

Министерство образования и науки Российской Федерации
 Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
 высшего профессионального образования
 ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
 УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Кафедра телекоммуникаций и основ радиотехники

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАССИВНЫХ RC - ФИЛЬТРОВ

Руководство к лабораторной работе № 10 по дисциплине
 «Теория электрических цепей»
 для студентов радиотехнического факультета
 всех специальностей

Разработчики:
 доцент кафедры ТОР
 И.В. Мельникова
 доцент кафедры ТОР
 К.Ю.Дубовик

Оглавление

1. Цель работы.....	3
2. Основные теоретические сведения	3
3. Домашнее задание	8
4. Лабораторное задание и обработка результатов.....	9
4.1 Общая часть.....	9
4.2 Описание установки	9
6. Контрольные вопросы	11
7. Список литературы	12

1. Цель работы

- 1) исследование АЧХ и ФЧХ нагруженных и ненагруженных симметричных RC-фильтров нижних и верхних частот;
- 2) изучение принципа работы режекторного RC-фильтра на основе исследования АЧХ и ФЧХ нагруженных симметричных RC-фильтров нижних и верхних частот, образующих схему двойного T-образного фильтра;
- 3) исследование АЧХ и ФЧХ режекторного RC-фильтра.

2. Основные теоретические сведения

Электрический фильтр – это устройство, при помощи которого электрические колебания разных частот отделяются друг от друга. Он представляет собой пассивный четырехполюсник, пропускающий определенный диапазон частот с малым затуханием ($a_c \approx 0$), а вне этого диапазона частот затухание фильтра велико (в идеальном фильтре $a_c \rightarrow \infty$).

Диапазон частот, в котором затухание фильтра мало ($a_c \rightarrow 0$) называется **полосой пропускания** (или полосой прозрачности) фильтра. Остальная область частот называется **полосой задерживания** фильтра.

В зависимости от пропускаемого спектра частот фильтры разделяются на фильтры: а) нижних частот (низкочастотные) ФНЧ (рис.2.1а); б) верхних частот (высокочастотные) ФВЧ (рис.2.1б); в) полосовые (рис.2.2.а); г) заграждающие (режекторные) ППФ (рис.2.2б).

Частота ω_c , разделяющая указанные полосы, называется **частотой среза**. Реальная АЧХ (см. рис. 2.1) в виду наличия потерь в фильтре всегда имеет плавный переход от полосы прозрачности к полосе задержки. В этом случае частота среза ω_c определяется по уровню 0.707 от максимального значения величины коэффициента передачи фильтра K :

$$K(\omega_c) = K_{max} / \sqrt{2} \approx 0,707 \cdot K_{max} \quad (2.1)$$

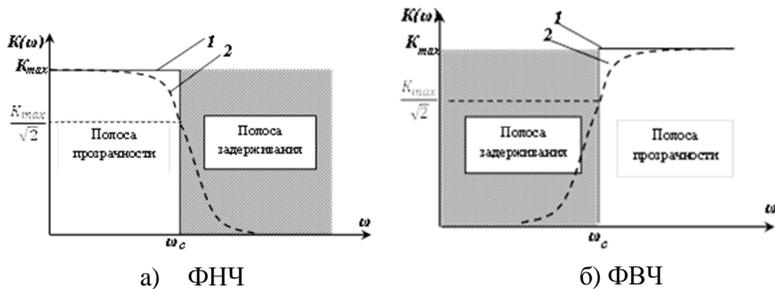


Рис.2.1 Примеры частотных характеристик различных фильтров: 1-идеальный фильтр; 2 – реальный фильтр

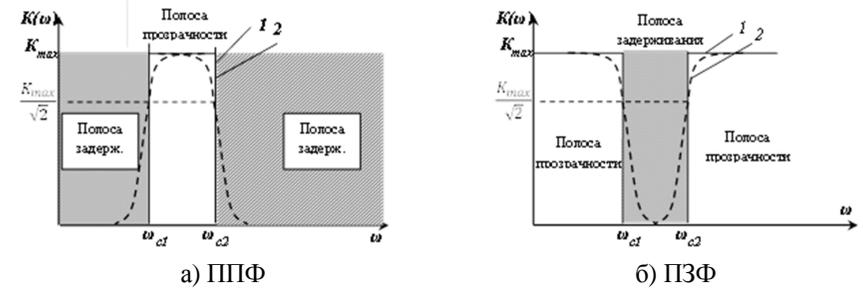


Рис.2.2 Примеры частотных характеристик различных фильтров: 1-идеальный фильтр; 2 – реальный фильтр

В качестве исследуемых в лабораторной работе фильтров используются простейшие T-образные фильтры нижних и верхних частот, которые подключены каскадно (рис.2.3). или параллельно относительно друг друга (рис.2.5).

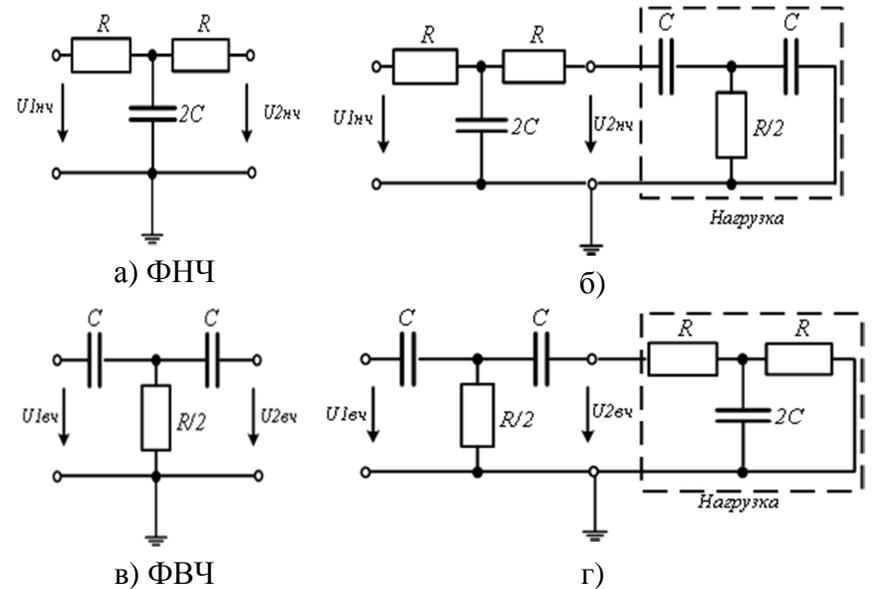


Рис.2.3 Примеры простейших RC-фильтров и их соединения: а) симметричный ФНЧ; в) симметричный ФВЧ; б) каскадное соединение ФНЧ с закороченным ФВЧ; г) каскадное соединение ФВЧ с закороченным ФНЧ;

Для определения передаточных частотных характеристик фильтров целесообразно использовать методику исследования четырехполюсников на крайних частотах. Исходя из этой методики, для фильтра нижних частот, ненагруженного, т.е. находящегося в режиме холостого хода

(рис.2.3а), и нагруженного – рис.(2.3б) при частоте $\omega=0$ значение коэффициента передачи $K_U(0)=0$, при частоте $\omega \rightarrow \infty$ значение коэффициента передачи $K_U(\infty)=0$. Однако частоты среза для этих двух фильтров будут отличаться (см. рис.2.4а).

Аналогичным образом определяются частотные характеристики нагруженного (рис.2.3 в) и ненагруженного (рис.2.3 г) фильтров верхних частот, которые представлены на рис.2.4б

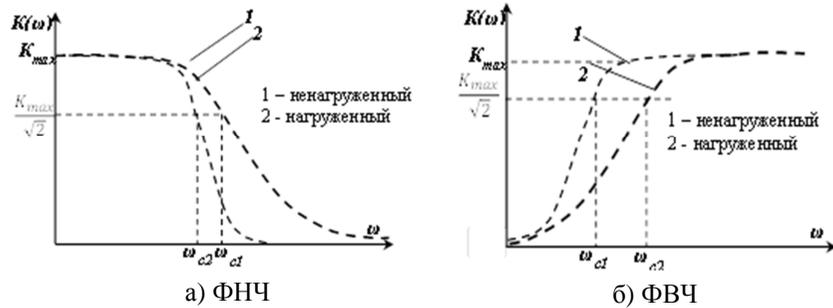


Рис.2.4 АЧХ передаточной функции ФНЧ и ФВЧ

Выражения для частотных характеристик определяется с помощью комплексных функций цепи. Пример определения частотных характеристик представлен выражением (2.2):

$$K_{U_{нч}}^{xx}(j\omega) = \frac{U_{вых}}{U_{вх}} = \frac{\frac{1}{j\omega 2C}}{R + \frac{1}{j\omega 2C}} = \frac{1}{1 + j2\omega CR} = \frac{1}{1 + j2\Omega}. \quad (2.2)$$

где $\Omega = \frac{\omega}{\omega_0} = \omega RC$ – нормированная частота

Тогда АЧХ и ФЧХ ненагруженного фильтра нижних частот будут определяться выражениями (2.3 , 2.4):

$$K_{U_{нч}}^{xx}(\Omega) = \frac{1}{\sqrt{1+4\Omega^2}}. \quad (2.3)$$

$$\varphi_{Ku}^{xx}(\Omega) = -\text{arctg}(2\Omega). \quad (2.4)$$

Аналогичным образом определяются выражения для остальных фильтров.

Выражения для АЧХ и ФЧХ нагруженного фильтра нижних частот (рис.2.3б):

$$K_{U_{нч}}(j\Omega) = \frac{1}{1-\Omega^2 + j4\Omega} \quad (2.5)$$

$$K_{U_{нч}}(\Omega) = \frac{1}{\sqrt{(1-\Omega^2)^2 + 16\Omega^2}}. \quad (2.6)$$

$$\varphi_{Ku}(\Omega) = -\text{arctg}\left(\frac{4\Omega}{1-\Omega^2}\right). \quad (2.7)$$

Выражения для АЧХ и ФЧХ ненагруженного фильтра верхних частот (рис.2.3в), т.е. в режиме холостого хода:

$$K_{U_{вч}}^{xx}(j\omega) = \frac{U_{вых}}{U_{вх}} = \frac{\frac{R}{2}}{\frac{R}{2} + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{j\omega CR}{2 + j\omega CR} = \frac{j\Omega}{2 + j\Omega}. \quad (2.8)$$

$$K_{U_{вч}}^{xx}(\Omega) = \frac{\Omega}{\sqrt{1+4\Omega^2}}. \quad (2.9)$$

$$\varphi_{Ku}^{xx}(\Omega) = \frac{\pi}{2} - \text{arctg}\left(\frac{\Omega}{2}\right). \quad (2.10)$$

Выражения для АЧХ и ФЧХ нагруженного фильтра верхних частот (рис.2.3г):

$$K_{U_{вч}}(j\Omega) = \frac{-\Omega^2}{1-\Omega^2 + j4\Omega}, \quad (2.11)$$

$$K_{U_{вч}}(\Omega) = \frac{\Omega^2}{\sqrt{(1-\Omega^2)^2 + 16\Omega^2}}. \quad (2.12)$$

$$\varphi_{Ku}(\Omega) = \pi - \text{arctg}\left(\frac{4\Omega}{1-\Omega^2}\right). \quad (2.13)$$

При параллельном соединении двух симметричных Т-образных фильтров нижних и верхних частот образуется двойной Т-образный фильтр, на радиотехническом языке - "фильтр пробка (рисунок 2.4). Сигнал на выход фильтра проходит по двум каналам: через ФНЧ, с комплексным коэффициентом передачи $K_{нч}(j\omega)$, и через ФВЧ, с комплексным коэффициентом передачи $K_{вч}(j\omega)$: Если значение параметров элементов схемы выбрать так, как указано на рисунке 2.4, то разность фаз между сигналами, поступающими на выход по обоим каналам на всех частотах будет постоянной и равной 180° , т.е. сигналы будут вычитаться, а фаза результирующего напряжения $U_{вых}(j\omega)$ будет равна фазе выходного напряжения того канала, модуль коэффициента передачи которого больше.

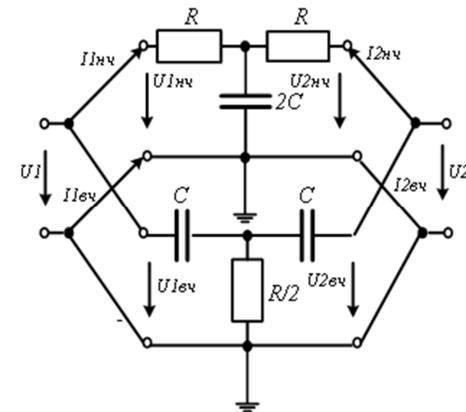


Рис.2.4 Параллельное соединение ФВЧ и ФНЧ.

АЧХ и ФЧХ исследуемого фильтра внешне напоминает соответствующие характеристики резонансных цепей: на некоторой частоте модуль передаточной функции достигает минимума (теоретически - нуля), а ФЧХ меняет знак. Поскольку резонансные явления возможны только в LC-цепях, частота ω_0 получила название частоты квазирезонанса ("как бы" - резонанса) (рис.2.5).

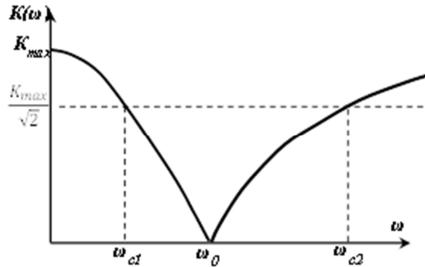


Рис.2.5 АЧХ режекторного фильтра

Для получения расчетных соотношений удобно воспользоваться теорией четырехполюсника: Y-параметры двойного T-фильтра можно найти суммированием Y- параметров образующих его параллельно включенных ФНЧ и ФВЧ (рис. 2.4). С учетом принятых на рисунке 2.4 условно положительных направлений токов и напряжений, получим:

$$Y_{\text{ФНЧ}} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1+j2\Omega}{2R(1+j\Omega)} & \frac{-1}{2R(1+j\Omega)} \\ \frac{-1}{2R(1+j\Omega)} & \frac{1+j2\Omega}{2R(1+j\Omega)} \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

$$Y_{\text{ФВЧ}} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{j\Omega \cdot (2+j\Omega)}{2R(1+j\Omega)} & \frac{\Omega^2}{2R(1+j\Omega)} \\ \frac{\Omega^2}{2R(1+j\Omega)} & \frac{j\Omega \cdot (2+j\Omega)}{2R(1+j\Omega)} \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

$$Y = [Y]_{\text{ФВЧ}} + [Y]_{\text{ФНЧ}} = \begin{bmatrix} \frac{1-\Omega^2+j4\Omega}{2R(1+j\Omega)} & \frac{\Omega^2-1}{2R(1+j\Omega)} \\ \frac{\Omega^2-1}{2R(1+j\Omega)} & \frac{1-\Omega^2+j4\Omega}{2R(1+j\Omega)} \end{bmatrix}. \quad (2.16)$$

Комплексный коэффициент передачи режекторного фильтра можно найти по известной из теории четырехполюсников формуле:

$$K = \frac{-Y_{21}}{Y_{22}+Y_H}. \quad (2.17)$$

Наилучшим образом режекторный фильтр работает в режиме холостого хода ($Z_H = \infty$) при возбуждении от источника э.д.с. ($R_i=0$). Для этого случая выражение (2.17) принимает вид:

$$K_{\text{xx}}(j\Omega) = \frac{-Y_{21}}{Y_{22}} = \frac{1-\Omega^2}{1-\Omega^2+j4\Omega}. \quad (2.18)$$

Из (2.5) получим расчетные соотношения АЧХ и ФЧХ:

$$K_{\text{xx}}(\Omega) = \frac{|1-\Omega^2|}{\sqrt{(1-\Omega^2)^2+16\Omega^2}}. \quad (2.19)$$

$$\varphi_{K_{\text{xx}}}(\Omega) = \arctg\left(\frac{0}{1-\Omega^2}\right) - \arctg\left(\frac{4\Omega}{1-\Omega^2}\right). \quad (2.20)$$

Как следует из (2.19), (2.20), на нормированной частоте $\Omega_0=1$ коэффициент передачи равен 0, а ФЧХ в окрестностях Ω_0 скачком изменяется на 180° .

Частота, соответствующая значению $\Omega_0=1$, называется частотой квазирезонанса и рассчитывается по формуле:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC}. \quad (2.21)$$

3. Домашнее задание

По методическим указаниям к данной работе и рекомендуемой литературе изучить работу RC-фильтров нижних частот, верхних частот, двойного T-образного RC-фильтра, а также выполнить следующее задание:

1) по приведенным в таблице 3.1 значениям элементов для своего рабочего макета определить частоту квазирезонанса двойного T-образного RC-фильтра;

2) пользуясь соотношениями п. 2., рассчитать значения АЧХ и ФЧХ передаточной функции режекторного RC-фильтра и образующих его фильтров нижних и верхних частот. Расчет выполнить для нормированных частот $\Omega=0, \Omega=0.5, \Omega=1, \Omega=2, \Omega=\infty$. По результатам расчетов построить АЧХ и ФЧХ фильтров. Указать на оси абсцисс как нормированные (Ω), так и абсолютные (f) значения частоты;

3) подготовить в рабочей тетради отчет, включающий название и цель работы, выполненное домашнее задание, схемы измерений и заготовки для таблиц измерений и частотных характеристик.

Таблица 3.1

Параметры элементов двойного T-образного фильтра

номер рабочего места (макета)	R, кОм	C, пФ
1	1,2	22000
2	2,2	5100
3	3,3	4700
4	2,7	9100
5	1,8	22000
6	1,6	22000
7	1,2	15000
8	1,3	22000
9	3,3	6800
10	3,9	9100
11	3,3	4700
12	3,9	5100

4. Лабораторное задание и обработка результатов

4.1 Общая часть

1. Измерить амплитудно-частотные и фазо-частотные характеристики (результаты измерений занести в таблицу, включающую значения f , $U_{вых}$, $K_{из}$, φ_k):

- RC-фильтра нижних частот без нагрузки, т.е. в режиме холостого хода;
- RC-фильтра нижних частот, нагрузкой которого служит короткозамкнутый на выходе RC-фильтр верхних частот (рис. 4.2а);
- RC-фильтра верхних частот без нагрузки (режим х.х.);
- RC-фильтра верхних частот, нагрузкой которого служит короткозамкнутый на выходе RC-фильтр нижних частот (рис. 4.2б);
- двойного Т-образного RC-фильтра (схема рисунка 4.2в);
- минимум напряжения на выходе двойного RC-фильтра;
- определить и зафиксировать частоту квазирезонанса.

2. По данным измерений на одном рисунке и в одном масштабе по частоте, напряжению и фазе построить АЧХ и ФЧХ передаточной функции исследуемых фильтров в следующем порядке:

- графики АЧХ коэффициента передачи фильтров ВЧ и НЧ в режиме х.х. На графиках указать частоты среза для каждого из фильтров;
- графики ФЧХ коэффициента передачи фильтров ВЧ и НЧ в режиме х.х. На графиках указать частоту среза для каждого из фильтров;
- графики АЧХ коэффициента передачи нагруженных фильтров ВЧ и НЧ, режекторного фильтра в режиме х.х. На графиках указать частоты среза для каждого из фильтров. Сравнить полученные частоты среза;
- графики ФЧХ коэффициента передачи нагруженных фильтров ВЧ и НЧ, режекторного фильтра в режиме х.х. На графиках указать частоты среза для каждого из фильтров;
- графики АЧХ коэффициента передачи нагруженных фильтров ВЧ и НЧ, режекторного фильтра в режиме х.х. в логарифмическом масштабе.

3. Сравнить между собой фазочастотные характеристики ФНЧ и ФВЧ в режиме х.х., а также, когда эти фильтры работают в составе двойного Т-образного моста. Сделать выводы.

4.2 Описание установки

Исследуемый двойной Т-образный RC-фильтр расположен в правой части панели "Линейные цепи". Входные зажимы RC-фильтров нижних и верхних частот разомкнуты, благодаря чему имеется возможность исследовать как режекторный RC-фильтр, так и ФНЧ и ФВЧ, из которых он

состоит. Схемы измерения частотных характеристик фильтров представлены на рисунках 4.1, 4.2.

Схема экспериментальной установки представлена на рис.4.1:

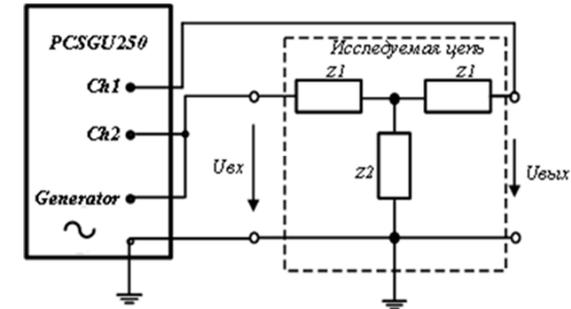
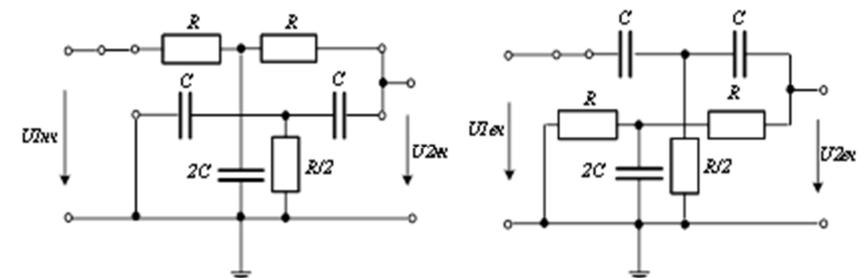
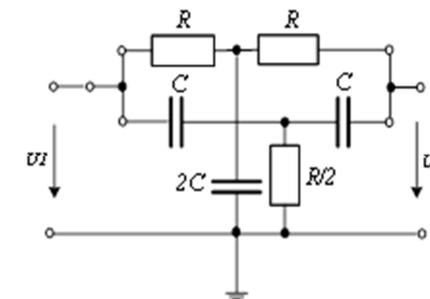


Рис.4.1 Схема экспериментальной установки

Вместо исследуемой цепи в схеме подключается Т-образный фильтр верхних, нижних частот, или режекторный фильтр, схемы которых представлены на рис.4.2а-в.



а) Схема исследуемой цепи ФНЧ б) Схема исследуемой цепи ФВЧ



в) Схема исследуемой цепи двойного Т-образного фильтра

Рис.4.2 Схемы исследуемых цепей

6. Контрольные вопросы

- 1) как классифицируются элементы, входящие в состав электрических цепей?
- 2) какие электрические цепи являются линейными?
- 3) сформулируйте основные свойства линейных радиотехнических цепей.
- 4) в чем сущность анализа цепей методом суперпозиции, и к каким цепям он применим?
 - 5) для каких цепей используются электрические фильтры?
 - 6) изобразите АЧХ и ФЧХ основных типов фильтров.
 - 7) сформулируйте условие полосы прозрачности фильтра.
 - 8) дайте определение четырехполюсника.
 - 9) как можно классифицировать четырехполюсники?
 - 10) каков физический смысл параметров четырехполюсников?
 - 11) как связаны между собой параметры четырехполюсника, выраженные в Z -, Y -, H -системах?
 - 12) к какому классу фильтров (ВЧ, НЧ, ПП или ПЗ) относится двойной Т-образный RC-фильтр? Дайте физическое толкование явления квазирезонанса;
 - 13) поясните, почему ФЧХ режекторного RC-фильтра для частот $\Omega < \Omega_0$ совпадает с ФЧХ ФНЧ, а для частот $\Omega > \Omega_0$ с ФЧХ ФВЧ;
 - 14) поясните, допустимо ли такое преобразование комплексной передаточной функции двойного Т-образного RC-фильтра:

$$K_{xx} = \frac{1 - \Omega^2}{1 - \Omega^2 + j4\Omega} = \frac{1}{1 + j \frac{4\Omega}{1 - \Omega^2}}$$
 покажите это применительно к АЧХ и ФЧХ фильтра.
 - 15) поясните, почему при выводе расчетных соотношений двойного Т-образного RC-фильтра использованы именно Y -параметры, а не Z -, A - и т.п.
 - 16) поясните, как АЧХ двойного Т-образного фильтра зависит от R_n (пусть $R_n = R$, $R_n = 2R$ и т.д.) Для объяснения используйте эквивалентные схемы на крайних частотах;
 - 17) зависит ли частота квазирезонанса от величины R_n ? Почему?
 - 18) запишите выражение K_u для произвольной нагрузки из системы A -параметров и сделайте переход к выражению (2.17), т.е. к K_u через Y -параметры;
 - 19) запишите выражение для определения затухания напряжения в дБ или Неп;

- 20) выведите соотношение между дБ и Неп;
- 21) оцените затухание сигнала в дБ и Неп, если:
 - a. $U_{ax}=5B$, а $U_{вых}=1.25B$;
 - b. $U_{ax}=3B$, а $U_{вых}=1.75B$;
 - c. $U_{ax}=4B$, а $U_{вых}=1.5B$;
 - d. $U_{ax}=3B$, а $U_{вых}=2.25B$.
- 22) Определить A -параметры для схем на рис.2.3 (а, б, в, г);
- 23) Определить Y -параметры для схем на рис.2.3 (а, б, в, г);
- 24) Определить Z -параметры для схем на рис.2.3 (а, б, в, г);

7. Список литературы

1. Попов В.П. Основы теории цепей.- М.: Высш.шк.,2005.-574с.(252 экз.)\$
2. Атабеков Г.И. Основы теории цепей.- СПб: Лань,2009.-432с. Режим доступа: http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_cid=25&pl1_id=95
3. Мельникова И.В., Дубовик К.Ю. Теория электрических цепей: Учебное пособие к практическим занятиям / Под общей ред. Мельниковой И.В.- Томск. 2012.- 156 с. Режим доступа: <http://edu.tusur.ru/training/publications/1432>
4. Теория радиотехнических цепей/Н.В.Зернов, В.Г.Карпов.-М.:Энергия, 1972-787с.
5. Теория радиотехнических цепей/Н.В.Зернов, В.Г.Карпов.-Л..Энергия, 1965.-890с.
6. Теория линейных электрических цепей/Б.П.Афанасьев, О.Е.Гольдин, И.Г.Кляцкин, Г.Я.Пинес.-М..Высш.шк., 1973.-592с.