

Федеральное агентство по образованию РФ

Томский государственный университет систем управления и  
радиоэлектроники (ТУСУР)

Кафедра телекоммуникаций и основ радиотехники

Мельникова И.В.

## **Исследование одиночных колебательных контуров**

Руководство к лабораторным работам по дисциплине «Основы  
теории цепей» для студентов радиотехнического факультета всех  
специальностей

Томск 2011

**Мельникова И.В.**

Исследование одиночных колебательных контуров: Руководство к лабораторным работам по курсу «Основы теории цепей» для студентов радиотехнического факультета всех специальностей – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. 2008. – 35 с.

Изложены цель, необходимые сведения по теории, домашние задания, методические указания, примеры контрольных вопросов для защиты. Работа предназначена для студентов радиотехнического факультета всех форм обучения всех специальностей, изучающих дисциплины «Основы теории цепей» и «Теория линейных электрических цепей».

© Мельникова И.В., 2011

© Томский государственный университет  
систем управления и радиоэлектроники, 2011

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	4
1. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ПО ТЕОРИИ.....	5
2. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №6 ИССЛЕДОВАНИЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО КОЛЕБАТЕЛЬНОГО КОНТУРА.....	10
2.1. Цель работы.....	10
2.2. Домашнее задание .....	11
2.3. Лабораторное задание .....	12
2.4. Указания к работе .....	13
2.5. Обработка данных эксперимента.....	18
3. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №7 ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО КОЛЕБАТЕЛЬНОГО КОНТУРА.....	19
3.1. Цель работы.....	19
3.2. Домашнее задание .....	19
3.3. Лабораторное задание .....	21
3.4. Указания к работе .....	21
3.5. Обработка данных эксперимента.....	24
4. ПРИМЕРЫ КОНТРОЛЬНЫХ ВОПРОСОВ.....	25
РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА.....	27
ПРИЛОЖЕНИЕ 1 .....	29
ПРИЛОЖЕНИЕ 2 .....	30
ПРИЛОЖЕНИЕ 3 .....	33

## ВВЕДЕНИЕ

Исследование частотных характеристик последовательного и параллельного колебательных контуров выполняется на панели «Линейные цепи». Идеи лабораторных работ, выполняемых на панели «Линейные цепи», и сама панель разработаны доцентами Гришко В.Н. и Голевым Б.Ф.

Значения параметров последовательного контура  $(L_1, R_0)$ , параллельного контура  $(L_2, P_L, R_0)$  и их резонансные частоты  $f_p$  приведены в таблице 2.1.

В процессе подготовки и выполнения лабораторных работ должны быть усвоены основные понятия резонансных цепей: добротность, характеристическое и резонансное сопротивление, сопротивление потерь, резонансная частота, резонансные характеристики, резонанс напряжений, резонанс токов, «контур настроен», «контур расстроен», абсолютная, относительная и обобщенная расстройки, полное и частичное включение параллельного контура.

Работы по одиночным контурам формируют практические навыки снятия резонансных частотных характеристик, умение оценить влияние входных комплексных сопротивлений подключаемых измерительных приборов на значения резонансной частоты  $f_p$  и добротности  $Q$ , а также влияние внутренних сопротивлений генераторов сигналов на добротность и полосу пропускания контуров.

Так как информация легче воспринимается и усваивается в сравнении, теоретическая часть по последовательному и параллельному контурам, а так же вопросы по защите обеих лабораторных работ являются общими.

## 1. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ПО ТЕОРИИ

Катушка индуктивности и конденсатор, включенные последовательно с источником сигнала или генератором  $\Gamma_{\sim}$ , образуют последовательный контур, а включенные параллельно генератору, образуют параллельный контур. На рисунке 1.1 показаны принципиальные схемы контуров.

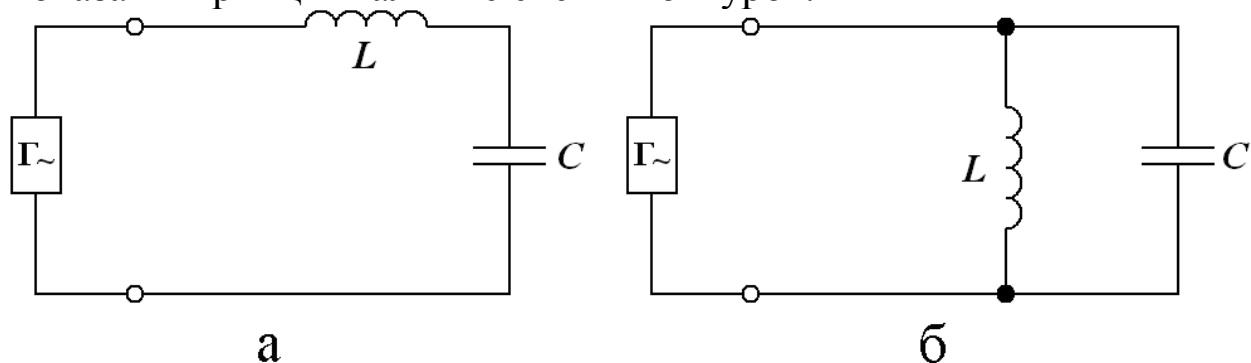


Рисунок 1.1 - Принципиальные схемы контуров.

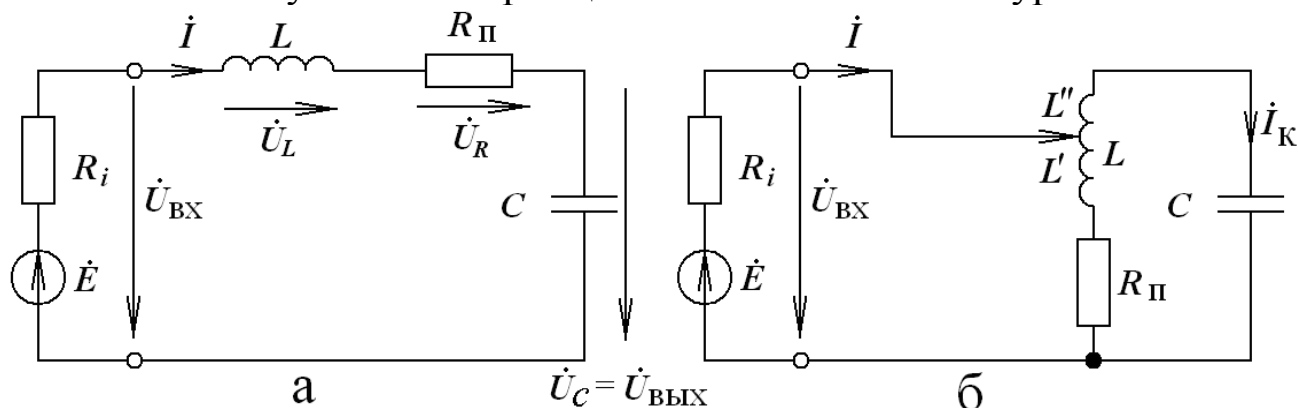


Рисунок 1.2 - Эквивалентные схемы контуров.

Сопротивление контура  $R_{\Pi}$  (рис.1.2) символизирует суммарные потери в катушке индуктивности, конденсаторе, соединительных проводах, потери на излучение и др.

Параллельный контур может подключаться к генератору как простой (рис.1.1б) или как сложный (рис 1.2б), что соответствует полному или частичному включению.

Для исключения влияния внутреннего сопротивления  $R_i$  генератора сигнала на характеристики контуров необходимо, чтобы последовательный контур питался от идеального источника э.д.с., а параллельный от идеального источника тока.

Но так как это реализовать невозможно, следует обеспечить условия:

$$\begin{aligned} R_{i1} \ll R_p & \quad \text{последовательного контура,} \\ R_{i2} \gg R_p & \quad \text{параллельного контура.} \end{aligned}$$

Для обоих контуров резонансная частота определяется из условия фазового резонанса

$$x_{BX}(\omega_p) = 0$$

и равна

$$\omega_p = 2\pi \cdot f_p = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad (1.1)$$

причем в последовательном контуре независимо от его сопротивления потерь, а в параллельном только при условии

$$R_{\Pi} \ll \rho.$$

Резонансные сопротивления, определяемые условиями  $Z_{BX}(\omega_p) = R_{BX}(\omega_p) = R_p$ , для последовательного контура

$$R_p = R_{\Pi},$$

для параллельного контура с любым включением при условии

$$R_{\Pi} \ll \rho$$

$$R_p = \frac{|x_{1p}|^2}{R_{\Pi}} = \frac{|x_{2p}|^2}{R_{\Pi}}, \quad (1.2)$$

где  $|x_{1p}| = |x_{2p}|$  - реактивное сопротивление любой ветви параллельного контура на резонансной частоте.

Из выражения (1.2) следует, что сопротивления простого и сложного параллельных контуров отличаются

$$R_{Pcl} = p^2 R_{Pnp},$$

где  $\rho$  – коэффициент включения реактивностей.

В общем случае

$$\rho = \frac{x_{OTD}}{x_{\Sigma}},$$

где  $x_{\Sigma}$  – сопротивление того же характера, что и  $x_{OTD}$ ; применительно к сложному контуру II вида (рис.1.2б)

$$\rho = \frac{L'}{L} = \frac{L'}{L' + L''}.$$

Для всех контуров характеристическое сопротивление  $\rho$  и добротность  $Q$  определяются соотношениями

$$\rho = \omega_P L = \frac{1}{\omega_P C} = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{x_L |x_C|}, \quad (1.3)$$

$$Q = \frac{\rho}{R_{\Pi}} = \frac{f_P}{2\Delta f_{\Pi}}, \quad (1.4)$$

где  $2\Delta f_{\Pi}$  – полоса пропускания контура, определяемая на уровне  $1/\sqrt{2}$  от максимального значения АЧХ.

Резонанс в последовательном контуре (см.рис.1.2а) называется резонансом н а п р я ж е н и й, так как

$$U_{CP} = QU_{BX}, \quad U_{LP} = QU_{BX};$$

резонанс в параллельном контуре (см. рис.1.2.б) называется резонансом т о к о в, так как в простом контуре

$$I_K = QI.$$

АЧХ обоих контуров удобно выражать через обобщенную расстройку

$$\xi = \frac{x}{R_{\Pi}} = Q \left( \frac{\omega}{\omega_P} - \frac{\omega_P}{\omega} \right);$$

в области частот, близких к резонансным, можно пользоваться

упрощенным выражением  $\xi \cong Q \frac{2\Delta\omega}{\omega_P}$ .

В последовательном контуре АЧХ тока и в параллельном контуре АЧХ  $Z_{BX}$  выражаются одинаково

$$\frac{I(\omega)}{I_D} = \frac{1}{\sqrt{1 + \xi^2}}, \quad \frac{Z(\omega)}{R_P} = \frac{1}{\sqrt{1 + \xi^2}}. \quad (1.5)$$

Шунтирующее действие генератора сигнала изменяет добротность параллельного контура, а, следовательно, и полосу пропускания (см. выражение (1.4)).

$$Q_3 = \frac{Q}{1 + \frac{R_P}{R_i}}, \quad (1.6)$$

где  $R_P$  - резонансное сопротивление простого или сложного контура.

На резонансной частоте для любого вида контуров справедлива схема замещения рис 1.3. Из сопоставления с рис.1.2 видно, что



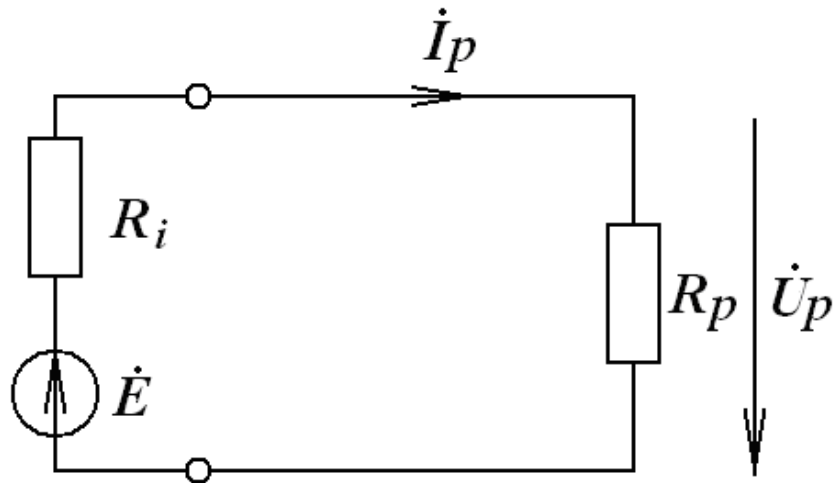


Рисунок 1.3 – Схема замещения на резонансной частоте.

для последовательного контура

$$R_P = R_{\Pi}, \quad \dot{U}_P = \dot{U}_{BX} = \dot{U}_{RP};$$

для параллельных контуров

$$R_P = R_{P_{\Pi P}} \quad \text{или} \quad R_{P_{СЛ}}, \quad \dot{U}_P = \dot{U}_{ВЫХ P};$$

$$\dot{U}_P = \dot{I}_P R_P = \frac{\dot{E} R_P}{R_i + R_P}.$$

В сложном параллельном контуре, кроме основного резонанса токов на частоте  $f_P$  (выражение (1.1)), имеет место последовательный резонанс (или резонанс напряжений) в ветви  $L''C$  (рис.1.2б)

$$f_{PH} = f_{P_{ПОСЛ}} > f_{PT}.$$

Значение резонансных частот токов и напряжений в сложном контуре жёстко связаны через коэффициент включения

$P_L$

$$\left( \frac{f_{P_T}}{f_{P_H}} \right)^2 = 1 - P_L.$$

При расстройке ( $f \neq f_{P_H}$  в последовательном контуре и  $f \neq f_{P_T}$  в параллельном контуре) входное сопротивление каждого контура носит комплексный характер (рис.1.4), причем характер реактивного сопротивления у последовательного и простого параллельного контуров всегда противоположный.

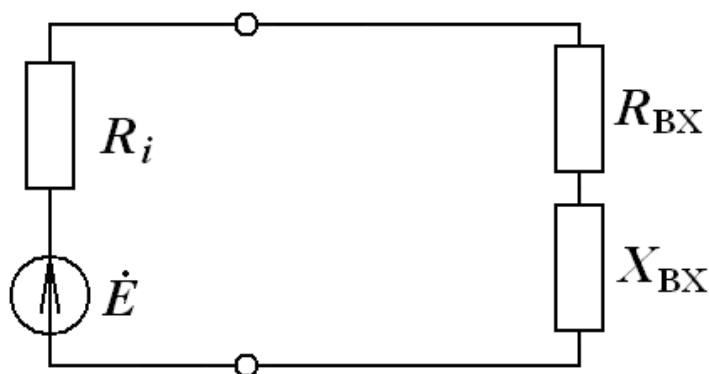


Рисунок 1.4 – Схема замещения контуров при расстройке.

## 2. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №6

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО КОЛЕБАТЕЛЬНОГО КОНТУРА

#### 2.1. Цель работы

Исследование основных соотношений на резонансной частоте в последовательном колебательном контуре.

Снятие частотных характеристик и определение параметров контура.

Исследование влияния внутреннего сопротивления генератора на добротность, полосу пропускания и частотные характеристики контура.

## 2.2. Домашнее задание

Исходные данные: значения резонансной частоты контура  $f_p$ , индуктивности контура  $L_1$  и сопротивление потерь контура на постоянном токе  $R_0$  взять из таблицы 2.1; величину входного напряжения  $U_{BX}$  (рис. 1.2а) принять равной 100 мВ; сопротивление потерь контура на резонансной частоте принять равным  $R_{\Pi} = kR_0$ , где  $k=1,7-1,8$  – коэффициент, учитывающий рост сопротивления потерь при увеличении частоты.

Таблица 2.1

Параметры колебательных контуров на панели «Линейные цепи»

№ панели	кГц	мкГн		Ом	$P_L = \frac{L_2'}{L_2}$
	$f_p$	$L_1$	$L_2$	$R_0$	
1	300	94	95	5.0	0.25
2	260	121	118	3.8	0.25
3	295	102	98	4.0	0.25
4	260	117	113	4.3	0.25
5	285	99	107	3.8	0.25
6	290	96	99	4.2	0.25
7	295	93	100	4.0	0.25
8	285	95	90	4.6	0.25
9	275	104	105	4.1	0.25
10	280	100	92	4.3	0.25

Вычислить:

- 1) величину емкости  $C_1$  конденсатора контура;
- 2) характеристическое сопротивление  $\rho$ ;
- 3) добротность контура  $Q$ ;
- 4) полосу пропускания контура  $2\Delta f_{\Pi}$ ;
- 5) резонансное значение тока в контуре  $I_p$ ;
- 6) резонансное значение напряжения на емкости  $U_{CP}$ ;

7) добротность  $Q_1$ , полосу  $2\Delta f_{П1}$  и напряжение на емкости  $U_{CP1}$  с дополнительным сопротивлением  $R_1=4 \text{ Ом}$ , включенным последовательно (рис.2.1);

8)  $Q_2$ ,  $2\Delta f_{П2}$ ,  $U_{CP2}$  с дополнительным сопротивлением  $R_2=8 \text{ Ом}$ , включенным последовательно (рис. 2.1).

Изобразить:

1) качественный характер АЧХ коэффициента передачи по напряжению (рис. 1.2а и рис.2.1) для трех значений дополнительных сопротивлений ( $R=0$ ,  $R_1=4 \text{ Ом}$ ,  $R_2=8 \text{ Ом}$ ) на общем графике с соблюдением относительного масштаба; указать значение  $|K|$  для частот  $f=0$ ,  $f=f_p$  и  $f \rightarrow \infty$ .

2) качественный характер АЧХ входного сопротивления контура (рис. 1.2а и рис.2.1) для трех значений дополнительных сопротивлений ( $R=0$ ,  $R_1=4 \text{ Ом}$ ,  $R_2=8 \text{ Ом}$ ) на общем графике с соблюдением относительного масштаба; указать значение  $|Z_{BX}|$  для частот  $f=0$ ,  $f=f_p$  и  $f \rightarrow \infty$ .

### 2.3. Лабораторное задание

Снять АЧХ коэффициента передачи и входного сопротивления последовательного контура:

1) снять три частотные характеристики для частот  $U_c(f)$  для разных значений сопротивления потерь контура;

2) снять три нормированные частотные характеристики

$\frac{U_c}{U_{CP}}(f)$  для разных значений сопротивления потерь контура;

3) снять три частотные характеристики входного сопротивления для разных значений сопротивления потерь контура.

*Примечание:* по указанию преподавателя второй пункт может быть исключен.

## 2.4. Указания к работе

### Схемы измерения и используемые приборы

Схема последовательного контура собирается на лабораторной панели «Линейные цепи». Для схемы последовательного контура используются элементы  $C_1$  и  $L_1$ , расположенные в левой верхней части панели.

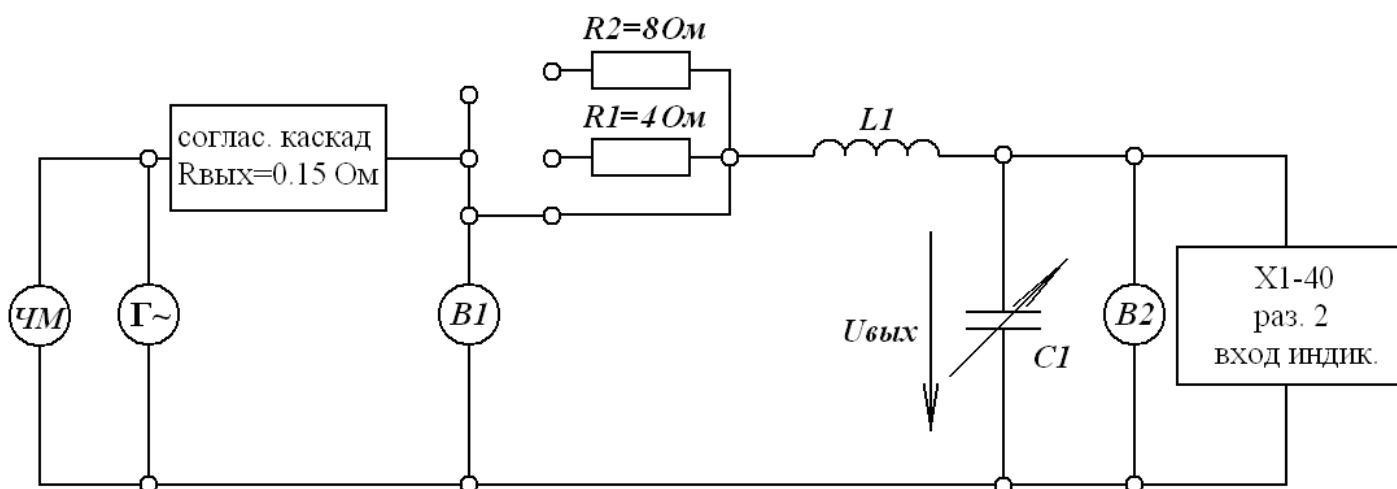


Рисунок 2.1 - Схема исследования передаточных характеристик последовательного контура.

Подключение измерительных приборов для исследования резонансных характеристик  $U_c(f)$  показано на рисунке 2.1:

В1 и В2 – вольтметры В3-38 для измерения действующего значения входного и выходного напряжений;

ЧМ – цифровой частотомер для измерения частоты входного гармонического сигнала;

Г~ - генератор гармонических колебаний.

При наблюдении формы частотных характеристик на экране ЭЛТ прибора X1-40 источником высокочастотного сигнала Г~ служит генератор качающейся частоты (ГКЧ) прибора X1-40 (разъем «1»).

В этом случае вход индикатора X1-40 (разъем «2») подключается к конденсатору C1.

Если нет возможности воспользоваться прибором X1-40, то передаточная характеристика  $\frac{U_c}{U_{BX}}(f)$  может быть снята по точкам (см. Приложение 1), и тогда в качестве  $\Gamma_{\sim}$  используется любой генератор, работающий в диапазоне сотен кГц, например, Г4-106 (Г4-102).

Так как генератор Г4-106 имеет выходное сопротивление 50 Ом, а ГКЧ прибора X1-40 минимум 75 Ом, то ни один генератор не может быть непосредственно подключен к последовательному контуру, для исследования которого нужен источник э.д.с. (см. ПРИЛОЖЕНИЕ 2). Поэтому генераторы подключаются к последовательному контуру через согласующий каскад, имеющий низкое выходное сопротивление 0.15 Ом.

Для измерения АЧХ следует менять частоту генератора и фиксировать значение  $U_{BX}$  и  $U_{ВЫХ}$  по соответствующим вольтметрам В1 и В2.

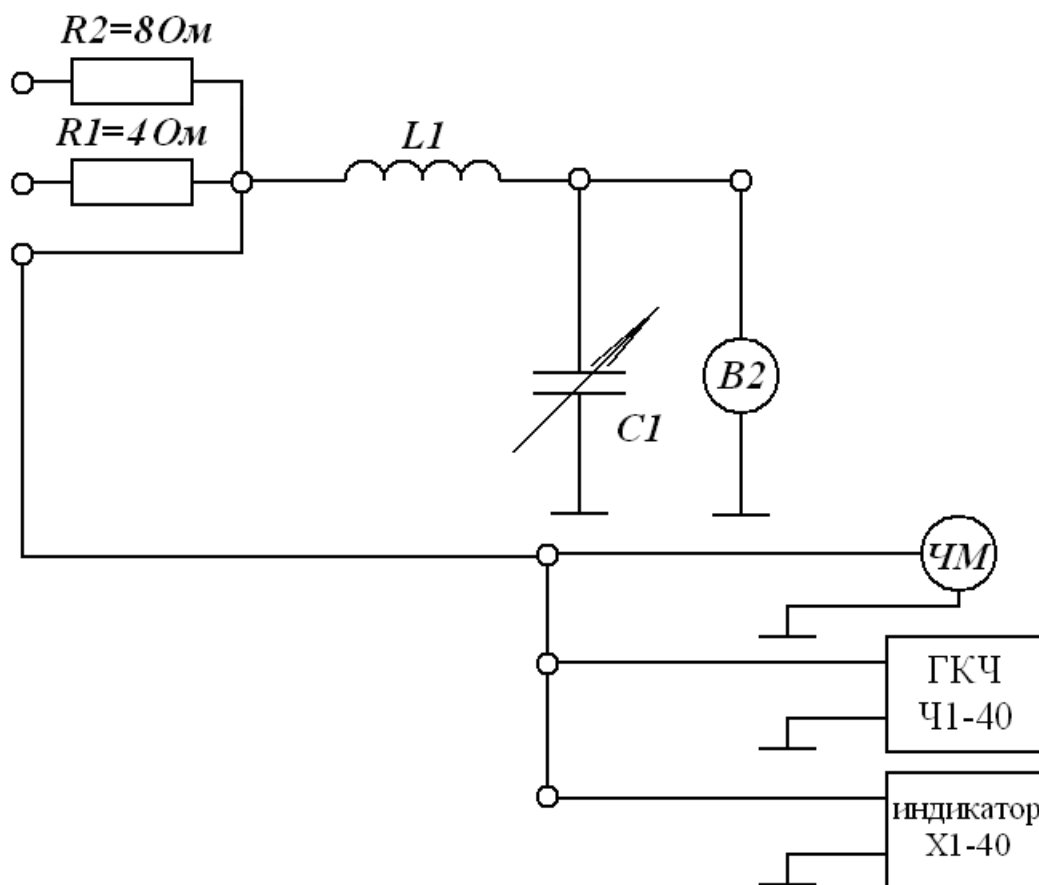


Рисунок 2.2 – Схема для наблюдения входных характеристик последовательного контура с помощью прибора X1-40.

Для наблюдения входных характеристик  $Z_{BX}(f)$  используется схема рис. 2.2.

Включение вольтметра В2 не обязательно и функционально не нужно. Он «остался» от схемы рис. 2.1. Если его убрать, то  $f_p$  при наблюдении  $Z_{BX}(f)$  будет еще больше отличаться от  $f_p$  для  $K_U(f)$  при прежнем значении  $C_1$ , так как

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1(C_1 + C_{II})}},$$

где  $C_{II}$  - паразитные емкости соединительных кабелей от В2 и индикатора Х1-40.

При исследовании ЧХ входного сопротивления (рис.2.2) для соединения прибора Х1-40 с исследуемым контуром использовать свободные клеммы на макете, чтобы избежать шунтирующего действия внешних цепей, например  $R_{ВЫХ}$  согласующего каскада.

Методики получения характеристик  $Z_{BX}(f)$  и  $K_U(f)$  на индикаторе Х1-40 и их обоснование описаны в Приложении 2.

П о р я д о к в ы п о л н е н и я р а б о т ы и н е о б х о д и м ы е п о я с н е н и я :

- 1) подготовить к работе прибор Х1-40, установив П частотный диапазон, максимально широкую полосу просмотра и  $R_{ВЫХ} = 600 \text{ Ом}$  (в процессе работы  $R_{ВЫХ}$  не менять);  
при этом оба условия (П.2.2) и (П.2.3) (см. Приложение 2), необходимые для снятия АЧХ коэффициента передачи и входного сопротивления, выполняются, так как при исследовании  $|K_U|$  сигнал подается через согласующий каскад с малым  $R_{ВЫХ}=0.15 \text{ Ом}$ , а при исследовании  $|Z_{BX}|$  входное сопротивление контура в области резонансной частоты в полосе просмотра, не превышающей 40 кГц,

существенно меньше  $R_{\text{ВЫХ}}=600$  Ом, в чем легко убедиться на основании известных соотношений для последовательного контура:

$$|Z_{\text{ВХ}}| = R_{\text{П}} \sqrt{1 + \xi^2}, \quad \xi = Q \left( \frac{f}{f_p} - \frac{f_p}{f} \right);$$

2) настроить генератор X1-40 таким образом, чтобы  $f_p$  соответствовало центральной вертикальной линии экранной сетки:

- собрать схему рис.2.1 без R1(R2), включить питание согласующего каскада и всех используемых приборов;
- развертка ручная (ручка 10 на X1-40; нумерацию ручек см. на рис.П.3.1);
- точка луча на центральной вертикальной линии сетки экрана;
- перестраивать частоту ГКЧ ручкой 12 до значения  $f_p$ , контролируя ее значение по частотомеру;
- установить величину  $U_{\text{ВХ}} = 100$  мВ по показанию вольтметра В1, меняя  $U_{\text{ВЫХ}}$  ГКЧ ручкой 17;

3) настроить последовательный контур в резонанс ручкой конденсатора  $C_1$ , ориентируясь по максимальному вертикальному положению точки луча (или по максимальному показанию В2);

4) получить изображение  $U_c(f) \equiv K_u(f)$  на экране индикатора X1-40:

- включить автоматическую развертку в положение «3» ручкой 10;
- обратный ход луча совместить с нижней линией экранной сетки (ручка 6);
- меняя усиление КВО (ручка 7) добиться, чтобы максимум АЧХ совпадал с верхней линией экранной сетки;



5) по показанию вольтметров В1 и В2 оценить значение добротности Q и сравнить с расчетным, показания вольтметров записать;

6) не меняя усиление по КВО, сначала просмотреть при автоматической развертке ( $S=3$ , ручка 10) графики  $U_c(f)$  для трех значений дополнительного сопротивления ( $R=0, R_1 = 4 \text{ Ом}, R_2 = 8 \text{ Ом}$ ), а затем зарисовать их в масштабе (1 клеточка на экране – 1 см. в тетради) **на общем рисунке**, используя ручную развертку луча; на шкале частот отметить положение меток 10 кГц; записать показания вольтметров на частоте  $f_p$ ;

7) зарисовать на общем графике три нормированные зависимости  $\frac{U_c}{U_{CP}}(f)$  для трех значений дополнительного сопротивления, для чего при подключении дополнительных сопротивлений 4 Ом и 8 Ом увеличивать усиление КВО таким образом, чтобы резонансное значение частотной характеристики соответствовало 10 клеточкам при любом сопротивлении потерь; для каждой АЧХ определить и записать граничные частоты  $f_{ГР1}, f_{ГР2}$ ; вычислить полосы пропускания, сравнить с расчетными;

8) собрать схему рис.2.2 для исследования АЧХ входного сопротивления;

9) просмотреть при автоматической развертке луча зависимости  $Z_{BX}(f)$  и подобрать величину усиления КВО таким образом, чтобы резонансные значения на графике при разных дополнительных сопротивлениях отличались на (1,5 – 2,5) клеточки (обратный ход луча совмещен с нижней границей экранной сетки);

10) зарисовать в одном масштабе на общем графике три зависимости  $Z_{BX}(f)$  для разных сопротивлений потерь; измерить значение  $f_p$  по минимуму частотной характеристики при  $R=0$ .

## 2.5. Обработка данных эксперимента

1) полосы пропускания на основе экспериментальных АЧХ и полученные в процессе расчета для соответствующих дополнительных сопротивлений свести в таблицу 2.2.

Таблица 2.2.

Дополнительные сопротивления, Ом	$2\Delta f_{П}$ , кГц	$2\Delta f_{П}$ , кГц
	эксперимент	расчет
$R = 0$		
$R_1 = 4$		
$R_2 = 8$		

2) вычислить добротность контура при разных значениях сопротивлений потерь по отношению напряжений и по полосе пропускания контура, сравнить их между собой и с расчетными значениями, результаты свести в таблицу 2.3.

Таблица 2.3

Дополнительное сопротивление, Ом	Q расчет	Q exper. по отнош. напряжений	Q эксперимент по ППЦ
$R = 0$			
$R_1 = 4$			
$R_2 = 8$			

3) на основе зависимостей  $Z_{BX}(f)$  при разных R определить примерное значение потерь в контуре;

4) определить знак и величину смещения резонансной частоты для экспериментальных зависимостей  $Z_{BX}(f)$  по сравнению с зависимостями  $U_c(f)$  и дать соответствующее пояснение;

5) сделать общее заключение по работе.

### 3. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №7

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО КОЛЕБАТЕЛЬНОГО КОНТУРА

### 3.1. Цель работы

Исследование основных соотношений на резонансной частоте в параллельном колебательном контуре.

Снятие частотных характеристик контура при полном и частичном включении.

Исследование влияния внутреннего сопротивления генератора на добротность, полосу пропускания, коэффициент передачи напряжения и частотные характеристики параллельных контуров.

### 3.2. Домашнее задание

Исходные данные: значения  $f_{рт}$  – резонансной частоты токов, индуктивности  $L_2$ , сопротивления потерь  $R_0$  и коэффициента включения  $P_L$  взять из табл.2.1; величину напряжения источника  $\dot{E} = \dot{U}_{xx}$  (рис.1.2б) принять равной 1 В; сопротивление потерь контура на резонансной частоте принять равным  $R = k \cdot R_0$ , где  $k = 1.7 - 1.8$  – коэффициент, учитывающий рост сопротивления потерь при увеличении частоты.

Рассчитать для простого контура:

1) добротность контура  $Q$ , резонансное сопротивление  $R_p$  и полосу пропускания  $2\Delta f_{П}$  без учета влияния внутреннего сопротивления генератора;

2) эквивалентную добротность  $Q_{Э1}$  и полосу пропускания  $2\Delta f_{П1}$  с учетом внутреннего сопротивления генератора  $R_{i1}=60,6\text{кОм}$  (рис.3.1а);

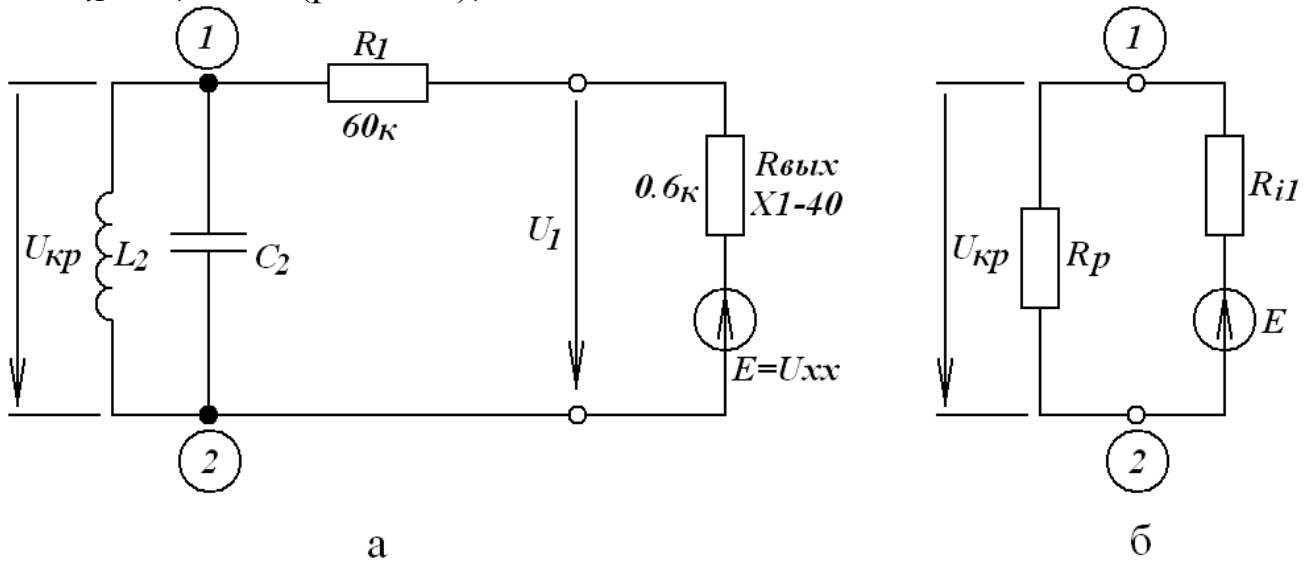


Рисунок 3.1 – Подключение параллельного колебательного контура к генератору и его эквивалентная схема на резонансе.

3)  $Q_{Э2}$ ,  $2\Delta f_{П2}$  для  $R_{i2}=6,6\text{кОм}$ ;

4) резонансное напряжение на контуре  $U_{кр}$  при подключении его к генератору с внутренним сопротивлением  $R_{i1}=60,6\text{ кОм}$  и  $R_{i2}=6,6\text{ кОм}$  (рис.3.1б);

5) коэффициент передачи напряжения к контуру  $K = \frac{U_{кр}}{E}$  для заданных  $R_{i1}$  и  $R_{i2}$ .

Рассчитать для сложного контура:

1) резонансное сопротивление  $R_{p\text{ сл}}$  (рис.1.2б);

2)  $Q_{Э}$ ,  $2\Delta f_{П}$  и  $U_{кр}$  при подключении к генератору с внутренним сопротивлением  $6,6\text{кОм}$ ;

3) коэффициент передачи напряжения к контуру от генератора с внутренним сопротивлением  $6,6\text{кОм}$ ;

4) частоту последовательного резонанса  $f_{p\text{ посл.}}$  (на рис.1.2б  $L'+L'' = L_{\Sigma} = L_2$ ).

### 3.3. Лабораторное задание

Исследовать частотные характеристики параллельного контура при полном и частичном включении:

- 1) снять нормированные ЧХ простого параллельного контура при двух различных значениях внутреннего сопротивления генератора сигнала;
- 2) снять нормированную частотную характеристику сложного параллельного контура, определить значение частоты резонанса напряжений.

### 3.4. Указания к работе

Схемы измерения и используемые приборы

Схемы параллельных контуров собираются на лабораторном стенде панели «Линейные цепи». Для схемы параллельного контура используются элементы  $C_2$  и  $L_2$ , расположенные в правой верхней части панели; катушка  $L_2$  имеет отвод, который делит ее на части  $L'_2$  и  $L''_2$ , обеспечивая коэффициент включения  $p_L \approx 0,25$ .

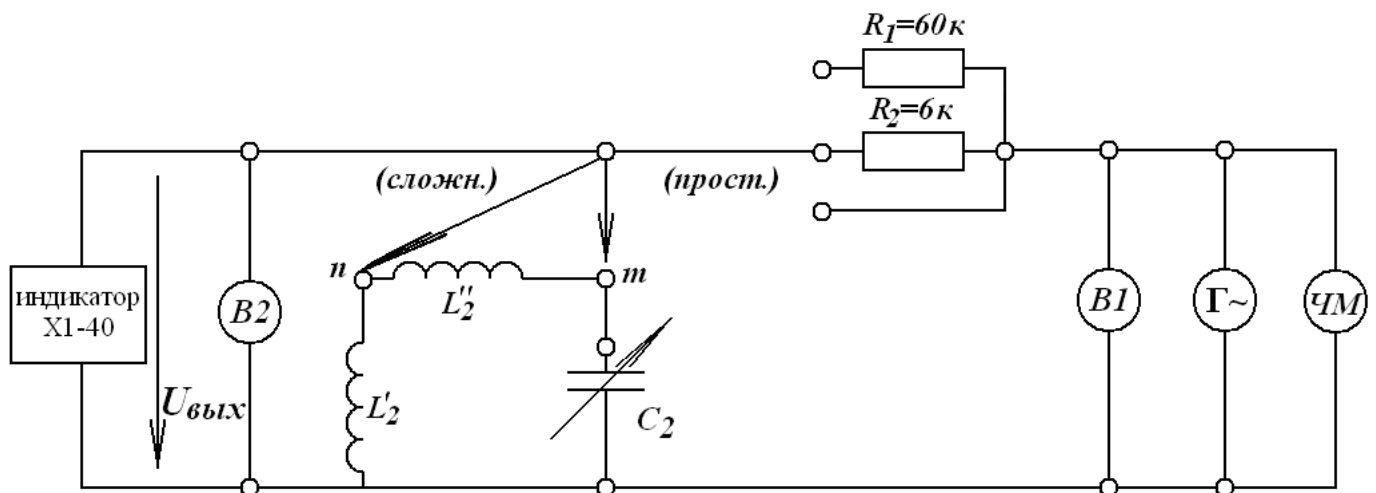


Рисунок 3.2 – Схема исследования входных характеристик параллельного контура.

Подключение измерительных приборов для исследования резонансных характеристик  $Z_{вх}(f) \equiv U_{к}(f)$  показано на рис.3.2:

$\Gamma_{\sim}$  - генератор качающейся частоты прибора Х1-40, при включении дополнительных сопротивлений  $R_1=60\text{кОм}$  или  $R_2=6\text{кОм}$  имитирует источник тока («внутреннее сопротивление генератора» складывается из  $R_{\text{вых}}$  и  $R_1$  (или  $R_2$ ), как показано на рис.3.1а);

индикатор Х1-40 – для изображения  $U_{к}(f)$ , пропорционально отражающего  $Z_{вх}(f)$  (см. Приложение 2);

В2 – вольтметр ВЗ-38 измеряет напряжение на контуре (простом или сложном);

В1 – вольтметр ВЗ-38 для измерения (однократного)  $U_{\text{хх}}=E$  при отключенном контуре;

ЧМ – цифровой частотомер.

П о р я д о к в ы п о л н е н и я р а б о т ы и у к а з а н и я :

1) подготовить к работе прибор Х1-40, установив 2-й частотный диапазон, максимально широкую полосу просмотра,  $R_{\text{вых}}=600\text{ Ом}$  (в процессе работы  $R_{\text{вых}}$  не менять);

2) собрать схему рис.3.2 с  $R_2=6\text{кОм}$  и полным включением контура (простой контур) (питание, В2 и индикатор к точке m);

3) настроить генератор Х1-40 таким образом, чтобы  $f_p$  соответствовала центральной вертикальной линии экранной сетки:

- развертка ручная (ручка 10),
- точка луча на центральной вертикальной линии,
- частоту ГКЧ перестраивать ручкой 12 до значения  $f_p$ , контроль по частотомеру;

4) настроить параллельный контур в резонанс ручкой конденсатора  $C_2$  по максимальному напряжению на контуре;

5) в режиме автоматической развертки получить изображение резонансной кривой контура на экране X1-40; регулируя усиление КВО ручкой 7, добиться, чтобы резонансное значение ЧХ соответствовало 10 клеточкам экранной сетки (обратный ход луча совмещен с нижней границей экранной сетки);

6) зарисовать в масштабе нормированную частотную характеристику ( $U_{\kappa}/U_{\kappa p}=1$ ), используя ручную развертку и частотомер, определить по частотомеру и записать значения  $f_{cp1}$  и  $f_{cp2}$ ; ППЦ сравнить с расчетной;

7) записать показания вольтметров В1 и В2 на резонансной частоте;

8) измерить по В1 значение  $U_{xx}=E$  на частоте резонанса, отключив контур от генератора; сравнить E и показания В1 из предыдущего пункта, результат объяснить (см. рис.3.1а);

9) повторить пункты 5)-7) для простого контура, подключенного к генератору сигнала через сопротивление  $R_1=60\text{кОм}$ , оба графика для простого контура совместить на общем рисунке;

10) повторить пункты 5)-7) для сложного контура, подключенного к генератору через сопротивление  $R_2=6\text{кОм}$  (питание, В2 и индикатор к точке n);

*Указание:* резонансную частоту сложного контура не подстраивать с помощью конденсатора  $C_2$ ;  $f_p$  сложного контура измерить, записать; объяснить смещение  $f_p$  сложного относительно  $f_p$  простого контура;

11) меняя частоту прибора X1-40 ручкой 12 и увеличивая усиление КВО, найти частоту резонанса напряжений и определить ее значение по частотомеру;

*Указание:* последовательный резонанс в сложном контуре выражен ярче при отсутствии дополнительного сопротивления  $R_1$  или  $R_2$ , т.к. при этом значительно увеличивается сигнал на входе КВО; однако и в этом случае сигнал для работы частотомера может оказаться слишком мал

*(закорачивающий эффект последовательного контура  $CL_2$  на резонансе); тогда, зафиксировав луч в точке минимума ( $f_p$  посл.), надо временно отключить контур, при этом на входе частотомера будет напряжение, равное  $U_{xx}$ , достаточное для его работы.*

### 3.5. Обработка данных эксперимента

1) вычислить значения коэффициентов передачи напряжения к простому и сложному контурам при  $R_1$  и  $R_2$ , сравнить с расчетными данными в виде таблицы; прокомментировать результаты сравнения;

2) по нормированным резонансным характеристикам определить полосы пропускания простого и сложного контуров; сравнить их с расчетными в виде таблицы; результаты прокомментировать;

3) сравнить резонансные частоты токов простого и сложного контуров, определить численное значение и знак ухода  $f_{pT\text{ сл}}$  относительно  $f_{pT\text{ пр}}$ , объяснить расхождение данных эксперимента и теоретических значений  $f_{pT}$ .

4) по экспериментальным данным  $f_{pT}$  и  $f_{pH}$  сложного контура вычислить коэффициент включения  $P_L$  и сравнить с заданным (табл.2.1);

5) сделать общее заключение по работе.



#### 4. ПРИМЕРЫ КОНТРОЛЬНЫХ ВОПРОСОВ

При защите работы умейте ответить на следующие вопросы:

1) поясните, из каких условий определяются резонансные частоты цепи и как записывается  $f_p$  для цепи из последовательного и параллельного соединения катушки индуктивности с потерями и конденсатора с пренебрежительно малыми потерями;

2) поясните, почему резонанс в последовательном контуре называется резонансом напряжений, а в простом параллельном резонансом токов;

3) поясните, как и почему осуществляется экспериментальная настройка на резонансную частоту в последовательном контуре, на резонансную частоту токов в параллельном контуре, на частоту последовательного резонанса в сложном параллельном контуре;

4) запишите, каковы резонансные сопротивления последовательного и параллельного контуров и как они зависят от добротности при неизменных значениях  $L$  и  $C$ ;

5) запишите, каковы резонансные сопротивления последовательного и параллельного контуров без потерь; изложите методику определения резонансных сопротивлений  $RLC$  - цепи;

6) поясните, почему частоту последовательного резонанса в сложном контуре определяют по минимуму напряжения на вольтметре, включенном параллельно контуру; что покажет на этой же частоте вольтметр, включенный параллельно емкости сложного контура с разделенными индуктивностями;

7) объясните, почему с помощью фазометра Ф2-1 нельзя снять  $\varphi_z(f)$  или  $\varphi_k(f)$  исследуемых контуров;

8) запишите коэффициент включения индуктивности и поясните, как он влияет на резонансное сопротивление контура;

9) установите связь между  $f_{pT}$  и  $f_{pH}$  в сложном контуре через коэффициент включения  $P_L$ ;

10) назовите, какие экспериментальные способы определения добротности Вы использовали в этой работе;

11) объясните, почему подключение источника сигнала с конечным внутренним сопротивлением  $R_i$  снижает добротность параллельного контура;

12) поясните, какой из параллельных контуров (простой или сложный) испытывает меньшее шунтирующее действие генератора сигнала и почему;

13) поясните, будет ли изменяться и почему напряжение на параллельном контуре с изменением частоты сигнала при питании его от идеального источника э.д.с.;

14) поясните методику снятия резонансных кривых

а) по точкам,

б) с помощью прибора Х1-40;

15) изобразите зависимость резонансного напряжения на емкости

а) последовательного контура,

б) простого параллельного контура

при изменении сопротивления потерь;

16) сформулируйте, какие требования и почему предъявляются к генератору сигнала для питания

а) последовательного контура,

б) параллельного контура;

17) поясните, как отличаются значения входного сопротивления последовательного и простого параллельного контуров

а) на частоте резонанса,

б) по модулю  $|Z|$  от частоты,

в) по характеру реактивных сопротивлений;

18) изобразите диаграммы реактивных сопротивлений  $X(\omega)$  для реактивных двухполюсников из последовательного и параллельного соединений индуктивности и емкости;

19) на входе настроенного последовательного контура напряжение 2 В,  $Q=50$ ; вычислить напряжение на  $R_{\Pi}$ ;

20) изобразите схему и графики  $Z_{ex}(f)$  и  $\varphi_{Z_{ex}}(f)$  для сложного параллельного контура

а) с разделенными индуктивностями,

б) с разделенными емкостями;

запишите выражения резонансных сопротивлений и резонансных частот через параметры контура;

21) изобразите схемы реактивных двухполюсников, образованных из параллельных контуров 2-го и 3-го вида и постройте соответствующие диаграммы реактивных сопротивлений  $X(\omega)$ ;

22) изобразите с соблюдением относительного масштаба графики напряжения  $U_k(f)$  на простом контуре ( $R_p=4\text{кОм}$ ) при питании от генератора с  $R_{i1}=4\text{кОм}$  и  $R_{i2}=16\text{кОм}$ ;

23) простой и сложный контуры (коэффициент включения 0,5) с одинаковыми параметрами  $L$ ,  $C$ ,  $R_n$  подключают поочередно к одному и тому же генератору ( $R_i=R_{p\text{ пр}}$ ); изобразите в одинаковом масштабе  $U_k(f)$  обоих контуров;

24) дайте обоснование необходимости использования согласующего каскада при снятии передаточных частотных характеристик последовательного контура и обоснование исключения его влияния при снятии входных частотных характеристик с индикатора Х1-40 для этого же последовательного контура;

25) поясните, почему при исследовании частотных характеристик с помощью прибора Х1-40 необходим согласующий каскад для подключения последовательного контура и дополнительные сопротивления  $6\text{кОм}$  и  $60\text{кОм}$  для подключения параллельного контура.

## РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

Основная:

1. Попов В.П. Основы теории цепей. – Москва: Высшая школа, 2003.-576 с.
2. Попов В.П. Основы теории цепей. – Москва: Высшая школа, 2000.-575 с.
3. Атабеков Г.И. Основы теории цепей. – Санкт-Петербург: Лань, 2006.-432 с.
4. Мельникова И.В., Тельпуховская Л.И. Основы теории цепей. Часть 2.- Томск, 2001. – 186 с.

Дополнительная:

1. Лосев А.К. Теория линейных электрических цепей. – Москва: Высшая школа, 1987.-511 с.
2. Попов В.П. Основы теории цепей. – Москва: Высшая школа, 1985.-496 с.
3. Зернов Н.В., Карпов В.Г. Теория радиотехнических цепей. – Л.: Энергия, 1972.-816 с.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 1

### МЕТОДИКА СНЯТИЯ АЧХ ПО ТОЧКАМ

При снятии ЧХ по точкам с помощью вольтметров, фазометра и источника сигнала с перестраиваемой частотой сигнала надо оценить общий характер частотных зависимостей в исследуемом диапазоне без фиксации показаний приборов.

В тех цепях, где частотные характеристики носят монотонный характер, для построения ЧХ достаточно снять показания приборов для 5-6 значений частоты.

В резонансных цепях, где АЧХ имеют экстремумы, количество точек необходимо увеличить, при этом шаг по частоте можно выбрать неравномерный. Предварительный «просмотр» частотной зависимости позволяет оценить резонансные значения  $f_p$  и  $U_p$  и правильно выбрать частотный диапазон для измерения  $f_{min} - f_{max}$  (рис.П1.1).

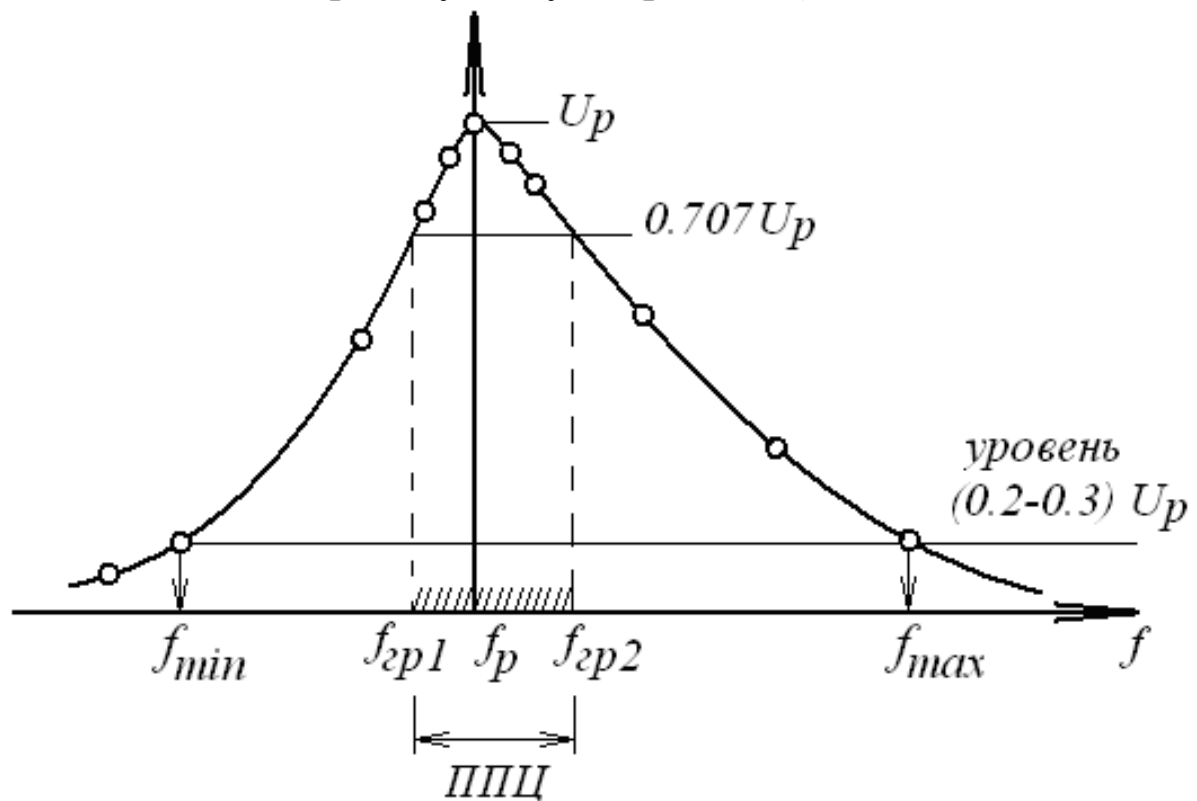


Рисунок П.1.1.

В области ППЦ следует снять не менее пяти точек, точку резонанса обязательно зафиксировать, частоту изменять в одну сторону, обычно от  $f_{min}$  к  $f_{max}$ .

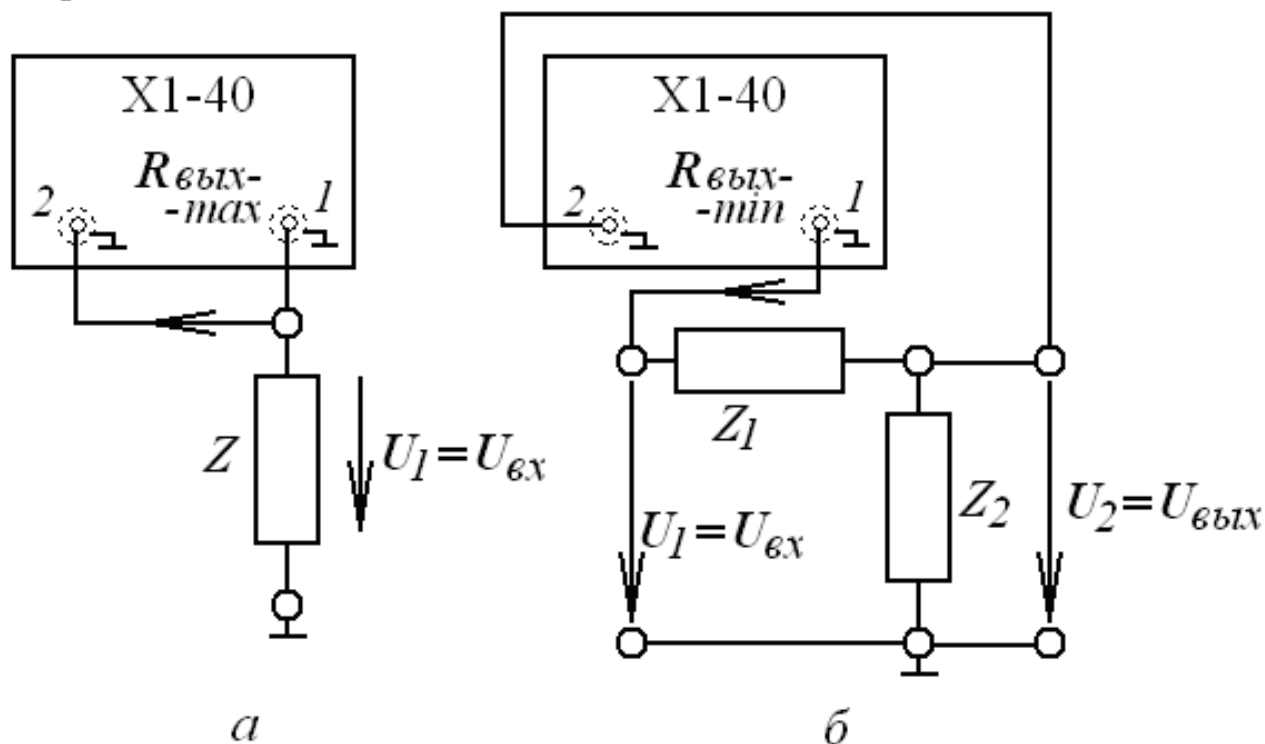
При наличии нескольких резонансных точек на частотной зависимости все они должны быть обязательно зафиксированы (не пропустите резонансное значение «внутри» жестко выбранного шага на частоте!).

В процессе измерения входное напряжение поддерживать неизменным.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 2

### ИССЛЕДОВАНИЕ АЧХ С ПОМОЩЬЮ ПРИБОРА X1-40

Прибор X1-40 (см. Приложение 3 и рис. ПЗ.1) отражает на экране электронно-лучевой трубки (ЭЛТ) величину напряжения, поступающего на вход «2» (т.е. вход индикатора) при изменении частоты своего, внутреннего для X1-40, генератора сигнала. По отношению к исследуемой цепи это внешний генератор сигнала с меняющейся частотой и регулируемым внутренним сопротивлением  $R_i$  (75 Ом, 150 Ом, 600 Ом, 10000 Ом).



а – для наблюдения АЧХ входного сопротивления,  
б – для наблюдения АЧХ передаточной функции.

Рисунок П2.1 – Схемы подключения прибора Х1-40 для наблюдения АЧХ.

В соответствии с рисунком П2.1 для наблюдения АЧХ  $Z_{ex}$  на вход индикатора прибора Х1-40 следует подать сигнал  $U_1$ , а для наблюдения АЧХ  $K_u$  подать сигнал  $U_2$ . При этом для наблюдения АЧХ  $Z_{ex}$  надо, чтобы генератор прибора работал как источник тока ( $R_{вых} = R_i \gg |Z_{ex}|$ ), а для наблюдения АЧХ  $K_u$  – как источник напряжения ( $R_{вых} = R_i \ll |Z_{ex}|$ ).

Дадим обоснование этому утверждению.

Любой сложности схема по отношению к выходным зажимам генератора выступает как двухполюсник с сопротивлением  $Z_{ex}$  (рис.П2.2).

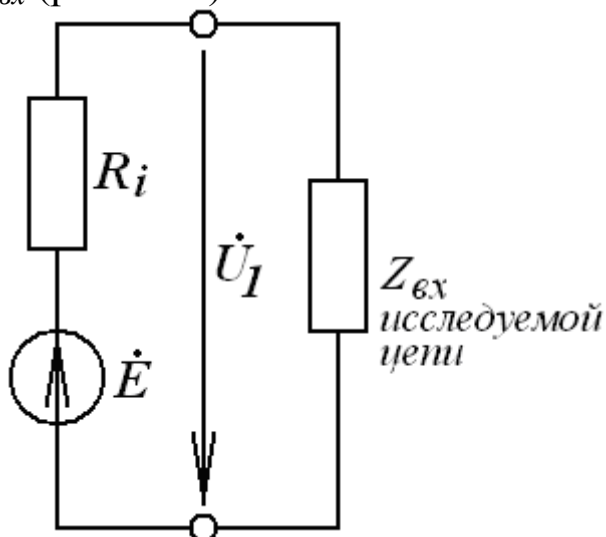


Рисунок П.2.2.

Следовательно

$$\dot{U}_1(j \cdot \omega) = \frac{\dot{E} \cdot Z_{ex}(j \cdot \omega)}{R_i + Z_{ex}(j \cdot \omega)} \cong \frac{E}{R_i} Z_{ex}(j \cdot \omega) \quad (\text{П2.1})$$

при  $R_i \gg |Z(j \cdot \omega)| = Z(\omega). \quad (\text{П2.2})$

Поэтому АЧХ  $U_1(\omega)$  на экране ЭЛТ с точностью до постоянного множителя  $\frac{E}{R_i}$  отражает АЧХ по сопротивлению  $Z_{ex}(\omega)$ , если выполняется условие (П2.2).

В зависимости от значения входного сопротивления исследуемых цепей для обеспечения условия (П2.2) можно выбрать на X1-40  $R_{вых}=600$  Ом или  $R_{вых}=10000$  Ом и даже подключить последовательно с выходом X1-40 добавочное сопротивление.

*Внимание:* при работе с  $R_{вых}=10000$  Ом соединительные кабели следует брать как можно короче для уменьшения спада собственной АЧХ; этот спад хорошо наблюдается, когда в процессе подготовки к работе прибор включен «сам на себя».

В соответствии с рис.П2.1б

$$\dot{K}_U(j \cdot \omega) = \frac{\dot{U}_2(j \cdot \omega)}{\dot{U}_1(j \cdot \omega)},$$

следовательно, график  $U_2(\omega)$  на экране ЭЛТ отражает  $K_U(\omega)$  только при условии, что  $U_1(\omega)=const$ , а это возможно, если генератор сигнала выступает по отношению к исследуемой цепи как генератор напряжения, т.е.

$$R_i \ll Z_{ex}(\omega). \quad (\text{П2.3})$$

При этом

$$\dot{U}_1(j \cdot \omega) = \frac{\dot{E} \cdot Z_{ex}(j \cdot \omega)}{R_i + Z_{ex}(j \cdot \omega)} \cong \dot{E} = const. \quad (\text{П2.4})$$

Если наименьшее значение  $R_{вых}$  X1-40, равное 75 Ом, не отвечает условию (П2.3), как это имеет место при исследовании АЧХ последовательного колебательного контура, то сигнал от X1-40 подается на схему через согласующий каскад, имеющий низкое выходное сопротивление (0.15 Ом).



Так как входное сопротивление исследуемых цепей частотнозависимо, то условия (П2.2) и (П2.3) на одних частотах могут выполняться лучше, а на других хуже. Соответственно результаты по АЧХ достоверны в той мере, в какой выполняются названные условия в полосе просмотра АЧХ.

Если при наблюдении АЧХ на экране ЭЛТ потребуется изменить размер изображения по вертикали, то это следует делать с помощью регулировки усиления КВО (ручка 7). Изменение размера изображения ручкой 17 происходит за счет изменения величины выходного сигнала X1-40 с разъема «1» (см.рис ПЗ.1).

## ПРИЛОЖЕНИЕ 3

### ПРИБОР X1-40 ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ АЧХ

Расположение ручек управления на лицевой панели прибора схематично показано на рисунке ПЗ.1, где приняты следующие обозначения:

- 1 и 2 – соответственно выходной и входной разъемы:  
выход 1 от генератора качающейся частоты (ГКЧ),  
вход 2 к индикатору X1-40 в виде электронно-лучевой трубки,
- 3,4,5,6 – перемещение и регулировка яркости и фокуса луча,
- 7 – ступенчатая и плавная регулировка усиления по каналу вертикального отклонения (КВО),
- 8 – установить в положение «ЛИН.» и не переключать,
- 9 – установить в положение «ВХОДН.» и не переключать,
- 10 – ручная или автоматическая развертка луча с регулируемой скоростью,
- 11 – переключатель частоты меток и плавная регулировка их амплитуды,
- 12 – 15 – регулировки по частоте, конкретнее:  
12 и 13 – регулировка частоты грубо и точно (подстройка),  
14 – переключатель диапазонов,  
15 – переключатель ширины полосы просмотра с плавной регулировкой,

- 16 – переключатель выходного сопротивления,  
 17 – переключатель и плавная регулировка величины  
 выходного сигнала генератора качающейся частоты,  
 18 – установить в положение «~» и не переключать.

*Непронумерованные ручки в процессе настройки и работы не трогать!*

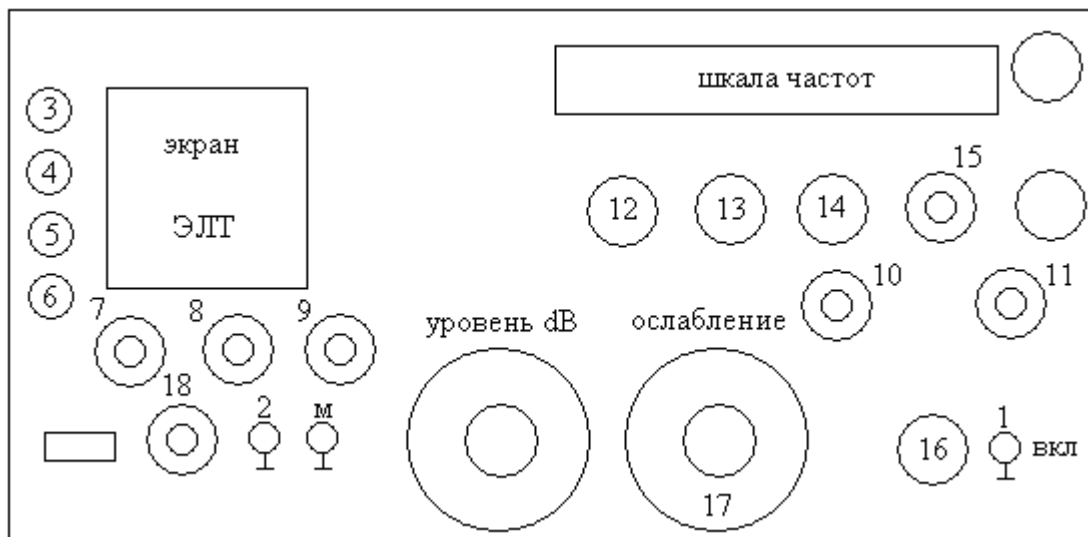


Рисунок П.3.1.

### Подготовка прибора X1 – 40 к работе.

Настройку прибора X1-40 начинать не ранее, чем через 20 минут после включения!

Рекомендуемый порядок действий:

- 1) 8 – «лин.», 18 – «~», 9 – «входн.», 10 – «период S=3», 11 – «откл.», 17 – в положение, соответствующее 0 dB;
- 2) установить переключателем 14 частотный диапазон: 1 – для исследования в низкочастотной области; 2 – для исследования в области высоких частот;
- 3) переключателем 15 установить требуемую полосу (в работах №4 - №7 «широкая» и плавная регулировка вправо до упора);

Положение переключателя 14	Положение переключателя 15	
	широкая	узкая
I: 20 Гц – 40 кГц	от 1 до 20 кГц	от 0.1 до 1 кГц
II: 10 кГц – 1 МГц	от 3 до 30 кГц	от 0.3 до 3 кГц

- 4) установить переключателем 16 требуемое  $R_{\text{вых}}$ ;

5) при анализе АЧХ  $\dot{K}_U$ , если  $|\dot{K}_U| \leq 1$ , следует входной сигнал, действующий на цепь, подать на вход 2 и добиться, чтобы луч перемещался по периметру сетки 10\*10 на экране ЭЛТ; для этой цели использовать ручки:

- 5 – смещение  $\longleftrightarrow$ , после настройки ручку 5 не трогать,
- 6 – добиться совмещения обратного хода луча с нижней линией сетки,
- 7 – добиться совмещения прямого хода луча с верхней гранью сетки; для этой же цели можно использовать ручку 17, если величина входного напряжения в проводимом исследовании не играет роли;

6) при работе в I диапазоне удобно минимальную частоту генератора (практически  $f=0$ ) совместить с левым краем экранной сетки - настроиться на нулевые биения:

- 10 – в положении «руч.», плавной регулировкой переместить луч на левый край сетки
- 12 и 13 – добиться нулевых биений (световая точка сначала вытянется в вертикальную линию и затем упадет до нуля);

*После настройки на нулевые биения ручки 12 и 13 не трогать!*

Примечание: контроль частоты внутри диапазона можно осуществлять с помощью частотомера или используя метки 11 через 10 кГц или 1 кГц в зависимости от полосы наблюдения.