

Лабораторная работа № 1.

Изучение средств измерений в электронике. Исследование частотных характеристик электронных устройств

Цель работы – изучение генератора сигналов и осциллографа; освоение методики измерения параметров электронных устройств с помощью осциллографа и генератора сигналов; освоение методики построения частотных характеристик электронных устройств.

1.1. Краткие теоретические сведения

Работа большинства электронных устройств (ЭУ) связана с передачей и возможным преобразованием электрических сигналов. На вход устройства поступает сигнал с определёнными параметрами, а с выхода снимается сигнал, параметры которого обычно отличаются от входного. При этом взаимосвязь между параметрами входного и выходного сигналов определяется функциональным назначением устройства и поэтому, как правило, известна. Следовательно, проверить правильность функционирования устройства можно путем подачи на вход сигнала с требуемыми параметрами и измерения параметров выходного сигнала.

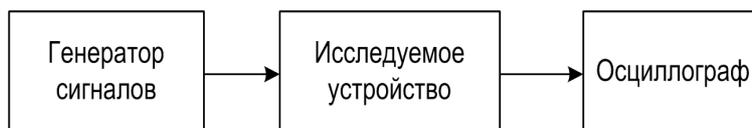


Рисунок 1.1 - Функциональная схема подключения генератора и осциллографа к исследуемому устройству

Указанный метод анализа является весьма распространённым. Для его реализации требуется генератор сигналов и осциллограф. Схема подключения данных приборов к исследуемому устройству показана на рисунке 1.1.

Для исключения влияния измерительных приборов на работу устройства их входные и выходные сопротивления должны быть согласованы, т.е. входное сопротивление последующего устройства в направлении прохождения сигнала должно быть на порядок больше выходного сопротивления предыдущего устройства. Следовательно, для схемы, представленной на рис.1.1, выходное сопротивление генератора должно быть по возможности меньшим, а входное сопротивление осциллографа по возможности большим.

Необходимо помнить: подключение к выходу исследуемого ЭУ нагрузки, сопротивление которой меньше допустимого значения, может привести к перегрузке и повреждению устройства. Поэтому подключения приборов в процессе измерения следует выполнять аккуратно, не допуская коротких замыканий на выходе ЭУ.

Осциллограф является весьма универсальным прибором, позволяющим определить не только форму сигнала, но и его количественные параметры: амплитуду (U_m), период (T), частоту ($f=1/T$) и т.п. На рисунке 1.2 представлена осциллограмма синусоидального сигнала $u(t)$. Для определения по осциллограмме амплитудного значения напряжения U_m необходимо с помощью вертикальной шкалы (см. рис.1.2) измерить амплитуду сигнала в единицах шкалы (сантиметрах), а затем умножить полученное значение на соответствующий масштабный множитель. Аналогично определяются и временные параметры сигнала, только в этом случае измерения проводятся с помощью горизонтальной шкалы (рис.1.2).

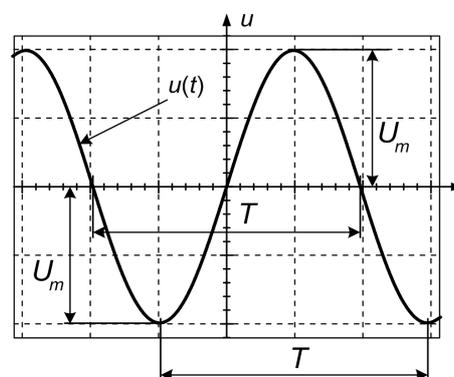


Рисунок 1.2 - Определение амплитуды (U_m) и периода колебаний (T) переменного напряжения

Двухлучевой осциллограф даёт возможность одновременного исследования двух сигналов и определения их взаимного расположения на временной оси. С его помощью можно получать и *частотные* характеристики исследуемых устройств. На рисунке 1.3 показано подключение приборов к исследуемому устройству для получения его частотных характеристик.

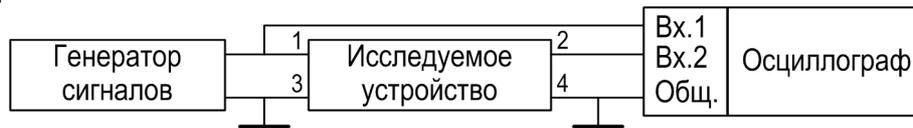


Рисунок 1.3 - Схема измерения частотных характеристик исследуемого устройства

На один из входов двухлучевого осциллографа подаётся сигнал непосредственно с генератора (с входа исследуемого устройства), а на другой – с выхода исследуемого устройства. По полученным осциллограммам определяются амплитуды обоих сигналов и соотношение между ними, а также смещение сигналов во времени Δt .

На рисунке 1.4 представлены примерные осциллограммы для двух случаев:

- выходной сигнал опережает ($\Delta t > 0$, рис. 1.4, а) и
- запаздывает ($\Delta t < 0$, рис. 1.4, б) по фазе относительно входного сигнала.

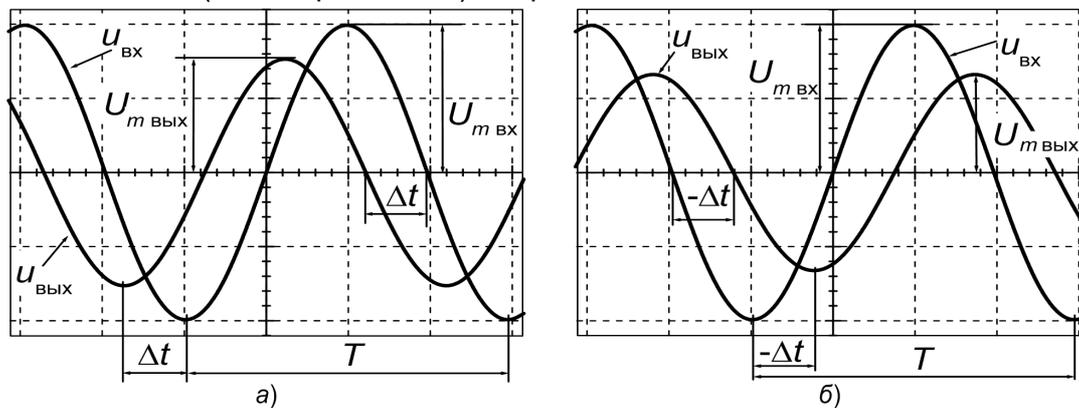


Рисунок 1.4 - Осциллограммы входного $u_{ВХ}$ и выходного $u_{ВЫХ}$ сигналов:

а – выходной сигнал опережает входной сигнал; б – выходной сигнал отстаёт от входного

Сдвиг фаз между входным и выходным сигналами можно вычислить по формуле

$$\varphi = 360^\circ \cdot f \cdot \Delta t, \quad (1.1)$$

где f – частота сигнала. Иногда более удобно определять разность фаз по формуле

$$\varphi = 360^\circ \cdot \Delta t / T. \quad (1.2)$$

Основные параметры и характеристики электронных устройств

В общем случае электронное устройство можно представить в виде *четырёхполюсника* – электрической цепи с двумя парами зажимов: *входными* (1–1'), к которым подводится входное напряжение $\dot{U}_{ВХ}$, и *выходными* (2–2'), на которых появляется выходное напряжение $\dot{U}_{ВЫХ}$ (см. рис.1.5).

К одним из основных технических показателей и характеристик электронных устройств (ЭУ) относят:

- входное и выходное сопротивления;
- коэффициент передачи;
- амплитудно- и фазо-частотные характеристики.

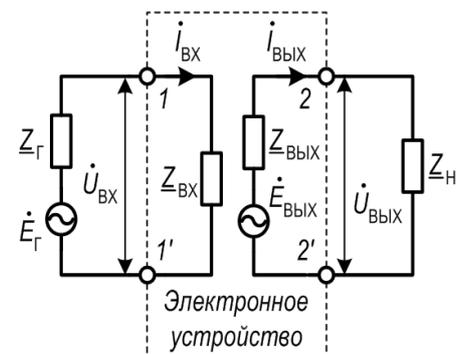


Рисунок 1.5 - Представление ЭУ в виде четырёхполюсника

Входное сопротивление ЭУ представляет собой сопротивление $Z_{ВХ}$ между зажимами 1–1' (рис.1.5) и определяется выражением

$$Z_{ВХ} = \frac{\dot{U}_{ВХ}}{\dot{I}_{ВХ}}. \quad (1.3)$$

Выходное сопротивление $Z_{ВЫХ}$ определяют между выходными зажимами (2–2') ЭУ при отключённом сопротивлении нагрузки:

$$Z_{ВЫХ} = \frac{\dot{U}_{ХХ}}{\dot{I}_{КЗ}}, \quad (1.4)$$

где $\dot{U}_{ХХ}$ – напряжение «холостого хода» (равно $\dot{E}_{ВЫХ}$), а $\dot{I}_{КЗ}$ – ток «короткого замыкания» на выходе ЭУ.

Коэффициент передачи ЭУ (по напряжению, току либо мощности) определяется как отношение выходного значения сигнала к соответствующему входному значению. Например, коэффициент передачи по напряжению

$$K = \frac{\dot{U}_{ВЫХ}}{\dot{U}_{ВХ}}. \quad (1.5)$$

В общем случае коэффициент передачи зависит от частоты ω электрического сигнала и является комплексной величиной: $\underline{K} = \underline{K}(j\omega)$. Его можно представить в виде

$$\underline{K}(j\omega) = K(\omega) e^{j\varphi(\omega)}, \quad (1.6)$$

где

$$K(\omega) = |\underline{K}(j\omega)| = \sqrt{\text{Re}^2(\underline{K}) + \text{Im}^2(\underline{K})} \quad (1.7)$$

– **амплитудно-частотная характеристика (АЧХ)** ЭУ – зависимость модуля коэффициента передачи $\underline{K}(j\omega)$ от частоты;

$$\varphi(\omega) = \arg(\underline{K}(j\omega)) = \arctg \frac{\text{Re}(\underline{K})}{\text{Im}(\underline{K})} \quad (1.8)$$

– **фазо-частотная характеристика (ФЧХ)** ЭУ – зависимость разности фаз между выходным и входным напряжениями от частоты.

АЧХ и ФЧХ дают полное представление о свойствах исследуемых электронных устройств и широко используются при проектировании различных ЭУ. На практике обычно используют *логарифмические амплитудно- и фазо-частотные* характеристики (*ЛАЧХ* и *ЛФЧХ*). При построении ЛАЧХ ординаты откладывают в децибелах (дБ), вычисляя их по формуле

$$K(\omega), \text{ дБ} = 20 \lg(K_U(\omega)), \text{ или } K(f), \text{ дБ} = 20 \lg(K_U(f)), \quad (1.9)$$

где $K_U(f) = \frac{U_{m \text{ Вых.}}}{U_{m \text{ Вх.}}}$; $U_{m \text{ Вых.}}$ и $U_{m \text{ Вх.}}$ – амплитудные значения выходного и входного напряжений соответственно на частоте $f = \frac{\omega}{2\pi}$.

Обе характеристики (*ЛАЧХ* и *ЛФЧХ*) строят в логарифмическом масштабе частот. При десятикратном изменении частоты считается, что она изменяется на *декаду*. Каждая декада занимает на оси частот одинаковый отрезок. Если принять его равным 100 мм, то разметка оси в пределах декады производится следующим образом:

f , Гц	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
d , мм	0	30	48	60	70	78	84,5	90	95,5	100

При построении ЛФЧХ значения разности фаз откладывают в градусах ($\pi = 180^\circ$).

С помощью АЧХ можно определить частоту среза (верхнюю и/или нижнюю граничную частоту $f_{В.гр.}$, $f_{Н.гр.}$ соответственно), на которой коэффициент передачи $K(f_{гр.}) = K_{max} / \sqrt{2} \approx 0,7 K_{max}$, т.е. в $\sqrt{2}$ раз меньше максимального значения коэффициента передачи $K_{max} = K(f_0)$, где $f_0 = \sqrt{f_{В.гр.} \cdot f_{Н.гр.}}$.

В случае ЛАЧХ коэффициент передачи на частоте среза меньше максимального значения на 3 дБ, т.е. $K(f_{гр.})$, дБ = K_{max} , дБ – 3 дБ, т.к. $20 \lg(1/\sqrt{2}) \approx -3$

В данной лабораторной работе исследуются часто применяемые на практике линейные схемы на пассивных элементах – пассивные RC-фильтры.

Расчёт частотных характеристик пассивных фильтров

Для простейшего делителя напряжения на комплексных сопротивлениях, представленного на рисунке 1.6, выходное напряжение $\dot{U}_{ВЫХ} = \dot{U}_{ВХ} \cdot \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2}$. Поэтому, в соответствии с (1.5), коэффициент передачи этого делителя напряжения

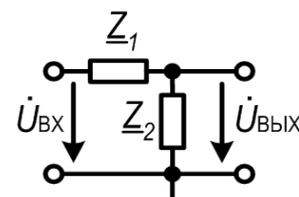


Рисунок 1.6. Делитель напряжения

$$K = \frac{\dot{U}_{ВЫХ}}{\dot{U}_{ВХ}} = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (1.10)$$

Если такой делитель напряжения состоит из резисторов ($Z_1 = R_1$ и $Z_2 = R_2$), его коэффициент передачи будет действительным и не зависящим от частоты: $K = R_2 / (R_1 + R_2)$.

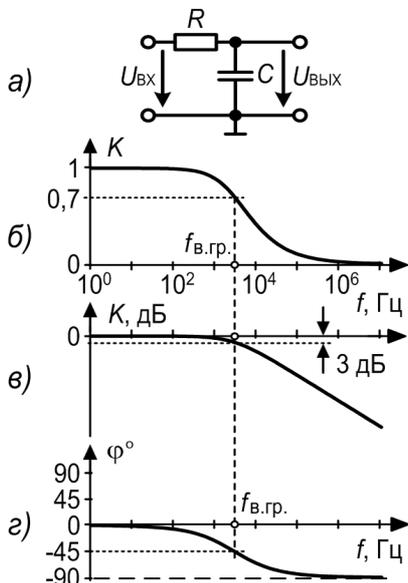


Рисунок 1.7. Фильтр нижних частот (ФНЧ)

а – электрическая схема;
б – АЧХ; в – ЛАЧХ; г – ЛФЧХ

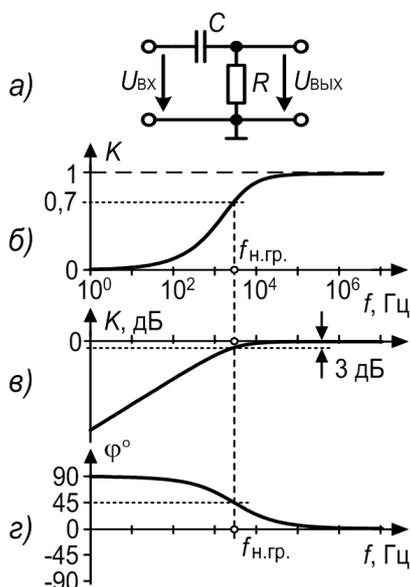


Рисунок 1.8. Фильтр верхних частот (ФВЧ)

а – электрическая схема;
б – АЧХ; в – ЛАЧХ; г – ЛФЧХ

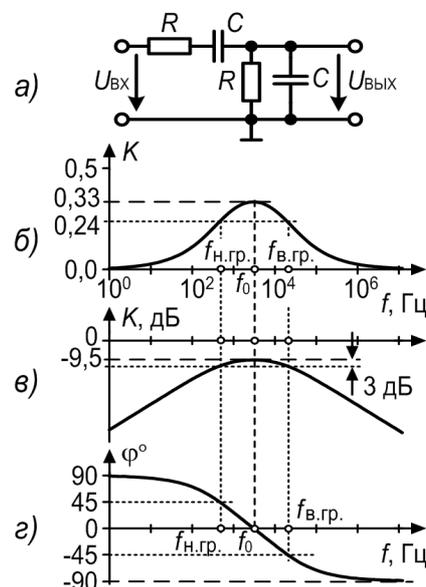


Рисунок 1.9. Полосовой пропускающий фильтр (ППФ)

а – электрическая схема;
б – АЧХ; в – ЛАЧХ; г – ЛФЧХ

Фильтр нижних частот

Рассмотрим схему, представленную на рисунке 1.7, а.

Сравнивая эту схему с простейшим делителем напряжения (рис. 1.6), можно записать

$Z_1 = R, Z_2 = \frac{1}{j\omega C}$. Согласно формуле (1.10) коэффициент передачи

$$\underline{K}(j\omega) = \frac{1/(j\omega C)}{R + 1/(j\omega C)} = \frac{1}{1 + j\omega RC} = \frac{1}{1 + j\frac{\omega}{\omega_0}}, \text{ или } \underline{K}(jf) = \frac{1}{1 + j(f/f_0)} \quad (1.11)$$

где $\omega_0 = \frac{1}{RC}; f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$. Отсюда, учитывая (1.7) и (1.8), получаем аналитические выражения для амплитудно-частотной характеристики данной схемы

$$K(f) = \frac{1}{\sqrt{1 + (f/f_0)^2}} \quad (1.12)$$

и фазо-частотной характеристики

$$\varphi(f) = -\arctg(f/f_0). \quad (1.13)$$

Фильтр верхних частот

На рисунке 1.7 приведены АЧХ (б), ЛФЧХ (з), построенные соответственно по формулам (1.11), (1.12), и ЛАЧХ (в), при построении которой использовалась формула (1.9). Из рисунка 1.7, б, з видно, что коэффициент передачи $K(f)$ снижается с ростом частоты, следовательно, рассматриваемое устройство является *фильтром низких частот* (ФНЧ). Найдём верхнюю граничную частоту $f_{\text{в.гр.}}$ данного фильтра. Для этого в (1.12) сделаем следующие подстановки $f = f_{\text{в.гр.}}$ и $K(f_{\text{в.гр.}}) = 1/\sqrt{2}$. Решая полученное уравнение относительно $f_{\text{в.гр.}}$, находим $f_{\text{в.гр.}} = f_0 = 1/(2\pi RC)$. Сдвиг фазы в ФНЧ на частоте $f_{\text{в.гр.}}$ составляет $\varphi(f_{\text{в.гр.}}) = -\arctg(f_{\text{в.гр.}}/f_0) = \arctg 1 = -45^\circ$.

Проводя аналогичные рассуждения для схемы на рис. 1.8, а, можно записать $Z_1 = \frac{1}{j\omega C}, Z_2 = R$. Тогда коэффициент передачи

$$\underline{K}(j\omega) = \frac{R}{R + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{1}{1 - j\frac{1}{\omega RC}} = \frac{1}{1 - j\frac{\omega_0}{\omega}}, \text{ или } \underline{K}(jf) = \frac{1}{1 - j(f_0/f)}, \quad (1.14)$$

откуда амплитудно-частотная характеристика $K(f) = \frac{1}{\sqrt{1 + (f_0/f)^2}}, \quad (1.15)$

и фазо-частотная характеристика $\varphi(f) = \arctg(f_0/f). \quad (1.16)$

где $\omega_0 = 1/(RC); f_0 = 1/(2\pi RC)$.

Частотные характеристики (1.15) и (1.16), приведены на рис. 1.8, б, з. Видно, что с ростом частоты коэффициент передачи увеличивается, поэтому такая схема является *фильтром высоких частот* (ФВЧ) с нижней граничной частотой $f_{\text{н.гр.}} = 1/(2\pi RC)$. Сдвиг фазы в ФВЧ на частоте $f_{\text{н.гр.}}$ составляет $\varphi(f_{\text{н.гр.}}) = +45^\circ$.

Полосовой пропускающий фильтр

Анализируя схему на рис. 1.9, а и сравнивая её со схемой на рис. 1.6, замечаем, что комплексное сопротивление Z_1 представляет собой последовательно соединённые резистор R и конденсатор C , а Z_2 – параллельно соединённые резистор R и конденсатор C , поэтому $Z_1 = R + \frac{1}{j\omega C}, \frac{1}{Z_2} = \frac{1}{R} + j\omega C$. Тогда коэффициент передачи

$$\underline{K}(j\omega) = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} = \frac{1}{1 + \frac{Z_1}{Z_2}} = \frac{1}{1 + \left(R + \frac{1}{j\omega C}\right) \left(\frac{1}{R} + j\omega C\right)}. \quad (1.17)$$

Откуда после несложных преобразований получаем

$$\underline{K}(j\omega) = \frac{1}{3 + j\omega RC + \frac{-j}{\omega RC}} = \frac{1}{3 - j\left(\frac{\omega_0}{\omega} - \frac{\omega}{\omega_0}\right)}, \text{ где } \omega_0 = \frac{1}{RC}, \quad (1.18)$$

или
$$\underline{K}(jf) = \frac{1}{3 - j\left(\frac{f_0}{f} - \frac{f}{f_0}\right)}, \text{ где } f_0 = \frac{1}{2\pi RC}. \quad (1.19)$$

Из последнего выражения находим соответственно амплитудно- и фазо-частотную характеристики схемы (рис. 1.9)

$$K(f) = \frac{1}{\sqrt{9 + \left(\frac{f_0}{f} - \frac{f}{f_0}\right)^2}}; \quad (1.20)$$

$$\varphi(f) = \arctg \frac{\left(\frac{f_0}{f} - \frac{f}{f_0}\right)}{3}. \quad (1.21)$$

На рисунке 1.9, б, г представлены частотные характеристики (1.20) и (1.21), из анализа которых видно, что коэффициент передачи сначала возрастает до максимального значения $K_{\max} = 1/3$ на частоте f_0 , а затем убывает до 0, такая характеристика соответствует *полосовому пропускающему фильтру* (ППФ).

Режекторные фильтры

Если ППФ с коэффициентом передачи $\underline{K}_{\text{ППФ}}(jf)$ дополнить сопротивлениями R_1 и $2R_1$ (см. рис. 1.10, а), получим так называемый *мост Вина – Робинсона*. Выходное напряжение в нём снимается между выходом омического делителя напряжения $2R_1 - R_1$ и выходом ППФ. Омический делитель напряжения обеспечивает коэффициент передачи

$$K_{\text{ч.н.д.}} = \frac{R_1}{2R_1 + R_1} = \frac{1}{3},$$

поэтому с учётом (1.19) коэффициент передачи моста Вина – Робинсона можно представить в виде:

$$\underline{K}(jf) = K_{\text{ч.н.д.}} - \underline{K}_{\text{ППФ}}(jf) = \frac{1}{3} - \frac{1}{3 - j\left(\frac{f_0}{f} - \frac{f}{f_0}\right)} = \frac{1}{3} \frac{\frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f}}{\left(\frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f}\right) - 3j}, \quad (1.22)$$

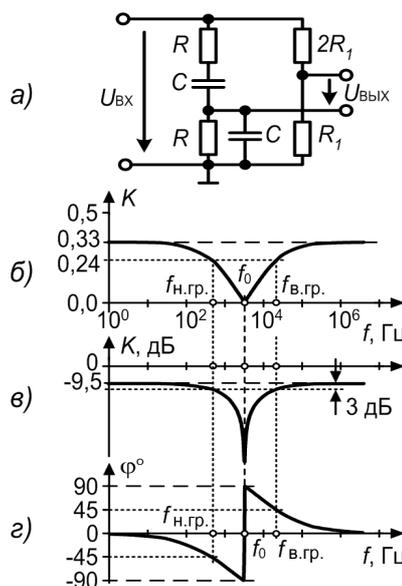


Рисунок 1.10. Мост Вина – Робинсона

а – электрическая схема;

б – АЧХ; в – ЛАЧХ; г – ПФЧХ

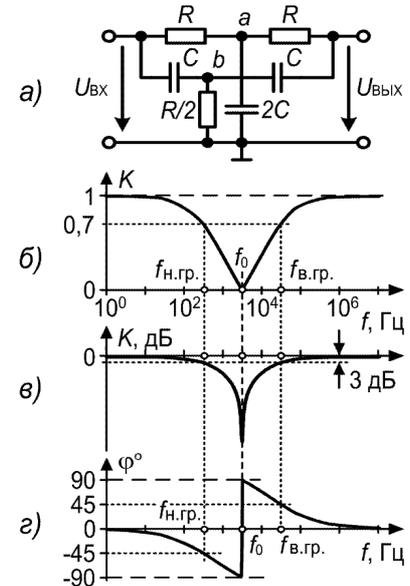


Рисунок 1.11. Двойной Т-образный мост

а – электрическая схема;

б – АЧХ; в – ЛАЧХ; г – ПФЧХ

где $f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$. Тогда амплитудно-частотная и фазо-частотная характеристики моста Вина – Робинсона соответственно будут иметь вид

$$K(f) = \frac{|(f/f_0) - (f_0/f)|}{3\sqrt{9 + ((f/f_0) - (f_0/f))^2}}; \quad (1.23)$$

$$\varphi(f) = \operatorname{arctg} \frac{3}{(f/f_0) - (f_0/f)}. \quad (1.24)$$

Эти характеристики показаны на рисунке 1.10, б, г. Видно, что АЧХ моста Вина – Робинсона имеет максимальное значение $K_{\max} = 1/3$ на низких и высоких частотах и принимает минимальное значение (теоретически 0) на частоте f_0 . Такое устройство называют *режекторным фильтром*, или *полосовым заграждающим фильтром* (ПЗФ).

На рисунке 1.11, а представлена схема так называемого двойного T -образного моста, коэффициент передачи которого можно найти, воспользовавшись, например, первым законом Кирхгофа. При ненагруженном выходе получаем (см. рис. 1.11, а):

$$\begin{cases} \frac{\dot{U}_{\text{ВХ}} - \dot{U}_a}{R} = \dot{U}_a \cdot j\omega(2C) + \frac{\dot{U}_a - \dot{U}_{\text{ВЫХ}}}{R}; \\ (\dot{U}_{\text{ВХ}} - \dot{U}_b) \cdot j\omega C = \frac{\dot{U}_b}{R/2} + (\dot{U}_b - \dot{U}_{\text{ВЫХ}}) \cdot j\omega C; \\ \frac{\dot{U}_a - \dot{U}_{\text{ВЫХ}}}{R} + (\dot{U}_b - \dot{U}_{\text{ВЫХ}}) \cdot j\omega C = 0, \end{cases} \quad (1.25)$$

где \dot{U}_a, \dot{U}_b – потенциалы точек a и b соответственно. Исключая в (1.25) \dot{U}_a и \dot{U}_b , после ряда преобразований получаем выражение для коэффициента передачи T -моста:

$$\underline{K}(j\omega) = \frac{\dot{U}_{\text{ВЫХ}}}{\dot{U}_{\text{ВЫХ}}} = \frac{(\omega RC)^2 - 1}{(\omega RC)^2 - 1 - 4j\omega RC}. \quad (1.26)$$

Переходя к частоте f , можно представить (1.26) в виде

$$\underline{K}(jf) = \frac{(f/f_0) - (f_0/f)}{((f/f_0) - (f_0/f)) - 4j}, \text{ где } f_0 = \frac{1}{2\pi RC}. \quad (1.27)$$

Откуда амплитудно-частотная характеристика

$$K(f) = \frac{|(f/f_0) - (f_0/f)|}{\sqrt{16 + ((f/f_0) - (f_0/f))^2}}; \quad (1.28)$$

фазо-частотная характеристика

$$\varphi(f) = \operatorname{arctg} \frac{4}{(f/f_0) - (f_0/f)} \quad (1.29)$$

Представленные на рисунке 1.11 частотные характеристики двойного T -образного моста подобны характеристикам моста Вина – Робинсона (рис. 1.10 и (1.23), (1.24)). Поэтому данное устройство также является полосовым заграждающим фильтром. Однако, в отличие от моста Вина – Робинсона выходное напряжение здесь снимается относительно общей точки, и максимальный коэффициент передачи стремится к 1.

Условные графические обозначения фильтров на функциональных схемах представлены на рисунке 1.12.

При построении частотных характеристик для всех типов фильтров, представленных на рисунках 1.7 – 1.11, принимались: сопротивления резисторов $R = 1,6 \text{ кОм}$, ёмкости конденсаторов $C = 33 \text{ нФ}$.

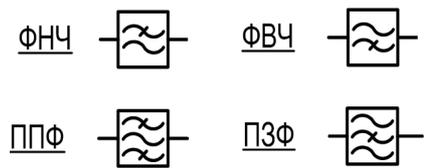


Рисунок 1.12. Условные графические обозначения фильтров

1.2. Порядок выполнения работы

Задание 1: Изучение измерительных приборов и методов выполнения измерений

- изучить технические описания и инструкции по эксплуатации цифрового осциллографа С8-40 и генератора сигналов ГЗ-120;
- включить приборы в сеть и подготовить их к работе;

Задание 2: Измерение амплитуды, периода и частоты исследуемого сигнала (рис.1.2)

- выставив заданные преподавателем значения амплитуды сигнала и его частоты $f_{\text{ЗАДАН}}$ по шкале генератора, определить с помощью осциллографа частоту $f_{\text{ИЗМЕР}}$.

$$\text{сигнала и вычислить отклонение } \delta = \left| 1 - \frac{f_{\text{ИЗМЕРЕН.}}}{f_{\text{ЗАДАН.}}} \right| \times 100\%.$$

Задание 3: Определение характеристик и параметров пассивного четырехполюсника

- собрать схему для измерения частотных характеристик в соответствии с рис. 1.3;
- для каждой частоты $f = (0,01; 0,03; 1; 3; 10; 30; 100; 300) \text{ кГц}$, занести в таблицу результаты измерений амплитудных значений входного и выходного напряжений $U_{m \text{ ВХ}}$ и $U_{m \text{ ВЫХ}}$ соответственно, а также временной сдвиг Δt между выходным и входным напряжениями, при этом **обязательно учитывать знак Δt** (см. рис. 1.4);

$f, \text{ Гц}$	$U_{m \text{ ВХ}}, \text{ В}$	$U_{m \text{ ВЫХ}}, \text{ В}$	Δt	T	$K(f), \text{ дБ}$	$\varphi^\circ(f)$

- рассчитать значения коэффициента передачи $K(f)$, дБ и сдвига фаз $\varphi^\circ(f)$ (по формуле (1.1) или (1.2)), и занести результаты в таблицу;
- по рассчитанным значениям построить ЛАЧХ и ЛФЧХ пассивного четырехполюсника; определить по их виду тип исследованного четырехполюсника (см. рис. 1.7 – 1.11), на чертить его предполагаемую схему и определить частоты среза.

1.3. Контрольные вопросы

- Для чего используются генератор сигналов и осциллограф?
- Какие функциональными возможностями обладает осциллограф С8-40.
- Как с помощью осциллографа определить амплитуду, частоту и разность фаз двух сигналов?
- Как строятся логарифмические частотные характеристики и для чего они используются?
- Как по АЧХ и ЛАЧХ определяются частоты среза?
- Пояснить принцип действия пассивных RC -фильтров.
- Получить аналитические выражения зависимостей $\underline{K}(j\omega)$, $K(f)$ и $\varphi(f)$ для различных типов пассивных RC -фильтров.