

**Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение Высшего профессионального образования
«Санкт-Петербургский государственный
политехнический университет»**

**Факультет технической кибернетики
Кафедра «Измерительные информационные технологии»**

Дьяченко Ю.Н., Милицын А.В.

Элементы электрических и электронных цепей

**Методические указания
к практическим и лабораторным работам**

Санкт-Петербург

2012

Методические указания содержат описания практических и лабораторных работ, цель которых научить студентов умению рассчитывать, экспериментально исследовать и проводить компьютерное моделирование простых пассивных устройств, используемых в электрических и электронных цепях.

Методические указания предназначены для студентов изучающих курсы «Электротехника», «Электроника и электротехника», «Электроника и схемотехника» по направлениям подготовки 200100 «Приборостроение», 230400 «Информационные системы и технологии», 090900 «Информационная безопасность».

Печатается по решению кафедры измерительных информационных технологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

Оглавление

1. Пассивные электрические RC цепи	4
Программа работы	4
Методические указания по проведению расчётов	5
Методические указания по проведению моделирования устройств с применением программы Multisim	9
2. Пассивные полосно-пропускающие и заграждающие RC фильтры	12
Программа работы	12
Полосовой RC-фильтр	13
Мост Вина	14
Двойной T-образный фильтр	15
3. Пассивные полосно-пропускающие и заграждающие фильтры на основе колебательных контуров	16
Программа работы	16
Методические указания по проведению расчётов	17
Полосовой и заграждающий фильтры с последовательным LC-контуром	19
Полосовой и заграждающий фильтры с параллельным LC-контуром	20

1. Пассивные электрические RC цепи

Целью работы является умение рассчитать, исследовать и моделировать характеристики и работу пассивных RC цепей при подаче гармонических и импульсных сигналов.

Программа работы

1. Рассчитать схемы исследуемых устройств

Рассчитать схему фильтра нижних частот (ФНЧ)

Рассчитать схему фильтра верхних частот (ФВЧ)

2. Исследовать работу ФНЧ

Определить переходную характеристику (ПХ)

Определить амплитудно-частотную характеристику (АЧХ)

Определить фазо-частотную характеристику (ФЧХ)

3. Исследовать работу ФВЧ

Определить переходную характеристику (ПХ)

Определить амплитудно-частотную характеристику (АЧХ)

Определить фазо-частотную характеристику (ФЧХ)

4. Провести анализ полученных результатов и составить отчет по работе

Таблица 1. Варианты заданий

№ задания	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ФНЧ f_c [кГц]	1	2	3	5	10	30	20	15	25	8
ФВЧ f_c [кГц]	0,2	0,5	3	1	6	2	0,8	4	1,5	12

Методические указания по проведению расчётов

1. Параметры ФНЧ и ФВЧ рассчитывают исходя из значений частот среза f_c , приведённых в Таблице 1.

2. Сопротивление резистора выбирают в пределах $1 \text{ кОм} \leq R \leq 100 \text{ кОм}$, а для расчёта ёмкости конденсатора используют формулу (8).

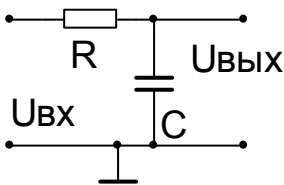


Рис. 1. Схема ФНЧ

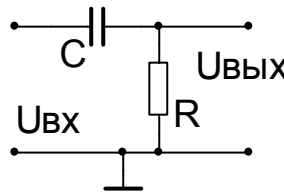


Рис. 2. Схема ФВЧ

Схемы простейших ФНЧ и ФВЧ первого порядка (рис.1 и рис.2 соответственно) составлены из одного резистора с сопротивлением R и одного конденсатора с ёмкостью C [1,2]. На переменном синусоидальном токе, входное $U_{вх}$ и выходное $U_{вых}$ напряжения фильтров представляют в виде комплексных величин. Сопротивление конденсатора в этом случае также представляют комплексной величиной, зависящей от частоты входного напряжения:

$$\dot{X}_C = \frac{1}{j\omega C} = \frac{1}{j2\pi f C}$$

j - мнимая единица;

f - частота изменения напряжения $U_{вх}$;

$\omega = 2\pi f$ - круговая частота.

Напряжения $\dot{U}_{вх}$ и $\dot{U}_{вых}$ связаны между собой через комплексные коэффициенты передачи ФНЧ $\dot{K}_{фнч}$ и ФВЧ $\dot{K}_{фвч}$ соотношениями:

$$\text{для ФНЧ} \quad \dot{U}_{вых} = \dot{U}_{вх} \cdot \dot{K}_{фнч} = \dot{U}_{вх} \cdot \frac{1}{1 + j\omega\tau} \quad (1)$$

$$\text{для ФВЧ} \quad \dot{U}_{вых} = \dot{U}_{вх} \cdot \dot{K}_{фвч} = \dot{U}_{вх} \cdot \frac{j\omega\tau}{1 + j\omega\tau} \quad (2)$$

$\tau = RC$ - постоянная времени ФНЧ и ФВЧ

Коэффициенты передачи $\dot{K}_{\text{ФНЧ}}$ и $\dot{K}_{\text{ФВЧ}}$ полностью характеризуют свойства рассматриваемых цепей на переменном синусоидальном токе, так как комплексные величины определяются двумя параметрами – модулем и аргументом. Применительно к линейной электрической цепи, модуль представляет собой отношения амплитуд синусоидальных напряжений $U_{\text{ВХ}}$ и $U_{\text{ВЫХ}}$, т.е. коэффициент передачи цепи. Зависимость коэффициента передачи от частоты называют амплитудно-частотной характеристикой - АЧХ. Аргумент представляет собой угол фазового сдвига между синусоидальными напряжениями $U_{\text{ВЫХ}}$ и $U_{\text{ВХ}}$. Зависимость значения угла фазового сдвига от частоты называют фазо-частотной характеристикой - ФЧХ. Соответствующие величины и их зависимости от частоты определяются из соотношений:

$$\text{для ФНЧ} \quad K_{\text{ФНЧ}}(f) = \left| \dot{K}_{\text{ФНЧ}} \right| = \left| \frac{\dot{U}_{\text{ВЫХ}}}{\dot{U}_{\text{ВХ}}} \right| = \frac{U_{\text{м ВЫХ}}}{U_{\text{м ВХ}}} = \frac{1}{\sqrt{1 + (2\pi f\tau)^2}} \quad (3)$$

$$\varphi_{\text{ФНЧ}}(f) = -\text{arctg}(2\pi f\tau) \quad (4)$$

$$\text{для ФВЧ} \quad K_{\text{ФВЧ}}(f) = \left| \dot{K}_{\text{ФВЧ}} \right| = \left| \frac{\dot{U}_{\text{ВЫХ}}}{\dot{U}_{\text{ВХ}}} \right| = \frac{U_{\text{м ВЫХ}}}{U_{\text{м ВХ}}} = \frac{1}{\sqrt{1 + (2\pi f\tau)^{-2}}} \quad (5)$$

$$\varphi_{\text{ФВЧ}}(f) = \text{arctg} \frac{1}{2\pi f\tau} \quad (6)$$

где $U_{\text{м ВЫХ}}$ и $U_{\text{м ВХ}}$ – амплитуды выходного и входного напряжений цепей

АЧХ и ФЧХ фильтров удобно отображать в виде графиков. При снятии характеристик, частоту изменяют в широком диапазоне, перекрывающем несколько декад, поэтому графики, как правило, строят в полулогарифмическом масштабе: масштаб по оси частот пропорционален десятичному логарифму частоты. Для построения АЧХ часто используют логарифмический масштаб, при кото-

ром по оси коэффициента передачи цепи масштаб также пропорционален десятичному логарифму, а значение самого коэффициента оценивается в децибелах:

$$K^{\log}(f) = 20 \log K(f) \quad [\text{дБ}] \quad (7)$$

Частотой среза фильтра называют частоту f_c , на которой коэффициент передачи уменьшается до значения $K_0/\sqrt{2} \approx 0,707K_0$ по сравнению с номинальным значением K_0 . Так как и для ФНЧ и для ФВЧ $K_0 = 1$, то из формул (3) и (5) следует:

$$2\pi f_c \tau = 1 \Rightarrow f_c = \frac{1}{2\pi\tau} = \frac{1}{2\pi RC} \quad (8)$$

Полоса рабочих частот ФНЧ находится в пределах $0 \leq f \leq f_c$. Коэффициент передачи имеет номинальное значение $K_0 = 1$ на частоте $f = 0$. Угол фазового сдвига $\varphi_{\text{ФНЧ}}$ в полосе рабочих частот изменяется от 0° до -45° и, далее, при $f \rightarrow \infty$ стремится к значению -90° .

Полоса рабочих частот ФВЧ находится в пределах $f_c \leq f < \infty$. Коэффициент передачи имеет номинальное значение $K_0 = 1$ на частоте $f \rightarrow \infty$. Угол фазового сдвига $\varphi_{\text{ФВЧ}}$ в полосе рабочих частот (при изменении частоты f от ∞ до 0) изменяется от 0° до $+45^\circ$ и, далее, стремится к значению $+90^\circ$.

АЧХ и ФЧХ характеризуют свойства линейных электрических цепей при подаче на вход гармонического сигнала. В случае воздействия импульсных сигналов свойства цепей характеризует переходная характеристика (ПХ). Переходные процессы, возникающие в ФНЧ и ФВЧ при подаче на их входы прямоугольного импульсного сигнала, описываются экспоненциальными функциями.

Для ФНЧ переходный процесс на выходе, после подачи импульса входного напряжения с постоянной амплитудой U_0 , описывается формулой:

$$U_{\text{вых ФНЧ}} = U_0 \cdot (1 - e^{-t/\tau})$$

Выходное напряжение начинает изменяться от нуля, а при $t \geq (5 \div 10)\tau$ переходный процесс практически завершается и, на выходе ФНЧ имеем установившееся значение напряжения:

$$U_{\text{вых фнч}} = U_0 \quad \text{при} \quad t \geq (5 \div 10)\tau$$

По графику переходной характеристики можно определить постоянную времени ФНЧ τ , которая равна моменту времени в который

$$U_{\text{вых фнч}}(\tau) = U_0 \cdot (1 - e^{-1}) \approx 0,63U_0$$

Для ФВЧ переходный процесс на выходе, после подачи импульса входного напряжения с постоянной амплитудой U_0 , описывается формулой:

$$U_{\text{вых фнч}} = U_0 \cdot e^{-t/\tau}$$

Выходное напряжение в начальный момент скачком достигает значения U_0 , а при $t \geq (5 \div 10)\tau$ переходный процесс практически завершается и, на выходе ФВЧ имеем установившееся значение напряжения равное нулю:

$$U_{\text{вых фнч}} = 0 \quad \text{при} \quad t \geq (5 \div 10)\tau$$

По графику переходной характеристики можно определить постоянную времени ФВЧ τ , которая равна моменту времени в который

$$U_{\text{вых фвч}}(\tau) = U_0 \cdot e^{-1} \approx 0,37U_0$$

Отчет по работе должен содержать

1. Схемы фильтров.
2. Результаты расчётов фильтров.
3. Графики АЧХ, ФЧХ и временные диаграммы ПХ, полученные в ходе экспериментального исследования или моделирования работы фильтров.
4. Выводы о соответствии результатов моделирования теории. Для этого на полученные в ходе моделирования графики АЧХ и ФЧХ наносят расчетные точки

(рассчитанные по формулам (3) – (6)), соответствующие частотам $0,1f_c$; $0,5f_c$; f_c ; $2f_c$; $10f_c$ и оценивают величину расхождения значений $K(f)$ и $\varphi(f)$.

По графикам ПХ определяют значение τ и сравнивают с расчетным.

5. Сравнительную оценку графиков АЧХ, построенных в различных масштабах.

Графики АЧХ строят в трёх масштабах:

- линейном - линейные масштабы по осям $K(f)$ и f
- полулогарифмическом - линейный масштаб по оси $K(f)$ и логарифмический по оси f
- логарифмическом - логарифмический масштаб по осям $K(f)$ (в дБ) и f

Графики ФЧХ строят только в полулогарифмическом масштабе.

Методические указания по проведению моделирования устройств с
применением программы Multisim

Определение переходных характеристик (ПХ) фильтров

Simulate/Analyses/Transient Analysis. Моделируют работу фильтра во временной области при воздействии на его вход переменного импульсного напряжения. На вход схемы необходимо подключить генератор импульсов прямоугольного напряжения. Исследование проводят при двух разных периодах T следования импульсов:

1. $T = (5 \div 8)\tau$
2. $T = (0,15 \div 0,2)\tau$

Необходимые установки:

Analysis parameters – Start time – время начала анализа устанавливают равным нескольким периодам входного напряжения для исключения начального переходного процесса.

End time – конечное время анализа устанавливают таким, чтобы можно было рассмотреть $2 \div 3$ периода выходного напряжения.

Generate time steps automatically – установка флажка для автоматического выбора шага может иногда приводить к некоторой «корявости» графиков. В этом случае лучше подобрать минимальное количество точек на временной оси, обеспечивающее лучшие результаты.

Output – Selected variables for analysis – выбирают узлы и вид сигнала для наблюдения формы. Следует выбрать напряжения на входном и выходном узлах.

Моделирование ПХ может быть осуществлено с помощью осциллографа, без использования пункта меню **Simulate**. При этом в осциллографе необходимо произвести правильные установки масштабов по осям времени и амплитуд.

Построение графиков АЧХ и ФЧХ фильтров.

Simulate/Analyses/AC Analysis. По графикам АЧХ и ФЧХ можно определить коэффициент преобразования по переменному току на разных частотах и рабочий диапазон частот фильтров. В качестве генератора входного сигнала необходимо включить источник переменного синусоидального напряжения.

Необходимые установки:

Frequency parameters – Start frequency – начальную частоту для проведения анализа устанавливают примерно равной $(0,01 \div 0,02)f_c$.

Stop frequency – конечную частоту для проведения анализа устанавливают примерно $(50 \div 100) f_c$.

Sweep type – масштаб частотной оси. Графики строят с использованием как линейного, так и десятичного логарифмического масштабов.

Number of points per decade – количество точек на декаду в которых проводится расчет характеристик. Увеличение количества точек делает график более гладким.

Vertical scale – масштаб вертикальной оси используют и линейный и логарифмический в децибелах.

Output – Selected variables for analysis – выбирают вид сигнала и узлы, в которых снимают характеристики. Следует выбрать напряжения на выходном узле.

С помощью маркеров, определяют частоту среза фильтров f_c по спаду АЧХ примерно на 30% в линейном масштабе, или по уровню -3дБ в логарифмическом масштабе.

Графики АЧХ строят при различных масштабах по оси частот и оси напряжений – линейном и логарифмическом, в том числе в децибелах. Сравнивают значение величины f_c , полученное путем моделирования с расчетным значением.

По ФЧХ оценивают фазовый сдвиг на частотах $f = f_c$, $f \rightarrow 0$, $f \rightarrow \infty$.

Моделирование частотных характеристик может быть осуществлено и с помощью графопостроителя, без использования пункта меню **Simulate**.

Литература

1. В. Г. Гусев, Ю. М. Гусев. Электроника и микропроцессорная техника : учеб. для вузов.— Изд. 3-е, перераб. и доп .— М. : Высшая школа, 2005 .— 790 с. : ил .— Библиогр.: с. 786 - 787.
2. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника. 12-е изд. Том 2: Пер. с нем., М.: ДМК Пресс, 2007. – 942 с. : ил.

2. Пассивные полосно-пропускающие и заграждающие RC фильтры

Целью работы является умение рассчитать, исследовать и моделировать характеристики и работу пассивных RC фильтров.

Программа работы

1. Изучить принцип работы пассивных полосно-пропускающих и полосно-заграждающих фильтров.
 - 1.1 Изучить принципы работы полосно-пропускающего RC-фильтра.
 - 1.2 Изучить принципы работы моста Вина.
 - 1.3 Изучить принципы работы двойного T-образного фильтра.
2. Рассчитать элементы фильтров.
3. Рассчитать в заданных точках частотной оси (Таб. 3) амплитудно-частотную (АЧХ) и фазо-частотную (ФЧХ) характеристики фильтров.
4. Провести моделирование работы фильтров с использованием частотного анализа **AC Analysis**. Построить графики АЧХ и ФЧХ фильтров в диапазоне частот, указанном в Таб. 3 в десятичном логарифмическом масштабе.
5. Сравнить графики, полученные в результате моделирования АЧХ и ФЧХ фильтров, с результатами, полученными расчетным путем.

Резонансная частота для всех фильтров, на которой АЧХ имеет максимум или минимум определяется постоянной времени τ

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi\tau} \quad \tau = RC$$

Таблица 2. Варианты заданий

№ варианта		1	2	3	4	5	6	7	8
Резонансная частота f_0	кГц	1	2	3	4	5	6	7	8
Номинал емкости С	нФ	10	10	5,1	5,1	3,3	3,3	2	1

Таблица 3. Значения текущей частоты f для расчета АЧХ и ФЧХ.

$0,02f_0$	$0,05f_0$	$0,1f_0$	$0,2f_0$	$0,5f_0$	f_0	$2f_0$	$5f_0$	$10f_0$	$20f_0$	$50f_0$
-----------	-----------	----------	----------	----------	-------	--------	--------	---------	---------	---------

! ФЧХ моста Вина (рис. 4) и двойного Т-образного фильтра (рис. 5) не определены на частоте f_0 т.к. имеют разрыв в виде скачка 180° , поэтому ФЧХ для них следует рассчитать вместо f_0 на двух частотах: $0,99f_0$ и $1,01f_0$.

Полосовой RC-фильтр

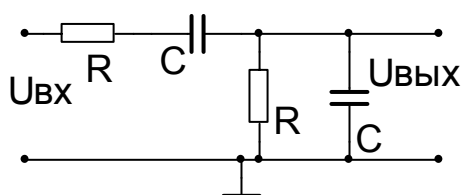


Рис. 3. Полосовой RC-фильтр

Полосовой RC-фильтр получают путем последовательного соединения ФНЧ и ФВЧ. Фильтр используют для пропускания сигналов в определенном частотном диапазоне. Одна из возможных схем фильтра представлена на рис. 3. Коэффициент передачи фильтра равен нулю на высоких и низких частотах, а его максимум наблюдается на резонансной частоте f_0 . Фазовый сдвиг на резонансной частоте равен нулю.

АЧХ фильтра

$$|G(f)| = \frac{1}{\sqrt{(1/2\pi f\tau - 2\pi f\tau)^2 + 9}}$$

ФЧХ фильтра

$$\varphi(f) = \operatorname{arctg} \frac{1/2\pi f\tau - 2\pi f\tau}{3}$$

Мост Вина

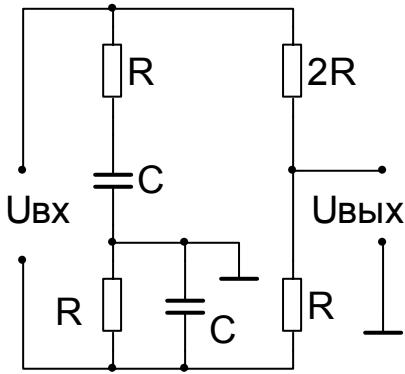


Рис. 4. Мост Вина

Если полосовой фильтр рис. 3 дополнить резистивным делителем $2R-R$, то получится мост Вина рис. 4. Резистивный делитель напряжения обеспечивает частотно-независимый коэффициент деления напряжения $U_{вх}$, а полосовой фильтр коэффициент деления напряжения $U_{вх}$, зависящий от частоты. При этом на резонансной частоте f_0 выходное напряжение равно нулю, т.е. в отличие от полосового фильтра коэффициент передачи фильтра на резонансной частоте имеет минимум. Схема может быть использована как заграждающий фильтр для подавления сигналов в определенном частотном диапазоне. К недостатку фильтра можно отнести отсутствие в нем общего узла для входного и выходного напряжений, что для некоторых применений может быть недопустимо.

АЧХ фильтра

$$|G(f)| = \frac{1}{3} \frac{|1/2\pi f\tau - 2\pi f\tau|}{\sqrt{(1/2\pi f\tau - 2\pi f\tau)^2 + 9}}$$

ФЧХ фильтра

$$\varphi(f) = -\operatorname{arctg} \frac{3}{1/2\pi f\tau - 2\pi f\tau}$$

Двойной Т-образный фильтр

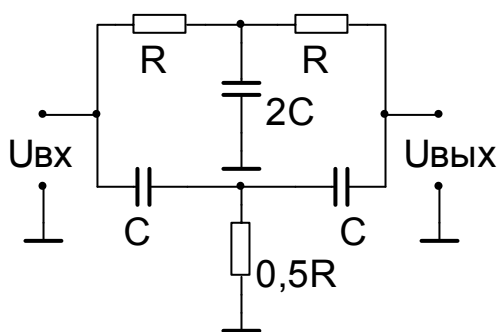


Рис. 5. Двойной Т-образный фильтр

АЧХ и ФЧХ фильтра по виду практически такие же как и у моста Вина, имеются только некоторые количественные отличия. Фильтр также может быть использован как заграждающий фильтр для подавления сигналов в определенном частотном диапазоне. По отношению к мосту Вина он имеет то преимущество, что и входное и выходное напряжения подаются и снимаются относительно общей точки – земли. Для высоких и низких частот справедливо соотношение

$$U_{\text{ВЫХ}} \rightarrow U_{\text{ВХ}}$$

т.к. напряжение $U_{\text{ВХ}}$ на высоких частотах полностью передается на выход через два конденсатора C , а напряжение низких частот – через два резистора R .

АЧХ фильтра

ФЧХ фильтра

$$|G(f)| = \frac{|1/2\pi f\tau - 2\pi f\tau|}{\sqrt{(1/2\pi f\tau - 2\pi f\tau)^2 + 16}}$$

$$\varphi(f) = -\arctg \frac{4}{1/2\pi f\tau - 2\pi f\tau}$$

Литература

1. В. Г. Гусев, Ю. М. Гусев. Электроника и микропроцессорная техника : учеб. для вузов.— Изд. 3-е, перераб. и доп.— М. : Высшая школа, 2005.— 790 с. : ил.— Библиогр.: с. 786 - 787.
2. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника. 12-е изд. Том 2: Пер. с нем., М.: ДМК Пресс, 2007. – 942 с. : ил.

3. Пассивные полосно-пропускающие и заграждающие фильтры на основе колебательных контуров

Целью работы является умение рассчитать, исследовать и моделировать характеристики и работу пассивных фильтров на основе колебательных контуров.

Программа работы

1. Изучить принцип работы пассивных полосно-пропускающих и полосно-заграждающих фильтров на основе колебательных контуров.
2. Рассчитать элементы фильтров.
3. Провести моделирование работы фильтров с использованием частотного анализа **AC Analysis**. Моделирование проводят в диапазоне частот f
 $(0,2 \div 0,3)f_0 \leq f \leq (3 \div 5)f_0$

Каждый фильтр исследуют при двух значениях активного сопротивления R .

4. Построить графики амплитудно-частотной (АЧХ) и фазо-частотной (ФЧХ) характеристик фильтров в полулогарифмическом масштабе: в десятичном логарифмическом масштабе по оси частот и линейном по оси амплитуд.
5. Определить в 10÷12 точках частотной оси расчетные значения АЧХ и ФЧХ.
6. Сравнить графики АЧХ и ФЧХ фильтров, полученные в результате моделирования с результатами, полученными в расчетных точках.

Таблица 4. Варианты заданий

№ варианта		1	2	3	4	5	6	7	8
Резонансная частота f_0	кГц	100	120	125	140	150	170	180	200
Номинал емкости C	нФ	10	10	5,1	5,1	3,3	3,3	2	1

Методические указания по проведению расчётов

Последовательный (рис. 6) и параллельный (рис. 7) колебательные контуры без потерь состоят из конденсатора и катушки индуктивности.

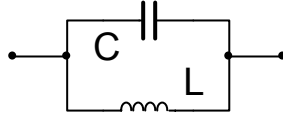
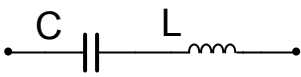


Рис. 6. Последовательный КК

Рис. 7. Параллельный КК

В ходе расчетов электрических цепей используют представление сопротивления конденсатора и катушки индуктивности в виде комплексного сопротивления и его модуля – реактивного сопротивления

$$\dot{X}_L = j \cdot \omega L; \quad \left| \dot{X}_L \right| = X_L = \omega L; \quad \dot{X}_C = \frac{1}{j \cdot \omega C}; \quad \left| \dot{X}_C \right| = X_C = \frac{1}{\omega C}; \quad f = \frac{\omega}{2\pi}$$

C – емкость конденсатора

L – индуктивность катушки

Комплексное и реактивное сопротивления последовательного и параллельного колебательных контуров без потерь определяются формулами

$$\dot{X}_{--} = \frac{1 - \omega^2 LC}{j \cdot \omega C} \quad X_{--} = \left| \dot{X}_{--} \right| = \frac{|1 - \omega^2 LC|}{\omega C} = |\omega L - 1/\omega C| \quad (1)$$

$$\dot{X}_{||} = \frac{j \cdot \omega L}{1 - \omega^2 LC} \quad X_{||} = \left| \dot{X}_{||} \right| = \frac{\omega L}{|1 - \omega^2 LC|} = \frac{1}{|\omega L - 1/\omega C|} \quad (2)$$

На определённой частоте наступает равенство модулей сопротивлений конденсатора и катушки индуктивности, в результате чего в контурах возникает явление резонанса. Частоту резонанса f_0 можно найти из соотношений

$$\omega_0^2 \cdot LC - 1 = 0 \quad f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi}$$

В последовательном контуре через емкость и индуктивность протекает одинаковый ток, который создает на частоте резонанса f_0 на равных сопротивлениях

равные по модулю падения напряжения. Но в емкости напряжение отстает по фазе от тока на 90° , а в индуктивности наоборот, напряжение опережает по фазе ток на 90° , следовательно, эти напряжения сдвинуты относительно друг друга на 180° и находятся в противофазе.

$$u_C = -u_L \Rightarrow u_\Sigma = u_C + u_L = 0$$

Суммарное напряжение на контуре в момент резонанса равно нулю, что математически отражено в формуле (1) равенством нулю сопротивления контура.

В параллельном контуре напряжение на емкости и индуктивности равны, следовательно, в равных сопротивлениях протекают равные по модулю токи. Но в емкости ток опережает по фазе напряжение на 90° , а в индуктивности наоборот, ток отстает от напряжения по фазе на 90° , следовательно, эти токи сдвинуты относительно друг друга на 180° и находятся в противофазе.

$$i_C = -i_L \Rightarrow i_\Sigma = i_C + i_L = 0$$

В результате ток полностью замыкается внутри контура, а во внешней цепи ток равен нулю, что математически отражено в формуле (2) равенством бесконечности сопротивления контура.

Явление равенства нулю или бесконечности сопротивления контуров в режиме резонанса позволяет строить на их основе полосовые и заграждающие фильтры. Преимуществом таких фильтров перед аналогичными фильтрами, построенными на RC цепях, является их высокая добротность, что обеспечивает возможность построения фильтров с узкой полосой пропускания или задержания сигналов и резкими переходами АЧХ. Резонансная частота f_0 для всех фильтров, на которой АЧХ имеет максимум или минимум определяется параметрами L и C колебательных контуров и может быть определена из тех же соотношений, что и для колебательного контура.

Полосовой и заграждающий фильтры с последовательным LC-контуром

Коэффициент передачи полосового RLC фильтра стремится к нулю на высоких и низких частотах, а его максимум наблюдается на резонансной частоте f_0 . Фазовый сдвиг на резонансной частоте равен нулю.

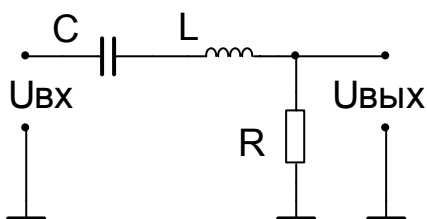


Рис. 8. Полосовой RLC фильтр

АЧХ полосового фильтра

$$|G(f)| = \frac{\omega RC}{\sqrt{\omega^2 (RC)^2 + (\omega^2 LC - 1)^2}}$$

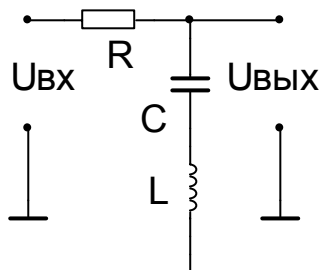


Рис. 9. Заграждающий RLC фильтр

ФЧХ полосового фильтра

$$\varphi(f) = -\operatorname{arctg} \frac{\omega^2 LC - 1}{\omega RC}$$

Коэффициент передачи заграждающего RLC фильтра стремится к единице на высоких и низких частотах, а на резонансной частоте f_0 стремится к нулю. Угол фазового сдвига на резонансной частоте имеет разрыв 180° . Физически это означает, что при переходе через частоту f_0 выходной сигнал меняет фазу на противоположную.

АЧХ заграждающего фильтра

$$|G(f)| = \frac{|\omega^2 LC - 1|}{\sqrt{\omega^2 (RC)^2 + (\omega^2 LC - 1)^2}}$$

ФЧХ заграждающего фильтра

$$\varphi(f) = \operatorname{arctg} \frac{\omega RC}{\omega^2 LC - 1}$$

Характеристики фильтра рассчитывают и исследуют при двух значениях сопротивлений $R = 10 \text{ Ом}$ и $R = 100 \text{ Ом}$

Полосовой и заграждающий фильтры с параллельным LC-контуром

Вид частотных характеристик этих фильтров аналогичен виду характеристик RLC фильтров на основе последовательного LC-контура.

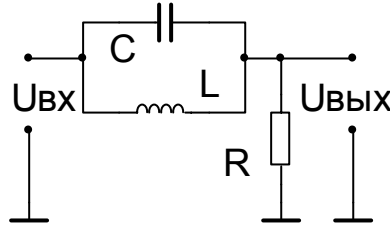
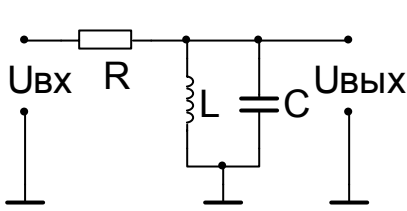


Рис. 10. Полосовой RLC фильтр

Рис. 11. Заграждающий RLC фильтр

АЧХ полосового фильтра

$$|G(f)| = \frac{\omega(L/R)}{\sqrt{\omega^2(L/R)^2 + (\omega^2 LC - 1)^2}}$$

ФЧХ полосового фильтра

$$\varphi(f) = -\arctg \frac{\omega^2 LC - 1}{\omega(L/R)}$$

АЧХ заграждающего фильтра

$$|G(f)| = \frac{|\omega^2 LC - 1|}{\sqrt{\omega^2(L/R)^2 + (\omega^2 LC - 1)^2}}$$

ФЧХ заграждающего фильтра

$$\varphi(f) = \arctg \frac{\omega(L/R)}{\omega^2 LC - 1}$$

Характеристики фильтра рассчитывают и исследуют при двух значениях сопротивлений $R = 1$ кОм и $R = 10$ кОм.

Литература

1. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника. 12-е изд. Том 2: Пер. с нем., М.: ДМК Пресс, 2007. – 942 с. : ил.