

Документ подписан простой электронной подписью  
Информация о владельце:  
ФИО: Баламирзоев Назим Лиодинович  
Должность: И.о. ректора  
Дата подписания: 20.08.2023 22:10:49  
Уникальный программный ключ:  
2a04bb882d7edb7f479cb266eb4aaaedebeea849

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ**

**ФГБОУ «Дагестанский государственный технический университет»**

---

**Кафедра радиотехники и телекоммуникаций**

### **Методические указания**

к выполнению лабораторных работ по дисциплине  
"Радиотехнические цепи и сигналы"(Линейные цепи)

*(для студентов направления подготовки бакалавров  
11.03.01 - Радиотехника)*

**Махачкала 2019**

УДК 621.38/39

**ЛИНЕЙНЫЕ ЦЕПИ.** Лабораторные работы по дисциплине и "Радиотехнические цепи и сигналы" (Линейные цепи). Махачкала 2019 г. - 35

#### Аннотация

Приводятся описания четырех лабораторных работ по исследованию линейных электрических цепей: колебательных контуров, электрических фильтров, переходных процессов в RC-, RL- и RLC – цепях. Содержатся сведения по методике выполнения работ, а также теоретический материал, необходимый для подготовки к работам и выполнению расчетных заданий. Предназначено для студентов для студентов направления подготовки бакалавров 11.03.01 – Радиотехника.

**Составители:** ст. преп. Магомедсаидова С.З.

**Рецензенты:** Акимов А.К. – зам. директора РТПЦ РД;  
Мусаев Л.П. к.т.н., доцент ДГТУ

---

Печатается по постановлению Совета Дагестанского государственного технического университета.

## ОРГАНИЗАЦИЯ ЛАБОРАТОРНОГО ПРАКТИКУМА

Лабораторные работы выполняются фронтально, бригадами в составе 2-х – 3-х человек. Каждой бригаде присваивается свой порядковый номер. Номерам бригад соответствуют номера вариантов значений отдельных параметров, используемых при выполнении конкретных работ и домашних расчетов к ним (эти параметры в тексте описаний работ помечены звездочкой). *Сводная таблица значений таких параметров по всем работам приведена в Приложении в конце настоящего сборника.*

Для выполнения всех лабораторных работ данного цикла каждой бригаде студентов представляется одно рабочее место, укомплектованное типовыми измерительными приборами и универсальным лабораторным макетом. В комплект измерительных приборов входят: генераторы НЧ и ВЧ, осциллограф ОСЦ, вольтметры В (2шт.).

Лабораторный стенд, на котором выполняются все работы, представляет из себя настольный макет, в корпусе которого смонтированы все необходимые детали. На рабочую панель макета выведены только коммутационные элементы (гнезда, переключатели). Здесь же показаны схемы исследуемых цепей. Подробное описание лабораторного стенда приведено в Приложении.

Успешно выполнить лабораторную работу можно лишь при условии хорошей подготовки к ней. При домашней подготовке к работе каждому студенту следует:

- ознакомиться с описанием предстоящей работы, знать цель и порядок выполнения её;

- выполнить расчетную часть, если она предусмотрена в домашнем задании к работе, изучить теоретический материал соответствующей части курса в объеме конспекта лекций (или по литературе, которая указана в описании работы) и продумать ответы на контрольные вопросы;

- продумать методику и ход предстоящего эксперимента в лаборатории, заготовить таблицы для записи данных и миллиметровку для осциллограмм и графиков;

- ознакомиться с применяемой в работе измерительной аппаратурой и с лабораторным макетом по описаниям.

Лабораторные работы, приведенные в данном сборнике, могут успешно выполняться на компьютере с использованием отработанных и хорошо зарекомендовавших себя программ моделирования электронных схем, например таких, как Electronics Workbench [5] или Micro Cap [6]. Однако вместо полной замены “аппаратных” работ “компьютерными”, более предпочтительными представляются комбинированные лабораторные занятия, проводимые по следующей схеме.

Часть лабораторных экспериментов выполняется “аппаратно” с использованием лабораторных макетов и реальных измерительных приборов. Как правило, это более простые измерения, не требующие значительных временных затрат и особой тщательности проведения. Более сложные опыты,

связанные со снятием семейств характеристик при вариации параметров цепей, а также с определенной математической обработкой результатов, либо требующие тщательного соблюдения условий чистоты эксперимента, предпочтительнее выполнять на ПЭВМ. В нижеследующих работах такие пункты лабораторных заданий отмечены специальным знаком (\*\*\*)). При этом желательно заранее создать и хранить в памяти ПЭВМ библиотеку моделей исследуемых цепей с тем, чтобы студенты не затрачивали время занятий на процедуру набора. Подготовленные модели должны иметь управляемые параметры, которые можно изменять в процессе эксперимента в соответствии с номером варианта.

Организация лабораторного практикума при проведении таких “аппаратно-машинных” работ может быть различной в зависимости от степени компьютерной оснащённости лаборатории. Оптимальным является наличие ПЭВМ на каждом рабочем месте наряду с измерительной аппаратурой, что обеспечивает гибкость в проведении занятия. В зависимости от бюджета времени и уровня подготовленности студентов в этом случае на ПЭВМ могут выполняться не только оговоренные в лабораторном задании типовые измерения, но и дополнительные (индивидуальные) эксперименты. С этой целью в заключение каждой работы включен пункт “индивидуальное задание по указанию преподавателя”. При такой организации на выполнение отдельных работ может потребоваться более 4-х часов. В этом случае каждую из них следует выполнять на двух занятиях, так что лабораторный практикум будет состоять из 8-10 работ.

Учитывая, что имеются достаточно подробные и методически доступно изложенные руководства [1, 2] по пользованию указанными выше программами моделирования, в настоящем пособии эти вопросы не затрагиваются.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

### ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ КОНТУРОВ

**Цель работы:** изучение вынужденных колебаний и резонансных явлений в параллельном, последовательном и связанных колебательных контурах при воздействии гармонического сигнала.

#### Домашнее задание

1. Определить величину емкости  $C$  конденсатора, при которой одиночный колебательный контур с индуктивностью  $L = L^*$  имеет резонансную частоту  $f = f^*$ .  
Вычислить также добротность  $Q$ , характеристическое сопротивление  $\rho$  и ширину полосы пропускания  $\Pi$ , если сопротивление потерь контура  $r = 100$  Ом.
2. Рассчитать для параллельного колебательного контура величину шунтирующего сопротивления  $R_{ш}$ , которое нужно включить параллельно контуру для расширения полосы пропускания вдвое.
3. Изобразить ориентировочный вид резонансных кривых, которые должны быть получены при выполнении пункта 5 лабораторного задания.

#### Схемы и методика исследования

Исследование колебательных контуров производится в соответствии со схемами, приведенными на рис. 1. Источником гармонических колебаний служит генератор высокой частоты ГВЧ, а высокочастотное напряжение на контуре измеряется электронным вольтметром В.

В качестве элементов колебательных контуров используются катушки индуктивности  $L11$ ,  $L12$  и конденсаторы  $C11$ ,  $C12$ , смонтированные на лабораторном стенде.

Методика снятия резонансных кривых рекомендуется следующая.

Установить частоту колебаний генератора ВЧ равной  $f^*$ , а уровень входного напряжения генератора  $U_2 = 0,7 - 1,0$  В. Переменным конденсатором  $C$  настроить контур в резонанс с этой частотой, фиксируя момент резонанса по максимуму напряжения на контуре  $U_{к0}$ . После этого, поддерживая постоянной величину  $U_2$ , постепенно изменять частоту сигнала  $f$  генератора и периодически измерять напряжение на контуре. Вблизи резонансной частоты следует брать отсчеты чаще, а на «хвостах» - реже.

Измерение следует продолжать до тех пор, пока напряжение на контуре  $U_k$  не уменьшится до величины  $U_k = (0,1 - 0,2) U_{к0}$ . Затем таким же образом необходимо снять вторую половину резонансной кривой, изменяя частоту генератора в другую сторону от резонансной частоты. Результаты измерений занести в таблицу 1.

Таблица 1

Наименов. исслед. контура и значен. пост. параметров										
$f_0 = \dots$										
$f, \text{кГц}$										
$U_k, \text{В}$										
$U_k / U_{k0}$										

### *Лабораторное задание*

1. Собрать схему для исследования последовательного колебательного контура. После проверки схемы преподавателям включить приборы и снять по точкам резонансную характеристику контура - зависимость амплитуды напряжения на конденсаторе от частоты  $U_k(f)$ . Определить добротность контура:
  - а) по отношению напряжения на конденсаторе при резонансе  $U_{k0}$  к напряжению источника сигнала  $U_2$ ;
  - б) после снятия резонансной кривой - по полосе пропускания контура и резонансной частоте.
2. Собрать схему для исследования параллельного колебательного контура. Снять резонансную кривую контура  $U_k(f)$ , определить полосу пропускания и добротность контура.
3. С помощью переключки П11 зашунтировать параллельный контур резистором  $R_{ш}$ . Повторить измерения, указанные в п.2.
4. Собрать схему для исследования резонансных явлений в связанных колебательных контурах. Получить полный и оптимальный резонансы, для чего:
  - а) с помощью переменного конденсатора  $C11$  настроить первый контур на резонансную частоту  $f_0 = f^*$  при разомкнутом втором контуре (первый частичный резонанс);
  - б) не меняя параметров первого контура и установив между контурами минимальную связь, настроить конденсатором  $C12$  второй контур на резонанс по максимуму напряжения на втором контуре (второй частичный и полный резонансы);
  - в) изменяя коэффициент связи между контурами добиться наибольшего значения напряжения на втором контуре (оптимальный резонанс). По шкале указателя величины связи отметить значение, соответствующее оптимальному коэффициенту связи  $K_{св оп}$ .
5. Снять резонансные кривые связанных контуров для трех значений коэффициента связи между контурами:
  - а)  $K_{св} = K_{св оп}$ ;
  - б)  $K_{св} > K_{св оп}$ ;
  - в)  $K_{св} < K_{св оп}$

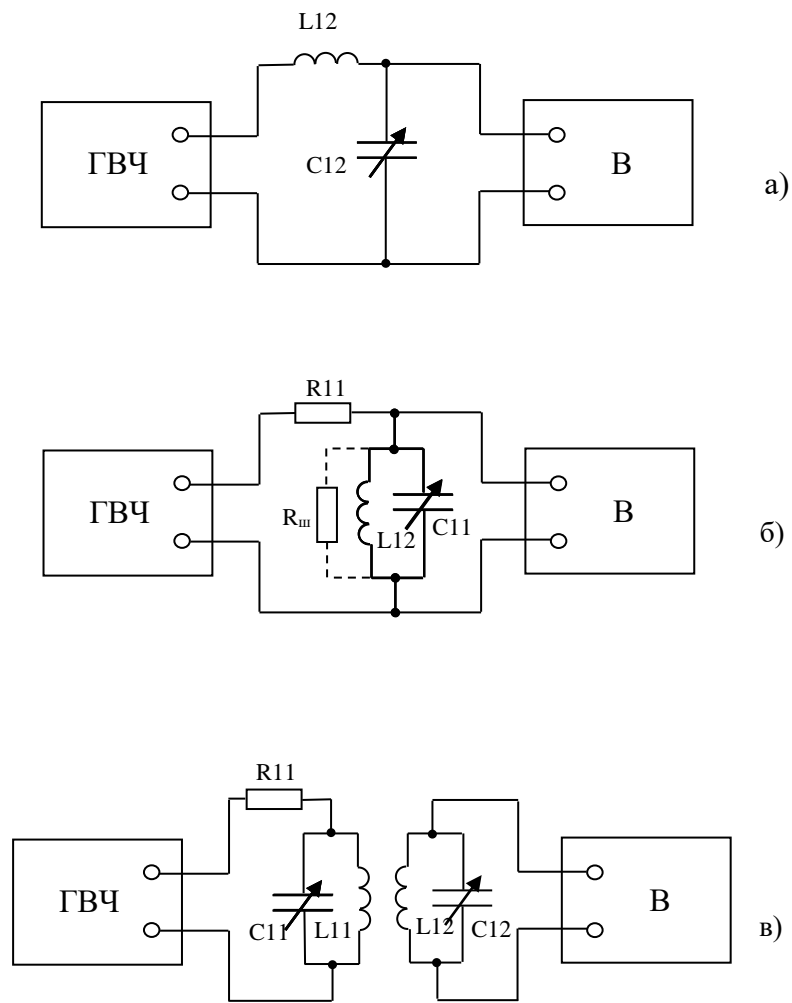


Рис.1. Схемы исследования последовательного (а), параллельного (б) и связанных (в) колебательных контуров

### *Содержание отчета*

Отчет, оформленный в соответствии с требованиями, приведенными в п.1.4., должен содержать:

1. Результат выполнения домашнего задания.
2. Схемы экспериментального исследования колебательных контуров.
3. Результаты измерений, сведенные в таблицы, а также результаты определения полосы пропускания и добротности.
4. Графики резонансных кривых, полученных в ходе эксперимента.

Графики должны быть построены в относительном масштабе-  $U_k(f) / U_{к0}$ , причем однотипные характеристики необходимо свести в семейства:

- для параллельного контура (п.п. 2 и 3)- на одном рисунке,
- для связанных контуров- также на одном рисунке.

## Краткие теоретические сведения

Резонансной частотой контура называется частота  $\omega_o$ , при которой реактивное сопротивление контура обращается в ноль:

$$\omega_o = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (1.1)$$

Характеристическое (волновое) сопротивление контура равно сопротивлению реактивного элемента контура на резонансной частоте:

$$\rho = \omega_o L = \frac{1}{C\omega_o} = \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (1.2)$$

Добротность контура  $Q = \rho/r = 1/\alpha$ , где  $r$ - активное сопротивление (сопротивление потерь),  $\alpha$  -затухание контура.

Обобщенная расстройка

$$\xi = \frac{\omega L - 1/\omega C}{r} = 2Q \frac{\Delta\omega}{\omega_o}, \quad \Delta\omega = |\omega - \omega_o| \quad (1.3)$$

Обобщенная резонансная кривая

$$K(\xi) = \frac{1}{\sqrt{1 + \xi^2}} \approx \frac{1}{\sqrt{1 + \left(2Q \frac{\Delta\omega}{\omega_o}\right)^2}} \quad (1.4)$$

По характеру кривых резонанса можно судить, насколько контур избирателен: чем острее резонансная характеристика, тем избирательнее контур. Формулы (1.4), (1.5) и рис. 2. показывают, что острота кривой резонанса определяется только добротностью контура: чем больше  $Q$ , тем острее резонансная характеристика и тем стало быть, выше избирательность.

Полоса пропускания контура

$$\Pi = 2\Delta\omega_{0,7} = \frac{\omega_o}{Q} \quad (1.5)$$

### Последовательный колебательный контур (рис.1а)

Комплексное входное сопротивление

$$\dot{z} = r + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right),$$

а модуль его  $z = r\sqrt{1 + \xi^2}$ . При резонансе ( $\xi = 0$ )  $z_o = r$ .

Амплитуда тока контура при питании его от генератора Э.Д.С.  $E_r$  (т.е. при  $U_{ax} = E_r = const$ )



$$I = \frac{E_r}{z} = \frac{E_r}{r\sqrt{1+\xi^2}} -$$

- изменяется (как и входная проводимость контура  $Y = \frac{1}{z}$ ) в соответствии с резонансной кривой (1.4).

Частотная характеристика (ЧХ) напряжений (модуль коэффициента передачи)  $K(\omega) = U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}}$  зависит от того, с какой реактивности снимается выходное напряжение

$$K_c(\omega) = \frac{U_c}{E_r} = \frac{\omega_o}{\omega} \cdot \frac{Q}{\sqrt{1+\xi^2}}; \quad K_L(\omega) = \frac{U_L}{E_r} = \frac{\omega}{\omega_o} \cdot \frac{Q}{\sqrt{1+\xi^2}}.$$

В области малых расстройк ( $\omega \approx \omega_o$ ) получим  $K(\omega_o) \approx K_c \approx K_L \approx Q/\sqrt{1+\xi}$ , т.е. ЧХ также имеет вид резонансной кривой рис. 3.

При резонансе ( $\xi = 0$ )  $K_L = K_c = Q$  - амплитуда напряжения на каждом из реактивных элементов в  $Q$  раз больше амплитуды Э.Д.С генератора  $E_r$ , питающего контура (резонанс напряжений).

Для сравнения частотных свойств различных колебательных контуров удобно строить АЧХ в относительных масштабах (нормирование АЧХ). При этом по оси ординат откладывается отношение  $K(\omega)/K(\omega_o)$ , а по оси абсцисс - относительная расстройка по частоте  $\Delta\omega/\omega_o = (\omega - \omega_o)/\omega_o$ . Вид нормированных АЧХ показан на рис. 2 для двух значений добротности ( $Q_1 > Q_2$ ).

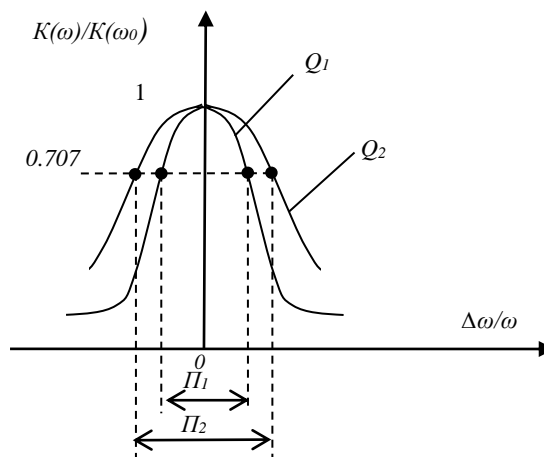


Рис. 2. АЧХ последовательного колебательного контура

Частотные искажения, вносимые контуром в сигнал, оцениваются полосой пропускания контура. Под полосой пропускания понимается интервал частот, в пределах которого частотные искажения не превышают заданного значения. Наиболее часто таким значением является уровень  $-3$  дБ, т.е.  $\frac{1}{\sqrt{2}} = 0,707$  от наибольшей величины. При этом полоса пропускания

будет отсчитываться между частотами, на которых коэффициент передачи (или выходное напряжение) составляет 0,707 от резонансного значения.

### **Параллельный колебательный контур (рис.1б)**

Комплексное входное сопротивление

$$\dot{z} = \frac{(r_L + j\omega L)(r_C - j \cdot 1/\omega C)}{r_L + r_C + j(\omega L - 1/\omega C)},$$

где  $r_C$  и  $r_L$  - сопротивления потерь емкостной и индуктивной ветвей контура. Учитывая, что обычно  $r_L \ll \omega L$  и  $r_C \ll 1/\omega C$ , имеем

$$\dot{z} \approx \frac{L/C}{r + j(\omega L - 1/\omega C)} = \frac{\rho^2}{r(1 + \xi^2)};$$

$$r = r_L + r_C.$$

Модуль входного сопротивления изменяется в соответствии с резонансной кривой:

$$z = \rho^2 / r \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \xi^2}} = R_0 \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \xi^2}};$$

На резонансной частоте сопротивление параллельного контура чисто активное и *большое*:

$$R_0 = \rho^2 / r = \rho Q.$$

Амплитуда напряжения на контуре при питании его от генератора тока (т.е. при  $I_G = const$ )

$$U_K = I_G \cdot z = I_G \cdot R_0 \frac{1}{\sqrt{1 + \xi^2}}$$

изменяется (как и входное сопротивление) в соответствии с резонансной кривой (1.4) рис.3.

Токи в индуктивной и емкостной ветвях контура:

$$I_L \approx \frac{U_K}{x_L} \approx \frac{I_G \cdot z}{x_L}; \quad I_C \approx \frac{U_K}{x_C} \approx \frac{I_G \cdot z}{x_C}.$$

При резонансе ( $x_{L0} = x_{C0} = \rho$ ,  $Z = R_0 = \rho Q$ ) получим:

$$I_L \approx I_C \approx I_G Q = I_K$$

Следовательно, при резонансе ток в контуре  $I_K$  в  $Q$  раз превосходит ток в неразветвленной цепи  $I_G$  (ток генератора), т.е. имеет место *резонанс токов*.

Введение в контур шунтирующего сопротивления  $R_{ш}$  увеличивает полосу пропускания, т.е. частотная избирательность системы ухудшается. Поэтому

исходя из (1.5) увеличение полосы пропускания можно количественно оценивать как уменьшение добротности системы до некоторой эквивалентной величины  $Q_{\text{э}}$ , меньшей чем добротность  $Q$  самого контура.

Эквивалентная добротность  $Q_{\text{э}}$  контура, к одному из реактивных элементов которого подключен параллельно резистор с сопротивлением  $R_{\text{ш}}$ :

$$Q_{\text{э}} = \frac{\rho}{r + \rho^2/R_{\text{ш}}} = \frac{Q}{1 + \rho Q/R_{\text{ш}}},$$

где  $r, \rho, Q$  - параметры исходного (не зашунтированного) контура.

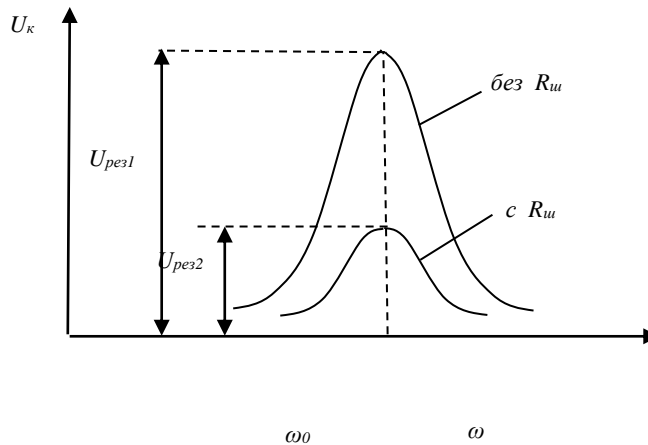


Рис.3. АЧХ параллельного колебательного контура

### Связанные контуры.

Вносимое из одного контура в другой (например, из вторичного в первичный) сопротивление.

$$\dot{Z}_{\text{BH1}} = -X_{\text{CB}}^2 / \dot{Z}_2 = r_{\text{BH1}} + jX_{\text{BH1}},$$

где  $X_{\text{CB}}$  - сопротивление связи (при трансформаторной связи  $X_{\text{CB}} = \omega M$ );

$\dot{Z}_2 = r_2 + jX_2$  - сопротивление вторичного контура. Активная составляющая вносимого сопротивления

$$r_{\text{BH1}} = \frac{X_{\text{CB}}^2}{r_2^2 + X_2^2} \cdot r_2 \approx -\frac{X_{\text{CB}}^2}{r_2} \cdot \frac{1}{1 + \xi_2^2},$$

а реактивная составляющая

$$X_{\text{BH1}} = -\frac{X_{\text{CB}}^2}{r_2^2 + X_2^2} \cdot X_2 \approx -\frac{X_{\text{CB}}^2}{r_2} \cdot \frac{\xi_2}{1 + \xi_2^2}.$$

При резонансе ( $\xi_2 = 0$ ) -  $r_{\text{BH1}} = X_{\text{CB}}^2 / r_2$ ,  $X_{\text{BH1}} = 0$ .

### Резонансные явления:

а) первый (второй) частичный резонанс - первичный (вторичный) контур настроен на резонанс при произвольной настройке другого контура, т.е.

$$X_1 + X_{\text{BH1}} = 0 \quad (X_2 + X_{\text{BH2}} = 0);$$

б) полный резонанс - каждый из контуров в отдельности настроен на резонанс, т.е.  $X_1 = X_0 = 0$ , а величина связи между контурами произвольная. При этом имеют место также оба частичных резонанса.

в) оптимальный (сложный) резонанс, при котором на вторичный контур передается максимальная мощность. Он достигается подбором определенной (оптимальной) связи между контурами при выполнении условий частичных резонансов.

Частотные характеристики связанных контуров, т.е. зависимости тока (напряжения) вторичного контура от частоты, определяются величиной связи между контурами. При связи меньше оптимальной ЧХ имеет вид одногорбой кривой - частоты полного и оптимального резонансов совпадают. При связи больше оптимальной ЧХ становится двугорбой - условия оптимального резонанса выполняются на частотах связи  $\omega_{01}$  и  $\omega_{02}$ , лежащих выше и ниже частоты полного резонанса  $\omega_0$ . На частоте  $\omega_0$  при этом имеет место провал в ЧХ.

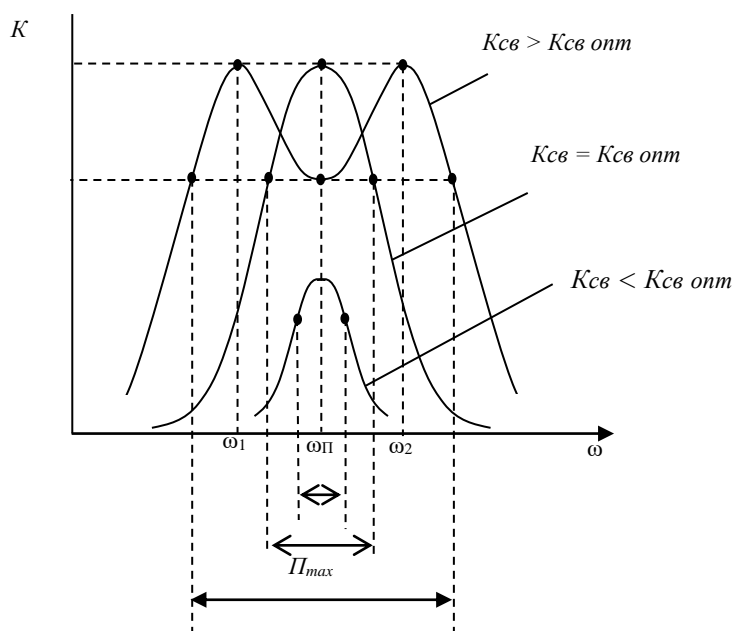


Рис.4. АЧХ связанных колебательных контуров

Наличие оптимальной связи между контурами легко объясняется следующими физическими соображениями. С увеличением сопротивления связи, с одной стороны, увеличивается напряжение, с другой стороны, увеличение связи влечет за собой возрастание обратной реакции вторичного контура на первичный. Вследствие этого увеличиваются вносимые сопротивления и должен уменьшаться ток  $I_1$ , а стало быть, и напряжение  $I_1 X_{CB}$ . Отсюда следует, что должна иметься наивыгоднейшая связь, при которой ток  $I_2 = I_1 X_{CB} / z$  достигает максимума.

## *Контрольные вопросы*

1. В чем состоит явление резонанса в последовательном колебательном контуре ?
2. Чему равно сопротивление последовательного колебательного контура при резонансе?
3. Какой характер носит полное сопротивление контура на частотах выше и ниже резонансной ?
4. В чем состоит явление резонанса в параллельном колебательном контуре ?
5. Как вычислить резонансную частоту контура ?
6. Что такое добротность контура и как ее определить опытным путем ?
7. Как изменятся величины  $Q$ ,  $R_o$ ,  $f_o$  простого параллельного колебательного контура, если индуктивность  $L$  и сопротивление потерь  $r$  контура уменьшить, а  $C$  увеличить вдвое ?
8. Что такое полоса пропускания контура и от чего она зависит ?
9. Как изменится полоса пропускания параллельного колебательного контура, если его зашунтировать активным сопротивлением, равным  $R_o$  ?
10. Какие виды связи между контурами в системе связанных колебательных контуров Вам известны ?
11. Что такое коэффициент связи ?
12. Расскажите о резонансных явлениях в связанных колебательных контурах.
13. Как объяснить физически наличие оптимальной связи между контурами ?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

### ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ФИЛЬТРЫ

**Цель работы:** изучение основных свойств и экспериментальное исследование частотных и фазовых характеристик электрических  $LC$  - фильтров.

#### Домашнее задание

1. Зарисовать схемы заданных для исследования фильтров  $\Phi 1^*$  и  $\Phi 2^*$ . Руководствуясь описанием лабораторного стенда продумать необходимые коммутации на стенде для образования этих фильтров.
2. Для фильтра  $\Phi 1^*$  рассчитать граничную частоту  $f_{ГР}$  и номинальное характеристическое сопротивление  $\rho$  при  $L = L^*$  и  $C = C^*$ .
3. Для фильтра  $\Phi 2^*$  рассчитать полосу прозрачности (подавления) и характеристическое сопротивление  $\rho$  при  $L1=2L2=L^{**}$  и  $C1=C2/2=C^{**}$ .
4. Для исследуемых типов фильтров ( $\Phi 1^*$  и  $\Phi 2^*$ ) изобразить предполагаемый ход частотных характеристик.

#### Схемы и методика исследования

В работе исследуются пассивные  $LC$  - фильтры типа «К», причем каждая бригада студентов исследует два различных звена. Конкретный вид исследуемого звена определяется номером варианта.

Для образования схем исследуемого фильтра на лабораторном стенде предусмотрены катушки индуктивности и конденсаторы с соответствующими коммутационными гнездами, а также нагрузочный резистор  $R_n$  с переменной величиной сопротивления. Необходимые коммутации для получения каждого из исследуемых фильтров указаны в разделе 2 настоящего руководства при описании лабораторного стенда.

Источником входного гармонического сигнала служит генератор низкой частоты НЧ, а напряжение на выходе фильтра измеряется вольтметром В. Напряжение на входе фильтра (на выходе ГНЧ) необходимо установить равным 1В и в процессе измерений поддерживать его постоянным; уровень входного сигнала контролируется вторым вольтметром В.

Экспериментальное определение граничных частот (п.2 лабораторного задания) основано на следующем свойстве: коэффициент передачи фильтра на холостом ходу ( $R_n = \infty$ ) для граничных частот  $K_{xx}(F_{гр})=1$ . Поэтому для нахождения  $F_{гр}$  необходимо установить  $R_n = \infty$  и изменяя частоту входного сигнала добиться равенства напряжений на входе и выходе фильтра  $U_{вых} = U_{вх}$ . Значение частоты сигнала генератора, при котором выполняется это равенство и является граничной частотой.

При исследовании частотной зависимости характеристического сопротивления  $Z_0(f)$  (п.3 задания) используется признак нулевого затухания в полосе прозрачности, если фильтр нагружен на характеристическое сопротивление. Измерения выполняются следующим образом. Установить некоторое значение сопротивления нагрузки  $R_n$  и изменять частоту входного сигнала до достижения равенства  $U_{вых} = U_{вх}$ . При этом  $Z_0 = R_n$ . Необходимо провести такие измерения для нескольких (4-х - 5-ти) значений  $R_n$  и результаты занести в таблицу наблюдений (Табл.2).

Таблица 2.

$f$ , кГц						
$Z_0$ , кОм						

Для снятия фазочастотной характеристики используется осциллографический метод измерения разности фаз двух напряжений (см. приложение 2). Сдвиг фаз между напряжениями на входе и выходе фильтра определяется для нескольких (5-7) значений частоты входного сигнала. Результаты измерений заносятся в таблицу измерений (Табл. 3).

В таблице 3  $X, x$  - отсчет по интерференционным фигурам на экране осциллографа (Приложение 2).

Таблица 3.

$f$ , кГц				
$X$				
$x$				
$\varphi$ , град				

### *Лабораторное задание*

1. Снять частотную характеристику  $K(f)$  фильтра Ф1\* при трех значениях сопротивления нагрузки  $R_n$  фильтра:  
 $R_n = \rho$ ;  $R_n > \rho$ ;  $R_n < \rho$ . По результатам эксперимента найти полосу пропускания фильтра.
2. Определить граничную частоту для фильтра Ф1\*, воспользовавшись опытом холостого хода ( $R_n = \infty$ ).
3. Исследовать зависимость характеристического сопротивления  $Z_0$  фильтра Ф1\* от частоты в полосе прозрачности. Для этого использовать признак нулевого затухания.
4. Снять частотную характеристику  $K(f)$  фильтра Ф2\* при  $R_n = \rho$ . По результатам эксперимента определить полосу пропускания (или задерживания- соответственно) фильтра.
5. Снять фазовую характеристику  $\varphi(f)$  фильтра Ф2\* при  $R_n = \rho$ .

## Содержание отчета

В отчет, оформленный в соответствии с общими требованиями, должны быть включены:

- 1) результаты выполнения домашнего задания;
- 2) результаты измерений, сведенные в таблицы;
- 3) графики характеристик, построенные по таблицам измерений;
- 4) анализ причин возможных отклонений результатов эксперимента от теоретических.

### Краткие теоретические сведения

Большинство пассивных фильтров строится по симметричным Т - и П - образным схемам, причем для отсутствия затухания в полосе прозрачности все элементы фильтра должны быть реактивными, т.е. состоять из L и C (LC – фильтры).

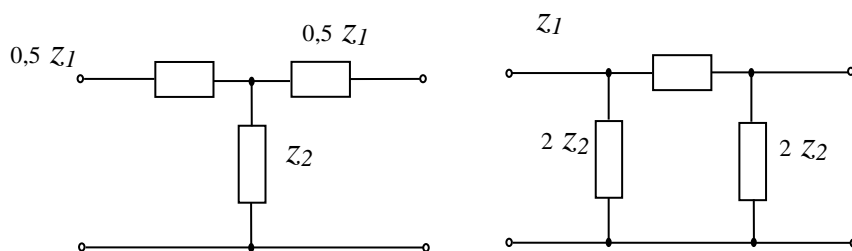


Рис. 5. Т- и П – образные схемы фильтров

*Полоса прозрачности* пассивного фильтра - это полоса частот, в которой коэффициент передачи фильтра  $K = 1$  (затухание  $\alpha = 0$ ). Необходимое и достаточное условие существования полосы прозрачности согласованного фильтра

$$-1 < \frac{\dot{z}_1}{4 \dot{z}_2} < 0, \quad (2.1)$$

т.е. в полосе прозрачности реактивные сопротивления продольного  $\dot{z}_1$  и поперечного  $\dot{z}_2$  плеч фильтра должны быть разных знаков и  $|z_1| < |4z_2|$ .

Граничные частоты (частоты среза)  $\omega_{cp1}$  и  $\omega_{cp2}$  полосы прозрачности в соответствии с (3.1) определяются из уравнений:

$$\frac{z_1(\omega_{cp1})}{4z_2(\omega_{cp1})} = -1; \quad \frac{z_1(\omega_{cp2})}{4z_2(\omega_{cp2})} = 0. \quad (2.2)$$

В полосе прозрачности модуль коэффициента передачи при холостом ходе ( $R_n = \infty$ ) будет  $K_{xx}(\omega) \geq 1$ ; для граничных частот  $K_{xx}(\omega_{cp}) = 1$ .



Характеристическое сопротивление  $z_0$  симметричных Т - и П-образных фильтров:

$$\begin{cases} Z_{OT} = \sqrt{z_1 z_2 (1 + z_1 / 4 z_2)}; \\ Z_{OP} = \sqrt{\frac{z_1 z_2}{1 + z_1 / 4 z_2}}. \end{cases} \quad (2.3)$$

*Постоянная передачи* (коэффициент распространения) фильтра есть логарифм отношения комплексных амплитуд напряжений на входе  $\dot{U}_{ex}$  и выходе  $\dot{U}_{вых}$  согласованного фильтра:

$$\gamma = \ln\left(\frac{U_{ex}}{U_{вых}}\right)\Big|_{z_n=z_0} = \alpha + j\beta, \quad (2.4)$$

где  $\alpha = \ln(U_{ex} / U_{вых})$  - затухание;  $\beta = \Phi_{ex} - \Phi_{вых}$  - фазовая постоянная фильтра ( $\Phi_{ex}$ ,  $\Phi_{вых}$  - фаза входного и выходного напряжений соответственно).

*Частотные характеристики* фильтров:

1) зависимость комплексного коэффициента передачи от частоты

$$K(j\omega) = \dot{U}_{вых} / \dot{U}_{ex} = K(\omega) \cdot e^{j\varphi(\omega)},$$

где  $K(\omega) = U_{вых} / U_{ex}$  - амплитудно - частотная характеристика (АЧХ);

$\varphi(\omega) = \Phi_{вых} - \Phi_{ex}$  - фазочастотная (фазовая) характеристика (ФЧХ).

2) для согласованного фильтра ( $R_n = Z_0$ ) имеет  $K(j\omega) = e^{-\gamma(j\omega)}$  и в качестве АЧХ можно рассматривать зависимость  $\alpha(\omega) = \ln 1/K(\omega)$ , а в качестве ФЧХ - зависимость  $\beta(\omega) = -\varphi(\omega)$ .

### **Фильтр нижних частот (ФНЧ) типа К (рис.9а)**

Фильтры типа К - такие, у которых в продольную и поперечную ветви включены взаимно - обратные реактивности, так что произведение  $Z_1 Z_2 = \text{const}$ .

$$\dot{z}_1 = j\omega L; \quad \dot{z}_2 = 1/j\omega C; \quad \dot{z}_1 \cdot \dot{z}_2 = L/C.$$

а) характеристические сопротивления

для Т-образного фильтра  $Z_{OT} = \rho \cdot \sqrt{1 - \varrho^2}$ ;

для П-образного фильтра  $Z_{OP} = \rho \cdot \sqrt{1 - \varrho^2}$ ,

;

$\rho = \sqrt{Z_1 \cdot Z_2} = \sqrt{L/C}$  - номинальное характеристическое сопротивление фильтра,  $\vartheta = \frac{\omega}{\omega_{ГР}}$  - нормальное частотное сопротивление.

$Z_{OT}(\omega = 0) = Z_{OП}(\omega = 0) = \rho$ .

б) граничные частоты  $\omega_{ГР1} = 2/\sqrt{LC}$ ;  $\omega_{ГР2} = 0$ .

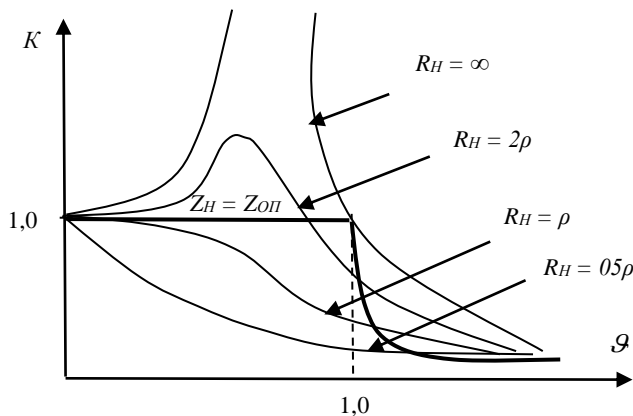


Рис. 6. Частотные характеристики фильтра нижних частот, нагруженного на сопротивление  $R_H$ .

**Фильтр верхних частот (ФВЧ) типа К (рис.9б).**

$$\dot{z}_1 = 1/j\omega C; \quad \dot{z}_2 = j\omega L.$$

а) характеристические сопротивления

для Т-образного фильтра  $Z_{OT} = \rho \cdot \sqrt{1 - 1/\vartheta^2}$ ;

для П-образного фильтра  $Z_{OП} = \rho / \sqrt{1 - 1/\vartheta^2}$ ;

$$\rho = Z_{OT}(\omega = \infty) = Z_{OП}(\omega = \infty) = \sqrt{L/C};$$

б) граничные частоты  $\omega_{ГР1} = \frac{2}{\sqrt{LC}}$ ;  $\omega_{ГР2} = \infty$ .

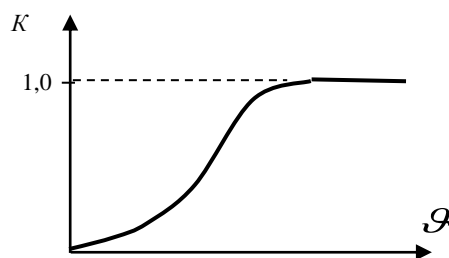


Рис.7. Частотная характеристика фильтра высоких частот.

**Полосовой (ПФ) и заграждающий (ЗФ) фильтры** (рис.9 в).

а) резонансные частоты каждого параллельного и последовательного контуров, включенных в плечи фильтра, должны быть равны

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}} = \sqrt{\omega_{ГР1} \cdot \omega_{ГР2}}.$$

б) граничные частоты для ПФ и ЗФ

-верхняя  $\omega_{ГР1} = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_2}} + \sqrt{\frac{1}{L_1 C_1} + \frac{1}{L_1 C_2}};$

-нижняя  $\omega_{ГР2} = \sqrt{\frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} + \frac{1}{\sqrt{L_1 C_2}}} - \frac{1}{\sqrt{L_1 C_2}}.$

в) номинальное характеристическое сопротивление  $\rho$  для ПФ и ЗФ есть значение характеристического сопротивления  $Z_0$  на частоте  $\omega_0$ .

$$\rho = Z_0(\omega_0) = \sqrt{\frac{L_1}{C_2}} = \sqrt{\frac{L_2}{C_1}}.$$

г) характеристические сопротивления

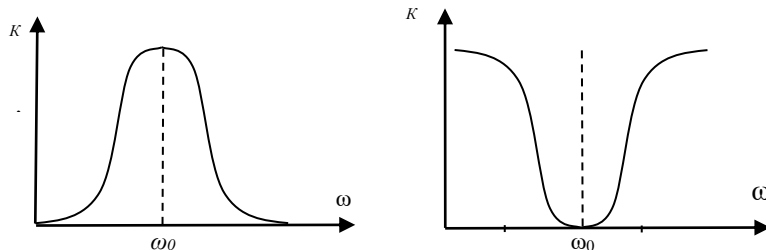
- полосового фильтра

$$\begin{cases} Z_{OT} = \rho \cdot \sqrt{1 - \chi}; \\ Z_{OП} = \rho / \sqrt{1 - \chi}; \end{cases}$$

$$\chi = \frac{C_2}{4C_1} \cdot \left( \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)^2.$$

-заграждающего фильтра

$$Z_{MT} = \rho \cdot \sqrt{1 - 2\chi}; \quad Z_{OП} = \rho / \sqrt{1 - 2\chi}.$$



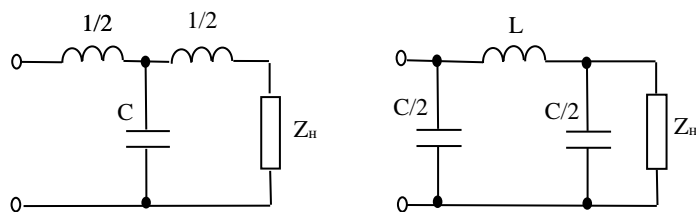
а)

б)

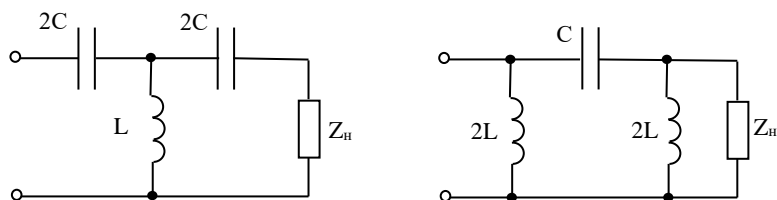
Рис. 8. Частотные характеристики полосового (а) и заграждающего фильтров.

Как следует из приведенных выше соотношений характеристическое сопротивление  $Z_0$  у всех фильтров сильно зависит от частоты.

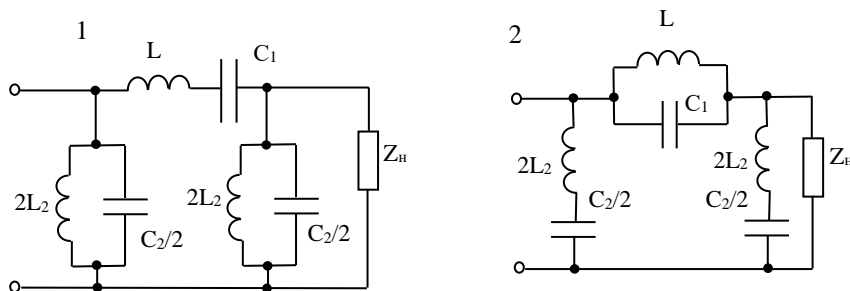
Из-за частотной зависимости  $Z_0$  обеспечить согласование в широкой полосе частот не удастся. Поэтому АЧХ сильно зависит от  $R_n$ . Для получения наиболее удовлетворительной равномерности ЧХ в полосе прозрачности необходимо выбирать нагрузку фильтра  $R_n = \rho$ .



а) Фильтры нижних частот



б) Фильтры высоких частот



в) Полосовой (1) и режекторный (2) П – образные фильтры

Рис.9. Схемы фильтров типа К

### ***Контрольные вопросы***

1. Дайте определение фильтрам верхних и нижних частот, полосовым и заграждающим фильтрам.
2. Что такое фильтры типа К ? Приведите примеры Т - и П - образных фильтров типа К.
3. Что такое характеристическое сопротивление фильтра и зависит ли оно от частоты ?
4. Что такое частотная  $K(f)$  и фазовая  $\varphi(f)$  характеристики фильтра и как они связаны с постоянной передачи фильтра ?
5. В чем заключается согласование фильтров ? Как выглядит частотная характеристика идеальных ФНЧ, ФВЧ, ПФ в режиме согласования ?
6. Объясните физически ход частотных характеристик  $K(f)$  ФНЧ и ФВЧ на примере конкретных Т - и П - образных звеньев.
7. Что такое граничные частоты полосы прозрачности и как они могут быть определены экспериментально ?
8. Зависит ли вид частотной характеристики фильтра от нагрузки и почему?
9. Объясните методику исследования частотной зависимости характеристического сопротивления фильтра.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

### ВОЗДЕЙСТВИЕ ИМПУЛЬСОВ НА RC- И RLC-ЦЕПИ

**Цель работы:** исследование электрических процессов при прохождении импульсов через простейшие линейные цепи и переходных процессов в этих цепях, а также изучение явлений электрического интегрирования и дифференцирования.

#### Домашнее задание

1. Определить величину емкости конденсатора интегрирующей RC - цепи из условия получения практического интегрирования прямоугольного импульса длительностью  $t_u^*$ .  
Активное сопротивление цепи  $R^*$ . Найти также относительную амплитуду  $U_c/U_{вых}$  напряжения на выходе цепи.
2. Определить величину активного сопротивления разделительной RC цепи, обеспечивающей неискаженную (практически) передачу последовательности прямоугольных импульсов с длительностью  $t_u^*$  и периодом  $T=2t_u^*$ . Емкость конденсатора цепи  $C^*$ .
3. Изобразить ориентировочно временные диаграммы напряжений на выходе дифференцирующей цепи для трех значений постоянной времени цепи  $\tau$ :  
 $\tau = t_u^*$ ;  $\tau \gg t_u^*$ ;  
 $\tau \ll t_u^*$ , где  $t_u^*$  - длительность прямоугольного импульса на входе цепи.
4. Изобразить ориентировочно временные диаграммы напряжения на выходе RLC - цепи (последовательный контур) при подаче на вход прямоугольного импульса с длительностью  $t_u^*$ .

#### Схема и методика исследования

Исследование RC - и RLC - цепей производится в соответствии со схемой (рис.10).

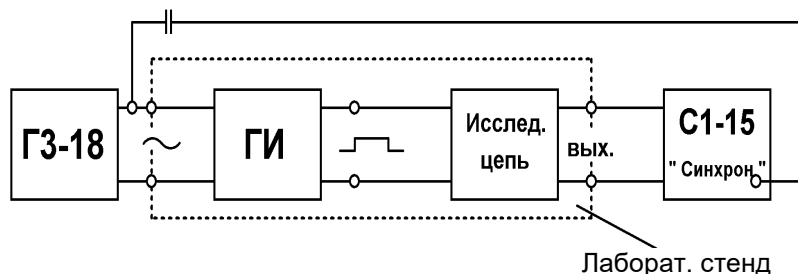


Рис. 10. Схема исследования

На вход исследуемой цепи подается последовательность импульсов прямоугольной формы, формируемая в генераторе импульсов (ГИ). Для этого на вход ГИ необходимо подать сигнал от генератора низкой частоты ГНЧ. Генератор импульсов и исследуемые цепи смонтированы на лабораторном

стенде. Необходимые коммутации для образования каждой из исследуемых цепей приведены в Приложении II данного руководства при описании лабораторного стенда.

Форма напряжения на входе и выходе исследуемой цепи наблюдается с помощью осциллографа, причем синхронизация осциллографа должна быть внешней от ГНЧ. При снятии осциллограммы длительность развертки осциллографа следует установить такой, чтобы на экране можно было наблюдать 1-2 периода входной последовательности импульсов. Измерения амплитуд импульсов и временных интервалов (длительности импульсов, периода колебаний) производится с помощью осциллографа в соответствии с методиками, описанными в Приложении III настоящего руководства.

### *Лабораторное задание*

1. Собрать схему для исследования интегрирующей  $RC$  - цепи.  
Установить сопротивление резистора  $R=R^*$ , а емкость конденсатора  $C$  примерно равной рассчитанному в домашнем задании (п.1) значению  $C$  расч. Получить на выходе генератора импульсов (ГИ) лабораторного стенда прямоугольные импульсы с длительностью  $t_u = t_u^*$ , для чего установить на генераторе ГНЧ амплитуду сигнала  $U_{зг} = 10 - 15$  В и частоту  $F_{зг} = 1/(2 t_u^*)$ .  
С помощью осциллографа измерить амплитуду импульсов и зарисовать осциллограммы напряжений на входе и выходе интегрирующей цепи.
2. Исследовать влияние постоянной времени  $\tau = RC$  интегрирующей цепи на параметры сигнала. Для этого зарисовать осциллограммы выходного напряжения при нескольких значениях емкости цепи:  
 $C = 0,1 t_u^*/R^*$ ;  $0,5 t_u^*/R^*$ ;  $(1-2) t_u^*/R^*$ .
3. Собрать схему для исследования дифференцирующей  $RC$  - цепи, установив  $C = C^*$  и  $R = R_{рас}$  ( $R_{рас}$  - значение, рассчитанное в п.2 домашнего задания). Параметры входного сигнала такие же, как в п.1.  
Зарисовать осциллограмму напряжения на выходе цепи.
4. Исследовать влияние постоянной времени дифференцирующей цепи на параметры выходного сигнала, для чего зарисовать осциллограммы напряжения на выходе цепи при нескольких значениях сопротивления цепи:  
 $R = (1-2) t_u^*/C^*$ ;  $0,5 t_u^*/C^*$ ;  $0,1 t_u^*/C^*$ .  
При  $\tau \ll t_u^*$  (т.е. при  $R = 0,1 t_u^*/C^*$ ) измерить длительность остроконечного импульса на выходе цепи.
5. Собрать схему для исследования  $RLC$  - цепи (последовательного контура). Длительность входных импульсов установить  $t_u^* = 0,1$  мксек ( $F_{зг} = 5$  кГц). Установив  $R = 0$ ,  $C = 5 \cdot 10^3$  пФ, зарисовать осциллограмму выходного напряжения. С помощью осциллографа измерить период  $T$  собственных колебаний контура.
6. Исследовать влияние величины активного сопротивления цепи на характер и параметры переходного процесса. Для этого, устанавливая последовательно значения  $R = 100, 500$  Ом, зарисовать осциллограммы выход-

ного напряжения. С помощью осциллографа измерить длительность переходного процесса и оценить значение коэффициента затухания  $\alpha$  при  $R=100$  Ом.

### *Содержание отчета*

Отчет, оформленный в соответствии с общими требованиями, должен содержать:

- 1) результаты выполнения домашнего задания;
- 2) общую схему экспериментального исследования;
- 3) схемы исследуемых  $RC$  - и  $RLC$  - цепей с указанием входа и выхода;
- 4) осциллограммы, снятые при выполнении лабораторного задания, а также результаты измерений параметров импульсов. На осциллограммах должны быть нанесены координатные оси с относительным масштабом, а также указаны параметры входных импульсов и условия эксперимента (параметры цепи).

### *Краткие теоретические сведения*

*Переходными процессами* называются процессы, происходящие в линейных цепях при переходе от одного стационарного состояния к другому. Возникновение таких процессов связано с особенностями изменения энергии электромагнитного поля в реактивных элементах.

Переходные процессы в  $RC$  - цепях связаны с зарядом (разрядом) конденсатора. Если к такой цепи подключается источник постоянной Э.Д.С.  $E$ , то напряжение на конденсаторе  $U_C(t)$  будет нарастать, а на резисторе  $U_R(t)$  - убывать по экспоненциальному закону:

$$\begin{cases} U_R(t) = Ee^{-t/\tau}; \\ U_C(t) = E(1 - e^{-t/\tau}) \end{cases}, \quad \tau = RC. \quad (3.1)$$

В  $RL$  - цепях переходные процессы определяются экспоненциальным возрастанием (убыванием) тока в индуктивности при скачкообразном изменении входного напряжения. В соответствии с этим при подключении постоянной Э.Д.С.  $E$  к такой цепи напряжения на элементах цепи изменяются по закону:

$$\begin{cases} U_L(t) = Ee^{-t/\tau}; \\ U_R(t) = E(1 - e^{-t/\tau}) \end{cases}, \quad \tau = L/R \quad (3.2)$$

Скорость протекания переходных процессов, т.е. скорость заряда (разряда) конденсатора в  $RC$  - цепях или нарастания (убывания) тока в  $RL$  - цепях, определяется постоянной времени цепи  $\tau$ : чем больше  $\tau$ , тем медленнее протекают переходные процессы.



Переходные процессы в  $RLC$  - цепях (контурах) определяются свободными колебаниями в таких цепях, связанными с обменом энергии между электрическим полем конденсатора и магнитным поле катушки индуктивности. Характер переходного процесса, т.е. характер тока в контуре (и напряжения на элементах контура), зависит от параметров контура и в первую очередь от коэффициента затухания  $\alpha = R/2L = 1/\tau$ . Коэффициент затухания  $\alpha$  связан с затуханием контура  $d = 1/\alpha$  соотношением  $\alpha = 0,5 (\omega_0 \alpha)$ , где  $\omega_0$  - резонансная частота контура. При  $\alpha < \omega_0$  имеет место колебательный переходный процесс:

при подключении постоянной Э.Д.С.  $E$  ток в контуре изменяется по гармоническому закону, но амплитуда его экспоненциально убывает:

$$i(t) = -\frac{E}{\omega_c L} \cdot e^{-\alpha t} \cdot \sin \omega_c t$$

$$\text{Частота колебаний } \omega_c = \omega_0 \sqrt{1 - R/4\rho} \approx \omega_0,$$

где  $\rho = \sqrt{L/C}$  - характеристическое сопротивление контура. Промежуток времени, в течение которого амплитуда колебаний в контуре убывает в  $e = 2,7$  раз, есть постоянная времени контура  $\tau = 1/\alpha = 2L/R$ .

При  $\alpha \geq \omega_0$  (т.е.  $\alpha \geq 2$ ) переходной процесс в контуре носит аperiodический характер.

При прохождении импульсных сигналов через линейные цепи рассмотренные переходные процессы возникают от переднего и заднего фронта импульсов. Если последовательность входных импульсов периодическая, то переходные процессы от соседних импульсов накладываются друг на друга. Однако когда период повторения импульсов  $T \gg \tau$  можно пренебречь этим наложением и рассматривать переходные процессы от каждого отдельного импульса независимо.

*Дифференцирующей цепью* называется цепь, напряжение на выходе которой пропорционально производной входного сигнала. Приближенное дифференцирование может быть получено как в  $RC$  - цепях, в которых выходное напряжение снимается с резистора, так и в  $RL$  - цепях при съеме выходного напряжения с индуктивности. Для этого необходимо выполнение условия

$$\tau \ll \frac{1}{\omega_B}, \quad (3.3)$$

где  $\omega_B$  - верхняя частота в спектре входного сигнала;

$\tau$  - постоянная времени цепи.

При импульсном воздействии с длительностью  $t_u$  удобнее другая форма условия дифференцирования:

$$\tau \ll t_u \quad (3.4)$$

Чем выше степень неравенств (4.3) и (4.4), тем точнее выполняется дифференцирование. На практике в большинстве случаев оказывается достаточным обеспечение  $\tau = 0,1 t_u$ .

*Интегрирующей цепью* называется цепь, напряжение на выходе которой пропорционально интегралу входного сигнала. Приближенное интегрирование может осуществляться в  $RC$  - цепях при съеме выходного напряжения с конденсатора, либо в  $RL$  - цепях при съеме напряжения с резистора. При этом интегрирование тем точнее, чем сильнее обеспечивается неравенство

$$\tau \gg \frac{1}{\omega_H} \quad (3.5)$$

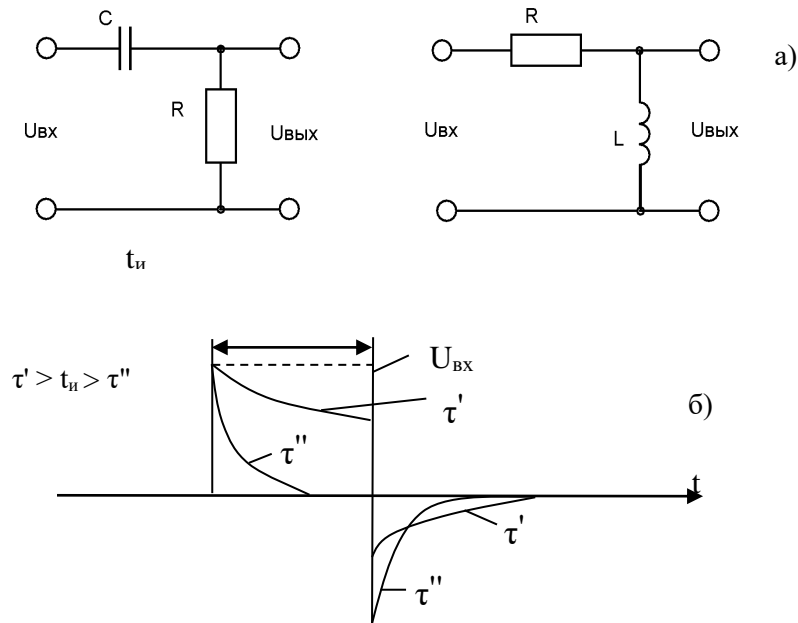


Рис.11. Схемы дифференцирующих цепей (а) и форма напряжения (б) на выходе.

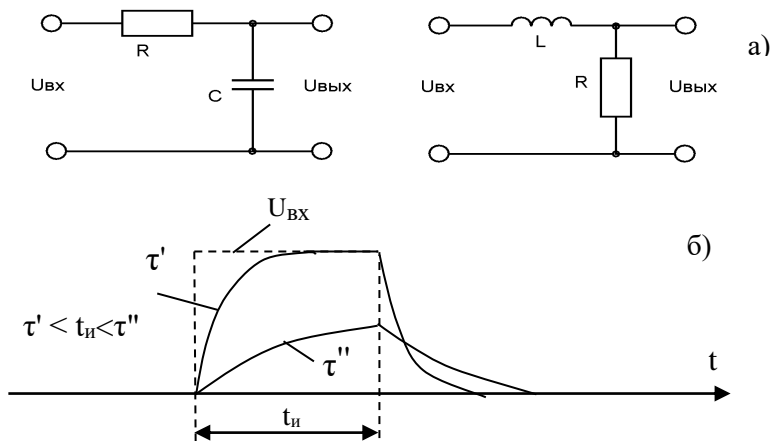


Рис. 12. Схемы интегрирующих цепей (а) и форма напряжения (б) на выходе при прямоугольном входном напряжении.

где  $\omega_H$  - нижняя частота в спектре входного сигнала, или для импульсного сигнала

$$\tau \gg t_u \quad (3.6)$$

Для практического интегрирования обычно достаточно иметь  $\tau = 10 t_u$ .

*Неискажающие цепи* - такие, напряжение на выходе которых повторяет форму входного сигнала. Для получения возможно меньших искажений в  $RC$  - цепях параметры их должны выбираться так, чтобы выполнялись условия, обратные (4.4) и (4.6) соответственно:

- при съеме выходного напряжения с резистора (т.е. в схеме дифференцирующей цепи) должно быть  $\tau \gg t_u$ ;

- при съеме выходного напряжения с конденсатора (в схеме интегрирующей цепи) должно быть  $\tau \ll t_u$ .

Примером неискажающей цепи является *разделительная цепь*, предназначенная для разделения постоянной и переменной составляющих периодического входного сигнала. Для этого используется  $RC$  - цепь с  $\tau \gg t_u$ . В установившемся режиме напряжение на резисторе в такой цепи приближенно повторяет форму входной последовательности импульсов (переменная составляющая), а напряжение на конденсаторе будет представлять собой постоянную составляющую входного сигнала.

### Контрольные вопросы

1. Объясните физические процессы, происходящие в дифференцирующих  $RC$  - и  $RL$  - цепях при воздействии на них прямоугольных импульсов.
2. Объясните физические процессы, происходящие в интегрирующих цепях.
3. Запишите условия практического интегрирования и дифференцирования в соответствующих  $RC$  - цепях.
4. Изобразите дифференцирующие и интегрирующие  $RL$  - цепи.
5. Нарисуйте временные диаграммы напряжения на выходе дифференцирующей (интегрирующей) цепи для случаев:

а)  $\tau \ll t_u$ ;

б)  $\tau \gg t_u$ ,

при условии, что на вход подается одиночный прямоугольный импульс.

6. Объясните физические процессы, происходящие в  $RLC$  - цепи при воздействии на нее прямоугольного импульса.
7. Как влияет величина сопротивления  $R$  в  $RLC$  - цепи на характер переходных процессов? Нарисуйте несколько характерных временных диаграмм выходного напряжения в такой цепи.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОХОЖДЕНИЯ АМПЛИТУДНО-МОДУЛИРОВАННЫХ КОЛЕБАНИЙ ЧЕРЕЗ ОДИНОЧНЫЙ КОЛЕБАТЕЛЬНЫЙ КОНТУР

**Цель работы:** Исследование искажений АМ-сигналов при прохождении через колебательный контур; ознакомление с методикой измерения коэффициента модуляции.

#### Домашнее задание

1. По заданным значениям элементов колебательного контура (с учетом входной емкости осциллографа) рассчитать резонансную частоту и добротность контура.
2. Рассчитать и построить зависимость фактора демодуляции от частоты управляющего сигнала. Для частот: 1; 5; 10; 15 кГц.

#### Лабораторное задание

1. Снять АЧХ заданного контура с помощью осциллографа. Результаты измерений поместить в табл.1.

Таблица 1.

$f$	кГц					
$l$	мм					
$l$ $l_{max}$						

Примечание:  $l$  – вертикальный размер изображения на экране осциллографа.

2. Исследовать АМ-колебания на выходе контура при его настройке на несущую частоту сигнала.

Для этого: собрать схему, изображенную на рис.13; с выхода генератора стандартных сигналов (ГСС) подать на вход контура АМ-колебания с несущей частотой, равной резонансной частоте контура ( $f_n = f_{рез}$ ) и частотой управляющего сигнала, равной поочередно 10, 15, 20 кГц; используя осциллограф, каждый раз измерять величину коэффициента модуляции выходного сигнала, поддерживая на входе коэффициент модуляции выходного сигнала, поддерживая на входе коэффициент

модуляции неизменным и равным 30 -50%; Зарисовать огибающую выходного сигнала. Результаты измерений записать в табл.2.

Таблица 2.

$m_{ex} = \dots$			$f_n = f_{рез} = \dots$	
$F,$	$A,$	$B,$	$m_{вых},$	$D = \frac{m_{вых}}{m_{ex}}$
кГц	мм	мм	%	
10				
15				
20				

3. Исследовать АМ-колебания на выходе контура при его расстройке ( $f_n \neq f_{рез}$ ).

Для этого: установить величину несущей частоты, равную  $f_{рез}+10$  кГц, и для частот управляющего сигнала, равных поочередно 5 и 10 кГц, измерить коэффициент модуляции выходного сигнала и зарисовать форму его огибающей. Результаты измерений записать в табл.3.

Таблица 3.

$m_{ex} = \dots$		$f_{рез} = \dots$		
$f_{нес}$	$F,$	$A,$	$B,$	$m_{вых},$
кГц	кГц	мм	мм	
	10			
	15			

- Построить АЧХ контура, снятую в п.1, и определить по ней полосу пропускания и добротность. Сравнить с расчетными значениями, полученными в п.1 домашнего задания.
- Построить зависимость фактора демодуляции от частоты управляющего сигнала по данным п. 2 на одном графике с аналогичной кривой, рассчитанной в п.2 домашнего задания. Сравнить результаты расчета и измерения.
- К рисункам огибающих выходного сигнала, выполненным в п. 4, привести соответствующее им взаимное расположение АЧХ контура и спектра выходного сигнала.
- То же, что и в п. 6, проделать для случая расстройки контура по данным п.3.

8. Сделать выводы об искажениях, вносимых в АМ – сигнал колебательным контуром.

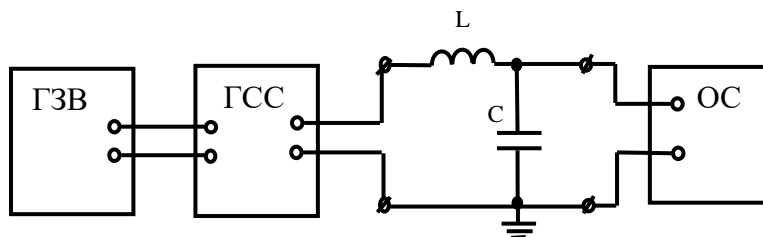


Рис.13. Схема исследования

ГЗВ – генератор звуковой частоты;  
 ГСС – генератор стандартных сигналов;  
 ОС – осциллограф.

### *Краткие теоретические сведения*

Амплитудно-модулированным (АМ) называется высокочастотное колебание, амплитуда которого изменяется во времени по закону управляющего сигнала. Если управляющий сигнал представляет собой сигнал одной частоты, то модулированные колебания называют тональными. Осциллограмма такого колебания с частотой  $f_0$ , модулированного по амплитуде гармоническим сигналом с частотой  $F$ , показана на рис.14, б.

На этом рисунке:

$U_{mn}$  – амплитуда немодулированного колебания с частотой  $f_0$ ;

$\Delta U_{mn}$  – амплитуда изменения огибающей высокочастотного сигнала;  $A$  – удвоенная максимальная амплитуда модулированных колебаний;  $B$  – удвоенная минимальная амплитуда модулированных колебаний.

Величина глубины тональной модуляции оценивается коэффициентом модуляции  $m$ , определяемым по формуле

$$m = \frac{\Delta U_{mn}}{U_{mn}} = \frac{A - B}{A + B}.$$

Для анализа искажений, возникающих в сигналах при прохождении через контур, удобно воспользоваться графическим изображением амплитудно-частотного спектра сигнала.

Спектр тонального АМ-колебания (рис.14, в) состоит из трех высокочастотных составляющих: Несущей частоты  $f_0$  и двух боковых частот  $f_0 + F$  и  $f_0 - F$ , симметрично расположенных относительно несущей. Чем выше частота управляющего сигнала  $F$ , тем дальше стоят боковые частоты от

несущей. Амплитуды составляющих боковых частот всегда одинаковы и равны  $\frac{m}{2}U_{mn}$ .

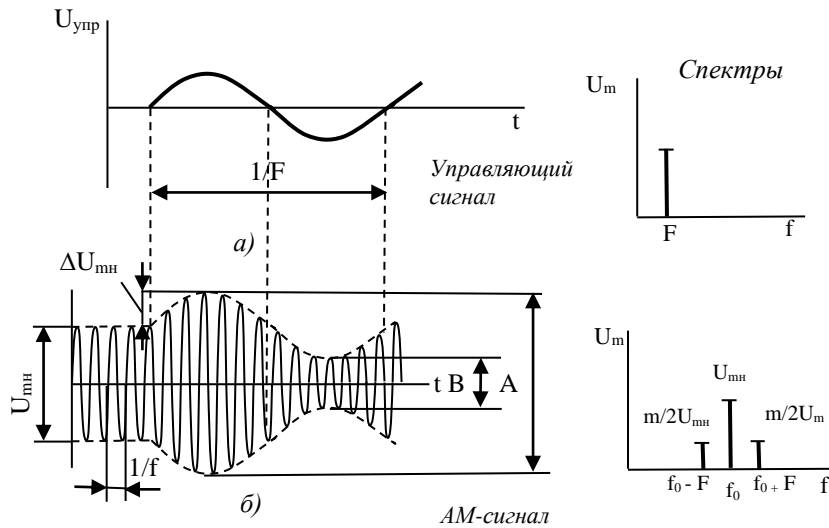


Рис.14. Спектр тонального АМ-колебания

Величина глубины тональной модуляции оценивается коэффициентом модуляции  $m$ , определяемым по формуле

$$m = \frac{\Delta U_{mn}}{U_{mn}} = \frac{A - B}{A + B}.$$

Для анализа искажений, возникающих в сигналах при прохождении через контур, удобно воспользоваться графическим изображением амплитудно-частотного спектра сигнала.

Спектр тонального АМ-колебания (рис.14, в) состоит из трех высокочастотных составляющих: Несущей частоты  $f_0$  и двух боковых частот  $f_0 + F$  и  $f_0 - F$ , симметрично расположенных относительно несущей. Чем выше частота управляющего сигнала  $F$ , тем дальше стоят боковые частоты от несущей. Амплитуды составляющих боковых частот всегда одинаковы и равны  $\frac{m}{2}U_{mn}$ .

Всякое нарушение соотношения между амплитудами составляющих спектра приводит к искажениям сигнала.

Кроме амплитудно-частотного спектра сигнала характеризуется еще и фазово-частотным спектром. Однако фазовые искажения сигнала представляют для практики меньший интерес, и рассматриваться в этой работе не будет.

Поскольку коэффициент передачи колебательного контура различен для различных частот, то проходя через колебательный контур, составляющие спектра АМ-сигнала изменяются неодинаково.

Если контур настроен точно на несущую частоту сигнала (рис.15. а), то боковые составляющие ослабляются в равной степени. При этом форма огибающей модулированного колебания не нарушится, но из-за изменения соотношения амплитуд колебаний боковых и несущей частот уменьшится глубина модуляции.

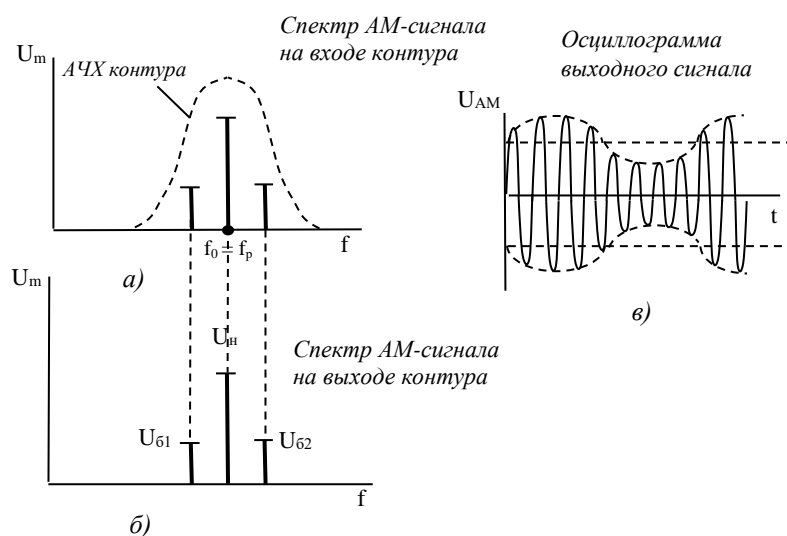


Рис.15.

Фактор демодуляции  $D$ , показывающий во сколько раз уменьшилась глубина модуляции на выходе по сравнению со входом может быть найден из уравнения АЧХ.

$$D = \frac{m_{\text{вых}}}{m_{\text{вх}}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2F}{f_0}\right)^2}}$$

Уменьшение глубины модуляции будет тем значительнее, чем больше добротность контура и чем выше частота управляющего сигнала. Если контур расстроен относительно несущей частоты (рис.16., а), то колебания боковых частот получают разные изменения амплитуды и симметрия сигнала на выходе контура нарушается. При этом, кроме изменения глубины модуляции, возникают искажения формы огибающей – она становится отличной от синусоидальной. Это приводит после детектирования к возникновению нелинейных искажений управляющего сигнала.

При расстроенном контуре возможно как уменьшение, так и увеличение глубины модуляции в зависимости от степени расстройки контура и частоты управляющего сигнала.

При модуляции сложным управляющим сигналом, состоящим из ряда гармонических составляющих, в спектре АМ-колебания каждой составляющей будет соответствовать пара боковых частот, расположенных



симметрично относительно несущей. Амплитуды боковых составляющих будут связаны с амплитудой несущего колебания через парциальные (частные) коэффициенты модуляции.

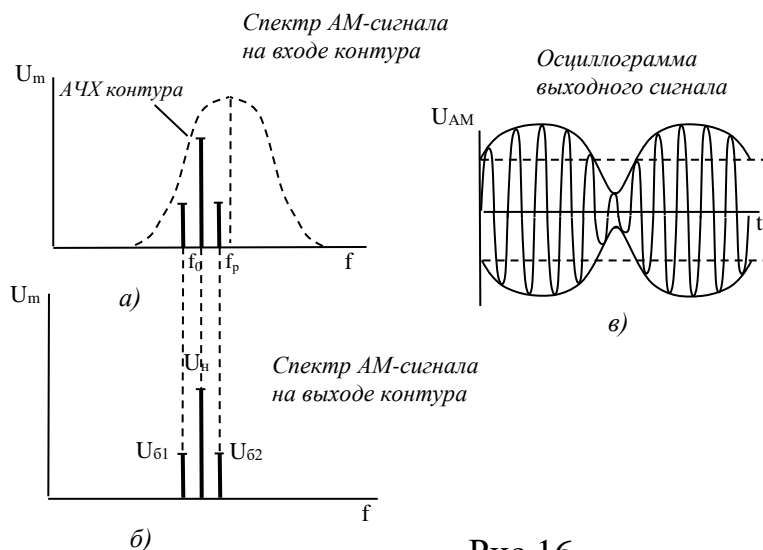


Рис.16

При прохождении такого АМ-сигнала через настроенный контур амплитуды различных пар боковых частот будут ослабляться неодинаково, что вызовет различное уменьшение соответствующих им парциальных коэффициентов модуляции. В результате этого возникают частотные искажения сигнала. При этом форма огибающей АМ-колебания на выходе контура хотя и будет отличаться от огибающей на входе, эти искажения огибающей не вызовут после детектирования нелинейных искажений, так как они не связаны с нарушением симметрии спектра АМ-колебания.

При прохождении того же АМ-сигнала через расстроенный контур произойдет изменение формы огибающей, приводящее к появлению после детектирования как частотных так и нелинейных искажений управляющего сигнала.

### **Контрольные вопросы**

1. Каким показателем оценивается глубина модуляции?
2. Какой вид имеют осциллограммы тональных АМ-колебаний при  $m=25\%$ ,  $m=50\%$ ,  $m=100\%$ ?
3. Что представляет собой спектр АМ-колебания при тональной модуляции?
4. С чем связано изменение коэффициента модуляции при прохождении АМ-сигнала через колебательный контур?
5. Как зависит фактор демодуляции от свойств контура и частоты управляющего сигнала?

Таблица вариантов

6. Почему при прохождении через настроенный контур тонально-модулированного по амплитуде колебания не искажается форма его огибающей?
7. В каком случае возникает искажение формы огибающей тонального АМ-колебания при прохождении через колебательный контур?
8. Какие искажения сложного АМ-сигнала возникают при прохождении через настроенный и ненастроенный контуры?

№№ работ	Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8
	Параметры								
1	$R, \text{ к}\Omega$	0,2	0,5	1	2,0	5	10	0,75	7,5
	$C, \text{ мкФ}$	0,2	0,5	1	2,0	2,5	3,0	0,25	0,75
2	$\omega, \text{ кГц}$	0,8	0,9	1	1,2	1,3	1,5	0,85	0,95
	$C, \text{ мкФ}$	0,6	0,55	0,5	0,65	0,45	0,5	0,7	0,65
3	$\Phi_1$	$\Phi_{НЧ-Т}$	$\Phi_{ВЧ-Т}$	$\Phi_{НЧ-Т}$	$\Phi_{ВЧ-П}$	$\Phi_{ВЧ-Т}$	$\Phi_{НЧ-Т}$	$\Phi_{ВЧ-П}$	$\Phi_{НЧ-П}$
	$L, \text{ мГн}$	10	2	0,8	0,5	5	4	0,4	1
	$C, \text{ мкФ}$	0,25	0,05	0,2	0,2	0,125	0,1	0,1	0,4
4	$\Phi_2$	$\Pi\Phi-П$	$Р\Phi-Т$	$Р\Phi-Т$	$\Pi\Phi-П$	$Р\Phi-Т$	$\Pi\Phi-П$	$\Pi\Phi-П$	$Р\Phi-Т$
	$L, \text{ мГн}$	5	2	0,9	0,6	5	2	0,9	0,6
	$C, \text{ мкФ}$	0,25	0,1	0,05	0,1	0,25	0,1	0,05	0,1
4	$C, \text{ мкФ}$	0,1	0,1	0,5	0,5	0,25	0,25	0,05	0,05
	$R, \text{ к}\Omega$	10	100	50	100	50	100	5	10
	$C, \text{ мкФ}$	0,1	0,1	0,1	0,01	0,05	0,25	$10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$

**Магомедсаидова Сарат Загидовна**

## **ЛИНЕЙНЫЕ ЦЕПИ**

Лабораторные работы по дисциплинам "Радиотехнические цепи и сигналы" (для студентов направления 11.03.01)

Формат 60x84. Бумага газетная. Печать ротап rint. Усл. п.л. 2,0. Тираж 50 экз. Заказ ...

---

Отпечатано в ИПЦ ДГТУ  
367015. Махачкала, пр. Имама Шамиля, 70