

ЛЕКЦИЯ 6

Фильтры электрических сигналов

План занятия:

1. Классификация фильтров электрических сигналов
2. Коэффициент передачи
3. Структуры схем фильтров
4. RC -фильтры
5. LC -фильтры

Классификация фильтров электрических сигналов и их характеристики

Фильтр – это устройство, которое позволяет ограничить частотный спектр сигнала или выделить сигналы в пределах определенной полосы частот (полосы пропускания).

Селективность фильтра (избирательность) – способность выделять полезный сигнал на фоне посторонних помех.

При расчете и определении параметров фильтров сигналов используется *амплитудно-частотная характеристика (АЧХ)* – зависимость амплитуды выходного сигнала от частоты.

Каждый фильтр характеризуется *частотой среза* – частота, которая соответствует условию, что мощность выходного сигнала фильтра уменьшилась на вдвое (или на -3 дБ) по сравнению с мощностью входного сигнала (рис.6.1). Поэтому частота среза называется еще *частотой половинной мощности*.

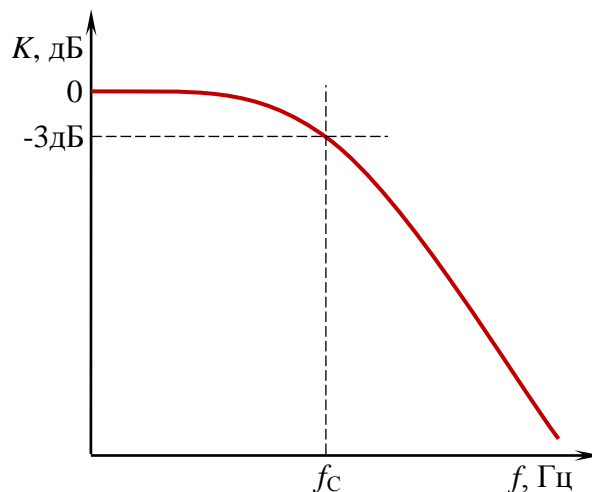


Рис.6.1. Определение частоты среза на амплитудно-частотной характеристике

При анализе характеристик фильтров выделяют реальные и идеальные фильтры.

Идеальные фильтры не ослабляют сигнал в полосе пропускания и полностью исключают прохождение сигнала в полосе задержания, обладая

бесконечно большой крутизной АЧХ на частоте среза.

Аналогичные параметры реальных фильтров конечны и зависят как от применяемых элементов схемы, так и от схемотехнических решений.

По расположению полосы пропускания в частотном спектре выделяют:

- фильтры нижних частот (ФНЧ);
- фильтры верхних частот (ФВЧ);
- полосовые фильтры (ПФ);
- заграждающие фильтры (ЗФ)
- гребенчатые (ГФ) или многополосовые фильтры.

Фильтр нижних частот имеет низкий коэффициент передачи на частотах выше частоты среза, а на частотах ниже частоты среза пропускает сигнал без ослабления (рис.6.2).

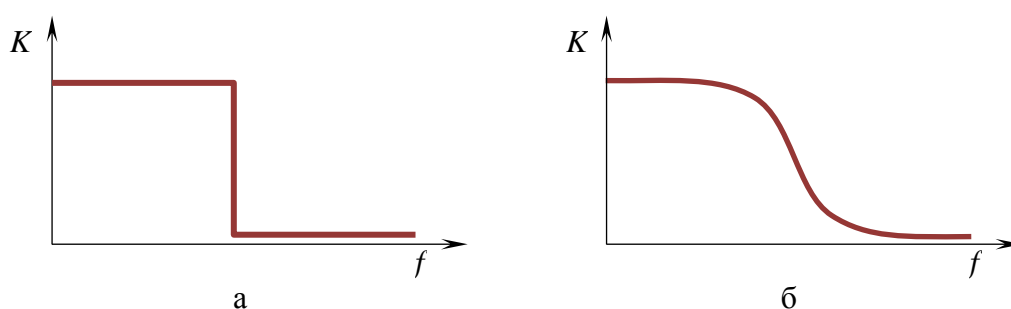


Рис.6.2. Амплитудночастотная характеристика ФНЧ:
а – идеального, б – реального

Фильтр верхних частот не оказывает влияния на амплитуды сигналов, имеющих частоту выше частоты среза, и не пропускает сигналы с частотой ниже, чем частота среза (рис.6.3).

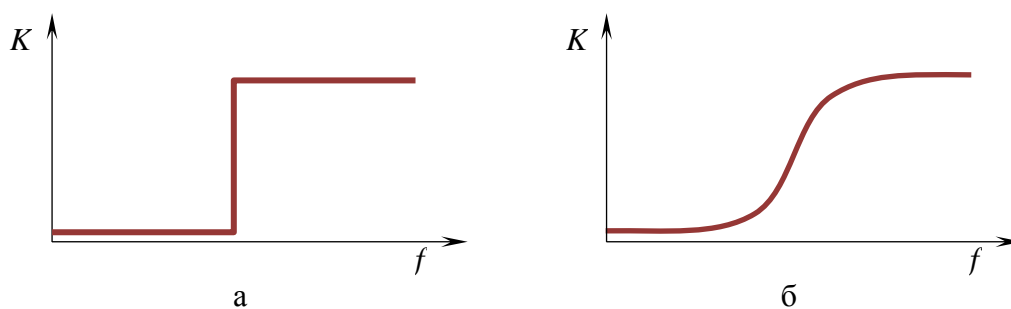


Рис.6.3. Амплитудночастотная характеристика ФВЧ:
а – идеального, б – реального

Полосопропускающий фильтр (полосовой) пропускает сигналы, частота которых находится в интервале между его нижней и верхней частотами среза и не пропускает сигналы остальных частот (рис.6.4).

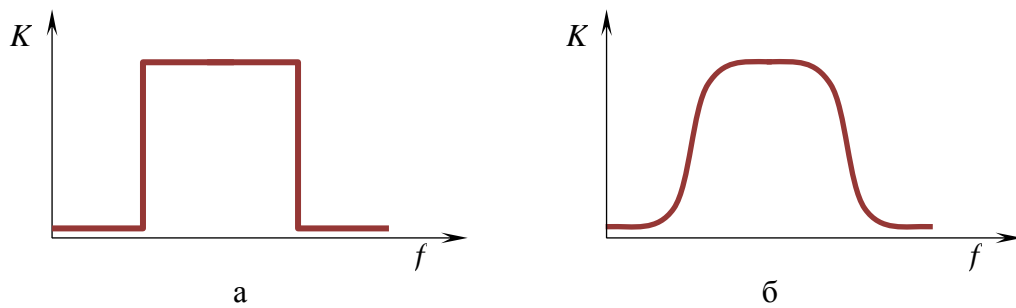


Рис.6.4. Амплитудночастотная характеристика полосового фильтра:
а – идеального, б – реального

Полосозаграждающий фильтр (режекторный) не пропускает сигналы с полосой частот, заключенной в интервале между его нижней и верхней частотами среза. Сигналы всех остальных частот он пропускает без ослабления (рис.6.5).

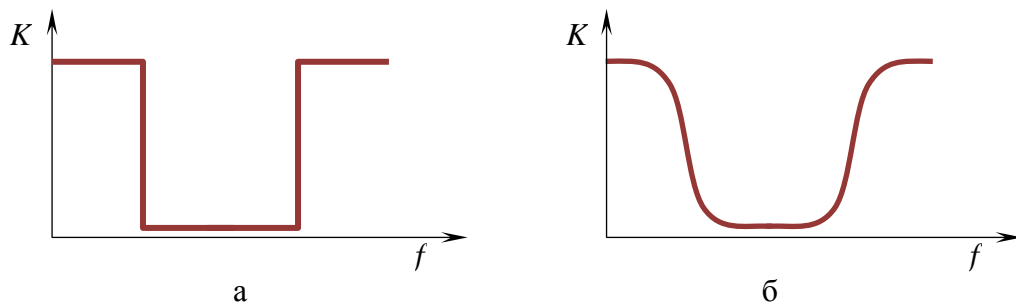


Рис.6.5. Амплитудночастотная характеристика режекторного фильтра:
а) идеального, б) реального

По типу применяемой элементной базы различают пассивные и активные фильтры.

Пассивные фильтры реализуются на основе пассивных элементов – резисторов, конденсаторов и катушек индуктивности. Такие фильтры просты в реализации, не требуют источников питания элементов фильтров, реализуются в широком диапазоне частот (от инфразвуковых частот до ультракоротковолнового диапазона радиочастот), обладают большим динамическим диапазоном.

В *активных фильтрах* присутствует один или несколько активных компонентов (транзистор или операционный усилитель). Активные фильтры способны усиливать проходящие через них сигналы по мощности за счет энергии внешнего источника.

По типу передаточной функции фильтры бывают *линейные* и *нелинейные*.

По типу импульсной характеристики фильтры бывают с бесконечной (*рекурсивный фильтр*) и с конечной (*нерекурсивный фильтр*) характеристикой.

Коэффициент передачи

Коэффициент передачи – отношение электрической величины сигнала на выходе той или иной системы, предназначенной для передачи электрических сигналов, к соответствующей величине на входе. У различных электронных устройств коэффициент передачи может быть больше или меньше единицы (больше или меньше нуля для коэффициента в логарифмическом масштабе) тогда коэффициент передачи называют коэффициентом усиления или ослабления.

Одним из основных параметров, используемых при анализе характеристик фильтров сигналов, является коэффициент ослабления. *Коэффициент ослабления* показывает во сколько раз амплитуда сигнала на выходе фильтра, уменьшилась по отношению к амплитуде сигнала на входе. На практике коэффициент ослабления принято определять в децибелах [дБ].

Децибел – логарифмическая единица уровней, затуханий и усилений.

Децибел – это безразмерная единица, применяемая для измерения отношения физических величин второго порядка (энергетических: мощность, энергия) и первого порядка (напряжение, сила тока). Иными словами, децибел – это относительная величина, предназначенная для измерения отношения двух других величин, причем к полученному отношению применяется логарифмический масштаб.

Изначально дБ использовался для оценки отношения *мощностей*, и в каноническом, привычном смысле величина, выраженная в дБ, предполагает логарифм отношения двух *мощностей* и вычисляется по формуле:

$$K \text{ дБ} = 10 \lg \frac{P_{\text{ВЫХ}}}{P_{\text{ВХ}}},$$

где $P_{\text{ВЫХ}}$ – измеряемая мощность на выходе устройства (усилителя, фильтра);

$P_{\text{ВХ}}$ – мощность на входе устройства (опорная мощность).

Соответственно, переход от дБ к отношению мощностей осуществляется по формуле

$$\frac{P_{\text{ВЫХ}}}{P_{\text{ВХ}}} = 10^{0,1 \cdot K \text{ дБ}},$$

а мощность $P_{\text{ВЫХ}}$ может быть найдена при известной опорной мощности $P_{\text{ВХ}}$ по выражению

$$P_{\text{ВЫХ}} = P_{\text{ВХ}} \cdot 10^{0,1 \cdot K \text{ дБ}}$$

Неэнергетические величины должны быть преобразованы в энергетические. Так, согласно закону Джоуля-Ленца $P = U^2/R$ или $P = I^2 \cdot R$.

Следовательно

$$K \text{ дБ} = 10 \lg \frac{P_{\text{ВЫХ}}}{P_{\text{ВХ}}} = 10 \lg \frac{U_{\text{ВЫХ}}^2 R_{\text{ВХ}}}{U_{\text{ВХ}}^2 R_{\text{ВЫХ}}}.$$

В частном, весьма распространенном, случае, если оба напряжения $U_{\text{ВЫХ}}$ и $U_{\text{ВХ}}$ измерялись при одном и том же сопротивлении ($R_{\text{ВЫХ}} = R_{\text{ВХ}}$) или соотношение сопротивлений по той или иной причине не важно, можно пользоваться краткими выражениями для тока и напряжения

$$K \text{ дБ} = 20 \lg \frac{I_{\text{ВЫХ}}}{I_{\text{ВХ}}}, \quad K \text{ дБ} = 20 \lg \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}}.$$

Структуры схем фильтров

По своей структуре схемы пассивных фильтров подразделяются на фильтры Г-, Т- и П-структур. Простейшим фильтром является Г-образный фильтр (рис.6.6). Модель фильтра при этом состоит из двух схемных элементов Z_1 и Z_2 . Параметр Z обозначает сопротивление схемного элемента фильтра сигнальным токам.

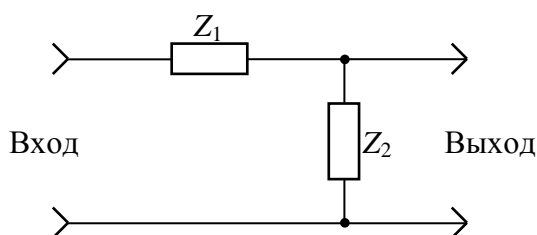


Рис.6.6. Модель Г-образного фильтра

Переход к другим структурам фильтров осуществляется за счет добавления в схему Г-образного фильтра дополнительного элемента.

Модель Т-образного фильтра состоит из трех схемных элементов: двух элементов $Z_1/2$, и одного элемента Z_2 (рис.6.7).

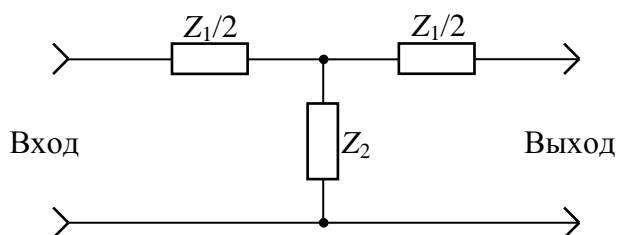


Рис.6.7. Модель Т-образного фильтра

При изменении схемы их соединения можно получить модель фильтра П-

структуры (рис.6.8). Модель П-образного фильтра состоит из трех схемных элементов: одного элемента Z_1 и двух элементов $2Z_2$.

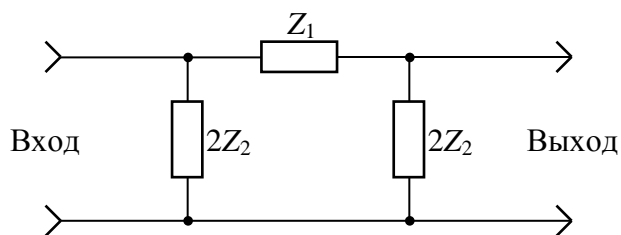


Рис.6.8. Модель П-образного фильтра

Одно из отличий фильтров Т- и П-структур заключается в характере их входных и выходных сопротивлений и зависимости их от частоты, что необходимо учитывать при проектировании конкретных электронных устройств.

Отмеченные типы фильтров могут применяться как в виде первичной, простой структуры, так и в виде цепочки, составленной из нескольких простых структур, количество которых зависит от требуемой селективности фильтра.

Фильтры на основе резисторов и конденсаторов

Фильтры, построенные на основе резисторов и конденсаторов условно называют *RC*-фильтрами. Они обладают сравнительно невысокой селективностью из-за использования в своем составе только одного элемента, сопротивление которого зависит от частоты сигнальных токов – конденсатора. В то же время *RC*-фильтры просты в реализации, обладают малыми габаритами и дешевизной. Это позволяет использовать их во многих случаях, когда не требуется высокая селективность и сигнал обладает достаточно большой энергией, так как необходимо учитывать потери на активном сопротивлении резистора.

Применяют *RC*-фильтры в основном в диапазонах инфразвуковых и звуковых частот, иногда и на более высоких частотах. В маломощных источниках питания электронной аппаратуры их используют для фильтрации выпрямленного напряжения. В усилителях они применяются в цепях межкаскадных связей, в цепях коррекции амплитудно-частотной характеристики, в развязывающих фильтрах по цепям питания. В этих же диапазонах частот *RC*-фильтры используют в системах управления для фильтрации сигналов от датчиков состояния объектов управления.

RC-фильтры нижних частот

Для реализации *RC*-фильтров нижних частот в качестве Z_1 используют резистор R , а в качестве Z_2 используют конденсатор C (рис.6.6). Частота среза для фильтра рассчитывается по формуле

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}. \quad (6.1)$$

Для ФНЧ Г-структуры номинальные величины параметров резистора и конденсатора получаются непосредственно из формулы. При реализации ФНЧ Т- и П-структур, номинальные величины параметров резисторов и конденсаторов в схеме определяют, учитывая коэффициенты номинальных величин схемных элементов относительно исходной Г-структуры.

RC-фильтры верхних частот

Для реализации RC-фильтров верхних частот в качестве Z_1 используют конденсатор C , а в качестве Z_2 используют резистор R (рис.6.6). Частота среза при этом рассчитывается по формуле (6.1). Определение номинальных величин параметров резисторов и конденсаторов для ФВЧ различных структур производится аналогично ФНЧ. То есть при реализации ФВЧ Т- и П-структур, номинальные величины параметров резисторов и конденсаторов в схеме определяют, учитывая коэффициенты номинальных величин схемных элементов относительно исходной Г-структуры.

При реализации пассивных фильтров следует учитывать, что на их элементах рассеивается энергия сигнала. Поэтому необходимо учитывать ослабление полезного сигнала в полосе пропускания пассивного фильтра, которое увеличивается при увеличении числа звеньев фильтра. При этом ослабление полезного сигнала в полосе пропускания больше у фильтров, реализованных на резисторах и конденсаторах, чем у фильтров, реализованных на катушках индуктивности и конденсаторах. Поэтому многозвенные пассивные фильтры реализуют в основном на катушках индуктивности и конденсаторах.

Фильтры на основе катушек индуктивности и конденсаторов

Фильтры, построенные на основе катушек индуктивности и конденсаторов условно называют LC-фильтрами. Они обладают более высокой селективностью по сравнению с RC-фильтрами из-за использования в своем составе двух элементов, сопротивление которых зависит от частоты сигнальных токов – конденсатора и катушки индуктивности. LC-фильтры обладают меньшим затуханием в полосе пропускания и большим затуханием в полосе задержания по сравнению с RC-фильтрами.

Применяют LC-фильтры, в основном, в ультразвуковом и радиочастотном диапазонах, в которых они обладают приемлемыми габаритами. Хотя в тех случаях, когда RC-фильтры не обеспечивают необходимой селективности, LC-фильтры используют и в диапазоне звуковых частот.

Частотная избирательность (селективность) LC-фильтров позволяет с их помощью решать проблемы частотного разделения каналов в многоканальных системах связи. Это необходимо, в частности, для реализации частотного уплотнения каналов связи при осуществлении телеуправления сложными

территориально-распределенными технологическими объектами. При использовании телеуправления по каналам радиосвязи LC -фильтры позволяют обеспечить необходимую помехоустойчивость.

При реализации LC -фильтров следует учитывать их некоторые специфические особенности. Это более высокая трудоемкость изготовления и большая стоимость катушек индуктивности по сравнению с резисторами и конденсаторами. К тому же LC -фильтры, использующие катушки индуктивности с ферромагнитными сердечниками обладают меньшим динамическим диапазоном из-за своей нелинейности. Для исключения паразитных связей и наводок катушки индуктивности фильтров необходимо экранировать.

Для LC -фильтров типа К последовательные и параллельные плечи (рис.6.6) являются обратными двухполюсниками и для них

$$Z_0^2 = Z_1 Z_2. \quad (6.2)$$

Параметр

$$Z_0 = \sqrt{Z_1 Z_2}, \quad (6.3)$$

имеет размерность сопротивления, называется характеристическим сопротивлением фильтра и является для такого типа фильтра постоянной величиной.

При подстановке в (6.3) выражений сопротивления катушки индуктивности и конденсатора переменному току, получим

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (6.4)$$

LC-фильтры нижних частот

Для реализации LC -фильтров нижних частот в качестве Z_1 используют катушку индуктивности L , а в качестве Z_2 используют конденсатор C (рис.6.6). Частота среза для фильтра рассчитывается по формуле

$$f_c = \frac{1}{\pi \sqrt{LC}}. \quad (6.5)$$

Из (6.4) и (6.5) следует, что индуктивность катушки фильтра

$$L = \frac{Z_0}{\pi \cdot f_c}, \quad (6.6)$$

а емкость конденсатора фильтра

$$C = \frac{1}{\pi \cdot Z_0 \cdot f_c}. \quad (6.7)$$

Для ФНЧ Г-структуры номинальные величины индуктивности катушки и емкости конденсатора рассчитывают непосредственно по формулам (6.6) и (6.7), с учетом необходимого характеристического сопротивления (при выполнении настоящей работы величина характеристического сопротивления задается).

При реализации ФНЧ Т- и П-структур, номинальные величины параметров катушек индуктивности и конденсаторов в схеме определяют, учитывая коэффициенты номинальных величин схемных элементов относительно исходной Г-структуры для схемы фильтра соответствующей структуры (рис.6.7, рис.6.8).

LC-фильтры верхних частот

Для реализации LC-фильтров верхних частот в качестве Z_1 используют конденсатор, а в качестве Z_2 используют катушку индуктивности (рис.6.6). Частота среза для фильтра рассчитывается по формуле

$$f_c = \frac{1}{4\pi\sqrt{LC}}. \quad (6.8)$$

Из (6.4) и (6.8) следует, что индуктивность катушки фильтра

$$L = \frac{Z_0}{4\pi \cdot f_c}, \quad (6.9)$$

а емкость конденсатора фильтра

$$C = \frac{1}{4\pi \cdot Z_0 \cdot f_c}. \quad (6.10)$$

Для ФВЧ Г-структуры номинальные величины индуктивности катушки и емкости конденсатора рассчитываются по формулам (6.9) и (6.10) с учетом необходимого характеристического сопротивления (при выполнении настоящей работы величина характеристического сопротивления задается).

При реализации ФВЧ Т- и П- структур, номинальные величины параметров катушек индуктивности и конденсаторов в схеме определяют, учитывая коэффициенты номинальных величин схемных элементов относительно исходной Г-структуры. При этом необходимо учитывать правила определения параметров конденсаторов и катушек индуктивности при их последовательном и параллельном соединении для сохранения неизменными значения расчетных параметров элементов исходной Г-структуры.