

**Поволжский Государственный университет
телекоммуникаций и информатики**

Кафедра ТОРС

Михайлов В.И.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУХПОЛЮСНИКОВ, ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКОВ,
АМПЛИТУДНЫХ КОРРЕКТОРОВ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ФИЛЬТРОВ**

Методические указания

к лабораторным работам

по 2-й части курса «Теории электрических цепей»

Самара 2014

СОДЕРЖАНИЕ

1. РАБОТА 3-1. “ИССЛЕДОВАНИЕ LC – ДУХПОЛЮСНИКА С ПОТЕРЯМИ”-----	3
2. РАБОТА 3-3. “ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА РАСЧЁТА ПАРАМЕТРОВ - КОЭФФИЦИЕНТОВ ПРОСТЫХ И СЛОЖНЫХ ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКОВ ”-----	11
3. РАБОТА 3-4. “ ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫХ КОРРЕКТОРОВ ”-- -----	19
4. РАБОТА 3-5. “ РАСЧЁТ И ИЗМЕРЕНИЕ РАБОЧЕГО ОСЛАБЛЕНИЯ ПОЛУЗВЕНЬЕВ ФНЧ ТИПОВ «к» и «m» ” -----	29

1. РАБОТА 3-1

“ИССЛЕДОВАНИЕ LC – ДВУХПОЛЮСНИКА С ПОТЕРЯМИ”

1.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Приобретение навыков измерения полного сопротивления LC – двухполюсника с потерями и синтеза по результатам измерения LC – двухполюсника без потерь.

1.2. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Исполнителю работы предоставляется LC – двухполюсник с малыми потерями с неизвестной схемой.

В результате измерений необходимо получить данные для определения класса; числа элементов; величин элементов реактивного двухполюсника, соответствующего измеряемому LC – двухполюснику с потерями.

В процессе выполнения лабораторной работы необходимо сделать следующее:

1. Измерить резонансные частоты исследуемого двухполюсника с малыми потерями и на основе этих измерений построить характеристическую строку реактивного двухполюсника, которая определяет сопротивление реактивного двухполюсника с точностью до постоянного множителя N .
2. Для определения множителя N на частоте f_0 , не равной резонансной, измерить полное сопротивление исследуемого двухполюсника.
3. На основе характеристической строки, полученной в п.1, определить класс реактивного двухполюсника, число элементов канонических схем и построить эти схемы.
4. Записать формулу Фостера для входного сопротивления реактивного двухполюсника $Z(p)$ и $Z(j\omega)$, подставив измеренные в п.1 значения нулей и полюсов.
5. Рассчитать множитель N , используя результаты измерений в п.2 полного сопротивления двухполюсника $|Z(j2\pi f_0)|$.

Теперь имеются все данные для расчета величин элементов любой канонической схемы реактивного двухполюсника.

1.3. ЗАДАНИЕ НА ПОДГОТОВКУ К РАБОТЕ

Ознакомиться с содержанием описания лабораторной работы, изучить методы синтеза реактивных двухполюсников по конспекту лекций или литературе, заготовить бланк отчета.

1.4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как по виду частотной зависимости U_R определить класс реактивного двухполюсника, число элементов?
2. Как, зная класс, нули и полюсы реактивного двухполюсника, можно составить выражение $Z(p)$, построить частотную зависимость $Z(j\omega)/j$, канонические схемы?
3. Как по частотной зависимости $Z(j\omega)/j$ составить выражение $Z(p)$ и канонические схемы реактивного двухполюсника, определить его класс?
4. Как по выражению $Z(p)$ определить класс, число элементов канонических схем и частотную зависимость $Z(j\omega)/j$?

1.5. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

В отчете привести:

- a) схемы измерений;
- b) результаты измерений;
- c) графики частотной зависимости U_R , Z_d , $Z(j\omega)/j$;
- d) выражения $Z(p)$ и $Z(j\omega)/j$ реактивного двухполюсника, расчет N ;
- e) канонические схемы реактивного двухполюсника, соответствующего исследуемому двухполюснику;
- f) расчет величин элементов одной из канонических схем (по заданию преподавателя).

Текст отчета должен содержать смысловую увязку расчетного и графического материала.

1.6. ПОЯСНЕНИЕ К ПОСТАНОВКЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

При выполнении работы используются приборы:

1. лабораторный стенд;
2. генератор синусоидального напряжения;
3. электронный вольтметр.

Измерения резонансных частот выполняются в схеме рисунка 1.1. В работе исследуются двухполюсники с малыми потерями, поэтому резонансные явления отчетливо различны. Резонансные частоты двухполюсников сосредоточены в диапазоне частот (2-15)кГц.

Для определения резонансных частот, достаточно, плавно меняя частоту генератора в диапазоне (1-20)кГц, исследовать частотную зависимость U_R , поддерживая постоянные значения напряжения генератора U_G ($U_G=(1-5)V$). При этом максимум U_R соответствует минимуму полного сопротивления Z_d двухполюсника, т.е. нулю сопротивления реактивного двухполюсника, а минимум U_R соответствует максимуму Z_d , т.е. полюсу сопротивления реактивного двухполюсника. Следует помнить, что нули и полюсы чередуются.

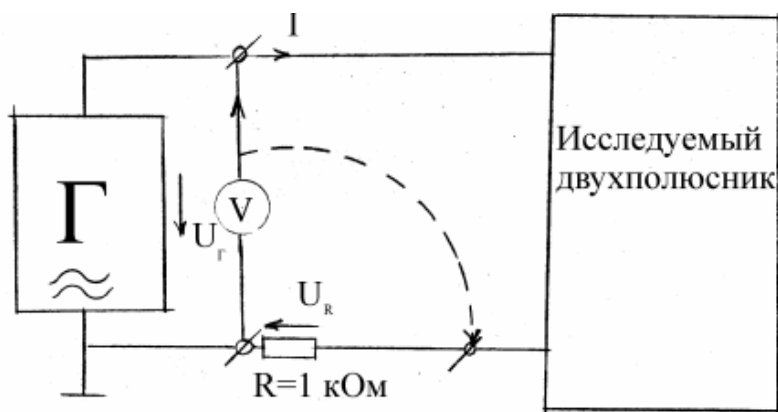


Рис. 1.1. Измерение U_R

Результаты измерений занести в таблицу 1.1.

Таблица 1.1. Данные по измерению двухполюсника

Частоты $U_{R \min}$ (полюсы сопротивления), кГц	
Частоты $U_{R \max}$ (нули сопротивления), кГц	

На основе таблицы 1.1 построить характеристическую строку соответствующего реактивного двухполюсника, определить его класс, число элементов канонических схем и привести 4 канонические схемы.

Составить выражение $Z(p)$ и $Z(j\omega)$ сопротивления реактивного двухполюсника в виде формулы Фостера, подставив численные значения нулей и полюсов из таблицы 1.1.

Для определения множителя H в формуле $Z(j\omega)$ необходимо сделать следующие измерения:

1. в схеме рисунка 1.1 измерить U_R на частоте f_0 , промежуточной между резонансными частотами;
2. в схеме рисунка 1.2 на частоте f_0 измерить U_d

На основе этих измерений определить полное сопротивление двухполюсника $Z_d=|Z(j2\pi f_0)|$:

$$Z_d = \frac{U_d}{I} = \frac{U_d}{U_R / R} = \frac{U_d}{U_R} \cdot 1000 = \frac{U_d}{U_R} \text{ кОм} \quad (1.1)$$

и рассчитать затем множитель H .

По заданию преподавателя рассчитать величины элементов одной из канонических схем.

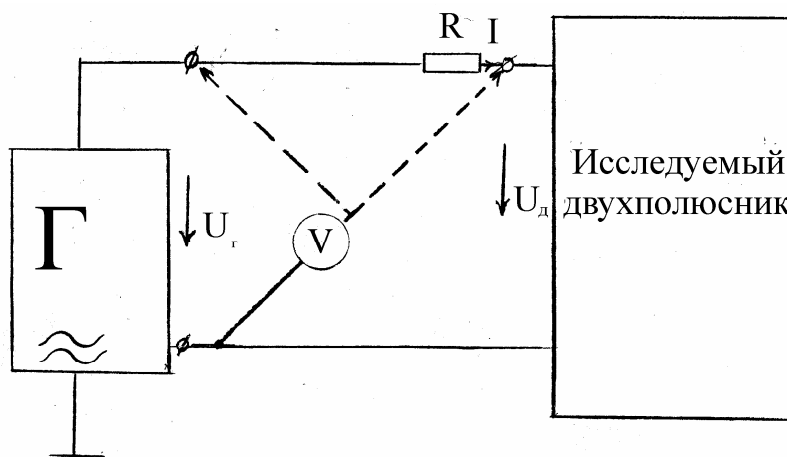


Рис. 1.2. Измерение U_d .

1.7. ПРИЛОЖЕНИЕ

1.7.1. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Реактивными называются двухполюсники, состоящие только из реактивных элементов: индуктивностей и ёмкостей. Так как активных сопротивлений в этих схемах нет, то входное сопротивление реактивных двухполюсников не содержит активной составляющей и является мнимым: $Z = \pm jX$.

Реактивные двухполюсники представляют собой идеализированную модель реальных двухполюсников, составленных из катушек индуктивностей и конденсаторов.

Если на вход реактивного двухполюсника подать гармоническое колебание и менять его частоту, то входное сопротивление двухполюсника на разных частотах будет иметь различные значения. Зависимость входного сопротивления $Z(j\omega)$ от частоты называется частотной характеристикой реактивного двухполюсника.

Значение частоты ω , при котором входное сопротивление двухполюсника обращается в нуль, называется нулями входного сопротивления. Значение частоты ω , при которых входное сопротивление равно бесконечности, называется полюсами входного сопротивления. Нули на графиках обозначают кружочками, полюсы – крестиками.

Во многих случаях, характеризуя частотную зависимость сопротивления реактивного двухполюсника, можно ограничиться графиком, который определяет лишь частоты нулей и полюсов сопротивления. Его называют характеристической строкой двухполюсника (или полюсно–нулевыми диаграммами).

В зависимости от характера сопротивления на концах частотного диапазона ($\omega=0$ и $\omega=\infty$), двухполюсники можно разделить на четыре класса. Нумерация класса условна и состоит из двух цифр (0 и ∞). Первая цифра класса определяет величину сопротивления на частоте $\omega=0$, вторая на частоте $\omega=\infty$. Выберем здесь следующую нумерацию классов: 1 класс: (0, ∞); 2 класс: (∞ ,0); 3 класс (0,0); 4 класс (∞ , ∞).

Нули и полюсы сопротивления двухполюсника можно разделить на внешние, определяемые классом и собственные (внутренние), определяемые резонансами. Частоты резонанса напряжений являются нулями сопротивления двухполюсника, а частоты резонанса токов – полюсами.

Характеристические строки двухполюсников указанных 4-х классов приведены на рисунке 1.3. Здесь внешние нули и полюсы выделены скобками для наглядности.

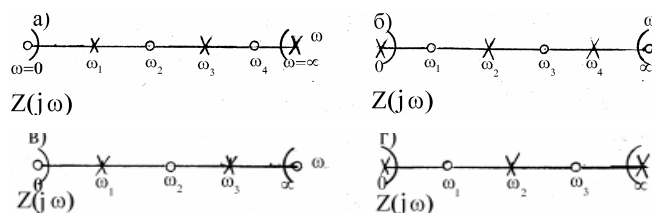


Рис. 1.3. Характеристические строки двухполюсников

Входное сопротивление любого реактивного двухполюсника может быть представлено через резонансные частоты в виде формулы Фостера. Теорема была опубликована Р.М. Фостером в 1924г. (США).

Для двухполосника 1 класса (рисунок 1.3а) формула Фостера имеет вид

$$Z(p) = pH \cdot \frac{(\omega_2^2 + p^2)(\omega_4^2 + p^2)}{(\omega_1^2 + p^2)(\omega_3^2 + p^2)}, (1.2)$$

для двухполосника 2 класса (рисунок 1.3б)

$$Z(p) = \frac{H}{p} \cdot \frac{(\omega_1^2 + p^2)(\omega_3^2 + p^2)}{(\omega_2^2 + p^2)(\omega_4^2 + p^2)}, (1.3)$$

для двухполосника 3 класса (рисунок 1.3в)

$$Z(p) = pH \cdot \frac{(\omega_2^2 + p^2)}{(\omega_1^2 + p^2)(\omega_3^2 + p^2)}, (1.4)$$

для двухполосника 4 класса (рисунок 1.3г)

для любого класса $H > 0$, $\omega_1 < \omega_2 < \omega_3 < \omega_4$. Частотную зависимость сопротивления получим, заменив

$$Z(p) = \frac{H}{p} \cdot \frac{(\omega_1^2 + p^2)(\omega_3^2 + p^2)}{(\omega_2^2 + p^2)}, (1.5)$$

$$p = j\omega, p^2 = -\omega^2.$$

Основные общие свойства реактивных двухполосников вытекают из формулы Фостера.

- 1) Если известно расположение нулей и полюсов реактивного двухполосника (т.е. известна характеристическая строка), его частотная характеристика определяется с точностью до постоянного множителя H .
- 2) Нули и полюсы сопротивления, т.е. частоты резонансов напряжений и токов чередуются. Это же относится и к нулям и полюсам класса.
- 3) В зависимости от величины сопротивления двухполосника на частоте $\omega=0$ множитель $j\omega$ записывается либо в числителе (для 1 и 3 классов), либо в знаменателе (для 2 и 4 классов).
- 4) В числителе $Z(j\omega)$ стоят скобки с частотами резонансов напряжений, которые являются нулями входного сопротивления. В знаменателе $Z(j\omega)$ стоят скобки с частотами резонансов токов (полюсов сопротивления).
- 5) Входное сопротивление $Z(j\omega)$ возрастает (в алгебраическом смысле) с ростом частоты, т.е.

Каноническими называются схемы, построенные по заранее определенному правилу. В теории

$$\frac{d \frac{Z(j\omega)}{j}}{d\omega} > 0$$

реактивных двухполосников применяются две канонические схемы Фостера и две канонические схемы Кауэра. Это эквивалентные схемы, имеющие одинаковое число индуктивностей и ёмкостей. Число n элементов канонических схем минимально и на единицу больше числа резонансов.

Канонические схемы двухполосников, соответствующие рисунку 1.3а и рисунку 1.3г представлены на рисунке 1.4 и рисунке 1.5 соответственно.

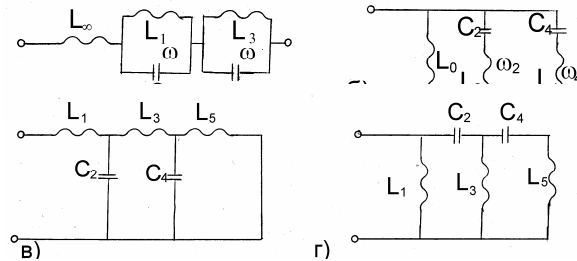


Рис. 1.4. Канонические схемы

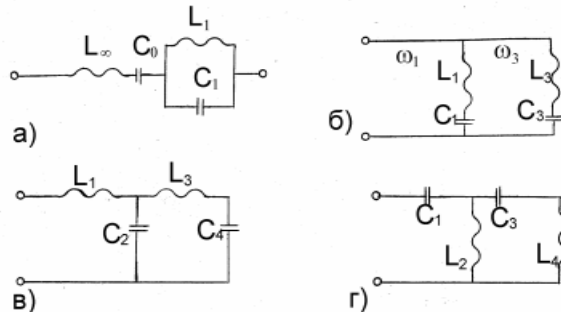


Рис. 1.5. Канонические схемы

На рисунке 1.4а, 1.5а и 1.4б, 1.5б показаны 1-я и 2-я канонические формы (схемы) Фостера, на рисунке 1.4в, 1.5в и 1.4г, 1.5г – 1-я и 2-я канонические формы Кауэра.

Реализация 1-ой формы Фостера основана на представлении $Z(p)$ в виде суммы слагаемых вида (1.6). Здесь A_0 , A_∞ , A_k – вычеты $Z(p)$ в полюсах $\omega=0$, $\omega=\infty$, $\omega=\omega_k$, ω_k – частота собственного полюса $Z(p)$ или частота резонанса токов.

$$\left. \begin{aligned} Z(p) &= pA_\infty + \frac{A_0}{p} + \sum_{(k)} \frac{A_k p}{p^2 + \omega_k^2} \\ A_\infty &= \lim_{p \rightarrow \infty} \frac{Z(p)}{p} = L_\infty; A_0 = \lim_{p \rightarrow 0} p \cdot Z(p) = \frac{1}{C_0} \end{aligned} \right\} (1.6)$$

$$A_k = \lim_{p^2 \rightarrow -\omega_k^2} \left\{ \frac{p^2 + \omega_k^2}{p} Z(p) \right\} = \frac{1}{C_k}, L_k = \frac{1}{\omega_k^2 C_k} \quad (1.6)$$

В двухполюснике со схемой рисунка 1.4а параллельные колебательные контуры с резонансными частотами ω_1 , ω_3 реализуют полюсы $Z(p)$ при $p = \pm j\omega_1$; $\pm j\omega_3$, а индуктивность L_∞ реализует полюс при $p = \infty$.

Двухполюсник пропускает постоянный ток (первая цифра класса равна нулю), поэтому $A_0 = 0$.

В двухполюснике рисунка 1.5а параллельный контур с резонансной частотой ω_1 реализует полюс сопротивления на частоте ω_1 , индуктивность L_∞ и емкость C_0 – полюсы сопротивления при $\omega = \infty$ и $\omega = 0$.

1.7.2. ПРИМЕР РАСЧЕТА РЕАКТИВНОГО ДВУХПОЛЮСНИКА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ

ИЗМЕРЕНИЙ

Пример. В результате измерений получили: на частоте $f_2 = 10$ кГц U_R достигает минимума, а на частотах $f_1 = 5$ кГц и $f_3 = 15$ кГц достигает максимумов.

В соответствии с этими данными измерений резонансных частот составили таблицу 1.2.

Таблица 1.2. Исходные данные для примера расчета

Частоты $U_{R \min}$, кГц	10	
Частоты $U_{R \max}$, кГц	5	15

Выбрали промежуточную частоту $f_0 = 13$ кГц, измерили на этой частоте U_R и U_d , затем по формуле (1) определили полное сопротивление двухполюсника $Z_d = 20$ кОм.

Обозначим резонансные частоты в порядке их увеличения: $f_1=5$ кГц, $f_2=10$ кГц, $f_3=15$ кГц. Анализ таблицы 1.2 показывает, что в исследуемом двухполоснике наблюдается резонанс напряжений на частотах f_1 и f_3 и резонанс токов на частоте f_2 . Следовательно, характеристическая строка соответствующего реактивного двухполосника имеет вид графика рисунка 1.6.

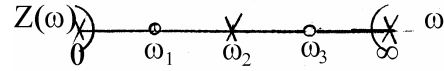


Рис. 1.6. Характеристическая строка

Таким образом, имеем дело с реактивным двухполосником 4 класса (∞, ∞) . Канонические схемы этого двухполосника содержат по 4 элемента и представлены на рисунке 1.5.

Формула Фостера для входного сопротивления исследуемого двухполосника (1.5) позволяет

$$Z(j\omega) = H \frac{(\omega_1^2 - \omega^2)(\omega_3^2 - \omega^2)}{j\omega(\omega_2^2 - \omega^2)} = -jH \frac{2\pi(f_1^2 - f^2)(f_3^2 - f^2)}{f(f_2^2 - f^2)}$$

определить частотную зависимость сопротивления, заменив p на $j\omega$, p^2 на $-\omega^2$, $\omega=2\pi f$:

Определим множитель H по результатам измерения $Z_d = |Z(j2\pi f_0)| = 20$ кГц на частоте $f_0=13$ кГц:

Окончательная формула для $Z(p)$:

$$Z_d = 20 \cdot 10^3 = H \left| \frac{2\pi(f_1^2 - f_0^2)(f_3^2 - f_0^2)}{f_0(f_2^2 - f_0^2)} \right|, \text{отсюда найдем } H$$

$$H = \frac{10^4}{\pi} \cdot \frac{13 \cdot |(10^2 - 13^2)|}{|(5^2 - 13^2)| \cdot (15^2 - 13^2)} = 0,1$$

$$Z(p) = 0,1 \frac{(p^2 + \omega_1^2)(p^2 + \omega_3^2)}{p(p^2 + \omega_2^2)}, \omega_1 = 2 \cdot \pi \cdot 5 \cdot 10^3$$

$$\omega_2 = 2 \cdot \pi \cdot 10 \cdot 10^3$$

$$\omega_3 = 2 \cdot \pi \cdot 15 \cdot 10^3$$

Рассчитаем величины элементов первой формы Фостера (рисунок 1.5а), на основе формулы (1.6), которая для данной четырехэлементной схемы 4 класса имеет вид:

$$Z(p) = A_\infty p + \frac{A_0}{p} + \frac{A_2 p}{p^2 + \omega_2^2},$$

Определяем элементы схемы рисунка 1.5а

$$A_\infty = L_\infty = \lim_{p \rightarrow \infty} \frac{Z(p)}{p} = \frac{0,1 \cdot (p^2 + \omega_1^2)(p^2 + \omega_3^2)}{p^2(p^2 + \omega_2^2)} \Big|_{p \rightarrow \infty} = 0,1 \text{ Гн}$$

$$A_0 = \lim_{p \rightarrow 0} pZ(p) = \lim_{p \rightarrow 0} \frac{0,1(p^2 + \omega_1^2)(p^2 + \omega_3^2)}{p^2 + \omega_2^2} = \frac{0,1 \cdot \omega_1^2 \cdot \omega_3^2}{\omega_2^2} = \frac{0,1 \cdot 4\pi^2 f_1^2 f_3^2}{f_2^2} =$$

$$= \frac{0,1 \cdot 4\pi^2 \cdot 5^2 \cdot 15^2 \cdot 10^6}{10^2} = \frac{1}{C_0}, \quad C_0 = 4,5 \cdot 10^{-9} \Phi$$

$$A_2 = \lim_{p^2 \rightarrow \omega_2^2} \frac{Z(p)(p^2 + \omega_2^2)}{p} = \lim_{p^2 \rightarrow \omega_2^2} \frac{0,1 \cdot (p^2 + \omega_1^2)(p^2 + \omega_3^2)}{p^2} =$$

$$= \frac{0,1 \cdot 4\pi^2 (f_1^2 - f_2^2)(f_3^2 - f_2^2)}{-f_2^2} = \frac{0,1 \cdot 4\pi \cdot 10^6 (5^2 - 10^2)(15^2 - 10^2)}{-10^2} = \frac{1}{C_2},$$

$$C_2 = 2,7 \cdot 10^{-9} \Phi$$

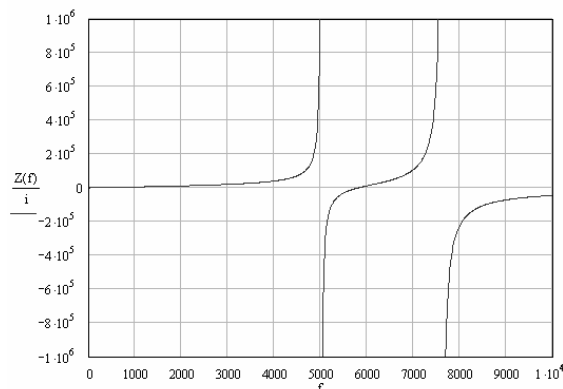
$$L_2 = \frac{1}{\omega_2^2 C_2} = \frac{1}{2\pi \cdot 10^2 \cdot 10^6 \cdot 2,7 \cdot 10^{-9}} = 93,6 \cdot 10^{-3} \text{ Гн.}$$

Проверка решения: $H=L\infty$.

Для проверки точности расчетов рекомендуется построить график зависимости сопротивления реактивного ДП на ЭВМ по программе

$$H = \frac{(p^2 + \omega_1^2)(p^2 + \omega_3^2)Z_0}{p(p^2 + \omega_2^2)} =$$

$$= \frac{((2j\pi \cdot 4000)^2 + (2\pi \cdot 5000)^2)((2j\pi \cdot 4000)^2 + (2\pi \cdot 7600)^2) \cdot 23000}{2j\pi \cdot 4000 \cdot ((2j\pi \cdot 4000)^2 + (2\pi \cdot 5800)^2)} = 1,36j \cdot 10^9$$



Проверим правильность составления формулы зависимости входного сопротивления ДП от частоты:

$$Z(f) := \frac{1,36 \cdot 10^9 \cdot \pi \cdot 2 \cdot i \cdot f \cdot [(2 \cdot i \cdot \pi \cdot f)^2 + (2 \cdot \pi \cdot 5800)^2]}{[(2 \cdot \pi \cdot i \cdot f)^2 + (2 \cdot \pi \cdot 5000)^2] \cdot [(2 \cdot i \cdot \pi \cdot f)^2 + (2 \cdot \pi \cdot 7600)^2]}$$

1.8. Выполнение работы на ЭВМ

Для проверки расчетов величин элементов двухполюсника следует собрать схему вида рисунка 1.7 со своим двухполюсником и убедиться, что резонансные частоты (максимумы и минимумы показаний измерителя) хорошо совпадают.

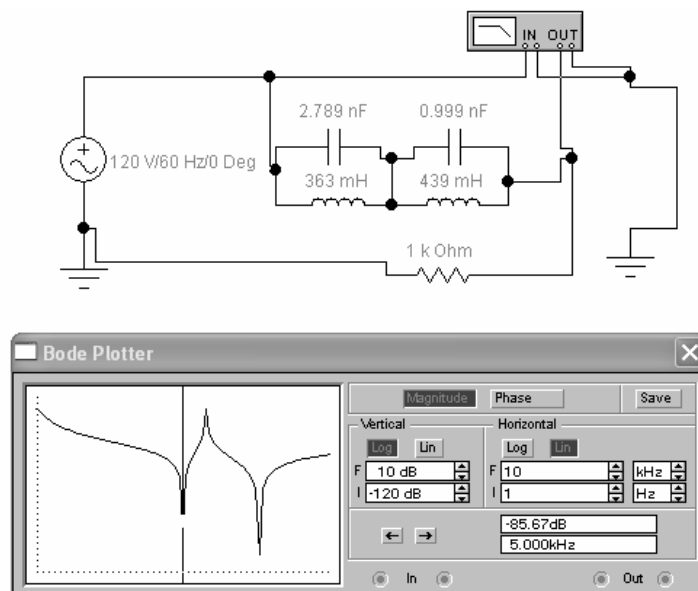


Рис. 1.7. Схема проверки рассчитанного ДП.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бакалов В.П., Дмитриков В.Ф., Крук Б.И. Основы теории цепей. -М.: Радио и связь. 2009, с. 412-432.
2. Бакалов В.П., Игнатов А.Н., Крук Б.И. Основы теории электрических цепей и электроники. М.: Радио и связь, 1989, с. 145-160.
3. Белецкий А.Ф. Теория линейных электрических цепей. М.: Радио и связь, 1986, с. 390-402.
4. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. -М.: Гардарики, 1999, с. 327-338.
5. Карлацук В. И. Электронная лаборатория на IBM PC. -М.:Солон-Р, 2005. – 506 с.
6. Киреев В.Р., Крухмалева В.Д., Михайлов В.И. Методические указания к лабораторным работам по 3 части курса ОТЦ. ПГАТИ, каф. ТЭЦ, Самара 2001.
7. Попов В.П. Основы теории цепей. М.: Высшая школа, 2007, с. 504 - 533.
8. Шебес М. Р., Каблукова М. В. Задачник по теории линейных электрических цепей. -М.: Высшая школа, 1990, с. 376- 397.

2. РАБОТА 3-3

“ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА РАСЧЁТА ПАРАМЕТРОВ - КОЭФФИЦИЕНТОВ ПРОСТЫХ И СЛОЖНЫХ ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКОВ ”

3.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является ознакомление студентов с методами теоретического и экспериментального определения параметров-коэффициентов четырёхполюсников (ЧП) из опытов холостого хода и короткого замыкания и расчёта параметров-коэффициентов сложного ЧП, полученного путём регулярного соединения более простых ЧП, по параметрам-коэффициентам этих последних.

3.2. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Исполнителю работы предоставляются два резистивных ЧП с известной схемой.

В процессе выполнения лабораторной работы необходимо:

- 1) измерить параметры-коэффициенты требуемого вида 1-го ЧП;
- 2) измерить параметры-коэффициенты того же вида 2-го ЧП;
- 3) осуществить регулярное соединение требуемого вида 1-го ЧП со 2-м;
- 4) измерить параметры-коэффициенты того же вида, что и в п.п.1 и 2. полученного в п.3 сложного ЧП;
- 5) сравнить результаты измерений с результатами расчётов, оценить величину относительного различия этих результатов, дать заключение о проделанной работе.

3.3. ЗАДАНИЕ НА ПОДГОТОВКУ К РАБОТЕ И ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РАСЧЁТЫ

Изучить теорию вопроса по одному из приводимых ниже источников, а также п.3.6 описания настоящей работы, выполнить предварительные расчёты по приводимому ниже заданию, заготовить бланк отчёта по лабораторной работе, занести в него результаты предварительных расчётов в виде таблиц, удобных для сравнения расчётных и экспериментальных данных. Варианты заданий приведены в таблице 3.1. Схемы исследуемых ЧП приведены в таблице 3.2, где они пронумерованы цифрами от 0 до 9. Выбор 1-го и 2-го ЧП из таблицы 3.2 осуществляется по данным таблицы 3.1.

В таблице 3.1 задание представлено в виде набора из трёх цифр, 1-я и 2-я представляют собою номера 1-го и 2-го простых ЧП из табл. 3.1, а 3-я - определяет способ их соединения.

Таблица 3.1. Варианты заданий

Номер бригады	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Задание	051	162	273	384	495	061	172	283	394	065

При этом различным видам соединения присвоены следующие номера:

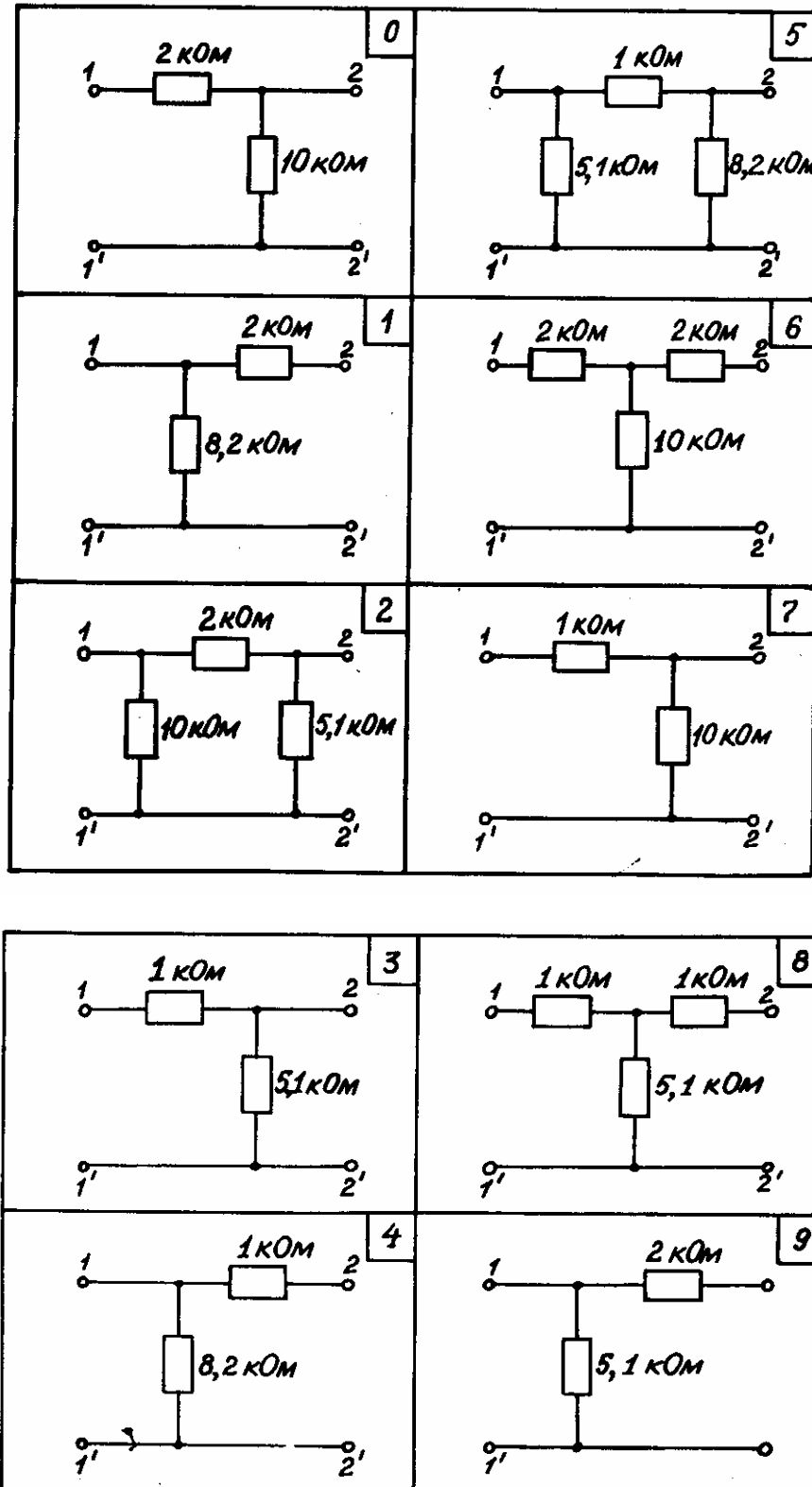
- последовательное соединение - 1,
- параллельное - 2,
- последовательно-параллельное - 3,
- параллельно-последовательное - 4,
- каскадное - 5.

Вид рассчитываемых и экспериментально определяемых параметров зависит от вида соединения 1-го и 2-го ЧП. При последовательном соединении рассчитываются и измеряются **Z**-параметры, при параллельном - **Y**-параметры, при последовательно-параллельном - **H**-параметры, при параллельно-последовательном - **F**-параметры и при каскадном - **A**-параметры.

Итак, по исходным данным табл. 3.1 и 3.2 расчёту подлежат:

- 1) параметры-коэффициенты требуемого вида 1-го и 2-го ЧП,
- 2) параметры-коэффициенты того же вида сложного ЧП.

Таблица 3.2. Схемы исследуемых ЧП



3.4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Дайте характеристику стандартного способа выбора направлений токов и напряжений пар зажимов ЧП.
2. Сформулируйте правила, позволяющие с минимальными затратами труда запомнить

стандартизованный вид систем уравнений передачи ЧП.

3. Дайте словесную формулировку смысла параметров-коэффициентов различных систем, вытекающего из опытов холостого хода и короткого замыкания.

4. Потренируйтесь в записи по памяти различных систем уравнений передачи ЧП.

5. Найдите выражения параметров-коэффициентов различного вида через элементы схемы: Γ и Π -, Γ - и Π -образны: Γ Π . Γ

6. В чём смысл понятия регулярности соединения ЧП.

7. Припомните основные понятия теории матриц и правила матричной алгебры.

3.5. ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЁТА

Выполнение лабораторной работы завершается оформлением отчёта. Отчёт должен содержать исходные данные для предварительного расчёта, расчёты и их результаты, схемы измерительных цепей и результаты измерений и расчётов по ним. Результаты расчётов, измерений и сравнений необходимо помещать в таблицы, удобные для обозрения материала. Текст должен создавать смысловую связку между схемным, табличным и графическим материалом. Отчёт должен заканчиваться критической оценкой проделанной работы.

3.6. ПРИЛОЖЕНИЯ

3.6.1. НЕКОТОРЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕОРИИ

Теория ЧП первоначально возникла как теория электрических компонентов с двумя парами зажимов (электронных ламп), соотношения между токами и напряжениями которых невозможно установить на основе законов Кирхгофа, а возможно лишь при помощи уравнений передачи, коэффициенты которых являются параметрами этих компонентов, полностью определяющими их электрические свойства. В дальнейшем такой подход оправдал себя и в применении к электрическим цепям с двумя парами зажимов и известной схемой замещения.

В настоящее время форма записи систем уравнений передачи стандартизована. Для обозначенных на рисунке 3.1 направлений токов и напряжений стандартная форма записи систем уравнений передачи приведена ниже:

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_1 &= \underline{Z}_{11} \underline{I}_1 + \underline{Z}_{12} \underline{I}_2 \\ \underline{U}_2 &= \underline{Z}_{21} \underline{I}_1 + \underline{Z}_{22} \underline{I}_2 \end{aligned} \right\} \text{ - система } \underline{Z} \text{ - параметров,}$$

$$\left. \begin{aligned} \underline{I}_1 &= \underline{Y}_{11} \underline{U}_1 + \underline{Y}_{12} \underline{U}_2 \\ \underline{I}_2 &= \underline{Y}_{21} \underline{U}_1 + \underline{Y}_{22} \underline{U}_2 \end{aligned} \right\} \text{ - система } \underline{Y} \text{ - параметров,}$$

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_1 &= \underline{A}_{11} \underline{U}_2 + \underline{A}_{12} (-\underline{I}_2) \\ \underline{I}_1 &= \underline{A}_{21} \underline{U}_2 + \underline{A}_{22} (-\underline{I}_2) \end{aligned} \right\} \text{ система } \underline{A} \text{ - параметров,}$$

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_2 &= \underline{B}_{11} \underline{U}_1 + \underline{B}_{12} (-\underline{I}_1) \\ \underline{I}_2 &= \underline{B}_{21} \underline{U}_1 + \underline{B}_{22} (-\underline{I}_1) \end{aligned} \right\} \text{ система } \underline{B} \text{ - параметров,}$$

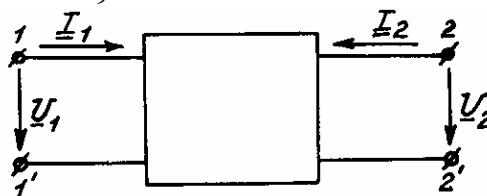


Рис. 3.1. Условное изображение ЧП

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_1 &= \underline{H}_{11} \underline{I}_1 + \underline{H}_{12} \underline{U}_2 \\ \underline{I}_2 &= \underline{H}_{21} \underline{I}_1 + \underline{H}_{22} \underline{U}_2 \end{aligned} \right\} \text{ система } \underline{H} \text{ - параметров,}$$

$$\left. \begin{aligned} \underline{I}_1 &= \underline{F}_{11} \underline{U}_1 + \underline{F}_{12} \underline{I}_2 \\ \underline{U}_2 &= \underline{F}_{21} \underline{U}_1 + \underline{F}_{22} \underline{I}_2 \end{aligned} \right\} \text{ система } \underline{F} \text{ - параметров.}$$

Совокупность коэффициентов каждой системы уравнений передачи составляет систему параметров-

коэффициентов соответствующего вида.

Параметры-коэффициенты являются входными или передаточными (либо обратными передаточным) функциями ЧП в режимах холостого хода или короткого замыкания. Смысл каждого параметра-коэффициента легко проясняется из опытов ХХ или КЗ. Так, смысл Z -параметров раскрывается в опытах ХХ, за что они иногда называются параметрами "холостого хода":

При $I_1=0$ $Z_{12}=\underline{U}_1/I_2$ – передаточное сопротивление при передаче от зажимов 2-2' к зажимам 1-1' и разомкнутых зажимах 1-1', $Z_{22}=\underline{U}_2/I_2$ – входное сопротивление со стороны зажимов 2-2' при ХХ на зажимах 1-1' и т.д.

Смысл Y -параметров выясняется в опытах короткого замыкания, смысл других параметров определяется из комбинации опытов ХХ и КЗ.

Для успешного выполнения лабораторной работы необходимо самостоятельно сформулировать смысл всех параметров-коэффициентов.

Уточним некоторые положения теории соединений ЧП, на основе которой определяются в настоящей работе параметры-коэффициенты сложных ЧП.

В настоящей работе используются так называемые "треугольные" ЧП (у них зажимы 1' и 2' соединены накоротко). Для этих ЧП на рисунке 3.2 приведены четыре вида регулярных соединений (каскадное соединение всегда регулярно при соединении между собой 1-го и 2-го ЧП).

Соединение ЧП называется регулярным, если после его осуществления для всех пар зажимов соединенных ЧП сохраняется справедливое соотношение: ток одного провода пары равен и противоположен току другого провода пары.

Как видно из рисунка 3.2, при последовательно-параллельном и параллельно-последовательном соединениях у одного из соединяемых ЧП для обеспечения регулярности соединения приходится с одной стороны скрещивать зажимы, что эквивалентно изменению знака тока и напряжения скрещиваемой пара зажимов. Так как на другой паре зажимов скрещивания нет, то происходит изменение знака на противоположный передаточных функций данного ЧП (в частности $\underline{H}_{12}, \underline{H}_{21}, \underline{E}_{12}$ и \underline{E}_{21}). Поэтому для последовательно-параллельного и параллельно-последовательного соединений рисунка 3.2 параметры сложного ЧП следует вычислять по формулам:

$$[\underline{H}] = [\underline{H}_1] + [\underline{H}_2]_{\text{скр}} = \begin{bmatrix} (\underline{H}'_{11} + \underline{H}''_{11})(\underline{H}'_{12} - \underline{H}''_{12}) \\ (\underline{H}'_{21} - \underline{H}''_{21})(\underline{H}'_{22} + \underline{H}''_{22}) \end{bmatrix}, (3.1)$$

$$[\underline{F}] = [\underline{F}_1] + [\underline{F}_2]_{\text{скр}} = \begin{bmatrix} (\underline{F}'_{11} + \underline{F}''_{11})(\underline{F}'_{12} - \underline{F}''_{12}) \\ (\underline{F}'_{21} - \underline{F}''_{21})(\underline{F}'_{22} + \underline{F}''_{22}) \end{bmatrix}, (3.2)$$

где штрихом обозначены параметры 1-го, а двумя штрихами – 2-го ЧП.

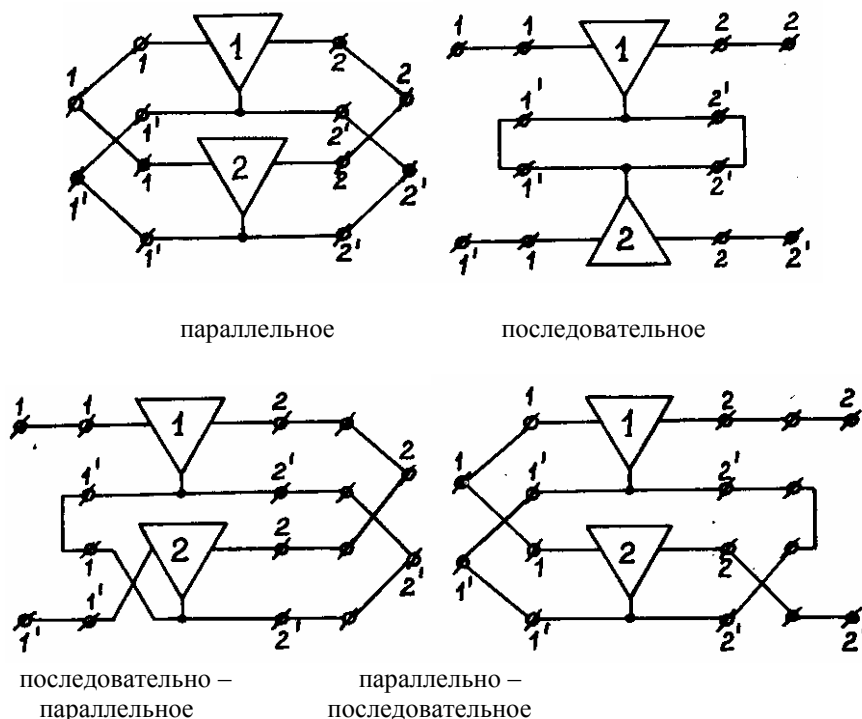


Рис. 3.2. Примеры соединения ЧП

В случае последовательного и параллельного соединений, показанных на рис. 3.2, Z - и Y - параметры сложного ЧП определяются по обычным формулам:

$$[\underline{Z}] = [\underline{Z}_1] + [\underline{Z}_2] = \begin{bmatrix} (\underline{Z}'_{11} + \underline{Z}''_{11})(\underline{Z}'_{12} + \underline{Z}''_{12}) \\ (\underline{Z}'_{21} + \underline{Z}''_{21})(\underline{Z}'_{22} + \underline{Z}''_{22}) \end{bmatrix}, \quad (3.3)$$

$$[\underline{Y}] = [\underline{Y}_1] + [\underline{Y}_2] = \begin{bmatrix} (\underline{Y}'_{11} + \underline{Y}''_{11})(\underline{Y}'_{12} + \underline{Y}''_{12}) \\ (\underline{Y}'_{21} + \underline{Y}''_{21})(\underline{Y}'_{22} + \underline{Y}''_{22}) \end{bmatrix}. \quad (3.4)$$

Параметры сложного ЧП, полученного каскадным соединением двух других, определяются по формулам:

$$[\underline{A}] = [\underline{A}_1] \times [\underline{A}_2] = \begin{bmatrix} \underline{A}'_{11} & \underline{A}'_{12} \\ \underline{A}'_{21} & \underline{A}'_{22} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \underline{A}''_{11} & \underline{A}''_{12} \\ \underline{A}''_{21} & \underline{A}''_{22} \end{bmatrix} = \\ = \begin{bmatrix} (\underline{A}'_{11} \underline{A}''_{11} + \underline{A}'_{12} \underline{A}''_{21})(\underline{A}'_{11} \underline{A}''_{12} + \underline{A}'_{12} \underline{A}''_{22}) \\ (\underline{A}'_{21} \underline{A}''_{11} + \underline{A}'_{22} \underline{A}''_{21})(\underline{A}'_{21} \underline{A}''_{12} + \underline{A}'_{22} \underline{A}''_{22}) \end{bmatrix}, \quad (3.5)$$

причём порядок матриц в произведении соответствует порядку ЧП в соединении (рис. 3.3).

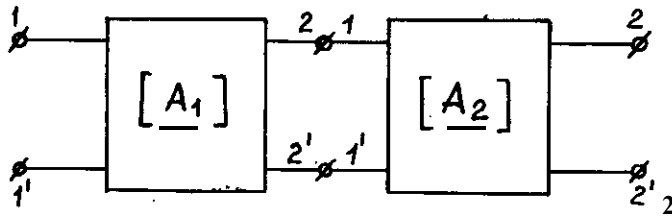


Рис. 3.3. Каскадное соединение ЧП

3.6.2. ПОЯСНЕНИЯ К ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫМ РАСЧЁТАМ.

Расчёт параметров-коэффициентов 1-го и 2-го ЧП.проще всего осуществить по их схемам при помощи методов контурных токов или узловых напряжений, принимая две из четырёх величин $\underline{U}_1, \underline{I}_1, \underline{U}_2, \underline{I}_2$ заданными, а две другие - неизвестными. Так, система уравнений контурных токов для Т-образного ЧП (рисунок 3.4а) сразу совпадает по форме с системой \underline{Z} -параметров:

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_1 &= (R_1 + R_2)\underline{I}_1 + R_2\underline{I}_2 \\ \underline{U}_2 &= R_2\underline{I}_1 + (R_2 + R_3)\underline{I}_2 \end{aligned} \right\}, \quad (3.6)$$

$$\text{откуда } \underline{Z}_{11}=R_1+R_2, \underline{Z}_{12}=R_2, \underline{Z}_{21}=R_2, \underline{Z}_{22}=R_2+R_3. \quad (3.7)$$

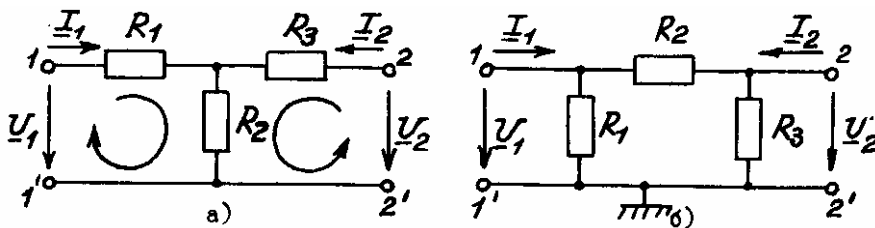


Рис. 3.4. Схемы Т-образного и П-образного ЧП

Для П - образного ЧП система узловых напряжений совпадает с системой уравнений передачи \underline{Y} -параметров, если токи \underline{I}_1 и \underline{I}_2 считать заданными, а напряжения \underline{U}_1 и \underline{U}_2 -узловыми (рисунок 3.4б):

$$\left. \begin{aligned} \underline{I}_1 &= \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \underline{U}_1 + \frac{-1}{R_2} \underline{U}_2 \\ \underline{I}_2 &= \frac{-1}{R_2} \underline{U}_1 + \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right) \underline{U}_2 \end{aligned} \right\}, \quad (3.8)$$

откуда

$$\underline{Y}_{11} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}, \underline{Y}_{12} = \underline{Y}_{21} = \frac{-1}{R_2}, \underline{Y}_{22} = \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}. \quad (3.9)$$

\underline{Z} - и \underline{Y} -параметры Γ и Υ -образного ЧП получим из формул (3.7) или (3.9), полагая в схеме рисунка 3.4а R_1 или R_3 равными нулю, либо в схеме рисунка 3.4б $\frac{1}{R_3}$ или $\frac{1}{R_1}$ равными нулю.

Параметры-коэффициенты других видов могут быть получены путём приведения систем уравнений передачи (3.6) и (3.8) к виду систем уравнений других параметров путём разрешения их относительно другой пары величин из четвёрки $\underline{U}_1, \underline{I}_1, \underline{U}_2$ и \underline{I}_2 . Например, разрешая систему (3.6) относительно \underline{U}_1 и \underline{I}_1 , получим:

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_1 &= \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) \underline{U}_2 + \frac{\Delta R}{R_2} (-\underline{I}_2) \\ \underline{I}_1 &= \frac{1}{R_2} \underline{U}_2 + \left(1 + \frac{R_3}{R_2} \right) (-\underline{I}_2) \end{aligned} \right\}$$

где $\Delta R = (R_1 + R_2)(R_2 + R_3) - R_2^2$ - определитель системы (3.6), откуда А-параметры ЧП рисунка 3.4а равны:

$$\underline{A}_{11} = 1 + R_1/R_2, \quad \underline{A}_{12} = \Delta R/R_2, \quad \underline{A}_{21} = 1/R_2 \quad \text{и} \quad \underline{A}_{22} = 1 + R_3/R_2.$$

Расчёт параметров сложного ЧП по параметрам входящих в соединение 1-го и 2-го ЧП осуществляются по формулам (3.1), (3.2), (3.3), (3.4) или (3.5) в зависимости от вида соединения.

3.6.3 ПОЯСНЕНИЯ К ПОСТАНОВКЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Согласно заданию на эксперимент (п.3.2 настоящего описания), измерению подлежат параметры-коэффициенты 1-го, 2-го и сложного ЧП, являющиеся входными, передаточными, либо обратными передаточным (А-параметры) функциями ЧП в режимах ХХ или КЗ.

Все измерения предусматривается осуществлять при гармонических токах и напряжениях частотой 1000 Гц по методу вольтметра-амперметра.

Для измерений потребуются: генератор синусоидального напряжения, электронный вольтметр и один или два магазина сопротивлений.

Измерение входных функций осуществляется в измерительной цепи рисунка 3.5.

Так как исследуемые ЧП являются резистивными, то входное сопротивление (входная проводимость) определяется после измерения U_Γ и U_{BX} по формуле:

$$\underline{Z}_{BX} = \frac{1}{\underline{Y}_{BX}} = \frac{U_{BX}}{U_\Gamma - U_{BX}} 10^3 \text{ Ом}.$$

Входные функции измеряются с обеих сторон ЧП.

Передаточные функции простых ЧП измеряются также в схеме рис. 3.5 с двух сторон, причем достаточно измерить передаточную функцию с одной стороны, так как ЧП являются обратимыми, у них $\underline{Z}_{12} = \underline{Z}_{21}$, $\underline{Y}_{12} = \underline{Y}_{21}$, $\underline{F}_{12} = -\underline{F}_{21}$, $\underline{H}_{12} = -\underline{H}_{21}$, а из четырех А-параметров достаточно измерить три, а четвертый определить из соотношения:

$$\underline{A}_{11}\underline{A}_{22} - \underline{A}_{12}\underline{A}_{21} = 1.$$

Индексы “вх” и “вых” у напряжений и токов заменяются на индексы «1» или «2» в зависимости того, к какой стороне присоединена измерительная цепь (генератор и сопротивление 1 кОм) – к паре зажимов 1-1' или 2-2'.

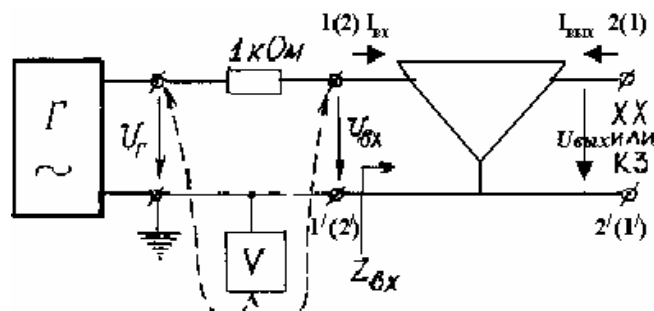


Рис. 3.5. Схема измерения входных и передаточных функций треугольных ЧП

Для измерения $I_{\text{вых}}$ в режиме КЗ сам режим организуется нагружением выходной стороны на

сопротивление R_n , причем величина R_n выбирается из соотношения $R_n \ll R$, где R – сопротивление резистора в схеме ЧП последовательное или параллельное R_n . Тогда $(-I_{\text{вых}}) \approx U_{\text{вых}}/R_n$. Сложные ЧП, полученные последовательным, последовательно-параллельным и параллельно-последовательным соединением не являются треугольными. Поэтому их передаточные функции измеряются в схеме рисунка 3.6, а $U_{\text{вых}}=U_{2'1'}-U_{2'1'}$ или $U_{\text{вых}}=U_{1'2'}-U_{1'2'}$, в зависимости от того, к какой паре зажимов: 1-1' или 2-2' присоединена измерительная цепь (генератора и сопротивление 1 кОм). В остальном измерение параметров – коэффициентов сложных ЧП не отличается от их измерения для простых 1-го и 2-го ЧП.

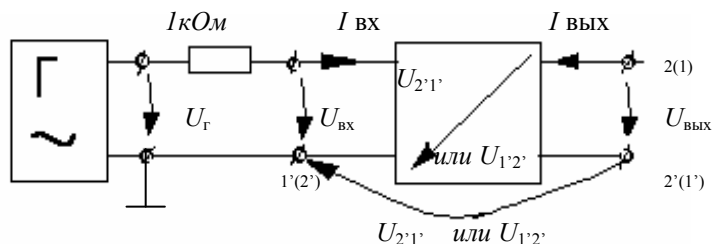


Рис. 3.6. Схема измерения передаточных функций сложных ЧП

3.7. ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ НА ЭВМ

Для выполнения работы 3-3 на ЭВМ необходимо запустить программу “**Electronics Workbench 4.0** (EWB)”. Работа с EWB описана в [5-7]. Следует “собрать” схемы измерений рисунка 3.5, 3-6, используя виртуальные элементы и приборы: резисторы, источник, вольтметры и амперметры. Для сборки схемы нужно “вытащив” с помощью курсора “мыши” и ее левой клавиши соответствующие элементы и приборы, соединить их “проводниками”, установить напряжение источника и режим измерения постоянного напряжения (DC) для вольтметров и амперметров и большого внутреннего сопротивления (100 Мом) для вольтметров. ЧП следует собрать из резисторов в соответствии со своей схемой и данными по таблице 3.1. Пример схемы исследования простого Т-образного ЧП из трех резисторов для этого случая с использованием виртуальных приборов показан на рисунке 3.7. Для создания режима короткого замыкания можно применить ключ или просто подключить проводник.

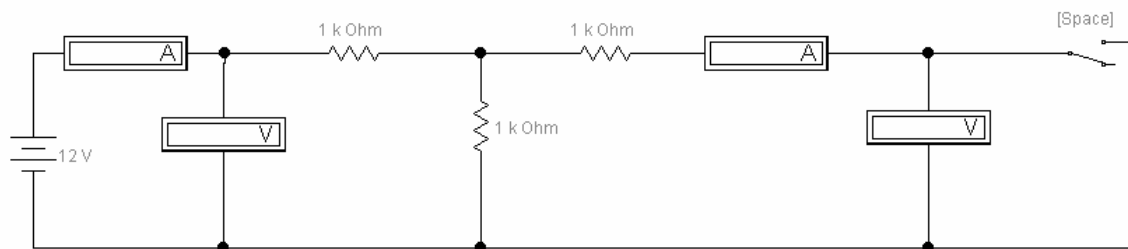


Рис. 3.7. Схема измерения параметров-коэффициентов ЧП на ЭВМ

Здесь применен источник постоянного напряжения 12 В, по два амперметра и вольтметра с режимами измерения постоянных токов и напряжений (DC) с параметрами $RA=1 \text{ mOhm}$, $RV=100 \text{ MOhm}$ и ключ [Space] для создания режима ХХ и КЗ. Ключ переключается клавишей “пробел”.

Для “экспериментального” определения параметра ЧП рекомендуется записать формулу и составить схему измерения на основе смысла данного параметра с соответствующим режимом на выходных зажимах. Запустить схему на моделирование кнопкой пуска в правом верхнем углу окна программы, затем выключить этой же кнопкой и считать показания приборов. После рассчитать параметр, используя полученные показания приборов.

Например, $Z_{21} = U_2 / I_1$ ($I_2=0$). Значит надо установить режим хх (ключ разомкнут) и использовать показания левого амперметра и правого вольтметра.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеев А.П. Информатика 2003. –М.: Солон-Р, 2001, с. 269-329.
2. Бакалов В.П., Дмитриков В.Ф., Крук Б.И Основы теории цепей. -М.: Радио и связь. 2009, с. 291-325.
3. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. –М.: Гардарики, 1999, с. 135-146.
4. Зевеке Г. В. и др., Основы теории цепей. -М.: Энергоатомиздат. 1989, с. 132-152
5. Карлащук В. И. Электронная лаборатория на IBM PC. –М.:Солон-Р, 2005. – 506 с.
6. Киреев В.Р., Крухмалева В.Д., Михайлов В.И. Методические указания к лабораторным работам по 3 части курса ОТЦ. ПГАТИ, каф. ТЭЦ, Самара 2001.
7. Шебес М. Р., Каблукова М. В. Задачник по теории линейных электрических цепей. -М.: Высшая школа, 1990, с. 328- 353.

3. РАБОТА 3-4 “ ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ АМПЛИТУДНО- ЧАСТОТНЫХ КОРРЕКТОРОВ ”

4.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

В настоящей лабораторной работе используются понятия обратных и дополняющих (дополнительных) двухполюсников, различные схемы амплитудно-частотных корректоров. Целью работы является закрепление знания соответствующих разделов курса ОТЦ и приобретение практических навыков в измерении входного сопротивления и рабочего ослабления амплитудно-частотных корректоров.

4.2. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Исполнителю лабораторной работы предоставляются измерительные приборы и два обратных двухполюсника. В процессе выполнения лабораторной работы следует:

- 1) составить требуемую цепь корректора, обладающего требуемым характером частотной зависимости рабочего ослабления;
- 2) составить цепь для измерения входного сопротивления и рабочего ослабления корректора и выполнить измерение этих характеристик в заданном диапазоне частот;
- 3) выполнить по результатам измерений необходимые расчёты, внести их в таблицы, удобные для сравнения с результатами предварительных расчётов, оценить качество расчётов и измерений путём вычисления максимальной величины относительного различия их результатов;
- 4) оформить отчёт о проделанной работе.

Пояснения к постановке экспериментов приведены в подразделе 4.6.3 настоящего руководства.

4.3. ЗАДАНИЕ НА ПОДГОТОВКУ К РАБОТЕ И ПРЕДВАРИТЕЛЬНОМУ РАСЧЁТУ

Подготовка к лабораторной работе заключается в изучении теории, выполнении предварительных расчётов, заготовке бланка отчёта и внесении в него результатов предварительных расчётов.

Сведения об обратных двухполюсниках можно найти в [1,2] (см. список источников), а также в подразделе 4.6.1 настоящего руководства.

Сведения о дополнительных двухполюсниках приведены в подразделе 4.6.1 настоящего руководства.

Основы теории амплитудных корректоров содержатся в [2] и разделе 4.6.1 настоящего руководства.

Исходные данные для предварительных расчётов приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1. Исходные данные для вариантов

№ бригады	Двухполюсник А		Двухполюсник Б		Схема корректора	A_K при увеличении частоты	Диапазон частот, кГц
	L, мГн	R, Ом	C', мкФ	G', мСм			
1	256	328	0,532	0,683	а	возрастает	0,3 - 3,4
2	240	321	0,245	0,327	б	возрастает	0,3 - 3,4
3	32,8	15,3	3,904	1,825	а	возрастает	0,3 - 3,4
4	50,8	12,7	1,630	0,408	б	возрастает	0,3 - 3,4
5	62,1	15,7	1,780	0,450	а	возрастает	0,3 - 3,4
6	59,7	15,0	1,714	0,431	б	убывает	0,3 - 3,4
7	36,0	9,3	3,34	0,859	а	убывает	0,3 - 3,4

8	260	49,7	0,497	0,095	б	убывает	0,3 - 3,4
9	51,0	25,6	1,477	0,742	а	убывает	0,3 - 3,4
10	31.4	29.9	3.456	3,291	б	убывает	0,3 - 3.4

По данным табл. 4.1 необходимо рассчитать:

- 1) величину параметра R_0 корректора;
- 2) составить схему корректора;
- 3) составить выражение комплексного входного сопротивления корректора, нагруженного на сопротивление R_0 , и вычислить его вещественную и мнимую составляющие, а также модуль на 5-ти частотах заданного частотного диапазона, включая граничные частоты;
- 4) на тех же частотах вычислить рабочее ослабление A_K корректора;
- 5) результаты расчётов скомпоновать в таблицу, предусмотрев в ней место для результатов эксперимента и величины относительной погрешности между результатами расчетов и экспериментов.

Пояснения к предварительным расчётам см. в подразделе 4.6.2 настоящего руководства.

4.4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

Проверьте свою подготовку по теории при помощи нижеследующих контрольных вопросов и заданий.

1. Дайте определение обратных и дополнительных двухполосников.
2. Вспомните требования к амплитудно- и фазочастотным характеристикам неискажающего четырёхполосника.
3. Как формулируются требования к рабочему ослаблению и рабочей фазе неискажающего четырёхполосника, в чём отличие по сравнению с требованиями к АЧХ и ФЧХ, чем обусловлены отличия?
4. В каких случаях допускается выполнение условий неискаженной передачи сигналов в ограниченном диапазоне частот?
5. Возможно ли на практике строгое выполнение условий неискаженной передачи сигналов? Обоснуйте ответ.
6. Изобразите различные схемы амплитудных корректоров (мостовую, Т-образную, перекрытую, Г-образные), укажите соотношения между элементами.
7. Покажите на схеме, как соединяются между собой источник сигналов, канал связи, корректор и приёмник сигналов.
8. Какое требование предъявляется к корректору в отношении его входного сопротивления?
9. Выведите формулу рабочей меры передачи G_K Г-образного корректора при включении его между нагрузочными сопротивлениями, равными R_0 .
10. Докажите, что пары двухполосников рис. 4.4а и 4.4б являются дополнительными.

4.5. ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЁТА

Отчёт по лабораторной работе должен содержать:

- 1) задание на предварительный расчёт;
 - 2) схемы двухполосников, из которых составляется схема исследуемого корректора;
 - 3) расчетные формулы и результаты расчётов величины параметра R_0 , входного сопротивления и рабочего ослабления корректора, сведённые в таблицы;
 - 4) графики частотной зависимости вещественной и мнимой составляющих, а также полного входного сопротивления и рабочего ослабления корректора;
 - 5) результаты измерений и расчётов по ним, сведённые в таблицы, а также графики полного входного сопротивления и рабочего ослабления, полученных экспериментально.
- Для удобства сравнения графики рассчитанных и измеренных частотных зависимостей (в данной работе графики Z_{ax} и A_K) строятся в общих осях координат и в одном масштабе; при этом, чтобы они не

сливались, их надо отличать цветом линий или каким-либо другим способом.

Расчётные и полученные экспериментально результаты следует помещать в таблицы, удобные для сравнения, в них же следует помещать результаты расчёта относительной погрешности расчётных и экспериментальных данных.

Пояснительный текст должен создавать смысловую увязку помещенного в отчёте материала. В конце текста следует дать оценку экспериментального материала, ориентируясь, в частности, на степень совпадения ожидаемых и фактически полученных результатов.

4.6. ПРИЛОЖЕНИЯ К РАБОТЕ 3. 4

4.6.1. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Академик А.А. Харкевич в своё время сказал, что перед наукой и техникой электрической связи стоят две важнейшие задачи: достижение высокой степени достоверности передаваемой информации и надёжности средств электрической связи.

Достоверность - есть идентичность передаваемой и принимаемой информации. Информация передаётся с помощью электрических сигналов связи. Поэтому можно считать, что достоверность будет достигнута, если сигнал, передаваемый источником сигналов, и сигнал, принимаемый приёмником сигналов, будут идентичны. Математически подобное соотношение сигналов записывается выражением:

$$y(t) = \kappa x(t - t_3), \quad (4.1) \text{ где } y(t) \text{ и } x(t) - \text{соответственно принимаемый приёмником и передаваемый источником сигналы; } \kappa -$$

масштабный коэффициент, $\kappa = \text{const}$; t_3 - время, в течение которого сигнал проходит от источника к приёмнику.

На рисунке 4.1 приведена структурная схема передачи электрических сигналов связи, где источник и приёмник представлены своими схемами

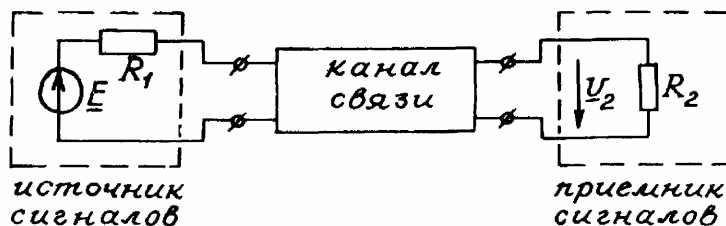


Рис.4.1

замещения, полученными на основании теоремы Тевенина (часто неудачно называемой теоремой об эквивалентном источнике напряжения), а канал связи изображен в виде четырёхполюсника.

Назовём рабочей передаточной функцией канала связи выражение:

$$T(j\omega) = \underline{U}_2(j\omega) / \underline{E}(j\omega). \quad (4.2)$$

Спектральный анализ показывает, что соотношение (4.1) выполняется, если амплитудно-частотная характеристика канала удовлетворяет требованию:

$$|T(j\omega)| = \kappa, \quad (4.3)$$

$$\arg[T(j\omega)] = -\omega t_3, \quad T(\omega) = \text{const} \text{ при } -\infty < \omega < +\infty, \text{ и фазочастотная характеристика канала удовлетворяет требованию:}$$

(4.4)

$$t_3(\omega) = \text{const} \text{ при } -\infty < \omega < +\infty.$$

Рабочая мера передачи через рабочую передаточную функцию (4.2) выражается формулой:

$$\underline{\Gamma}(j\omega) = A(\omega) + jB(\omega) = \ln \frac{1}{T(j\omega)} + \ln \sqrt{\frac{R_2}{4R_1}}, \quad (4.5)$$

где $A(\omega)$ - рабочее ослабление, а $B(\omega)$ - рабочая фаза.

Из (4.5) следует, что требования (4.3) и (4.4) преобразуются в требования к рабочему ослаблению и рабочей фазе следующим образом:

$$A(\omega) = \text{const}, \quad (4.6)$$

$$B(\omega) = \omega t_z \quad (4.7)$$

при $-\infty < \omega < +\infty$.

Соотношения (4.6) и (4.7) называют условиями неискаженной передачи сигналов.

Выполнить на практике условия (4.6) и (4.7) невозможно, да и не нужно. Последнее обусловлено двумя обстоятельствами.

Во-первых, все сигналы связи имеют ограниченный спектр, в связи с чем выполнение условий (4.6) и (4.7) можно ограничить полосой частот, содержащей спектр сигнала.

Во-вторых, все приёмники обладают так называемой "исправляющей способностью", под которой понимается способность приёмника обеспечивать достоверность приёма информации при допустимом искажении сигнала.

Таким образом, на практике условия неискаженной передачи (4.6) и (4.7) принимают вид:

$$A(\omega) \approx \text{const}, \quad (4.8)$$

$$B(\omega) \approx \omega t_z \quad (4.9)$$

при $\omega_1 \leq \omega \leq \omega_2$,

где ω_1 и ω_2 - граничные частоты полосы частот, содержащей спектр сигнала, а степень приближенности (4.8) и (4.9) определяется величиной исправляющей способности приёмника.

Отметим, что, если информация предназначена для восприятия человеческим ухом, то соблюдение условия (4.9) не требуется, так как ухо нечувствительно к начальным фазам спектральных составляющих звуковых сигналов.

Если условия (4.8) и (4.9) не выполняются с необходимой точностью, то рабочее ослабление и рабочую фазу искажающего четырёхполюсника "улучшают" (корректируют) путём каскадного присоединения к нему четырёхполюсников-корректоров амплитудно-частотных и фазочастотных искажений. Как правило, условия (4.8) и (4.9) корректируются отдельно, каждое - своим корректирующим четырёхполюсником.

При каскадном соединении двух четырёхполюсников (рис. 4.2) их рабочие меры передачи суммируются по формуле:

$$\underline{\Gamma} = \underline{\Gamma}_{\text{иск} \cdot R_1 Z_{\text{вх}}} + \underline{\Gamma}_{K Z_{\text{вх}} R_2}, \quad (4.10)$$

где $\underline{\Gamma}_{\text{иск} \cdot R_1 Z_{\text{вх}}}$ - рабочая мера передачи искажающего четырёхполюсника при включении его между сопротивлениями R_1 и $Z_{\text{вх}}$, $\underline{\Gamma}_{K Z_{\text{вх}} R_2}$ - рабочая мера передачи корректора при включении его между сопротивлениями R_2 и $Z_{\text{вх}}$.

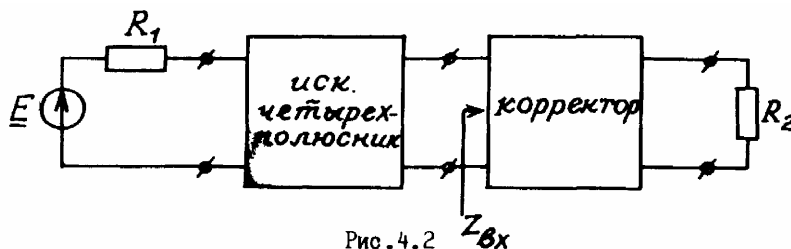


Рис. 4.2

Схема соединения четырехполюсника и корректора

Корректоры должны удовлетворять, по меньшей мере, двум требованиям.

1. Поскольку коррекции подлежит рабочая мера передачи $\underline{\Gamma}_{\text{иск} \cdot R_1 R_2}$

а в формулу (4.10) входит другая величина $\Gamma_{\text{нск.Р1}} Z_{\text{вх}}$ необходимо,

чтобы корректор при нагружении справа на сопротивление R_2 имел слева входное сопротивление $Z_{\text{вх}} = R_2$.

2. Корректор должен позволять получение требуемой частотной зависимости $A(\omega)$ или $B(\omega)$ достаточно простыми средствами.

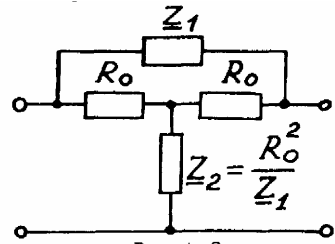
Существует несколько типов четырёхполюсников, удовлетворяющих приведённым выше требованиям.

Для корректирования амплитудно-частотных искажений широко применяются Т-образные перекрытые четырёхполюсники (рисунок 4.3).

При выполнении соотношения между сопротивлениями двухполюсников Z_1 и Z_2 вида

$$Z_1 \cdot Z_2 = R_0^2 \quad (4.11)$$

характеристические параметры этих четырёхполюсников определяются формулами



$$Z_c = \sqrt{Z_1 Z_2}, \quad (4.11a)$$

$$\Gamma_c = \ln\left(1 + \frac{Z_1}{R_0}\right)$$

Рис. 4.3.

Т-образная перекрытая схема АК

Двухполюсники, удовлетворяющие соотношению (4.11), являются обратными (взаимообратными).

Определение обратных двухполюсников таково:

дуальные двухполюсники, эквивалентные по активной мощности, называются обратными.

Помимо свойства (4.11), обратные двухполюсники обладают следующими свойствами:

1) схемы обратных двухполюсников - дуальны;

2) величины дуальных элементов обратных двухполюсников связаны

соотношениями:

$$G' = R/R_0^2, \quad L' = R_0^2 C, \quad C' = L/R_0^2, \quad (4.12)$$

где штрихом отмечены элементы

одного, а без штриха - другого из пары взаимобратных двухполюсников.

Ещё два типа корректоров (называемые Г-образными) образуются из пары дополнительных (взаимодополняющих) двухполюсников.

Дополнительными называют такие двухполюсники, сумма иммитансов которых (т.е. сопротивлений или проводимостей) - вещественна и не зависит от частоты. К дополнительным относятся пары двухполюсников, схемы которых приведены на рисунках 4.4а и 4.4б.

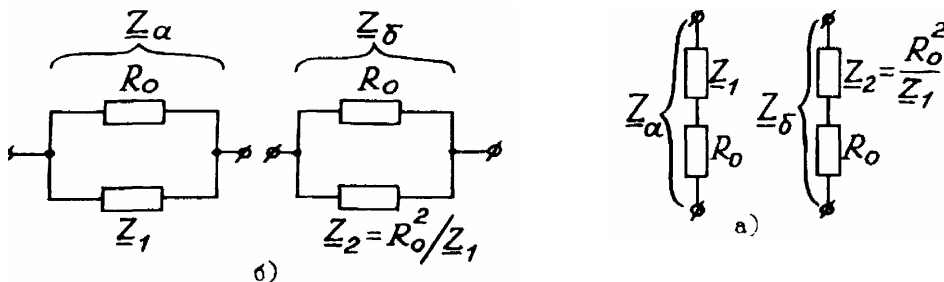


Рис. 4.4. Схемы дополнительных двухполюсников

Для 1-й пары двухполюсников (рис. 4.4а) справедливо соотношение

то есть при их параллельном соединении получаем двухполюсник с постоянным сопротивлением R_0 .

$$\frac{1}{Z_\alpha} + \frac{1}{Z_\delta} = \frac{1}{R_0},$$

$$Z_\alpha + Z_\delta = R_0,$$

Для 2-й пары двухполюсников (рис. 4.4б) справедливо соотношение то есть при их последовательном соединении получаем двухполюсник с постоянным сопротивлением R_0 .

Из пар дополнительных двухполюсников рисунка 4.4 образуются два типа Г-образных амплитудных корректоров, схемы которых (вместе с нагрузочным сопротивлением $R_2 = R_0$) приведены на рисунках 4.5а и б. По этим схемам составляются корректоры в настоящей лабораторной работе. Рабочая мера передачи и рабочее ослабление корректоров рисунка 4.5, включенных между

сопротивлениями источника сигнала $R_1 = R_0$ и приёмника сигнала $R_2 = R_0$ определяется формулами (4.13)

$$\Gamma_K = \ln \left(1 + \frac{Z_1}{R_0} \right), \quad A_K = \ln \left| 1 + \frac{Z_1}{R_0} \right|, \text{ Нн.}$$

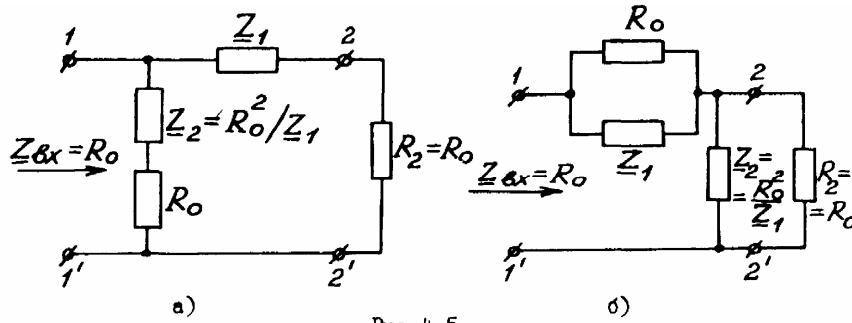


Рис. 4.5

Схемы Г-образных амплитудных корректоров

4.6.2. ПОЯСНЕНИЯ К ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫМ РАСЧЁТАМ

В таблице 4.1 буквами а и б обозначены схемы корректоров рисунков 4.5а и 4.5б соответственно. Схемы двухполюсников А и Б приведены на рисунке 4.6.

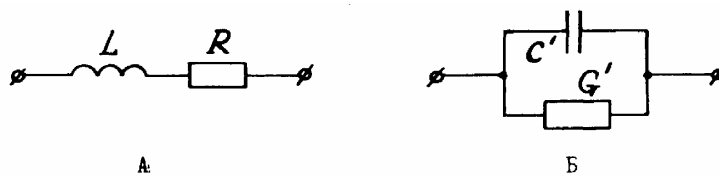


Рис. 4.6

Схемы двухполюсников для АК

Двухполюсники А и Б обратные, их элементы связаны соотношениями (4.12), из которых может быть определена величина параметра R_0 . В зависимости от характера изменения A_K в качестве двухполюсника Z_1 может быть выбран либо двухполюсник А, либо двухполюсник Б.

$$A_K = \ln \left| 1 + \frac{R + j\omega L}{R_0} \right| = \ln \left| 1 + \frac{R}{R_0} + j\omega \frac{L}{R_0} \right| = \frac{1}{2} \ln \left[\left(1 + \frac{R}{R_0} \right)^2 + \left(\omega \frac{L}{R_0} \right)^2 \right] \text{ Нн}$$

Подставим в формулу (4.13) для A_K вместо Z_1 сопротивление двухполюсника А и получим:

или

$$A_K = 10 \lg \left[\left(1 + \frac{K}{R_0} \right)^2 + \left(\omega \frac{L}{R_0} \right)^2 \right] \text{ дБ. (4.14)}$$

В этом случае, как следует из (4.14), A_K с ростом частоты возрастает. Теперь в качестве двухполосника Z_1 в схеме корректора используем двухполосник Б. Для этого случая

$$A_K = \ln \left| 1 + \frac{1}{R_o(G' + j\omega C')} \right| = \ln \left| \frac{1 + R_o G' + j\omega R_o C'}{R_o(G' + j\omega C')} \right| =$$

$$= \frac{1}{2} \ln \frac{(1 + R_o G')^2 + (\omega R_o C')^2}{(R_o G')^2 + (\omega R_o C')^2} \text{ Нн}$$

$$A_K = \text{или } 10 \lg \frac{(1 + R_o G')^2 + (\omega R_o C')^2}{(R_o G')^2 + (\omega R_o C')^2} \text{ дБ.} \quad (4.15)$$

В этом случае A убывает от величины

$$20 \lg \left(1 + \frac{1}{R_o G'} \right) \text{ дБ} \quad \text{до нуля.}$$

Изложенное выше позволяет правильно определить место двухполосников **А** и **Б** в схеме корректора по характеру изменения A_K с ростом частоты, а формулы (4.14) и (4.15) служат для расчёта частотной зависимости $A_K(\omega)$.

Для расчёта входного сопротивления по схеме корректора с включенными в неё двухполосниками **А** и **Б** и присоединённым сопротивлением нагрузки $R_2 = R_o$, составляется выражение $Z_{вх}(j\omega)$, по которому и осуществляется расчёт вещественной и мнимой составляющих, а также модуля входного сопротивления.

4.6.3. ПОЯСНЕНИЯ К ПОСТАНОВКЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Измерению подлежат;

- 1) частотная зависимость полного входного сопротивления $Z_{вх}(\omega)$ корректора;
 - 2) частотная зависимость рабочего ослабления $A_K(\omega)$ корректора.
- Измерения осуществляются при гармонических токах и напряжениях в тональном диапазоне частот (0,3 - 3,4)кГц.

Для измерений используются:

- 1) генератор синусоидального напряжения, 2) электронный вольтметр,
- 3) три магазина сопротивлений, 4) лабораторный стенд с двумя обратными двухполосниками **А** и **Б**.

На выходе генератора поддерживается постоянным напряжение в пределах $I - 5 \text{ В}$.

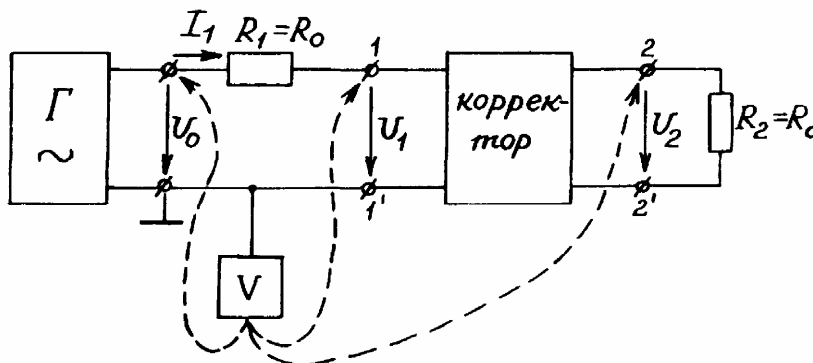


Рис. 4.7

Схема исследования амплитудного корректора

Измерения осуществляются в схеме рисунка 4.7. Напомним, что корректор выполняется по схемам рисунков 4.5а или 4.5 б (в зависимости от задания в таблице 4.1). Электронным вольтметром V измеряются напряжения U_0 , U_1 и U_2 .

Так как входное сопротивление корректора чисто активно, справедливы следующие соотношения:

$$\begin{aligned}
 U_0 &= I_1 R_1 + U_1, \\
 U_1 &= I_1 Z_{вх}, \\
 I_1 &= (U_0 - U_1) / R_1,
 \end{aligned}
 \tag{4.16}$$

При помощи U_1 корректора.

формулы (4.16) по результатам измерений U_0 и рассчитывается входное сопротивление

Рабочее ослабление измеряется в схеме рис. 4.7 при $R_1 = R_2 = R_0$.

На основании формулы (4.5) расчетная формула $A_K(\omega)$ принимает вид:

$$A_K(\omega) = 20 \lg \frac{U_0}{2U_2} \text{ дБ}. \tag{4.17}$$

Формула (4.17) используется для расчета частотной зависимости рабочего ослабления $A_K(\omega)$ по результатам измерения напряжений U_0 и U_2 .

Рекомендуется следующая организация измерений:

- 1) из двухполюсников **А** и **Б** лабораторного стенда и одного магазина сопротивлений составляется требуемая схема корректора;
- 2) затем составляется измерительная цепь по схеме рис. 4.7;
- 3) измеряются напряжения U_0 , U_1 и U_2 на 10-ти частотах тонального диапазона, включая граничные частоты и те частоты, на которых осуществляется расчет частотных зависимостей $Z_{вх}$ и $A_K(\omega)$.

Результаты измерений и расчётов по ним рекомендуется занести в таблицу, подобную таблице 4.2.

Таблица 4.2. Данные измерений и расчетов $Z_{вх}$ и A_K

f , кГц	$f_1=0.3$	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6	f_7	f_8	f_9	$f_{10}=3.4$
U_0 , В										
U_1 , В										
U_2 , В										
$Z_{вх}$, кОм										
A_K , дБ										

Для сравнения расчётных и измеренных значений $Z_{вх}$ и A_K их следует свести в таблицу 4.3.

Таблица 4.3. Сравнительные данные по расчету и измерению $Z_{вх}$ и A_K

f , кГц	$f=0,3$									$f=3,4$
$Z_{вх}$ кОм	расч.									
	измер.									
	δ , %									
A_K дБ	расч.									
	измер.									
	δ , %									

4.6.4 Выполнение работы на ЭВМ

6.4.1 Для выполнения работы 3-4 на ЭВМ необходимо запустить программу “**Electronics Workbench 4.0 (EWB)**”.

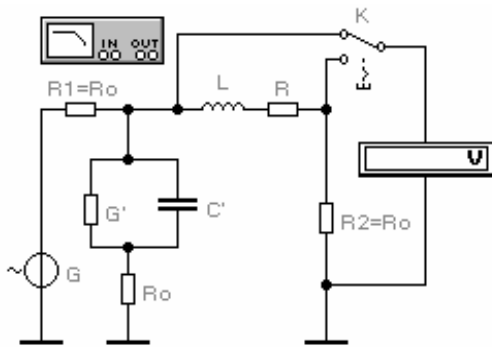


Рис. 4.8 Схема исследования АК на ЭВМ

Работа с **EWB** описана в [4-6]. Для исследования амплитудного корректора следует “собрать” схему аналогичную рисунку 4.8, где **АК** собирается в соответствии с вариантом задания. При этом используются виртуальные элементы и приборы: **L, C, R**, генератор **G**, вольтметр **V**, измеритель частотных характеристик (**ИЧХ**) – **Bode Plotter**, ключ **K**. Для сборки схемы необходимо “вытащить” с помощью курсора и левой клавиши “мыши” соответствующие элементы и приборы, затем соединить их “проводниками”.

6.4.2 Установить значения элементов в соответствии с вариантом, причем для элемента **G'** величину установить как для резистора то есть равной $1/G'$. Установить частоту генератора **G** 300 Гц, напряжение генератора 1 В, режим

измерений вольтметра **AC** (переменное напряжение), сопротивление 100 МОм (100 MN).

6.4.3 “Запустить” схему на моделирование кнопкой в правом верхнем углу окна интерфейса, затем выключить и считать напряжение на входе **АК** то есть U_1 . Нажать клавишу **“K”** на латинском регистре, переключив тем самым вольтметр к выходу **АК**. Повторить “эксперимент” и записать показания U_2 . При этом $U_0=1$ В. Снова нажав **“K”**, вернуть ключ в исходное состояние и аналогично провести измерения на остальных расчетных частотах. Рассчитать рабочее ослабление по “измеренным” данным.

6.4.4 Подключить **ИЧХ**. Для этого соединить левый зажим **ИЧХ “OUT”** к верхнему выводу генератора **G**, а левый зажим **“IN”** к верхнему выводу **R2**. Установить режим измерений, как показано на рисунке 4.9, нажимая соответствующие “кнопки” на панели прибора и при необходимости, вводя нужные числовые данные. В указанном подключении и режимах **“MAGNITUDE”** и **“LOG”** по вертикали **“Bode Plotter”** показывает ослабление в децибелах по величине обратной модулю коэффициента передачи. Рабочее ослабление при $R_1=R_2$ следует вычислять по формуле: $A_p=A_{ИЧХ}-6$ (дБ). Запустить схему на моделирование, выключить и зарисовать получившуюся характеристику. Далее снять показания **ИЧХ** для ослабления на тех же частотах, что и в п. 6.4.3 с помощью визира измерителя, управляемого “кнопками” стрелками на панели **ИЧХ**, считывая показания из “окошек” измерителя. При этом для более точной установки частоты необходимо подбирать поближе к ней частоты нижней и верхней границ **ИЧХ “I и F”**. Рассчитать A_p и сравнить с теоретическим.

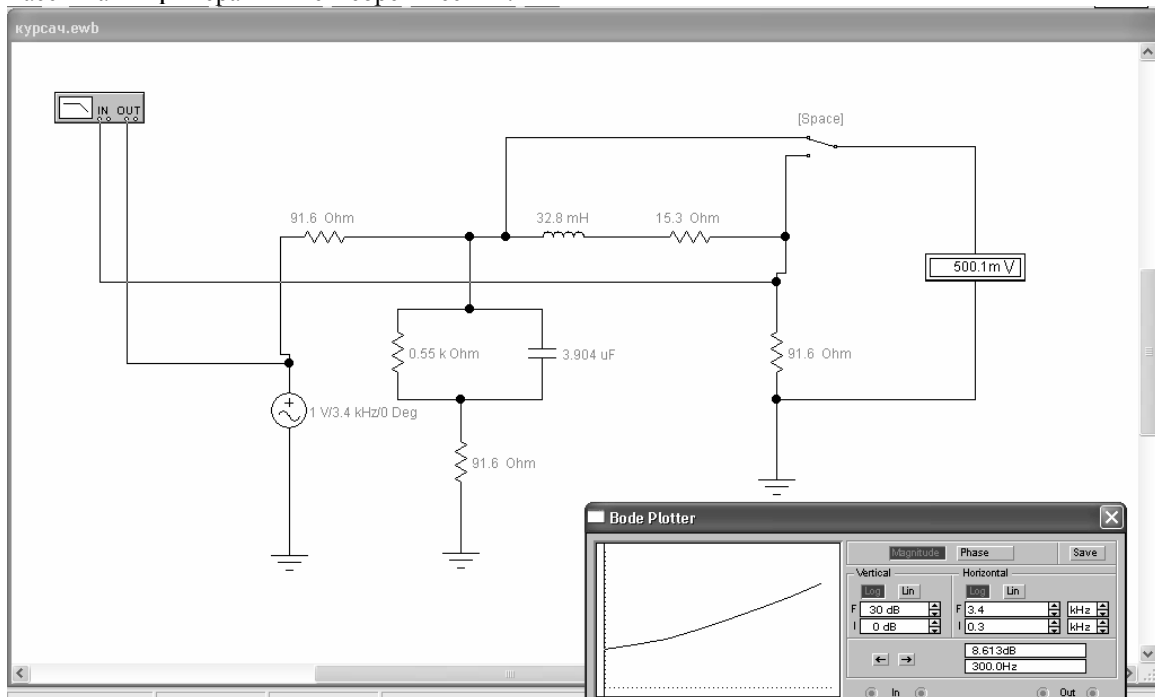


Рис. 4.9. Вид экрана ЭВМ при исследовании корректора

6.4.5 Перейти в режим **“PHASE”**, нажав соответствующую кнопку на панели **ИЧХ**. Установить

пределы измерений 0° и 90° , запустить схему на моделирование, выключить и зарисовать фазовую характеристику. Далее измерить фазу с помощью визира на расчетных частотах.

6.4.6 По усмотрению преподавателя рассчитать теоретическую фазовую характеристику АК как аргумент комплексного выражения $1 + \underline{Z}_1 / R_0$.

6.4.7 Проанализировать полученные результаты и сделать выводы.

Литература

1. Алексеев А.П. Информатика 2001. –М.: Солон-Р, 2003, с. 269-329.
2. Бакалов В.П., Дмитриков В.Ф., Крук Б.И Основы теории цепей. -М.: Радио и связь. 2009, с. 475-511.
3. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. –М.: Гардарики, 1999, с. 341-349.
4. Карлащук В. И. Электронная лаборатория на IBM PC. –М.:Солон-Р, 2005. – 506 с.
5. Киреев В.Р., Крухмалева В.Д., Михайлов В.И. Методические указания к лабораторным работам по 3 части курса ОТЦ, ПГАТИ, каф. ТЭЦ, Самара 2001.
6. Шебес М.Р., Каблукова М.В. Задачник по теории линейных электрических цепей. М.: Высшая школа, 1990, с. 463-499.

4. РАБОТА 3-5 “ РАСЧЁТ И ИЗМЕРЕНИЕ РАБОЧЕГО ОСЛАБЛЕНИЯ ПОЛУЗВЕНЬЕВ ФНЧ ТИПОВ «к» и «т» ”

5.1. ЦЕЛЬ И СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Целью настоящей лабораторной работы является знакомство с основами теории LC -фильтров, рассчитываемых по характеристическим параметрам. В лабораторной работе из набора, содержащего катушку индуктивности и два конденсатора, составляются полузвено ФНЧ типа «к», а потом полузвено типа «м». Затем эти полузвенья включаются между источником и приёмником сигналов с оптимальными значениями внутренних сопротивлений, и осуществляется измерение рабочего ослабления в полосах эффективного пропускания и задерживания, а также на частоте бесконечного ослабления. По результатам измерений выполняются необходимые расчёты, строятся частотные характеристики рабочего ослабления, выполняется сравнение расчётных и экспериментальных значений ослабления, делается заключение о качестве эксперимента.

5.2. ЗАДАНИЕ НА ПОДГОТОВКУ К РАБОТЕ И ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ РАСЧЁТ

Подготовку следует начать с изучения основ теории LC -фильтров, рассчитываемых по характеристическим параметрам. Сведения по этой теории Вы найдёте в литературе (см. список ниже), а также в приложении 6.1 к настоящему руководству.

Исходные данные для предварительного расчёта приведены в таблице 5.1. Схемы полузвеньев ФНЧ типов «к» и «м» составляются по схемам рисунков 5.1 а и б соответственно.

Таблица 5.1. Исходные данные для расчетов

Номер бригады	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$L_1, \text{мГн}$	214	214,8	215	215,4	215,47	150	150	100	100	50
$C_1, \text{мкФ}$	0,01	0,02	0,02	0,03	0,01	0,015	0,01	0,02	0,015	0,02
$C_2, \text{мкФ}$	0,0052	0,01	0,01	0,01	0,0098	0,01	0,0047	0,0033	0,0068	0,0068
K_1	0,8	0,73	0,78	0,81	0,69	0,71	0,7	0,7	0,85	0,9
$R_k, \text{Ом}$	80	80	80	80	80	55	55	55	55	15

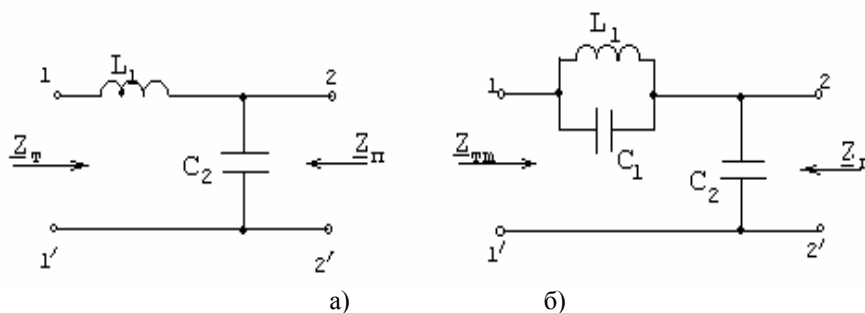


Рис. 5.1. Схемы полузвеньев ФНЧ типов «к» и «м»

Для полузвена типа «К» необходимо рассчитать:

- частоту среза f_c ,
- номинальное сопротивление R_0 ,
- оптимальные нагрузочные сопротивления R_1 и R_2 ,
- рабочее ослабление полузвена, нагруженного на сопротивления R_1 и R_2 на частотах $0,2 \bullet f_c$; $0,4 \bullet f_c$; $0,6 \bullet f_c$; f_c ; $1,2 \bullet f_c$; $1,5 \bullet f_c$; $2,0 \bullet f_c$; $3,0 \bullet f_c$.

Для полузвена ФНЧ типа «м» необходимо рассчитать:

- значение параметра m ,

- б) частоту среза f_c ,
- в) частоту бесконечного ослабления f_∞ ,
- г) номинальное сопротивление R_0 ,
- д) коэффициент использования полосы пропускания K_I ,
- е) оптимальные нагрузочные сопротивления R_1 и R_2 ,
- ж) рабочее ослабление полувзвена типа "м" на тех же частотах, что и для полувзвена "к" и на частоте f_∞ .

Пояснения к предварительному расчёту и расчётные формулы приведены в приложении 6.2 к данному руководству.

5.3. ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЁТА

Оформление отчёта начинается вместе с выполнением предварительного расчёта. Для отчёта следует взять два двойных тетрадных листа (восемь тетрадных страниц). В отчёт заносятся исходные данные и результаты расчётов, схемы и графики. Результаты расчёта функций по точкам, а также результаты измерения частотных характеристик и результаты расчётов по ним следует заносить в таблицы, удобные для сравнения результатов расчётов и экспериментов. Необходимо рассматривать отчёт по лабораторной работе как рассказ о проделанной работе. Формулы, рисунки и таблицы должны быть пронумерованы для удобства ссылки на них в тексте и связаны по смыслу содержания отчёта пояснительным текстом. Важным элементом отчёта является сравнение ожидаемых (то есть расчётных) и экспериментальных (то есть полученных измерением) результатов. С этой целью графики функций по результатам расчётов и экспериментов нужно строить в одних и тех же осях (на одном рисунке). В тех случаях, когда экспериментальные характеристики рассчитываются по измеренным величинам (например, рабочее ослабление по измеренным напряжениям), эти последние должны быть включены в таблицы результатов измерений. Сравнение расчётных и экспериментальных данных должно быть осуществлено также путём вычисления наибольшей величины относительного их расхождения (погрешности).

Отчёт должен заканчиваться разделом, содержащим результаты осмысления проделанной работы, оценку качества эксперимента и выводы.

5.4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

Проверьте подготовленность к выполнению лабораторной работы по нижеследующим контрольным вопросам.

1. Сколько существует видов полувзвеньев ФНЧ типа «к»?
2. Сколько существует видов полувзвеньев ФНЧ типа «m» и как они называются? Изобразите схемы полувзвеньев ФНЧ типов «к» и «m».
3. Сколькими параметрами определяются полувзвенья ФНЧ типов «к» и «m»?
4. Дайте смысловую оценку совокупности схемных параметров (L_1 , C_1 и C_2 на рисунке 5.1) и совокупности R_0 , f_c и m .
5. Можно ли полувзвено типа «к» считать полувзвеном типа «m» при определённом значении m ; если да, то при каком значении m ?
6. Какое из полувзвеньев («к» или «m») лучше?
7. Какими элементами схемы полувзвена типа «m» определяется всплеск ослабления? Как по ним рассчитать величину частоты f_∞ ?
8. Дайте оценку моментам сходства и различия понятий «характеристическое» и «рабочее» ослабления. Могут ли эти понятия совпадать? При выполнении каких условий?
9. Какое из двух понятий A_p и A_c является более общим?
10. Можно ли обойтись одним из этих понятий? Если можно, то каким?

5.5. ЗАДАНИЕ НА ПОСТАНОВКУ ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Собрать схему полувзвена ФНЧ типа «К» (рисунок 5.1а) и включить её в рабочую измерительную цепь рисунка 5.2.

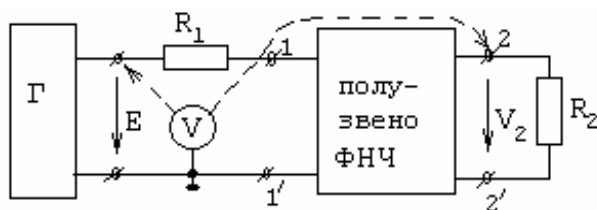


Рис. 5.2. Схема измерения рабочего ослабления

2. Установить на магазинах сопротивлений рассчитанные значения R_1 и R_2 .
3. Устанавливая на генераторе частоты, указанные в задании на предварительный расчёт, и сохраняя напряжение $E=10$ В неизменным на всех частотах, снять частотную зависимость U_2 , E и U_2 измерять электронным вольтметром V (рисунок 5.2).
4. По значениям E и $U_2(f)$ рассчитать частотную зависимость $A_p(f)$.
5. Собрать схему полувзвена ФНЧ типа «m» (рисунок 5.1б), включить его в измерительную цепь (рис. 5.2), установить рассчитанные значения R_1 и R_2 , повторить измерения на частотах в ПЭП и ПЭЗ и расчёты по п.4. Необходимо при этом иметь в виду, что частота среза для полувзвенов типов «к» и «m» имеет разную величину, вследствие чего и измерения для этих полувзвенов осуществляются на разных частотах. Кроме того, реальное значение частоты f_∞ следует определять экспериментально по минимуму величины U_2 .

5.6. ПРИЛОЖЕНИЯ

5.6.1. НЕКОТОРЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕОРИИ

В настоящее время существуют два основных способа расчёта электрических фильтров: по характеристическим и по рабочим параметрам.

И в том, и в другом случаях основанием для расчёта являются требования к рабочим параметрам, в первую очередь к рабочему ослаблению. Но при расчёте по характеристическим параметрам сначала требования к рабочим параметрам переводятся в требования к характеристическим параметрам и лишь по ним формируется схема фильтра.

При расчёте по рабочим параметрам схема фильтра формируется непосредственно по рабочим параметрам.

При расчёте фильтра важной задачей является получение схемы фильтра с минимальным числом элементов при безусловном выполнении технических требований, поскольку при этом достигаются минимальные стоимость, вес, габариты и максимальные технологичность, стабильность характеристик и т.д. Однако качество частотных характеристик возрастает с увеличением сложности фильтра, т.е., в конечном счёте, числа элементов схемы. И в этом плане расчёт по характеристическим параметрам уступает расчёту по рабочим параметрам.

Уже перевод требований к рабочему ослаблению в требования к характеристическому ослаблению влечёт некоторое излишнее усложнение схемы фильтра. Кроме того, при расчёте по характеристическим параметрам минимальной порцией усложнения фильтра является полувзвено, т.е., применительно к ФНЧ-прототипу - два-три элемента схемы, в то время как минимальная порция усложнения фильтра при расчёте по рабочим параметрам - это увеличение его порядка на единицу, т.е. добавление одного элемента к схеме ФНЧ-прототипа.

В силу этих обстоятельств в последнее время расчёту по рабочим параметрам отдаётся предпочтение. Однако расчёт по характеристическим параметрам не утратил полностью своего значения, поскольку наращивание сложности резонаторных фильтров (пьезоэлектрических, магнитострикционных и др.) осуществляется порезонаторно, а схемы замещения резонаторов содержат три и более элементов.

Соотношение между характеристическим A_c и рабочим A_p ослаблением фильтра устанавливается соотношением

$$A_p = A_c + A_{отр},$$

где $A_{отр}$ - так называемое ослабление отражения, обусловленное несогласованным нагружением фильтра.

В характеристической полосе пропускания (ПП) фильтра без потерь $A_c=0$ и $A_p=A_{отр}>0$, в характеристической полосе задерживания (ПЗ) $A_c>0$ (для ФНЧ см. рисунок 5.3), значения $A_{отр}$

$$\text{ограничены неравенством: } A_{отр} > -0,69 \text{ Нп} = -6 \text{ дБ.}$$

Полосой эффективного пропускания (ПЭП) называют часть ПП, в которой рабочее ослабление не превосходит требуемой величины ΔA .

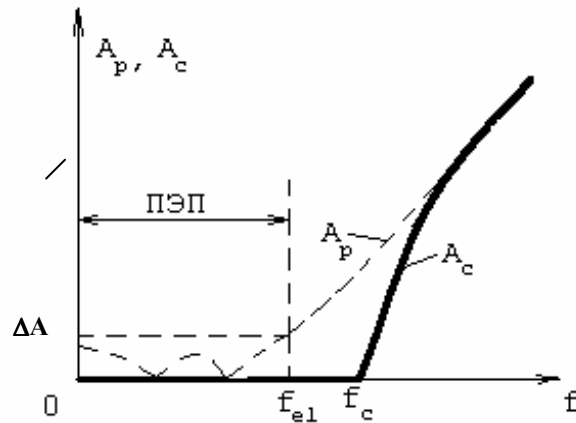


Рис. 5.3 Примеры графиков рабочего и характеристического ослаблений

Здесь f_{e1} – граничная частота ПЭП.

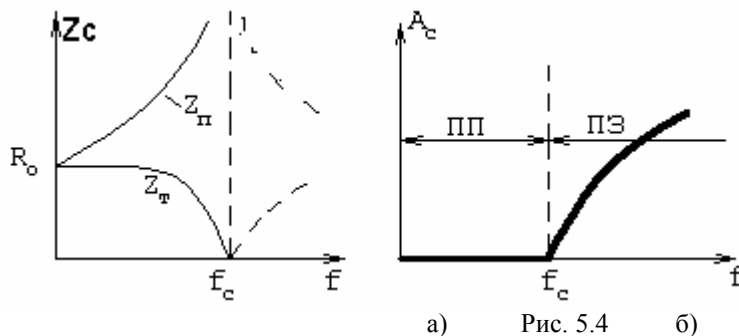
Степень использования ПП оценивается величиной коэффициента использования ПП: $K_1 = f_{e1}/f_c < 1$.

При расчёте фильтра по характеристическим параметрам стремятся увеличить K_1 , поскольку это приводит к упрощению схемы фильтра. При заданном значении K_1 можно так подобрать сопротивления нагрузки фильтра R_1 слева и R_2 – справа, так что $A_{отр}$ в ПЭП минимизируется. Соответствующие формулы для ползунов типов «к» и «т» приведены в приложении 5.6.2.

5.6.2. ПОЯСНЕНИЯ К ПРЕДВАРИТЕЛЬНОМУ РАСЧЁТУ

Ползуно ФНЧ типа «к» полностью определяется двумя схемными элементами (L_1 и C_2 на рисунке 5.1а) или двумя параметрами частотных характеристик: номинальным сопротивлением R_0 и частотой среза f_c (см. рисунок 5.4), которые связаны соотношениями:

$$R_0 = \sqrt{\frac{L_1}{C_2}}, \quad f_c = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{1}{\sqrt{L_1 \cdot C_2}} \quad (5.1)$$



а) б) Рис. 5.4 Характеристики ползуна ФНЧ типа «к»

На рисунке 5.4 Z_T и $Z_Π$ – характеристические сопротивления соответственно с Т- и Π-образной сторон, Ω -нормированная текущая частота,

$$Z_i = \frac{R_0}{\sqrt{1 - \Omega^2}}, \quad Z_0 = R_0 \cdot \sqrt{1 - \Omega^2}, \quad \Omega = \frac{f}{f_c}$$

Характеристическое ослабление A_c в ПП равно нулю, а в ПЭ рассчитывается по формуле:

$$A_c = 20 \log \left(\frac{1+q}{1-q} \right), \quad q = \frac{\Omega}{\sqrt{\Omega^2 - 1}}$$

Рабочее ослабление ползуна типа «к» рассчитывается по формуле:

$$A_p = 10 \lg \left[\left[\left(1 - \Omega^2 + \frac{R_1}{R_2} \right)^2 + \Omega^2 \left(\frac{R_1}{R_0} + \frac{R_0}{R_2} \right)^2 \right] \frac{R_2}{4R_1} \right], \text{ дБ} \quad (5.2)$$

справедливой как в ПП, так и в ПЗ, причём для минимизации максимумов огибающей $A_{отр}$ в ПЭП сопротивления нагрузки R_1 с Т-образной и R_2 с П-образной сторон при заданном значении K_1 рассчитываются по формулам:

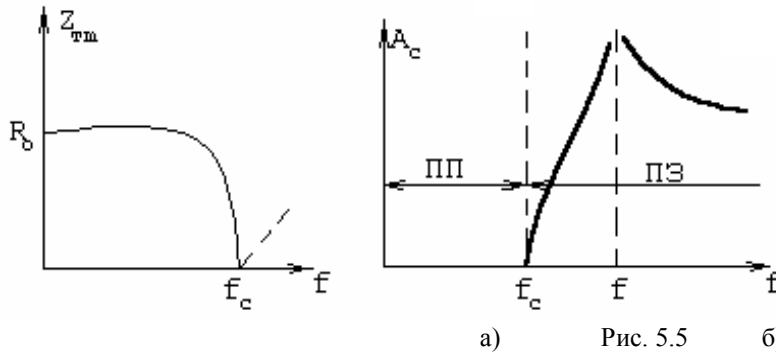
$$R_1 = R_0 \cdot \sqrt[4]{1 - (K_1)^2}, \quad (5.3)$$

$$R_2 = \frac{R_0}{\sqrt[4]{1 - (K_1)^2}}$$

Задание на предварительный расчёт для полувзвешенного ФНЧ типа «к» выполняется по значениям L_1 , C_2 и K_1 и формулам (5.1)-(5.4).

Полувзвешенный ФНЧ типа «м» полностью определяется тремя схемными параметрами (L_1 , C_1 и C_2 на рисунке 5.1б) или тремя параметрами частотных характеристик R_0 , f_c и m (см. рисунок 5.5), которые связаны соотношениями:

$$R_0 = \sqrt{\frac{L_1}{C_2}}, \quad f_c = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{1}{\sqrt{L_1 \cdot (C_1 + C_2)}}, \quad m = \sqrt{\frac{C_2}{C_1 + C_2}}. \quad (5.4)$$



а) Рис. 5.5 б)
Характеристики полувзвешенного ФНЧ типа «м»

При $C_1 \rightarrow 0$ $m \rightarrow 1$, схема и расчётные формулы полувзвешенного ФНЧ типа «м» переходят в схему и расчётные формулы полувзвешенного ФНЧ типа «к» (сравни формулы 5.1 и 5.5, схемы а и б на рис. 5.1). При этом частота всплеска затухания f_∞ устремляется в бесконечность.

$$f_\infty = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{1}{\sqrt{L_1 \cdot C_1}}. \quad (5.6)$$

При заданном значении m возможна минимизация максимумов огибающей $A_{отр}$ в ПЭП при заданном коэффициенте использования ПП:

$$K_1 = \frac{\sqrt{1 - 2 \cdot m^2}}{1 - m^2} \quad (5.7)$$

и оптимальных значениях нагрузочных сопротивлений R_1 с Т-образной стороны:

$$R_1 = \frac{R_0}{\sqrt[4]{2 \cdot \sqrt{1 - (K_1)^2} \cdot \sqrt{1 + \sqrt{1 - (K_1)^2}}}} \quad (5.8)$$

и R_2 с П-образной стороны:

$$R_2 = \frac{R_0}{\sqrt[4]{1 - (K_1)^2}} \quad (5.9)$$

Рабочее ослабление как в ПП, так и в ПЗ определяется формулой:

$$A_p = 10 \lg \left[\left(1 + \frac{R_1}{R_2} - \frac{\Omega^2}{1 - \Omega^2 / \Omega_\infty^2} \right)^2 + \Omega^2 \left(\frac{R_1}{R_0} + \frac{R_0}{R_2} \cdot \frac{1}{1 - \Omega^2 / \Omega_\infty^2} \right)^2 \right] \frac{R_2}{4R_1}, \text{ дБ} \quad (5.10),$$

а на частоте f_∞

$$A_{p_\infty} = 10 \lg \left[\left(\frac{R_1 + R_2 + Z_p}{R_2} \right)^2 + \frac{m^2}{1 - m^2} \left(\frac{R_1 + Z_p}{R_0} \right)^2 \right] \frac{R_2}{4R_1}, \text{ дБ} \quad (5.11)$$

где $Z_p = \frac{L_1}{C_1 R_K}$. (5.12)

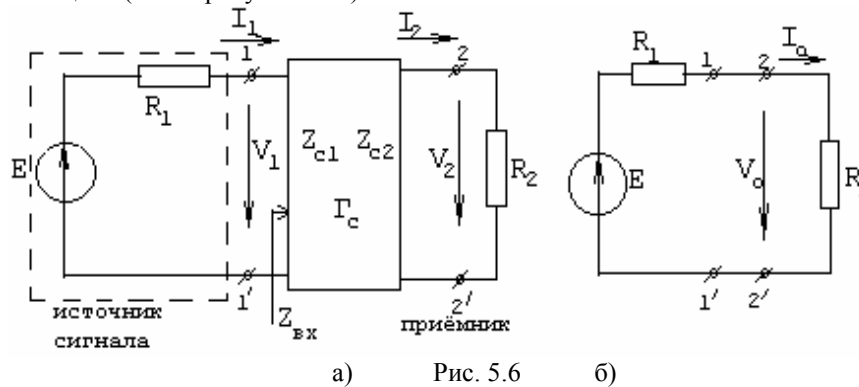
Задание на предварительный расчёт для полувзвешенного ФНЧ типа «m» выполняется по значениям L_1, C_1, C_2, R_K и формулам (5.5)-(5.12).

5.6.3. ИЗМЕРЕНИЕ РАБОЧЕГО ОСЛАБЛЕНИЯ

Для начала поясним понятие рабочей меры передачи, поскольку в литературе это непростое понятие не получило необходимого освещения.

Рабочая мера передачи является средством измерения условий прохождения сигнала от источника с внутренним сопротивлением R_1 через заданный четырёхполюсник к приёмнику сигналов со входным сопротивлением R_2 (рисунок 5.6а).

Всякое измерение есть сравнение с эталоном. В данном случае оценка условий прохождения сигнала через заданный четырёхполюсник осуществляется путём сравнения с условиями прохождения сигнала в эталонной цепи (схема рисунка 5.6б).



а) Рис. 5.6 б)
Схема оценки прохождения сигнала

Этот эталон обладает тремя замечательными качествами:

1) в нём приёмник потребляет максимальную мощность, что обеспечивает максимальное отношение мощности сигнала к мощности помехи

$$P_0 = \frac{E^2}{4 \cdot R_1},$$

2) в нём отсутствуют амплитудно-частотные искажения,

3) отсутствуют фазо-частотные искажения.

Количественное сравнение осуществляется, как известно, двумя способами: 1) по формуле «на сколько...» и 2) по формуле «во сколько...».

Для рабочей меры передачи принят 2-ой способ, она вычисляется по формуле:

$$\underline{G}_p = \frac{1}{2} \ln \frac{U_0 I_0}{U_2 I_2} = A_p + jB_p, \quad (5.13)$$

где U_0, I_0 - комплексы напряжения и тока приёмника в эталонной схеме; U_2, I_2 - комплексы напряжения и тока в рабочей схеме передачи сигнала.

Логарифмический масштаб, принятый в формуле (5.13), очень удобен, поскольку позволяет отдельно оценить ослабление мощности сигнала и изменение начальной фазы сигнала. В самом деле, рабочее ослабление A_p даёт в логарифмическом масштабе изменение активной мощности сигнала на пути от источника к приёмнику через заданный четырёхполюсник:

$$A_p = \frac{1}{2} \ln \left| \frac{U_0 I_0}{U_2 I_2} \right| = \frac{1}{2} \ln \frac{U_0 I_0}{U_2 I_2} = \frac{1}{2} \ln \frac{P_0}{P_2}, \text{ Нп,}$$

а рабочая фаза B_p - изменение начальной фазы напряжения или тока:

$$B_p = \frac{1}{2} (\arg U_0 + \arg I_0 - \arg U_2 - \arg I_2) = \arg U_0 - \arg U_2 = \\ = \arg I_0 - \arg I_2.$$

В настоящее время рабочее ослабление принято измерять в децибелах (дБ), число дБ определяется по формуле:

$$A_p = 10 \cdot \log \left(\frac{P_0}{P_2} \right), \text{ дБ} \quad (5.14)$$

Формула (5.13) неудобна, так как измерение мощностей сложно. Легче всего на практике измерять напряжение. Для практического измерения используется формула A_p , в которой мощности выражены через напряжения:

$$P_0 = U_0 I_0 = \frac{E}{2} \frac{E}{2 R_1} = \frac{E^2}{4 R_1}, \quad P_2 = U_2 I_2 = \frac{U_2^2}{R_2}, \\ A_p = 10 \lg \left[\frac{E^2 R_2}{4 R_1 (U)^2} \right] = 20 \lg \left(\frac{E}{2 U_2} \right) \left(\frac{R_2}{R_1} \right)$$

Измерение рабочего ослабления осуществляется косвенно в схеме рисунка 5.2. Напряжение на зажимах генератора E имитирует ЭДС источника сигнала, магазин сопротивлений R_1 - его внутреннее сопротивление. Измеряя напряжения и подставляя их величины в (5.15), получаем величину A_p в дБ.

В заключение отметим, что формула (5.13) для G_r возникла не случайно. Она сконструирована «по образу и подобию» формулы для характеристической меры передачи G_c , которая при $R_2 = Z_{c2}$ (см. рисунок 5.6а) имеет вид:

$$G_c = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{U_1 I_1}{U_2 I_2} \right),$$

а при дополнительном условии $R_1 = Z_{c1}$ переходит в формулу G_r , поскольку входной контур, содержащий ЭДС E , сопротивление R_1 и входное сопротивление четырёхполюсника $Z_{вх} = Z_{c1} = R_1$, превращается в эталонную цепь рисунка 5.6б, так как $U_1 = E/2 = U_0$ и $I_1 = E/2R_1 = I_0$.

5.6.4 Выполнение работы на ЭВМ

6.4.1 Для выполнения работы 3-5 на ЭВМ необходимо запустить программу “**Electronics Workbench 4.0 (EWB)**”. Работа с **EWB** описана в [6,7].

Следует “собрать” схему рисунка 5.7, используя виртуальные элементы и приборы: **L**, **C**, **R**, генератор **-G**, вольтметр – **multimeter**, измеритель частотных характеристик (ИЧХ) – **Bode Plotter**. Для сборки схемы нужно “вытащить” с помощью курсора “мыши” и ее левой клавиши соответствующие элементы и приборы, соединить их “проводниками”.

6.4.2. Установить: величины элементов ФНЧ типа “**K**” в соответствии с вариантом, режим измерения вольтметра (**multimeter**) как показано на рисунке 5.7 (V.~), частоту генератора **1 Гц** (частоту **0** установить нельзя), напряжение **1 В**. Запустить схему на моделирование нажатием кнопки в верхнем правом углу окна **EWB** и записать напряжение на выходе фильтра (U_2). При этом $E=1$ В. Аналогичным образом измерить напряжение на остальных расчетных частотах. Рассчитать рабочее ослабление на всех частотах по “измеренным” данным.

6.4.3. Включить последовательно с индуктивностью **L1** резистор **Rk**, имитирующий сопротивление потерь катушки. Величину **Rk** установить в соответствии с вариантом. Подключить ИЧХ (**Bode Plotter**). Для этого соединить левый зажим ИЧХ “**OUT**” к верхнему выводу **G**, а левый зажим “**IN**” к верхнему выводу **R2**. Установить режим измерений, как показано на рисунке 5. 8, нажимая соответствующие “кнопки” на панели прибора. Запустить схему на моделирование и зарисовать получившуюся характеристику. В

указанном включении и режимах “MAGNITUDE” и “LOG” по вертикали “Bode Plotter” показывает ослабление в децибелах по величине обратной модулю коэффициента передачи. Рабочее ослабление следует определять по формуле: $A_p = A_{ИЧХ} - 20 \cdot \lg 2 + 10 \cdot \lg (R_2/R_1)$ (дБ).

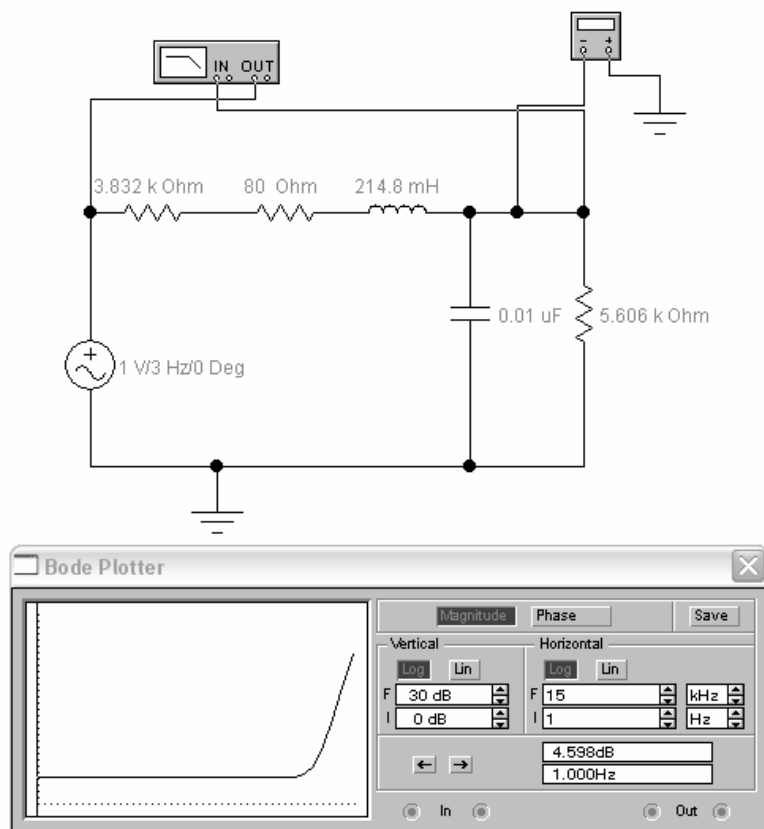


Рис. 5.7. Схема исследования ФНЧ “*k*, *m*” на ЭВМ

6.4.4. Далее снять показания ИЧХ для ослабления на тех же частотах, что и в п. 6.4.2 с учетом потерь в катушке индуктивности с помощью визира измерителя, управляемого “кнопками” со стрелками на панели ИЧХ. При этом для более точной установки частоты необходимо подбирать поближе к ней частоты нижней и верхней границ ИЧХ “**I** и **F**”. Рассчитать рабочее ослабление с учетом **R_k** и сравнить с теоретическим.

6.4.5. Выполнить аналогичные исследования по измерению частотных характеристик для ФНЧ типа “*m*” как в п.6.4.1,2,3,4 (сначала без **R_k**, затем с ним), подключив параллельно индуктивности **L1** конденсатор **C1** и устанавливая удобные для “измерений” параметры приборов по рисунку 5.8.

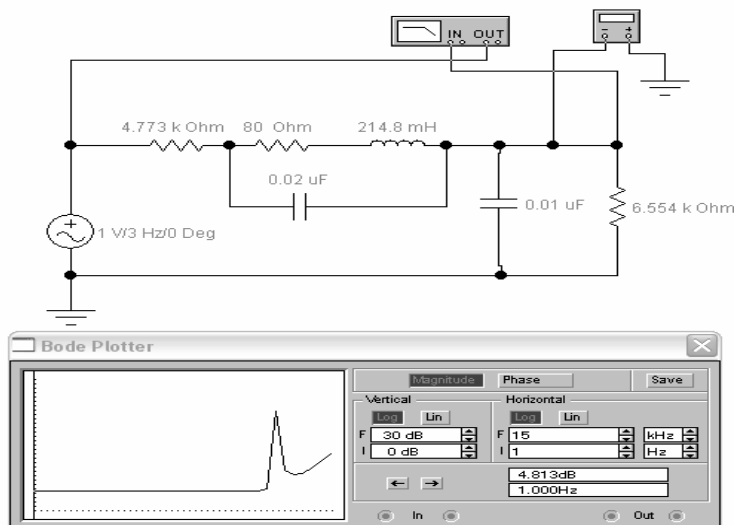


Рис.5.8. Исследование полувзена типа *m*.

Проанализировать полученные результаты и сделать выводы.

Литература

1. Алексеев А.П. Информатика 2001. –М.: Солон - Р, 2003, с. 269-329.
2. Бакалов В.П., Дмитриков В.Ф., Крук Б.И. Основы теории цепей. -М.: Радио и связь. 2009, с. 443-474.
3. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. –М.: Гардарики, 1999, с. 167-180.
4. Зевеке Г. В. и др., Основы теории цепей. -М.: Энергоатомиздат. 1989, с. 308-315.
5. Карлащук В. И. Электронная лаборатория на IBM PC. –М.: Солон -Р, 2005. 506 с.
6. Киреев В.Р., Крухмалева В.Д., Михайлов В.И. Методические указания к лабораторным работам по 3 части курса ОТЦ. ПГАТИ, каф. ТЭЦ, Самара 2001.
7. Попов В. П. Основы теории цепей. –М.: Высшая школа, 2007, с. 450-456
8. Шебес М. Р., Каблукова М. В. Задачник по теории линейных электрических цепей. -М.: Высшая школа, 1990, с. 413- 430.