

## 2.6. Исследование характеристик фильтров низкой частоты

### 2.6.1. Теоретическая часть

Среди передаточных параметров четырехполюсников основным является комплексный коэффициент передачи по напряжению  $K_U(j\omega)$ . Он представляет собой отношение комплексного выходного напряжения  $\dot{U}_2$  — отклика и комплексного входного напряжения  $\dot{U}_1$  — воздействия четырехполюсника:

$$K_U(j\omega) = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} = K_U(\omega) \cdot \exp(j\varphi(\omega)),$$

где  $K_U(\omega) = \frac{U_2}{U_1}$  — модуль комплексного коэффициента передачи

по напряжению  $K_U(j\omega)$ ;

$U_2$ ,  $U_1$  — действующие или амплитудные значения выходного и входного гармонических напряжений;

$\varphi(\omega) = \varphi_{U_2(\omega)} - \varphi_{U_1(\omega)}$  — аргумент комплексного коэффициента передачи  $K_U(j\omega)$ , равный разности между начальными фазами выходного и входного напряжений;

$\varphi_{U_2(\omega)}$ ,  $\varphi_{U_1(\omega)}$  — начальные фазы выходного и входного гармонических напряжений.

Зависимость модуля  $K_U(\omega)$  от частоты называется **амплитудно-частотной характеристикой** (АЧХ) цепи.

Зависимость аргумента  $\varphi(\omega)$  комплексного коэффициента передачи от частоты называется **фазо-частотной характеристикой** (ФЧХ) цепи.

Измерение АЧХ и ФЧХ возможно осуществить несколькими способами.

### 2.6.2. Измерение АЧХ с помощью вольтметра

1. Соберите на рабочей области схему простейшего фильтра низких частот первого порядка (рис. 2.6.1), используя виртуальные компоненты.

2. К входу схемы подключите источник переменного напряжения (источник напряжения АС).

3. Измените символ источника V1 на U1.

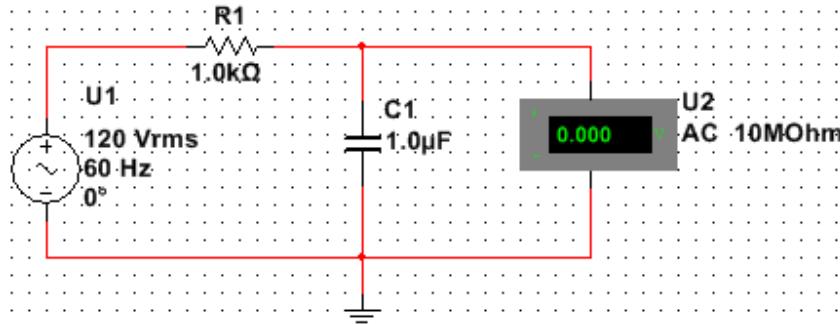


Рис. 2.6.1. Схема фильтра низких частот первого порядка

4. Дважды щелкните ЛКМ символ источника. На вкладке **Символ** измените  $V_1$  на  $U_1$ . На вкладке **Параметры** в соответствующих полях установите напряжение (RMS) источника  $U_1 = 200\text{V(V)}$ , частоту (F) —  $f = 200\text{Гц(Hz)}$ .

5. Установите значения параметров  $R1 = 10\text{k}\Omega$ ,  $C1 = 8200\text{pF}$ .

6. К выходным полюсам RC—цепи подключите вольтметр в режиме измерения переменного напряжения (рис. 2.6.2).

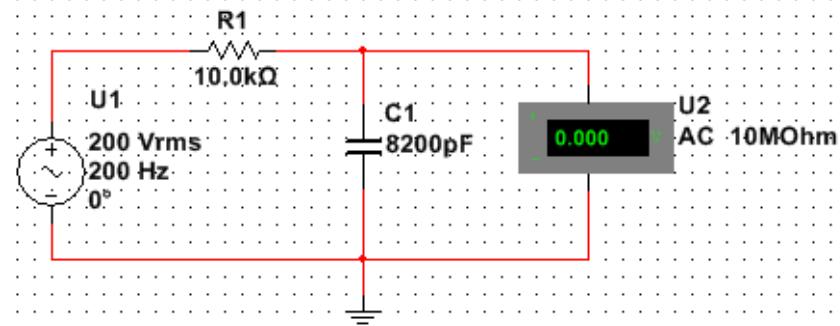


Рис. 2.6.2. Изменение параметров компонентов фильтра

7. Произведите измерения выходного напряжения RC-цепи в диапазоне частот  $f_{\min} \dots f_{\max}$ , начиная с частоты  $f_{\min} = 200\text{ Гц}$ . Для измерения выполните команду **Пуск** (F5), а при появлении показаний вольтметра — эффективной величины выходного напряжения  $U_2$  — команду **Стоп**. Величину  $U_2$  занесите в табл. 2.6.1.

8. По величине  $U_2$  рассчитайте экспериментальное значение коэффициента передачи и также занесите в табл. 2.6.1.

9. Изменять частоту генератора можно так, чтобы выходное напряжение изменилось примерно на  $8 \div 12\%$  от предыдущего значения. При таком шаге изменения частоты входного сигнала вся кривая разбивается примерно на 10 точек, по которым будет построена АЧХ. Значение частоты всегда можно откорректировать. Результаты расчетов и измерений занести в табл. 2.6.1. В табл. 2.6.1 предложены примерные значения частот для снятия АЧХ низкочастотного RC-фильтра.

Таблица 2.6.1

Результаты эксперимента								
$f, \text{kГц}$	0,2	1,0	5,0	10,0	...	...	...	...
$U_2$								
$K_U$								

10. По экспериментальным данным постройте АЧХ.

### 2.6.3. Измерение ФЧХ с помощью двухканального осциллографа

1. Соберите на рабочей области схему, показанную на рис. 2.6.3. Теперь вместо вольтметра нужно подключить двухканальный осциллограф.

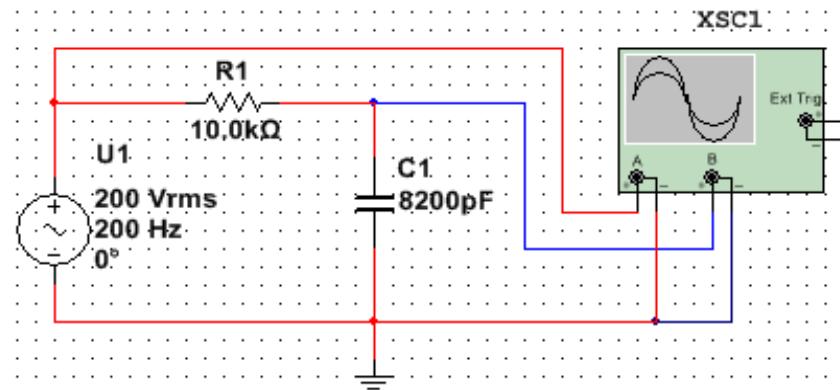


Рис. 2.6.3. Схема для измерения ФЧХ

2. ФЧХ низкочастотной RC-цепи снимите при тех же условиях, при которых снималась АЧХ.

3. Поэтому сохраните предыдущую схему под именем, например, **Определение АЧХ вольтметром**, а затем — **Определение ФЧХ осциллографом**.

4. Удалите из схемы вольтметр. На панели **Приборы** найдите двухлучевой осциллограф и разместите на рабочей области.

5. Соедините осциллограф проводниками, как на рис. 2.6.3.
6. Установите цвета проводников сигналов: входного красным, выходного синим. Для этого щелкните ПКМ по проводнику, в открывшемся меню выберите **Цвет сегмента**. Затем в появившемся окне выберите нужный цвет.
7. Двойным щелчком откроите переднюю панель осциллографа. Выставьте параметры осциллографа.
8. В блоке **Развертка** установите шкалу 500 us/Div и режим Y/T.
9. В каналах А и В установите одинаковую чувствительность 100 V/div в режиме переменного тока AC. В блоке **Синхронизация** включить режим **Авто**.
10. Произведите измерение сигналов. Для этого запустите модель кнопкой **Пуск**. Затем нажмите **Пауза**. Это нужно делать при каждом изменении параметров источника или цепи.
11. Подвести красную и синюю визирные линии в точки максимальных значений соответственно входного и выходного сигналов (рис.2.6.4). В правом нижнем окне прочтайте разность ( $T_2 - T_1$ ), равную смещению сигналов по оси времени.



Рис. 2.6.4. Передняя панель осциллографа

Таблица 2.6.2

Результаты экспериментальных измерений									
$f$ , кГц	0,2	1,0	5,0	10,0	...	...	...	...	250,0
$(T_2 - T_1)$									
$\varphi(f_k)$									

12. Результаты измерений занесите в табл. 2.6.2. Проведите расчет  $\varphi(f_k) = -(T_2 - T_1) \cdot f_k \cdot 360^\circ$  и занесите также в табл. 2.6.2.
13. Проделайте такие же измерения для всех значений частот, записанных в табл. 2.6.2. При изменении частоты сигнала нужно менять скорость развертки, размер окна и чувствительность каналов так, чтобы в пределах экрана укладывался примерно один период сигнала, как показано на рис. 2.6.4. Это увеличивает точность измерения.
14. Постройте ФЧХ по результатам измерений и расчетов.

#### 2.6.4. Измерение АЧХ и ФЧХ с помощью плоттера Боде

- Соберите на рабочей области схему, показанную на рис. 2.6.5. Теперь вместо двухканального осциллографа нужно подключить плоттер Боде.
- АЧХ и ФЧХ низкочастотной RC-цепи снимите при тех же условиях, что и ранее.
- Поэтому сохраните предыдущую схему под именем, например, **Определение ФЧХ осциллографом**, а затем — **Определение АЧХ и ФЧХ плоттером Боде**.
- Удалите из схемы двухканальный осциллограф. На панели **Приборы** найдите плоттер Боде и разместите на рабочей области.
- Соедините плоттер Боде проводниками, как на рис. 2.6.5.
- Дважды щелкните ЛКМ символ плоттера Боде.
- Откройте панель измерителя для измерения АЧХ.
- Настройте его параметры так, как показано на рис. 2.6.6.
- По вертикальной оси Y установить линейный масштаб, максимальное усиление F = 1, минимальное значение I = 0.
- По оси X — логарифмический масштаб, F = 100 GHz, I = 1 Hz.
- При необходимости скорректируйте значения F и I по осям координат.

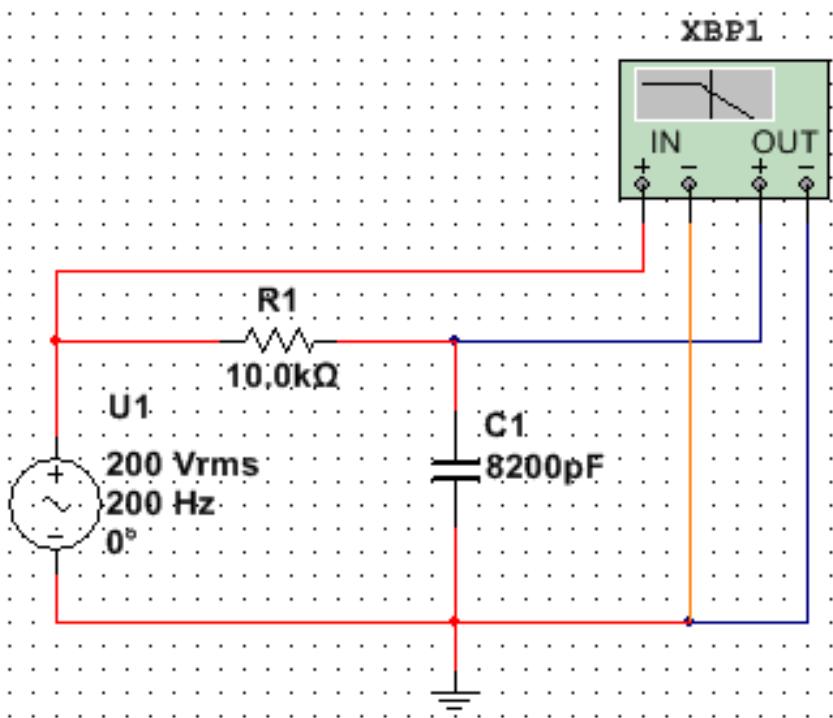


Рис. 2.6.5. Схема для измерения АЧХ и ФЧХ плottтером Боде

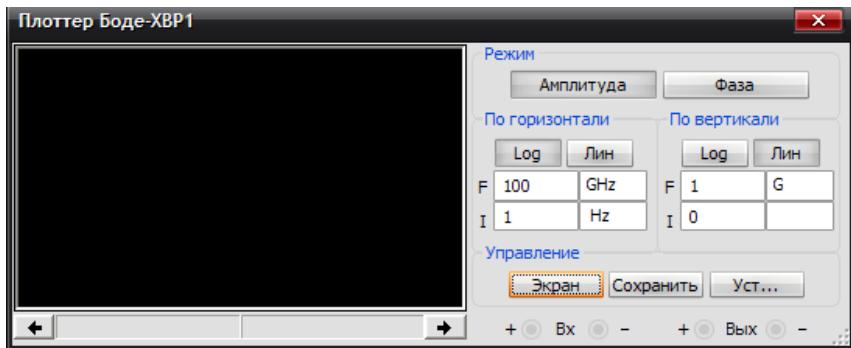


Рис. 2.6.6. Панель плottтера Боде для измерения АЧХ

12. Откройте панель измерителя для измерения ФЧХ и настройте параметры прибора так, как показано на рис. 2.6.7.
13. По вертикальной оси **Y** установите линейный масштаб, максимальное усиление  $F = 0$ , минимальное значение  $I = -90$ .

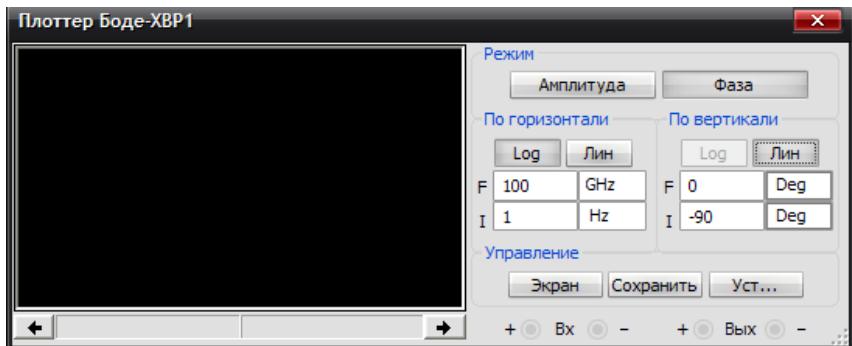


Рис. 2.6.7. Панель плоттера Боде для измерения ФЧХ

14. По оси X – логарифмический масштаб,  $F = 20$  кГц,  $I = 100$  Гц.
15. При необходимости скорректируйте значения  $F$  и  $I$  по осям координат.
16. Проведите измерения характеристик по точкам. Для этого запустите модель. Щелкните ЛКМ кнопку **Экран** — вместо черного он станет белым.
17. Для измерения  $K_U$  установите визирную линейку на частоту см. табл. 2.6.3 (рис. 2.6.8). Запишите значение  $K_U$  в табл. 2.6.3.

Таблица 2.6.3

Результаты экспериментальных измерений								
$f$ , кГц	0,2	1,0	5,0	10,0	...	...	...	250,0
$K_U$								
$\varphi$								

18. Переведите прибор в режим измерения фазы и запишите результат  $\varphi$  (рис. 2.6.9).
19. Измените частоту источника по табл. 2.6.3, то есть установите 1 кГц, и повторите измерения  $K_U$  и  $\varphi$  и т.д. Результат измерения  $\varphi$  показан на рис. 2.6.10. Результаты измерений заносите в табл. 2.6.3.
20. По результатам измерений постройте характеристики по точкам и сравните с их характеристиками, построенными по заданиям 2.6.2 и 2.6.3.

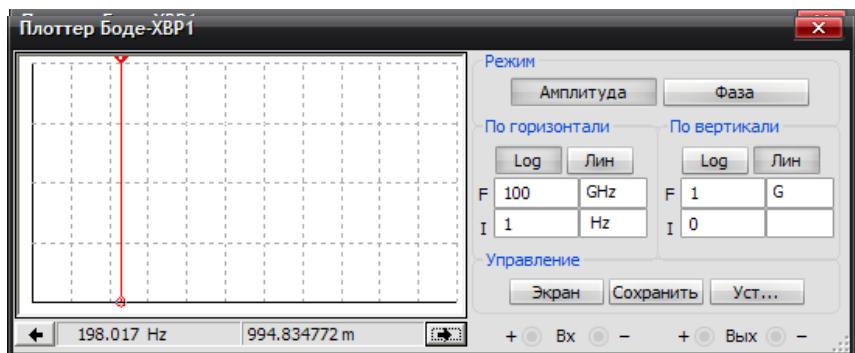


Рис. 2.6.8. Установка визирной линейки на частоту

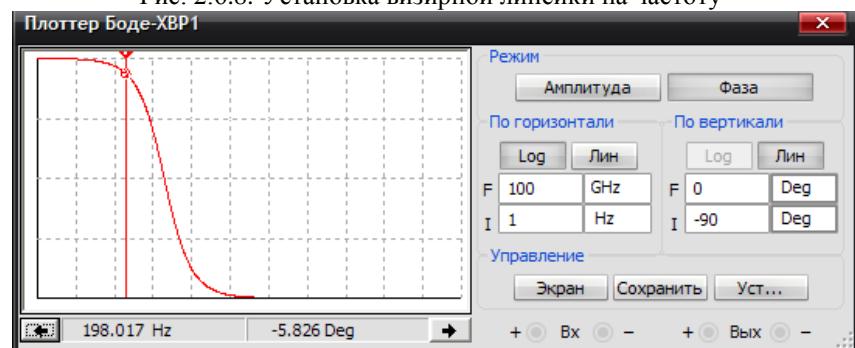


Рис. 2.6.9. Измерение фазы

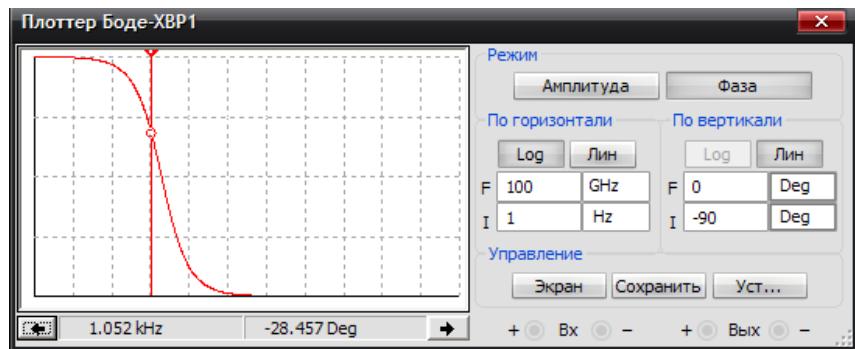


Рис. 2.6.10. Измерение фазы при другой частоте сигала