для измерения емкости конденсаторов с малыми потерями используют схему моста приведенную на рис. 7. Полное сопротивление плеч в данном случае:

$$Z_1 = R_X + 1/j\omega C_X; \quad Z_3 = R_N + 1/j\omega C_N; \quad Z_2 = R_1; \quad Z_4 = R_2$$

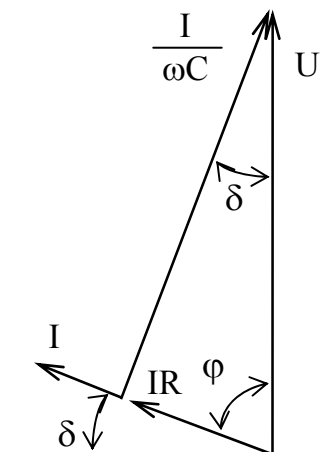


Рис.6. Векторная диаграмма конденсатора с потерями.

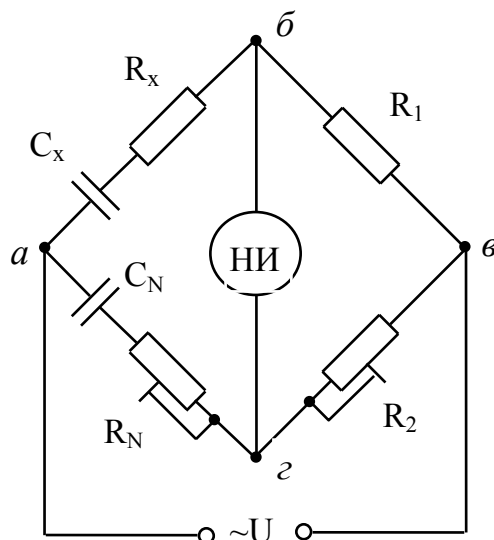


Рис.7. Схема моста для измерения емкости и угла потерь.

Подставив эти выражения в формулу равновесия моста, будем иметь

$$(R_x + 1/j\omega C_x)R_2 = (R_N + 1/j\omega C_N)R_1.$$

Отсюда получим условия равновесия моста:

$$C_x = C_N R_2 / R_1; \quad R_x = R_N R_1 / R_2.$$

Угол потерь δ , определяется из выражения $\tan \delta = \omega C_x R_x$.

2.4.2. Мосты для измерения индуктивности и добротности. Для измерения индуктивности можно использовать образцовый конденсатор (Рис. 8). В этом случае условие равновесия имеет вид:

$$(R_x + j\omega L_x)R = (1 + j\omega C_N R)R_1 R_2,$$

отсюда получим $L_x = C_N R_1 R_2$; $R_x = R_1 R_2 / R$.

По полученным значениям R_x и L_x можно определить добротность катушки

$$Q = \omega L_x / R_x.$$

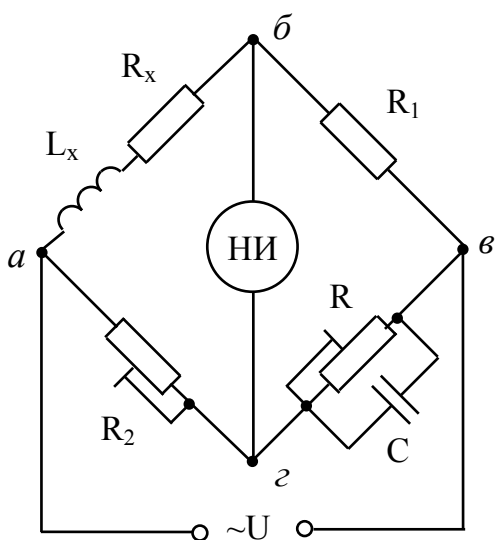


Рис. 8. Схема моста для измерения индуктивности и добротности

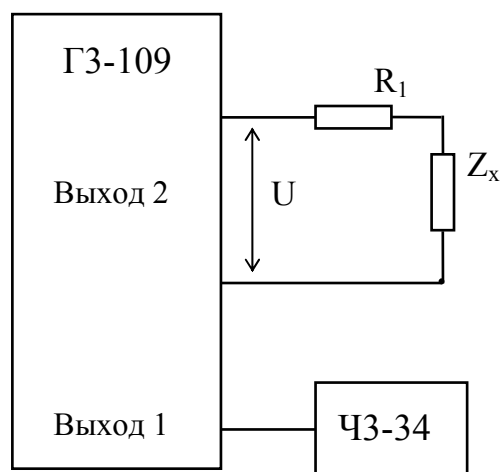


Рис. 9. Схема измерения индуктивности и емкости методом вольтметра - амперметра

3. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 3.1. Назовите основные параметры компонентов электрических цепей.
- 3.2. Нарисуйте схемы для измерения малых и больших сопротивлений методом амперметра и вольтметра.
- 3.3. Какие параметры конденсатора и катушки индуктивности можно измерить методом амперметра и вольтметра?
- 3.4. Сформулируйте принцип резонансного метода.
- 3.5. Как выражается условие равновесия моста переменного тока?
- 3.6. Что означает выражение "тангенс угла потерь"?
- 3.7. Изобразите схему моста для измерения индуктивности и добротности.
- 3.8. В чем заключаются достоинства и недостатки мостовых измерительных цепей.

4. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО МАКЕТА

В качестве объектов измерения в лабораторной работе используются резисторы МЛТ, конденсатор МБМ - 160В - 0,05 мкФ, катушка индуктивности на сердечнике Б22 с числом витков $W = 600$, намотанная проводом ПЭВ-2 диаметром 0,15 мм

Конденсатор C_x и индуктивность L_x расположены на макете и могут быть подключены к приборам и в измерительную схему с помощью соединительных проводов. Функциональная схема макета приведена на рис. 10.

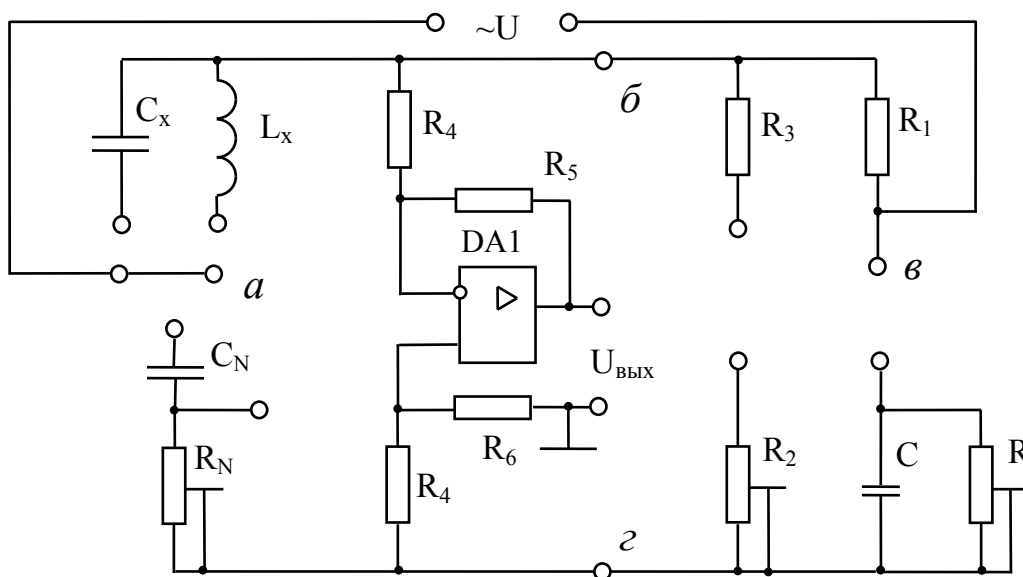


Рис. 10. Функциональная схема макета

В качестве нуль-индикатора используется дифференциальный усилитель, собранный на микросхеме DA1 (КР140УД608) и резисторах $R_4 - R_7$. К выходу усилителя подключается осциллограф С1-55. Напряжения питания для микросхемы DA1 получены выпрямлением напряжения $\sim U$, которым запитана диагональ моста $a - в$. C_N и C - образцовые конденсаторы К71-7 - 0,04 мкФ $\pm 0,5\%$. R_1 - образцовый резистор С2-14 - 0.5 - 5.11 кОм $\pm 0.1\%$.

Кроме того в лабораторной работе используются приборы:

- генератор сигналов низкочастотный ГЗ-109;
- цифровой частотомер ЧЗ-34;
- электронно-лучевой осциллограф С1-55;
- вольтметр универсальный цифровой В7-35.

5. ПРОГРАММА РАБОТЫ

5.1. Изучить по техническим описаниям средства измерения, используемые в работе.

5.2. Измерить сопротивление двух резисторов с помощью прибора непосредственной оценки (В7-35) и рассчитать погрешность измерения.

5.3. Изучить устройство лабораторного макета, назначение и параметры находящихся в нем компонентов.

5.4. Измерить методом вольтметра-амперметра емкость конденсатора и индуктивность катушки. Оценить погрешность измерения.

5.5. Измерить индуктивность и добротность катушки резонансным методом, оценить погрешность измерения.

5.6. Измерить емкость конденсатора C_x мостовой схемой.

5.7. Измерить индуктивность и добротность катушки L_x мостовой схемой.

5.8. Оценить погрешности измерения L_x и C_x мостовой схемой. Обработать результаты измерений, сравнить их по точности с предыдущими измерениями.

5.9. Оформить отчет по проделанной работе.

6. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

6.1. Измерение сопротивлений постоянному току

Измерить сопротивление двух резисторов ($R_x < 10 \text{ Ом}$, $R_x > 100 \text{ Ом}$) с помощью прибора непосредственной оценки В7-35. Определить относительную погрешности измерения δ (см. техническое описание прибора В7-35), рассчитать абсолютную погрешность ΔR_x и записать результат измерения.

6.2. Метод вольтметра-амперметра. Для определения емкости конденсатора C_x и индуктивности L_x этим методом необходимо собрать схему, показанную на рис. 9. Ток в измерительной цепи определяется косвенно, путем измерения напряжения на известном резисторе $R_1 = 5,11 \text{ кОм}$.

6.2.1. *Измерение емкости конденсатора C_x* производится в следующем порядке:

- подключить конденсатор C_x к точке "а" макета;
- подать напряжение с генератора частотой $f = 1 \text{ кГц}$ и напряжением 5В;
- измерить с помощью вольтметра В7-35 падение напряжения U_R и U_C соответственно на образцовом резисторе R_1 и неизвестном конденсаторе C_x ;
- подключить частотомер ЧЗ-34 к выходу 1 генератора ГЗ-109 и измерить частоту напряжения;
- определить значение емкости по формулам, приведенным в пункте 2.2.2.
- рассчитать относительную погрешность измерения δ_C , при этом учесть, что погрешность изготовления образцового сопротивления $\delta_R = 0,1 \%$

$$\delta_C = \sqrt{\delta_R^2 + \delta_{UR}^2 + \delta_f^2 + \delta_{UC}^2}, \text{ где}$$

δ_{UR} и δ_{UC} - погрешности измерения падения напряжения на резисторе и конденсаторе, определенные по техническому описанию на вольтметр В7-35, а δ_f - погрешность измерения частоты прибором ЧЗ-34.

6.2.2. Измерение индуктивности катушки L_X

Для измерения L_X необходимо подключить её к точке "а" макета и выполнить операции приведенные в п.п. 6.2.1., измеряя вместо U_C напряжение U_L , и далее:

- измерить активное (омическое) сопротивление катушки R_K прибором В7-35, предварительно отключив её от схемы;
- определить значение индуктивности и рассчитать относительную погрешность измерения;
- определить L_X с учетом значения R_K (пункт 2.2.2), считая, что в первом приближении $R_L \approx R_K$. Определить методическую погрешность.

Результаты измерений и вычислений п.п. 6.2.1. и 6.2.2. занести в таблицу 1

Таблица 1

	U_{R1}	U_C	f	C_X	-	δ_{UR}	δ_f	δ_{UC}	δ_C
6.2.1.									
	U_{R1}	U_L	f	L_X	R_K	δ_{UR}	δ_f	δ_{UL}	δ_L
6.2.2.									

6.3. Измерение добротности катушки индуктивности резонансным методом:

- собрать схему изображенную на рис. 4, для этого точку "а" макета соединить с нижним контактом конденсатора C_N и резистором R_3 перемычками, а катушку индуктивности L_X - с верхним контактом конденсатора C_N ;
- подключить макет к выходу 2 генератора ГЗ-109;
- установить выходное напряжение генератора $U = 10V$ частотой 1 кГц;
- подключить осциллограф С1-55 к конденсатору $C_N = 0,04$ мкФ;
- изменяя частоту генератора, определить резонансную частоту колебательного контура по максимуму напряжения на конденсаторе, наблюдаемого на экране осциллографа ;
- измерить резонансную частоту прибором ЧЗ-34;
- отключить осциллограф от конденсатора C_N и измерить напряжения U_1 и U_C прибором В7-35;
- рассчитать добротность Q , индуктивность L_X и сопротивление R_L катушки (пункт 2.3), определить относительные погрешности измерения.

Результаты измерений и вычислений занести в таблицу 2

Таблица 2

U_1	U_C	$f_{рез}$	L_X	R_L	Q	δ_f	δ_L

При определении относительной погрешности измерения резонансной частоты учесть, что $\delta_f = (\Delta f / f_{\text{рез.}})100\%$, где $f_{\text{рез.}}$ - резонансная частота, измеренная прибором ЧЗ-34, а Δf - погрешность установки резонансной частоты.

6.4. Измерение параметров конденсатора и катушки индуктивности мостовым методом.

6.4.1. Измерение емкости конденсатора C_x производится в следующем порядке:

- собрать схему приведенную на рис. 7;
- в диагональ моста $a - в$ подать напряжение 8В частотой 1 кГц; напряжение измерять вольтметром В7-35;
- подключить к выходу нуль-индикатора (микросхема DA1) осциллограф С1-55;
- сбалансировать мост, поочередно изменяя резисторы R_2 и R_N ;
- выключить генератор ГЗ-109;
- отключить конденсатор C_N от точки “а” моста, а резистор R_2 - от точки “в”;
- измерить значение резисторов R_2 и R_N прибором В7-35;
- рассчитать значения емкости C_x , сопротивления R_x (R_{C_x}) и tg угла потерь конденсатора;
- определить относительную погрешность δ_c ;

6.4.2. Измерение индуктивности катушки L_x :

- собрать схему, приведенную на рис. 8;
- подключить мост к генератору, установив напряжение 7В частотой 1 кГц;
- определить индуктивность L_x и сопротивление R_x (R_{L_x}) катушки, используя методику приведенную выше для измерения параметров конденсатора;
- рассчитать добротность катушки и погрешность измерения L_x .

Результаты измерений и вычислений занести в таблицу 3.

Таблица 3

	R_2	R_N	C_x	R_x	$\text{tg}\delta$	δ_c
6.4.1						
	R_2	R	L_x	R_x	Q	δ_L
6.4.2						

Сравнить результаты измерения параметров C_x и L_x тремя методами.

Определить методическую погрешность определения значений емкости и индуктивности методом вольтметра-амперметра, приняв за истинные, значения полученные мостовым методом.

7. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

7.1. Название и цель работы.

7.2. Программа работы.

7.3. Схемы проводимых измерений.

7.4. Результаты экспериментов и расчетов в виде таблиц.

7.5. Анализ полученных результатов, основные выводы по работе.