

Предисловие

В настоящее время проектирование и исследование электрических и электронных устройств, в том числе частотных фильтров (ЧФ), ведут по разработанным методикам с использованием программных сред: Matlab, Mathcad, LabView, Multisim и др. Учитывая небольшой объем часов, выделяемый в учебных планах на изучение таких дисциплин, как «Электротехника и электроника», «Основы теории цепей», «Цифровая обработка сигналов» и др., неоправданные стоимостные и временные затраты на приобретение и освоение любой из указанных лицензионных сред, а также необходимость обеспечения слушателей дистанционной формы обучения инструментарием по расчету, моделированию на вычислительном устройстве (ВУ) и испытанию пассивных, активных и цифровых фильтров, нами разработаны соответствующие электронные образовательные ресурсы — учебно-программные среды LgH, ARCF и DFLD для использования как при проведении лабораторно-практических занятий, так и при выполнении студентами расчетно-графических или курсовых работ, предусмотренных в учебных программах указанных дисциплин.

Две учебно-программные среды LgH [5] и DFLD [6], разработанные в рамках проектной деятельности студентами МАТИ по алгоритмам автора с использованием языков Visual C++ и DHTML, стали победителями конкурса курсовых и дипломных работ студентов и отмечены дипломами Минобрнауки РФ.

В пособии изложены теоретические основы частотного метода анализа линейных электрических цепей и устройств, даны примеры расчета параметров элементов звеньев фильтров и построения графиков их временных и частотных (в том числе логарифмических) функций, приведено описание процессов моделирования фильтров в разработанных программных средах с вводом с клавиатуры ВУ (персонального компьютера, ноутбука, компьютерного планшета) параметров звеньев фильтров для сравнительного анализа выводимых на экран дисплея графиков функций с графиками, рассчитанными и построенными студентами «вручную».

Приложение к книге — учебный образовательный ресурс «Частотные фильтры» (150 Мб) — размещено на сайте www.techbook.ru издательства для скачивания купившими книгу пользователями.

Учебное пособие предназначено для студентов технических вузов, обучающихся по естественнонаучным направлениям подготовки бакалавров и дипломированных специалистов, в учебные планы которых включены такие дисциплины, как «Электротехника и электроника», «Основы теории цепей», «Цифровая обработка сигналов» и другие электротехнические дисциплины, а также для преподавателей, занимающихся разработкой и использованием средств информационных технологий в образовании.

Введение

В.1. Частотный метод анализа электрических цепей и устройств

Частотный метод анализа заключается в расчете, построении и анализе частотных характеристик электрической цепи или устройства, отражающих его реакцию на гармоническое воздействие. В общем виде частотные свойства устройства определяются его комплексным коэффициентом передачи $H(j\omega)$, получаемым из выражения его передаточной функции $H(p)$ после замены в ней оператора Лапласа $p = \sigma + j\omega$ оператором Фурье $j\omega$ и несложных преобразований, т. е.

$$H(j\omega) = H(p)|_{p=j\omega} = H(\omega)e^{j\Psi(\omega)},$$

где $H(\omega) = |H(j\omega)|$ — модуль комплексного коэффициента передачи, а его график — *амплитудно-частотная характеристика* (АЧХ) устройства; $\Psi(\omega) = \arg H(j\omega)$ — аргумент комплексного коэффициента передачи, а его график — *фаза-частотная характеристика* (ФЧХ) устройства.

Характеристики $H(\omega)$ и $\Psi(\omega)$ позволяют определить реакцию устройства при подаче на его вход гармонического сигнала $u_1 = U_{m1} \sin \omega t$ с постоянной амплитудой U_{m1} и изменяющейся угловой ω (или циклической $f = \omega/2\pi$) частотой от 0 до $\omega \rightarrow \infty$.

В.1.1. Назначение и области применения частотных фильтров

На практике часто встречаются с необходимостью пропускать в ограниченном диапазоне частот к приёмнику (нагрузке) напряжения (токи) одних частот и не пропускать или пропускать, но с большим затуханием, напряжения (токи) других частот. Эта задача решается с помощью электрических частотных фильтров.

Частотный (полосно-пропускающий) *фильтр* (ЧФ) — селективный четырёхполюсник (рис. В.1,а), пропускающий без заметного ослабления электрические колебания (напряжения, токи) определённых частот и подавляющий колебания остальных частот. Полосу частот с возможно малым затуханием, например, напряжения $U_2(\omega)$ называют *полосой пропускания* $\Delta\omega_{\text{п}}$, а полосы частот с большим

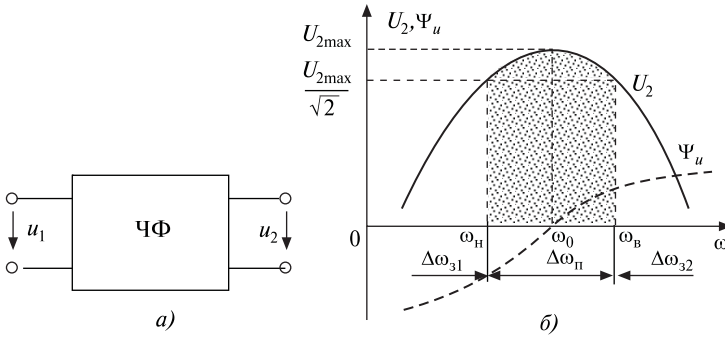


Рис. В.1

ослаблением сигнала — *полосами задерживания* (задержки) $\Delta\omega_{з1}$ и $\Delta\omega_{з2}$ (рис. В.1,б). Граничные частоты между полосой пропускания и полосами задерживания называют частотами среза ω_c : нижней $\omega_н$ и верхней $\omega_в$. Тогда ширина полосы пропускания $\Delta\omega = \omega_в - \omega_н$.

Частотные фильтры, собранные из индуктивных катушек и конденсаторов и используемые для частотной избирательности в диапазоне от 100 Гц до 100 МГц, называют *пассивными* или *LC-фильтрами*, а фильтры, выполненные на основе активных элементов (транзисторов, операционных усилителей и др.) и *RC-звеньев* и имеющие диапазон пропускания сигнала от 0 до 1 МГц, называют *активными* или *ARC-фильтрами*. Преимущества активных фильтров особенно проявляются в области сверхнизких частот, где использование *LC-фильтров* принципиально невозможно.

Принцип работы пассивных фильтров основан на явлении резонанса в *LC-звеньях* и частотных свойствах элементов *L* и *C*, а активных фильтров — на ограничительных (запирающих) свойствах активных элементов и частотных свойствах *RC-звеньев* обратных связей. На высоких частотах (СВЧ-диапазона) обычные *LC-фильтры* заменяют *полосковыми линиями*, в области микроволн (скажем, выше 2 ГГц) используют *полые резонаторы*, но принцип их работы остаётся таким же, как у обычных *LC-фильтров*.

Если необходимо иметь фильтр, пропускающий очень узкую полосу частот $\Delta\omega_п$ без ослабления сигнала и с резкими спадами напряжения на границах среза, то такой полосовой фильтр выполняют, используя *пьезоэлектрический* (керамический или на кристалле кварца) или *механический* резонаторы. В приёмниках сигналов с высокой избирательностью и для высокочастотной генерации модулированных сигналов широко используют 8- и 16-полосные пьезокристаллические фильтры с центральной частотой ω_0 в пределах от

1 МГц до 50 МГц и шириной полосы пропускания $\Delta\omega_{\text{п}}$ от нескольких сотен до нескольких килогерц.

Процесс преобразования формы поступающего на вход ЧФ сигнала путём исключения из его спектра составляющих отдельных частот называют *фильтрацией* сигнала. Если преобразуемые сигналы непрерывно изменяются во времени, то их, как и соответствующие фильтры, называют *аналоговыми*. Получение нужной крутизны склонов выходного напряжения $U_2(\omega)$ с помощью аналоговых ЧФ приводит, нередко, к значительному усложнению схем или вообще такие фильтры практически не реализуемы.

Задачи подавления одних и выделения других компонент спектра сигнала могут быть решены с помощью *цифровых* фильтров (ЦФ), главным элементов которых является вычислительное устройство (ВУ). Упрощённая структурная схема ЦФ показана на рис. В.2. Входной аналоговый сигнал (напряжение u_1) подают на вход фильтра нижних частот ФНЧ1, а с его выхода напряжение $u_a(t)$ подают на один из входов импульсного модулятора M . На второй вход модулятора поступает последовательность единичных импульсов $\delta_\tau(t) = \delta(t - k\tau)$, где τ — шаг последовательности единичных импульсов.

Выходной сигнал модулятора принимает вид

$$u_{\text{д}} = u_a(t)\delta_\tau(t) = u_a(t) \sum_{k=0}^{\infty} \delta(t - k\tau) = \sum_{k=0}^{\infty} u(k\tau)\delta(t - k\tau) = u(0)\delta(t) + u(\tau)\delta(t - \tau) + u(2\tau)\delta(t - 2\tau) + \dots + u(k\tau)\delta(t - k\tau) + \dots \quad (\text{В.1})$$

При этом высота (или площадь) каждого импульса в последовательности (В.1) представляет собой соответствующее значение непрерывной функции $u_a(t)$ на выходе ФНЧ1. Дискретный сигнал $u_{\text{д}}$ преобразуется в кодере K в цифровую последовательность единиц и нулей и подаётся на вычислительное устройство ВУ, которое исключает из последовательности спектральные компоненты, расположенные вне заданного частотного диапазона. Формирование заданной частотной характеристики фильтра обусловлено цифровой

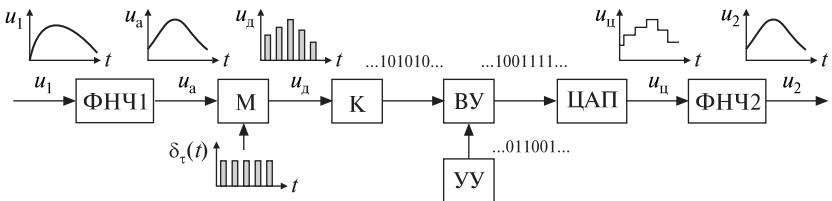


Рис. В.2

последовательностью, подаваемой на ВУ от устройства управления УУ, которая складывается, вычитается и т. д. с входной последовательностью единиц и нулей. Далее, результирующая последовательность поступает на цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП), формирующий ступенчатый сигнал из цифрового, и через ФНЧ2 сигнал u_2 подаётся на вход приемного устройства.

Достоинствами ЦФ являются:

- возможность быстрого изменения формы напряжения $u_a(t)$ и его ширины полосы пропускания $\Delta\omega_{п}$;
- высокая стабильность частотных характеристик;
- возможность работы на очень низких частотах (1...100 Гц);
- возможность изготовления на цифровых интегральных схемах, вследствие чего они могут быть компактными, недорогими и высоконадёжными устройствами.

В.1.2. Классификация фильтров

Частотные фильтры классифицируют по различным признакам, в частности:

- по виду сигналов: аналоговые и цифровые;
- по схемам звеньев, составляющих фильтр;
- по числу звеньев: однозвенные (двухполосные) и многозвенные;
- по пропускаемому спектру частот и форме амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) $H_u(\omega)$: фильтры нижних частот (ФНЧ), верхних частот (ФВЧ), полосовые (ПФ) и режекторные или заграждающие (РФ) (рис. В.3).

Отметим, что АЧХ $H_u(\omega)$ четырёхполосника по напряжению — это график отношения выходного напряжения $U_2(\omega)$ к входному напряжению $U_1(\omega)$, т. е.

$$H_u(\omega) = \frac{U_2(\omega)}{U_1(\omega)},$$

а фазо-частотная характеристика (ФЧХ) $\Psi_u(\omega)$ — это график разности начальных фаз сигналов на выходе и входе цепи (см.

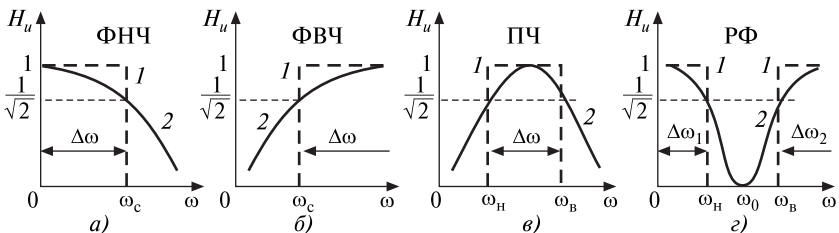


Рис. В.3