



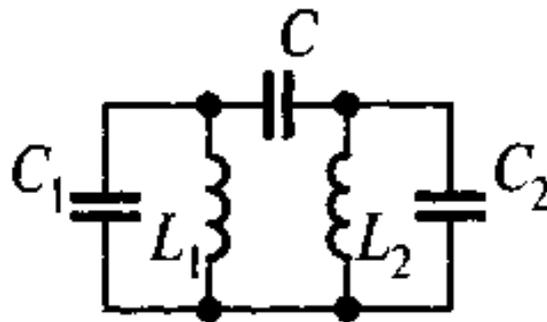
Кафедра конструирования  
и производства радиоаппаратуры

---

А.П. Кулинич, А.С. Шостак

## СВЯЗАННЫЕ КОНТУРЫ

Руководство к лабораторной работе



ТОМСК 2012

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>СОДЕРЖАНИЕ .....</b>	<b>2</b>
<b>1 ВВЕДЕНИЕ.....</b>	<b>3</b>
<b>2 ЦЕЛИ РАБОТЫ.....</b>	<b>3</b>
<b>3 СВЯЗАННЫЕ КОНТУРЫ .....</b>	<b>3</b>
3.1 Коэффициент и фактор связи.....	3
3.2 Резонансные явления .....	5
3.3 Частотные характеристики связанных контуров.....	6
3.4 Временные характеристики одиночного и связанных контуров	7
<b>4 ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЙ.....</b>	<b>8</b>
<b>5 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ.....</b>	<b>9</b>
5.1 Измерения параметров одиночного параллельного колебательного контура.....	9
5.2 Измерения параметров полосового фильтра на основе двух связанных параллельных контуров .....	9
5.3 Определение избирательностей фильтров по коэффициенту прямоугольности .....	10
5.4 Определение параметров одиночного колебательного контура по осциллограмме свободных колебаний.....	10
5.5 Исследование системы из двух связанных колебательных контуров в режиме свободных колебаний и оценка величины коэффициента связи .....	10
<b>6 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ .....</b>	<b>15</b>
<b>7 СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>	<b>15</b>

## 1 ВВЕДЕНИЕ

В канале связи всегда действуют различные помехи, которые нарушают информацию, передаваемую полезным сигналом. Поэтому важнейшей задачей при проектировании средств связи является подавление помех.

Качество подавления помех обычно оценивается селективностью (от латинского *selectio* - выбор, выделение) или избирательностью цепи, под которой понимают ее способность выделять полезный сигнал и ослаблять помехи. Цепи, обладающие избирательными свойствами, называют селективными цепями или фильтрами.

Селекция сигнала основывается на каком-либо различии между сигналом и помехой. В частности, при различии сигнала и помехи по частоте, используется частотная селекция, основанная на совмещении полосы пропускания цепи  $2\Delta f$  с полосой частот  $\Delta f_c$ , занимаемой спектром сигнала. При этом, амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) идеального фильтра должна иметь прямоугольный вид с шириной полосы пропускания равной ширине спектра сигнала  $\Delta f_c$ .

Простейшие фильтры, выполненные в виде одноконтурных колебательных систем не удовлетворяют даже относительно невысоким требованиям к избирательности цепи. Поэтому, для повышения избирательности часто используют несколько колебательных контуров, включенных последовательно один за другим, называемых связанными контурами.

## 2 ЦЕЛИ РАБОТЫ

Целями работы являются:

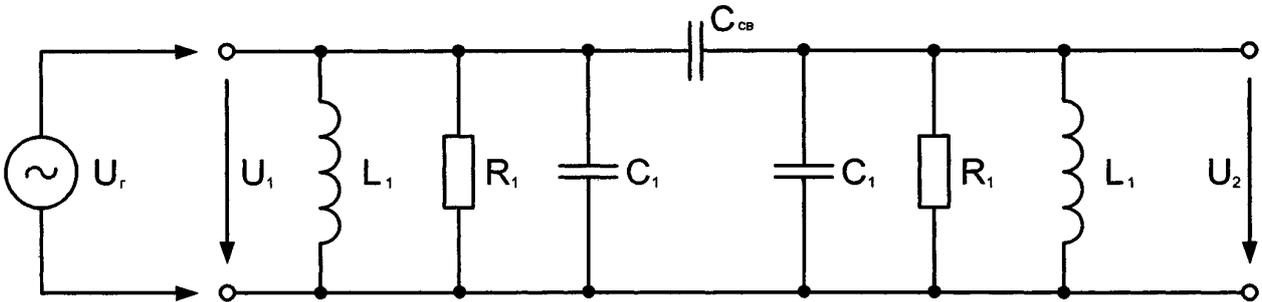
- 1) исследование физических процессов, протекающих в одиночном и связанных колебательных контурах в режимах вынужденных и свободных колебаний;
- 2) приобретение навыков экспериментального измерения основных параметров системы связанных колебательных контуров по амплитудно-частотной и переходной характеристикам;
- 3) исследование изменений АЧХ полосового фильтра на связанных контурах в зависимости от степени связи между контурами;
- 4) изучение методики настройки системы связанных контуров

## 3 СВЯЗАННЫЕ КОНТУРЫ

### 3.1 Коэффициент и фактор связи

Связанными называют систему из нескольких резонансных контуров, в которых колебания передаются из одного контура в другие. Связь между контурами может обеспечиваться различным образом. Однако характерные свойства связанных контуров не зависят от способа связи между контурами. В

данной работе рассматривается система связанных контуров, состоящая из двух параллельных контуров соединенных емкостной связью (рис.3.1).



**Рисунок 3.1. Система из двух связанных контуров, состоящая из двух параллельных контуров с емкостной связью -  $C_{CB}$**

Для количественной оценки степени связи любого вида используется понятие **коэффициента связи**.

**Коэффициентом связи** называется среднегеометрическое значение коэффициентов передачи по напряжению, которые определены для четырехполюсников связи при передаче слева направо и справа налево в режиме холостого хода.

Коэффициент связи для случая внешнеемкостной связи между контурами представляется в виде

$$k_{CB} = \frac{1}{\sqrt{(1 + C_1/C_{CB}) \cdot (1 + C_2/C_{CB})}} \quad (3.1)$$

Наряду с параметром (3.1) используют также понятие нормированного коэффициента связи или **фактора связи**  $A_{CB}$ :

$$A_{CB} = k_{CB} \sqrt{Q_1 \cdot Q_2}, \quad (3.2)$$

где  $Q_1, Q_2$  добротности контуров.

Для часто используемого на практике случая одинаковых связанных контуров ( $C_1 = C_2 = C; Q_1 = Q_2 = Q$ ) выражения (3.1) и (3.2) преобразуются к виду

$$k_{CB} = \frac{1}{1 + C/C_{CB}} = \frac{C_{CB}}{C + C_{CB}}; \quad A_{CB} = k_{CB} \cdot Q. \quad (3.3)$$

Из формул (3.3) видно, что коэффициент связи  $k_{CB}$  изменяется в пределах от 0 до 1 и с ростом емкости связи  $C_{CB}$  увеличивается. При одинаковом коэффициенте связи свойства связанных контуров с любым видом связи получаются идентичными.

### 3.2 Резонансные явления

Резонансные явления в связанных контурах существенно отличаются от резонанса в одиночном колебательном контуре за счет взаимного влияния связанных контуров друг на друга. Эквивалентные схемы двух связанных контуров могут быть представлены в виде рис.3.2.

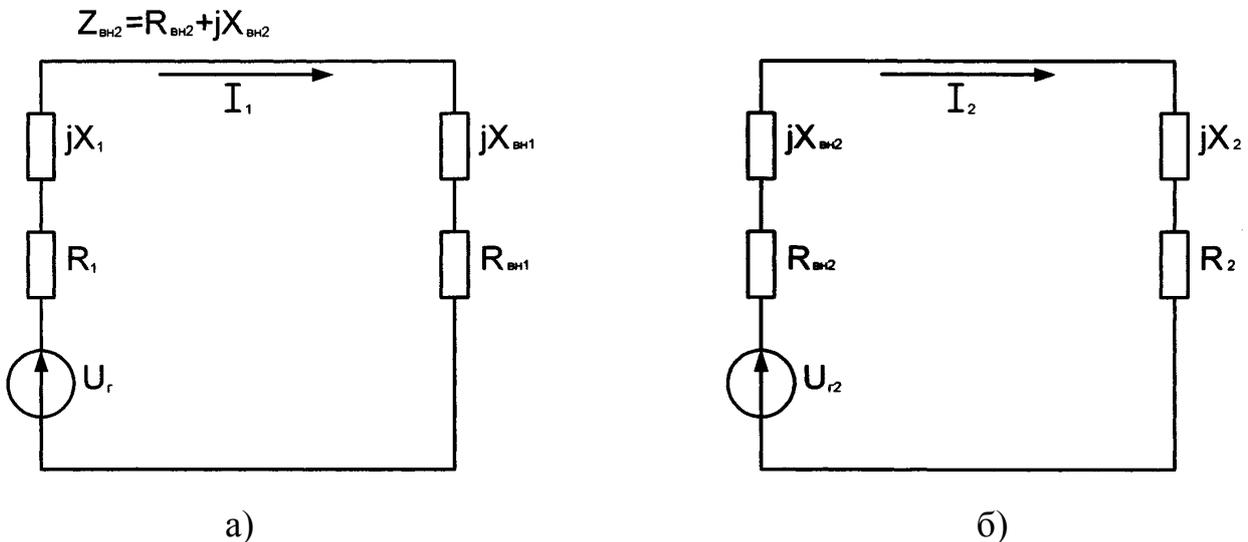


Рисунок 3.2. Эквивалентные схемы двух связанных контуров

Контур, в который включен источник сигнала  $U_r$  (рис.3.2,а), называется первичным контуром, второй контур (рис.3.2,б) - вторичным. На рис. 3.2  $jX_1$ ,  $R_1$  - собственные реактивное и активное сопротивления первичного контура;  $jX_2$ ,  $R_2$  - то же для вторичного контура. Характерной особенностью эквивалентной схемы на рис. 3.2,а является наличие вносимого комплексного сопротивления  $Z_{BH1}$ , которое вносится из вторичного контура в первичный:

$$Z_{BH1} = R_{BH1} + jX_{BH1}$$

и должно быть учтено при настройке первичного контура и резонанс.

Аналогично, в связанных контурах можно настраивать резонанс и вторичный контур, учитывая при этом влияние первичного контура. Это влияние учитывается введением в эквивалентную схему (рис. 3.2,б) вносимого сопротивления:

$$Z_{BH2} = R_{BH2} + jX_{BH2}$$

Э.д.с.  $U_{r2}$  на рис 3.2,б – наводимая э.д.с. во вторичном контуре током  $I_1$  первичного контура.

Учитывая взаимное влияние связанных контуров и принимая во внимание возможность настройки как первичного, так и вторичного контура, можно записать два условия резонанса для полного реактивного сопротивления контуров:

$$X_1 + X_{BH1} = 0, \quad X_2 + X_{BH2} = 0.$$

Резонансы, достигаемые настройкой либо первичного, либо вторичного контура называются соответственно **первым и вторым частными резонансами**.

Если последовательно настраивать первичный и вторичный контуры, то можно получить резонансы в обоих контурах при выполнении условия  $X_1 = X_2 = 0$ . В этом случае вносимые реактивные сопротивления также будут равны нулю.

Резонанс, получающийся при одновременной настройке обоих контуров, называется **полным резонансом**.

### 3.3 Частотные характеристики связанных контуров

Вид нормированной АЧХ цепи со связанными контурами (в режиме полного резонанса) определяется выражениями вида

$$K_H = \frac{2A_{CB}}{\sqrt{(1 + A_{CB}^2 - \xi^2)^2 + 4\xi^4}}, \quad (3.4)$$

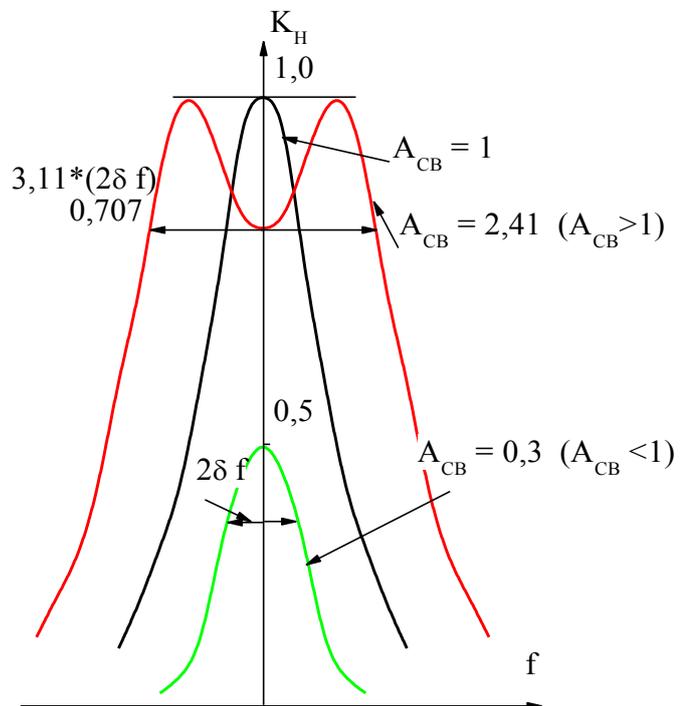
где  $\xi = \xi_1 = \xi_2 = \frac{2Q\Delta f}{f_0}$  обобщенная расстройка связанных контуров;

$\Delta f$  - расстройка относительно резонансной частоты  $f_0$ .

Анализ выражения (3.4) показывает наличие трех режимов связи (рис.3.3).

**Режим малой связи** ( $A_{CB} < 1$ ). АЧХ фильтра имеет один максимум и похожа на АЧХ одиночного контура, но имеющего более узкую полосу пропускания. Нормированный коэффициент передачи на резонансной частоте  $K_H < 1$ .

**Режим критической связи** ( $A_{CB} = 1$ ). АЧХ фильтра имеет максимально плоскую вершину. Полоса пропускания связанных контуров по уровню 0.707 в  $\sqrt{2}$  раз шире, чем у одиночного контура, имеющего такую же добротность, как и связанные контуры. Нормированный коэффициент передачи на резонансной частоте  $K_H = 1$ .



**Рисунок 3.3. Связанные контура. Три режима связи:  $A_{CB} < 1$ ,  $A_{CB} = 1$ ,  $A_{CB} > 1$**

Нормированный коэффициент передачи на резонансной частоте  $K_H = 1$ .

**Режим сильней связи** ( $A_{CB} > 1$ ). Характеризуется появлением в АЧХ фильтра двух максимумов со значениями нормированного коэффициента передачи равными 1. На резонансной частоте  $f_0$  АЧХ имеет минимум. При дальнейшем увеличении степени связи между контурами уменьшение АЧХ на резонансной частоте увеличивается и достигает значения, равного 0,707, при значении фактора связи, равного 2,41. В этом случае полоса пропускания связанных контуров примерно в 3,11 раза шире, чем у одиночного контура.

### 3.4 Временные характеристики одиночного и связанных контуров

При поступлении на вход устройства воздействия в виде единичной функции  $\sigma(t)$  (рис. 3.4) на выходе этого устройства будет наблюдаться некоторый переходной процесс, называемый “переходная характеристика”. Вид и параметры этого переходного процесса определяются свойствами исследуемого устройства.

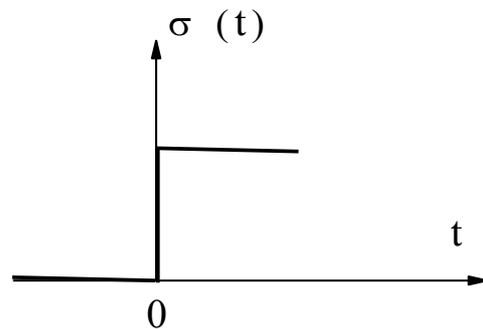
Переходной процесс на выходе одиночного колебательного контура определяется выражением

$$U(t) \approx e^{-t/\tau_k} \sin(\omega_{CB}t), \quad (3.5)$$

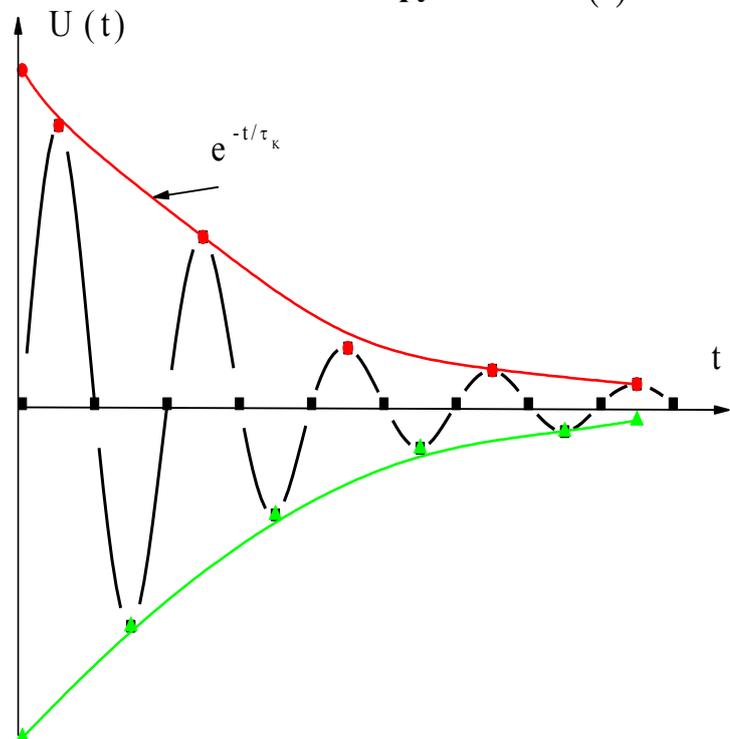
где  $t$  - текущее время;  $\omega_{CB}$  - частота свободных колебаний в контуре;  $\tau_k = \frac{2Q}{\omega_0}$  - постоянная времени контура.

Как видно из выражения (3.5) переходной процесс имеет вид постепенно затухающих колебаний. Частота колебательного процесса определяется частотой собственных колебаний контура, а скорость затухания - постоянной времени контура  $\tau_k$  (рис.3.5).

По виду осциллограмм переходного процесса можно оценить величину добротности контура. Добротность одиночного колебательного контура численно равна



**Рисунок 3.4.** Сигнал в виде единичной функции  $\sigma(t)$



**Рисунок 3.5.** Затухание колебаний при одиночном воздействии

численно равна

количеству периодов частоты собственных колебаний, подсчитанных за время, в течение которого амплитуда колебаний на зажимах контура уменьшается в 23 раза (на 27 дБ).

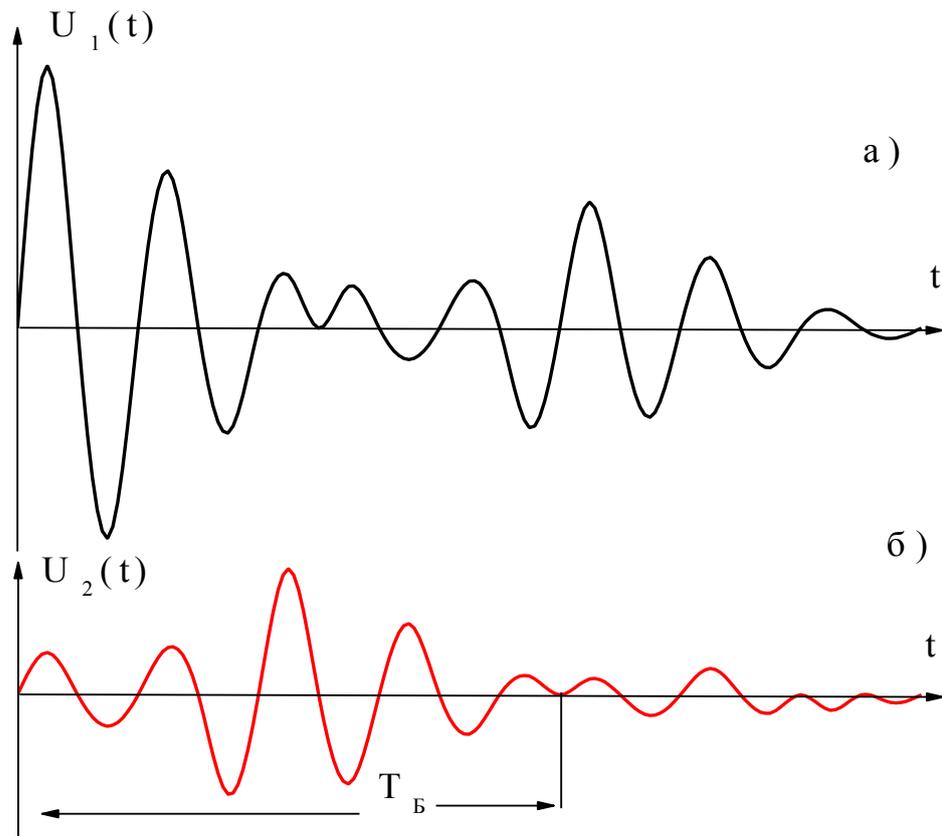
Переходные процессы, протекающие в системе связанных контуров (в режиме полного резонанса), показаны на рис. 3.6,а и рис. 3.6,б. Колебания в каждом из контуров представляют собой сумму двух свободных колебаний с частотами приблизительно равными частотам, при которых наблюдаются максимумы двугорбой резонансной кривой в режиме вынужденных колебаний.

Сложение в каждом из контуров двух близких по частоте колебаний образует биения (см. рис. 3.6). Потери энергии в контурах обуславливают постепенное затухание колебаний.

Частота заполнения биений примерно равна резонансной частоте связанных контуров, а частота биений определяется следующим выражением:

$$f_B = k_{CB} \cdot f_0 \quad (3.6)$$

Характерно, что максимумам огибающей амплитуд колебаний в



**Рисунок 3.6. Переходные процессы в системе из двух связанных контуров**

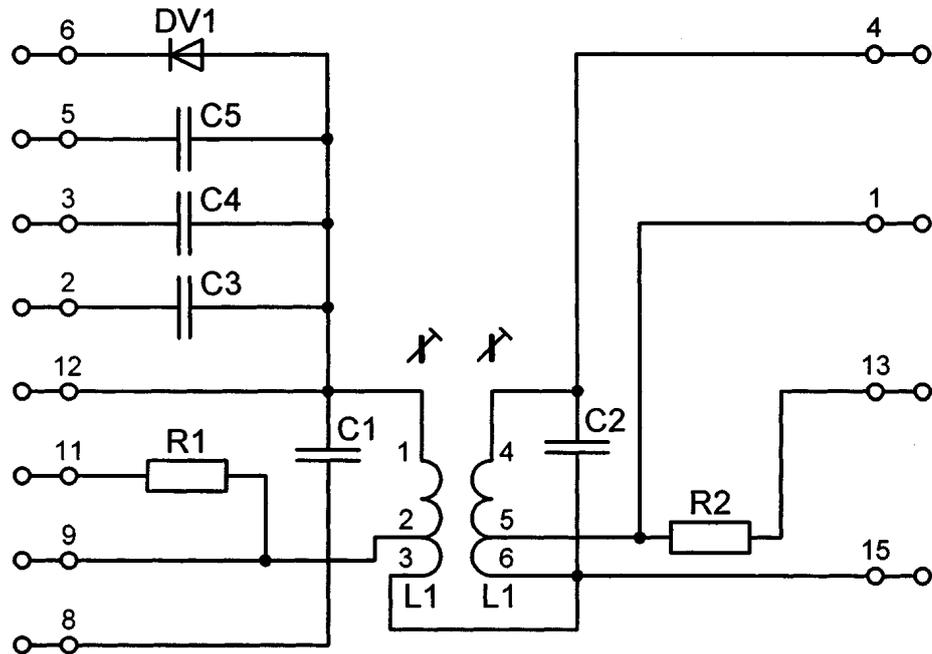
первичном контуре ( $U_1(t)$  на рис. 3.б, а) соответствуют минимумы огибающей амплитуд во вторичном контуре: ( $U_2(t)$  на рис. 3.б, б) и наоборот. Это объясняется явлением “перекачки” энергии из одного контура во второй.

#### 4 ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЙ

Объектом исследований являются два параллельных колебательных  $L_1 C_1$  и  $L_2 C_2$  контура, расположенных на сменной печатной плате. Изменение степени связи между контурами осуществляется подключением между контурами одного из конденсаторов связи  $C_3, C_4, C_5$  также расположенных на

сменной плате. Для этого необходимо гнездо 4 соединить при помощи перемычки с одним из гнезд – 2, 3, 5.

Измерения и наблюдение АЧХ в режиме вынужденных колебаний производят при помощи измерителя амплитудно – частотных характеристик (ИФЧХ) Х1 – 40, состоящего из генератора качающей частоты (ГКЧ) и индикатора (И). Измерения можно произвести также при помощи генератора ГЗ – 118 и вольтметра ВЗ - 38.



**Рисунок 4.1. Схема электрическая принципиальная сменной печатной платы для исследования связанных колебательных контуров**

## 5 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

### 5.1 Измерение параметров одиночного параллельного колебательного контура

При помощи прибора для исследования АЧХ (ИАЧХ) снять АЧХ одиночного колебательного контура (выходное сопротивление генератора ИАЧХ установить, равным 10000 Ом). Определить резонансную частоту, полосу пропускания и эквивалентную добротность одиночного колебательного контура  $L_1 C_1$  и контура  $L_2 C_2$ , настроив их на одну и ту же резонансную частоту. Схема измерений показана на рис 5.1.

### 5.2 Измерение параметров полосового фильтра на основе двух связанных параллельных контуров

Собрать схему полосового фильтра на связанных контурах (рис.5.2). Настроить оба связанных контура в резонанс по следующей методике:

- 1) при отключенном конденсаторе связи настроить в резонанс первичный контур;
- 2) аналогично настроить в резонанс вторичный контур (на ту же самую резонансную частоту);

3) подключить конденсатор связи.

Зарисовать вид АЧХ, измерить полосу пропускания (по уровню минус 3 дБ) полосового фильтра на связанных контурах при различной степени связи между контурами.

### 5.3 Определение избирательностей фильтров по коэффициенту прямоугольности

Измерить граничные частоты полосы пропускания фильтра на связанных контурах, за пределами которой значение АЧХ уменьшается в 10 раз (на 20 дБ) при критической и сильной связях между контурами. Сравнить избирательность одиночного и связанных колебательных контуров по величине коэффициента прямоугольности  $K_{пр} = \frac{2\Delta f_{0,7}}{2\Delta f_{0,1}}$ . (Идеальный фильтр с прямоугольной АЧХ имеет  $K_{пр} = 1$ ). Схема измерений показана на рис 5.2.

### 5.4 Определение параметров одиночного колебательного контура по осциллограмме свободных колебаний

Подать на вход одиночного колебательного контура прямоугольные импульсы. Зарисовать осциллограмму переходного процесса. Подсчитав количество периодов частоты собственных колебаний за время, в течение которого амплитуда колебаний на зажимах контура уменьшается в 23 раза (на 27 дБ), оценить добротность контура (добротность численно равна количеству подсчитанных периодов). По осциллограмме измерить  $f_0$  и затем рассчитать полосу пропускания  $2\Delta f = \frac{f_0}{Q}$ .

Сравнить полученные значения с ранее измеренными по АЧХ в п. 5.1.

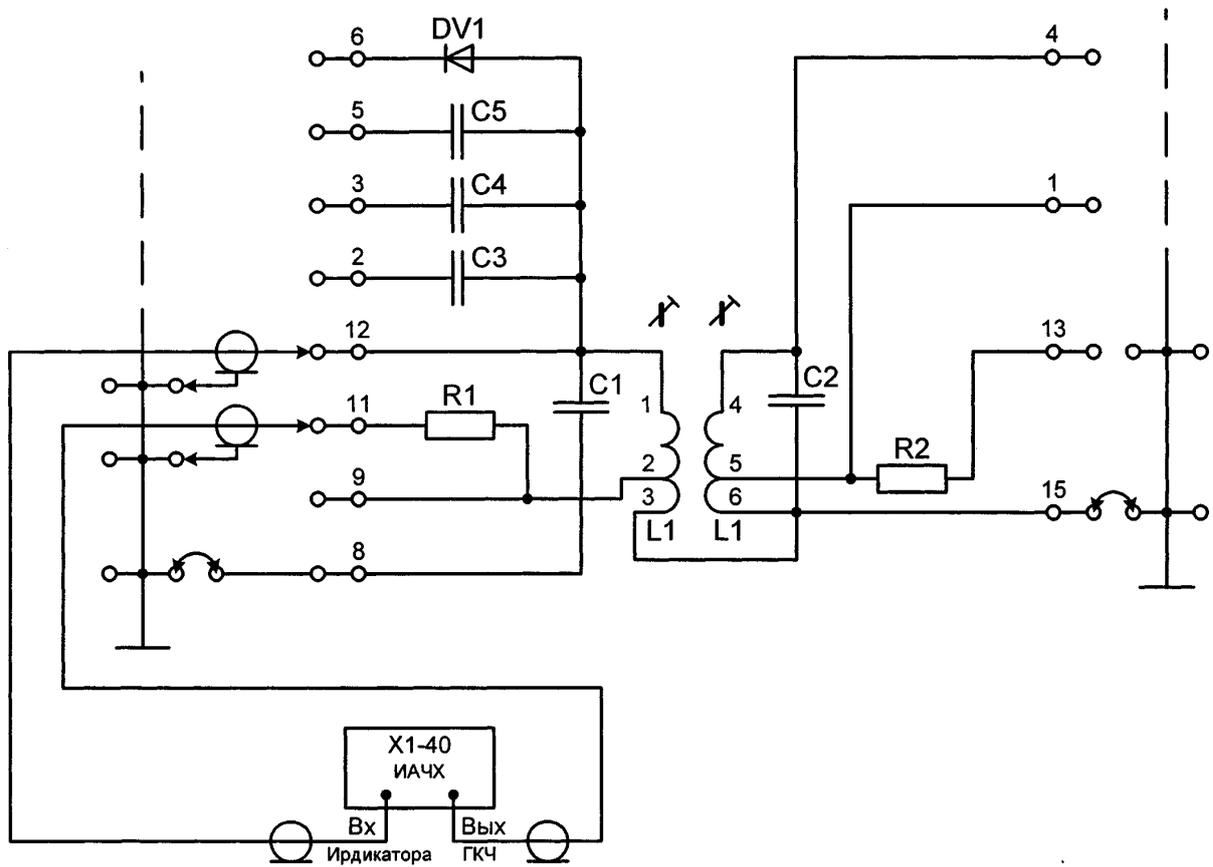
### 5.5 Исследование системы из двух связанных колебательных контуров в режиме свободных колебаний и оценка величины коэффициента связи

Подать на вход системы связанных контуров прямоугольные импульсы с генератора импульсов. Зарисовать вид свободных колебаний на выходе системы связанных контуров при различной степени связи между контурами.

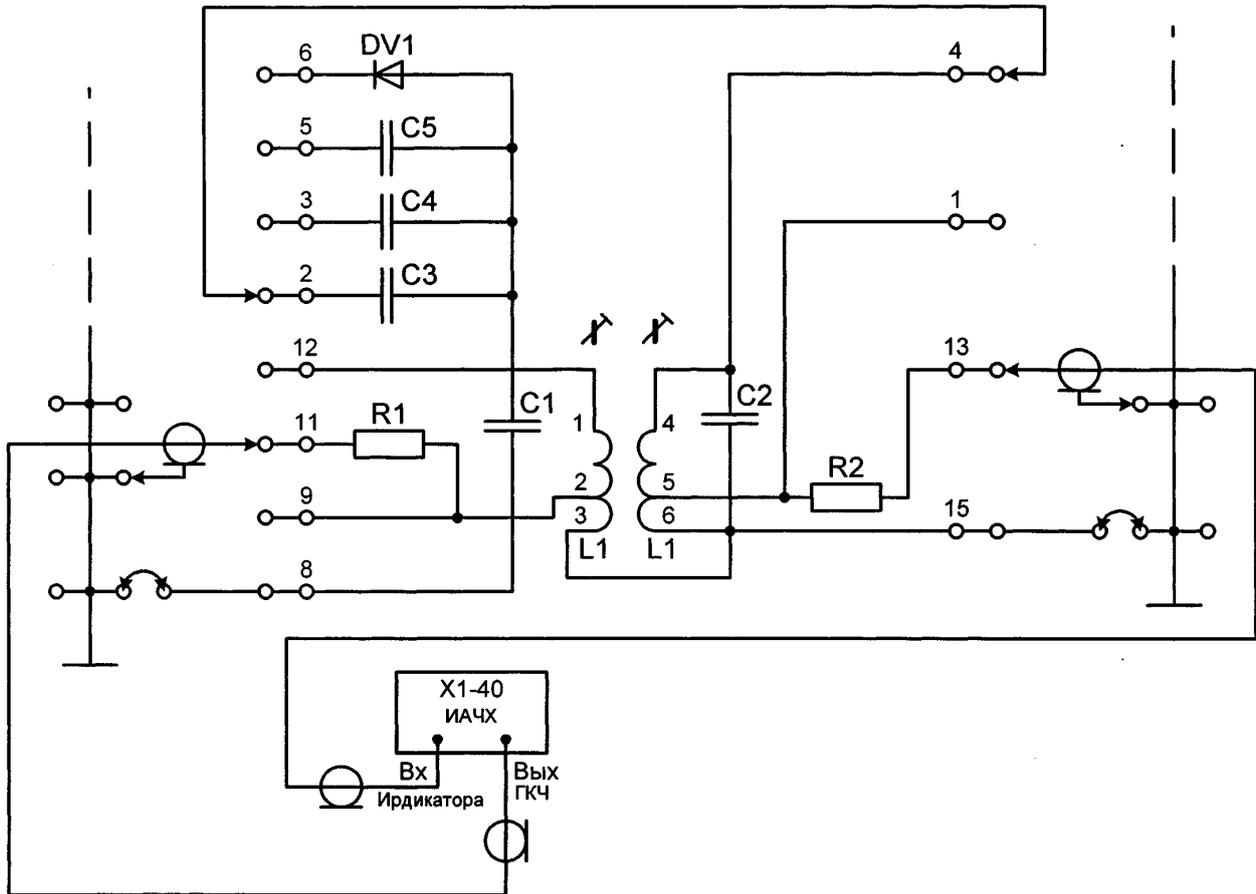
По осциллограммам свободных колебаний рассчитать частоту биений и по формуле (3.6) оценить коэффициент связи  $k_{св}$  между контурами.

Сравнить полученные значения с результатами расчета  $k_{св}$  по формуле 3.3.

Схема измерений показана на рис 5.4.

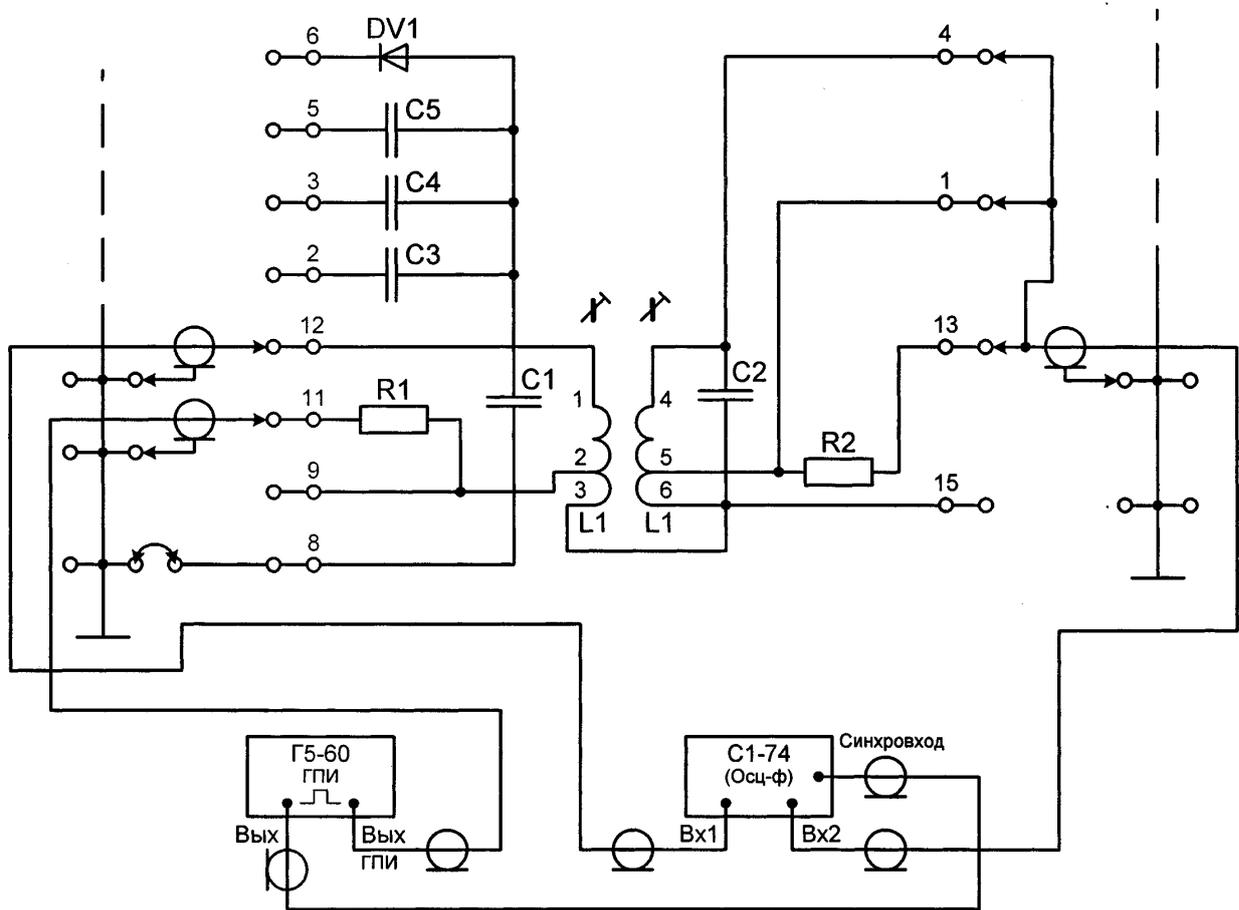


**Рисунок 5.1. Схема соединений для измерения параметров одного колебательного контура  $L1 C1$  в режиме вынужденных колебаний**



**Рисунок 5.2. Схема соединений для измерения параметров полосового фильтра в режиме вынужденных колебаний**





**Рисунок 5.4 . Схема соединений для исследования системы связанных колебательных контуров в режиме свободных колебаний**

## 6 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

6.1 .Объяснить условие резонанса в одиночном и связанных колебательных контурах.

6.2. С какой целью используются более сложные колебательные системы?

6.3. Какие виды резонанса возможны в системе связанных контуров?

6.4. Объяснить методику настройки системы связанных контуров.

6.5. Нарисовать и объяснить вид осциллограмм свободных колебаний в одиночном и связанных колебательных контурах.

6.6. Как рассчитать основные параметры одиночного и связанных контуров по осциллограмме свободных колебаний?

## 7 СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нефедов В.И. Основы радиоэлектроники и связи. - М.: Высш. шк., 2002. - 510 с.
2. Кулинич А.П. Описания радиоизмерительных приборов, инструкции по работе с ними и методика проведения измерения: Лабораторный практикум. – Томск: ТАСУР., 2005. - 18 с.
3. Каяцкас А.А. Основы радиоэлектроники. М.: Высш. шк., 1988. – 464 с.

