

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
ОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. Ф.М. ДОСТОЕВСКОГО

Т. В. Вахний

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ФИЛЬТРЫ

Лабораторный практикум

© Т. В. Вахний, 2016

© Оформление. ФГБОУ ВО «ОмГУ им. Ф.М. Достоевского», 2016

ISBN 978-5-7779-2057-7



2016

УДК 537
ББК 23.33я73я05
В223

*Рекомендовано к изданию
редакционно-издательским советом ОмГУ*

Рецензенты:
д-р техн. наук, проф. С.Н. Чуканов;
канд. физ.-мат. наук, доц. А.Н. Кабанов

Вахний, Т. В.

В223 Электрические фильтры [Электронный ресурс] : лабораторный практикум / Т. В. Вахний. – Электрон. текстов. дан. – Омск : Изд-во Ом. гос. ун-та, 2016. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM); 12 см.

ISBN 978-5-7779-2057-7

Излагаются основные теоретические сведения об электрических фильтрах, дается их классификация, основные формулы для расчета частотных характеристик, приводятся задания к выполнению четырех лабораторных работ. Каждая лабораторная работа содержит теоретическое введение, указания по расчету и оформлению отчета, а также контрольные вопросы для проверки усвоенного материала.

Для студентов факультета компьютерных наук, обучающихся по направлениям подготовки 10.03.01 «Информационная безопасность», 09.03.01 «Информатика и вычислительная техника» и по специальности 10.05.01 «Компьютерная безопасность».

Текстовое электронное издание

Самостоятельное электронное издание

Минимальные системные требования:

PC, Pentium и выше с частотой не ниже 500 MHz; ОЗУ 256 Mb; Microsoft Windows 2000/XP/Vista/7; Internet Explorer 6.0 и выше; Adobe Acrobat Reader 9.0; CD-ROM; мышь

© Т.В. Вахний, 2016

© Оформление. ФГБОУ ВО «ОмГУ им. Ф.М. Достоевского», 2016

Издается в авторской редакции
Макет подготовлен в Издательстве ОмГУ



Технический редактор *Е.В. Лозовая*
Программно-техническая реализация *Е.А. Малыгиной*

Дата выпуска: 20.12.2016. 1 электрон. опт. диск (CD-ROM); 12 см.
Тираж 10 копий. Объем 2,6 Мб.

*Издательство Омского государственного университета
им. Ф.М. Достоевского
644077, г. Омск, пр. Мира, 55а
тел.: 8(3812) 67-32-55, 64-30-61, 64-13-07*

Навигация по сборнику: инструкция для читателей

1. Для быстрого перехода к нужной статье используйте интерактивное содержание сборника:

- нажмите кнопку «Закладки» (иконка имеет вид  или ) на боковой (левой) панели;
- в открывшейся панели, прокручивая Содержание, найдите название статьи;
- кликнув по названию статьи, перейдите к ее тексту.

2. Если боковая панель с кнопкой «Закладки» отсутствует, настройте ее следующим образом:

– если вы используете раннюю версию Adobe Reader, зайдите в меню «Просмотр», выберите «Панели навигации», нажмите кнопку «Закладки»;

– если вы используете последние версии Adobe Reader, зайдите в меню «Просмотр», выберите «Показать / Скрыть», далее – «Области навигации», в выпадающем меню нажмите «Закладки».

Далее действуйте в соответствии с указаниями п. 1.

ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ И УКАЗАНИЯ

ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Неотъемлемой частью подготовки специалистов компьютерных специальностей является получение теоретических знаний и практических навыков использования электрических цепей для выделения электрических сигналов в определенном диапазоне частот. В данном издании в качестве компьютерной среды изучения основ работы с такими электрическими цепями (фильтрами) выбрана система Electronics Workbench, разработанная фирмой Interactive Image Technologies. Особенностью системы является наличие контрольно-измерительных приборов, по внешнему виду и характеристикам приближенных к их промышленным аналогам. Имеющиеся в программе библиотеки включают в себя большой набор широко распространенных электронных компонентов.

Лабораторный практикум включает в себя основные теоретические сведения об электрических фильтрах и задания к выполнению четырех лабораторных работ. Каждая лабораторная работа содержит теоретическое введение, указания по расчету и оформлению отчета, а также контрольные вопросы для проверки усвоенного материала. Перед тем как приступить к выполнению лабораторной работы следует внимательно ознакомиться с теоретическим материалом. Все предварительные расчеты нужно сделать заранее. В отчете к лабораторной работе необходимо указать название работы, цель работы, краткое изложение теории, схемы электрических цепей и все расчеты. Записи измерений лучше всего вести в виде таблиц с указанием единиц измерения величин. Графики рекомендуется чертить, снабжая заголовками и пояснениями, содержащими точное и краткое описание того, что показывает график. Обязательно указываются откладываемые по осям величины и их размерности. В конце отчета нужно перечислить выводы, сделанные по проделанной работе.

ОБЛАСТИ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ФИЛЬТРОВ

Практическое применение электрических фильтров весьма широко и разнообразно. Они применяются как в радиотехнике и технике связи, где имеют место токи достаточно высоких частот, так и в силовой электронике и электротехнике. Так, в радиоприемнике из сигналов многочисленных радиостанций фильтры выделяют сигнал одной принимаемой станции. В энергетических системах при передаче сигналов телеуправления, телеизмерении и автоконтроля по линиям электропередачи высокого напряжения фильтры отделяют эти сигналы от тока промышленной частоты (50 Гц). В установках частотного телеуправления многими объектами, например на газопроводах, железнодорожном транспорте и др. фильтры выделяют сигналы управления, предназначенные каждому объекту. При организации по воздушным линиям электропроводной связи одновременно несколько телефонных разговоров (высокочастотная телефонная связь) на приемной станции устанавливаются фильтры для разделения телефонных сигналов отдельных абонентов. Кроме того, широкое применение они находят в области распознавания речи. Совершенствование электрических фильтров неразрывно связано с последующим развитием высокочастотной техники и электроники. Создание многоканальной проводной связи и радиосвязи сопровождалось разработкой теории электрических фильтров и методов их расчета. Особенно быстрое и плодотворное развитие методов синтеза электрических цепей, и в частности электрических фильтров, достигло в результате применения ЭВМ и разработки специальных методов расчета. Различают аналоговые фильтры, в которых обрабатываемый сигнал имеет аналоговую форму, и цифровые фильтры, предназначенные для обработки цифровых сигналов. В настоящей учебном пособии рассматриваются аналоговые фильтры.

КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ФИЛЬТРОВ

Электрическими фильтрами называются четырехполюсники предназначенные для пропускания сигналов в определенных частотных диапазонах с возможно малым затуханием и подавления сигналов на частотах вне этих диапазонов. Полоса частот, пропускаемых фильтром без затухания или при малом затухании, называется **полосой пропускания** (или **полосой прозрачности**). Полоса частот, пропускаемых фильтром с затуханием называется **полосой задерживания** (**полосой непрозрачности** или **полосой затухания**). Частота, лежащая на границе полос пропускания и задерживания называется **частотой среза** или **граничной частотой**. Качество фильтра считается тем выше, чем ярче выражены его фильтрующие свойства, т. е. чем сильнее возрастает затухание в полосе задерживания.

Классификация электрических фильтров может быть проведена по различным признакам. Например, **в зависимости от пропускаемого диапазона частот** различают следующие типы фильтров:

- *фильтры нижних частот* (ФНЧ) пропускают сигнал без ослабления на частотах ниже частоты среза;
- *фильтры верхних частот* (ФВЧ) не оказывают влияния на амплитуды сигналов, имеющих частоту выше частоты среза, и не пропускают сигналы с частотой ниже, чем частота среза;
- *полосно-пропускающие фильтры (полосовые)* (ППФ) пропускают сигналы, частота которых находится в интервале между нижней и верхней частотами среза и не пропускают сигналы остальных частот;
- *полосно-заграждающие фильтры (режекторные)* (ПЗФ) не пропускают сигналы с полосой частот, заключенной в интервале между нижней и верхней частотами среза, а сигналы всех остальных частот пропускают без ослабления.

В зависимости от типов входящих элементов электрические фильтры подразделяют на следующие группы:

- *пассивные фильтры* реализуются на основе пассивных элементов – резисторов, конденсаторов и катушек индуктивности, просты в реализации, работают в широком диапазоне частот (от инфразвуковых частот до ультракоротковолнового диапазона радиочастот), обладают большим динамическим диапазоном;
- *активные фильтры* содержат один или несколько активных компонентов (транзистор или операционный усилитель), они способны усиливать проходящие через них сигналы по мощности за счет энергии внешнего источника;
- *фильтры, использующие различные физические эффекты* в твердых телах (пьезоэлектрические, магнитострикционные, акустооптические и др.).

Классификацию электрических фильтров также проводят по числу реактивных элементов в схеме, по типу передаточной функции, по структуре элементов, по типу импульсной характеристики и т. д.

В качестве пассивных фильтров обычно применяются четырехполюсники на основе катушек индуктивности и конденсаторов. **Принцип работы таких фильтров основан** на различных зависимостях индуктивного и емкостного сопротивлений от частоты, а также на различных фазовых соотношениях между напряжением и током на катушке индуктивности и на конденсаторе. В начале нашего столетия такие электрические фильтры получили широкое применение в технике. Благодаря их применению оказалось возможным осуществление многих магистралей дальней телефонной, телеграфной и других видов связи.

Электрический сигнал – это изменяющаяся во времени физическая величина (чаще всего напряжение или ток), в законе изменения которой содержится сообщение или информация. В случае периодического несинусоидального сигнала используется разложение функции (напряжения или тока) в гармонический ряд Фурье. Электрическая цепь, содержащая индуктивность и/или емкость, обладает различными сопротивлениями для различных гармоник, так как индуктивное сопротивление $X_{Lk} = k\omega L$ увеличивается с увеличением номера гармоники k , а емкостное $X_{Ck} = \frac{1}{k\omega C}$

уменьшается. Это дает возможность при включении электрического фильтра между источником и потребителем не только пропускать сигналы определенного частотного интервала, но и убирать из сигнала некоторые гармонические составляющие.

1. Фильтры нижних и верхних частот

Для того, чтобы отфильтровать высшие гармоники несинусоидального напряжения, т. е. не пропустить их к потребителю, последовательно с потребителем включается индуктивность, а параллельно емкость (см. рис. 1). При этом чем выше номер гармоники, тем большим сопротивлением обладает индуктивность и тем больше напряжение этой гармоники падает на индуктивном сопротивлении и тем меньшее напряжение поступает на нагрузку. Кроме того, чем выше номер гармоники (частота), тем меньше сопротивление конденсатора, тем больший ток этой частоты проходит через конденсатор, отфильтровываясь от потребителя.

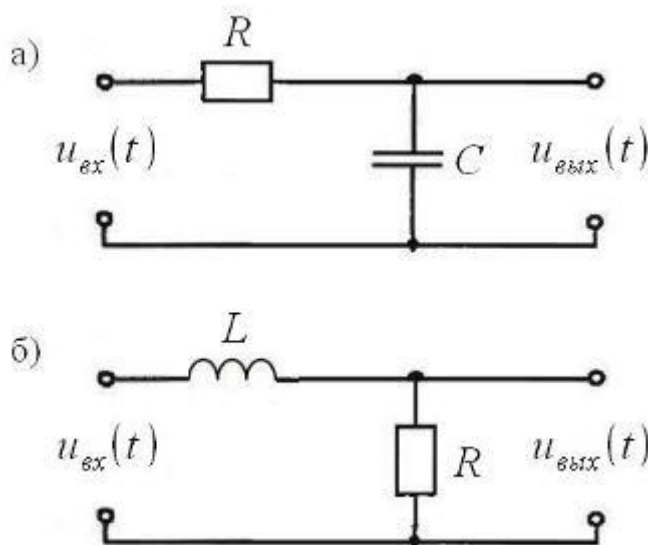


Рис. 1. Фильтры нижних частот

ФНЧ используются для подавления пульсаций напряжения на выходе выпрямителей переменного тока, для разделения частотных полос в акустических системах, в системах передачи данных для подавления высокочастотных помех и ограничения спектра сигнала, а также имеют большое

число других применений. Радиопередатчики используют ФНЧ для блокировки гармонических излучений, которые могут взаимодействовать с низкочастотным полезным сигналом и создавать помехи другим радиоэлектронным средствам. В обработке изображений низкочастотные фильтры используются для очистки картинки от шума и создания спецэффектов, а также при сжатии изображений.

Если нужно отфильтровать постоянную составляющую несинусоидального напряжения или его низкие частоты (гармоники), то в фильтрах (рис. 1) меняют местами индуктивность и емкость (рис. 2).

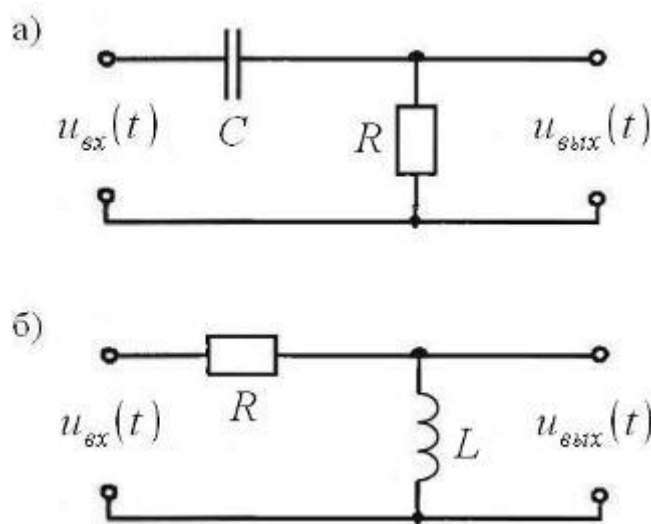


Рис. 2. Фильтры верхних частот

ФВЧ используется для выделения высоких частот из сигнала и часто используется в обработке аудиосигналов, для устранения лишь постоянной составляющей сигнала, для чего частоту среза выбирают достаточно низкой. Их используют при обработке изображений для того, чтобы осуществлять преобразования в частотной области (например, для выделения границ).

На практике гораздо чаще используют RC-фильтры по сравнению с RL-фильтрами. Преимуществами применения пассивных RC-фильтров являются небольшие габариты, простота изготовления и регулировки, малая чувствительность к посторонним магнитным полям и возможность изготовления фильтров, работающих на очень низких частотах. 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. Основным недостатком RC-фильтров является малая крутизна спада характеристики коэффициента затухания.

При реализации RL-фильтров следует учитывать их некоторые специфические особенности. Это более высокая трудоемкость изготовления и большая стоимость катушек индуктивности по сравнению с резисторами и конденсаторами. **В таких фильтрах** используются катушки индуктивности, получаемые путем однослойной или многослойной намотки тонкого изолированного провода на некоторый каркас или непосредственно на магнитный сердечник катушки. Как правило, RL-фильтры весьма громоздки и зачастую не могут обеспечить хороших качественных показателей, поскольку добротность катушек индуктивности мала. Эти фильтры в основном применяются в качестве групповых, направляющих, линейных, вспомогательных и очень редко – в качестве канальных фильтров.

2. Резонансные LC-фильтры

Если в напряжении, поступающем на вход фильтра, имеется k -я гармоника, которую нужно не пропустить к потребителю, то последовательно с потребителем можно включить параллельный резонансный контур (рис. 3, *a*), настроенный в резонанс токов на частоту k -й гармоники. В результате чего на большом сопротивлении резонансного контура (близкого к бесконечности – при отсутствии активного сопротивления в контуре) напряжение k -й гармоники падает на контуре, не попадая на нагрузку.

Такого же эффекта можно добиться, если параллельно с потребителем включить последовательный резонансный контур (рис. 3, б), настроенный в резонанс напряжений на частоту k -й гармоники. При резонансе напряжений сопротивление последовательного колебательного контура мало, следовательно, уменьшается напряжение k -й гармоники на нем, а следовательно, и на потребителе. Одновременное включение обоих колебательных контуров (рис. 3, в) обеспечивает значительно лучшую фильтрацию.

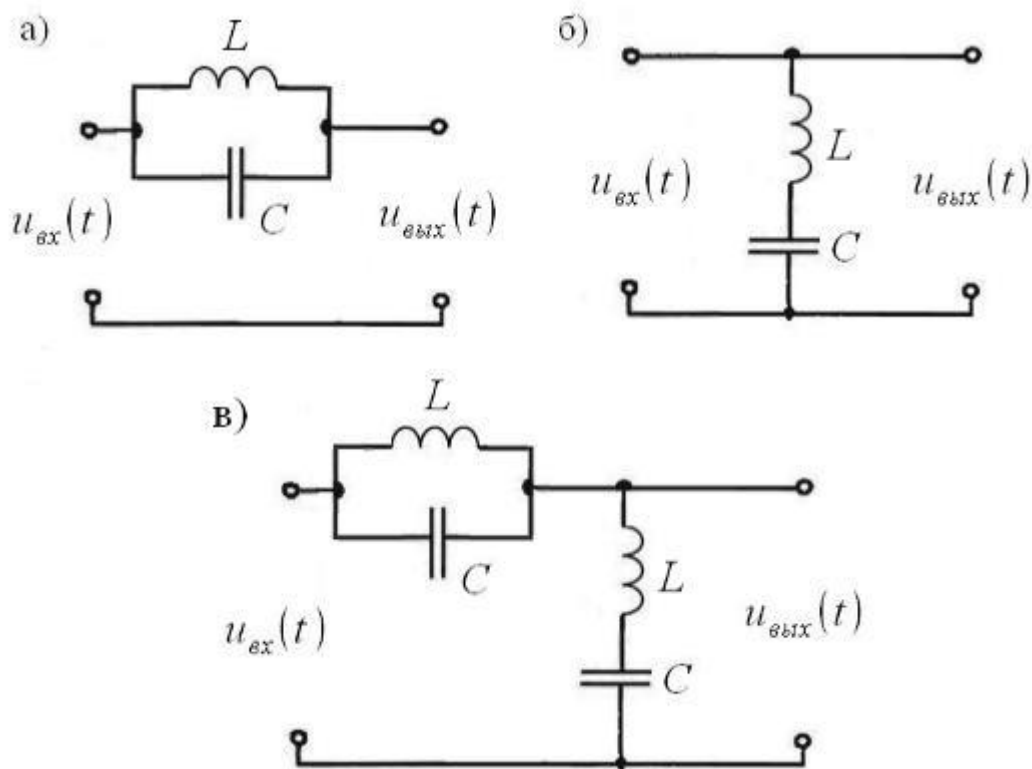


Рис. 3. Полосно-заграждающие фильтры

Если нужно уменьшить или устранить сразу несколько гармоник, то включают последовательно или параллельно с потребителем несколько колебательных контуров, каждый из которых настраивается в резонанс определенной гармоники.

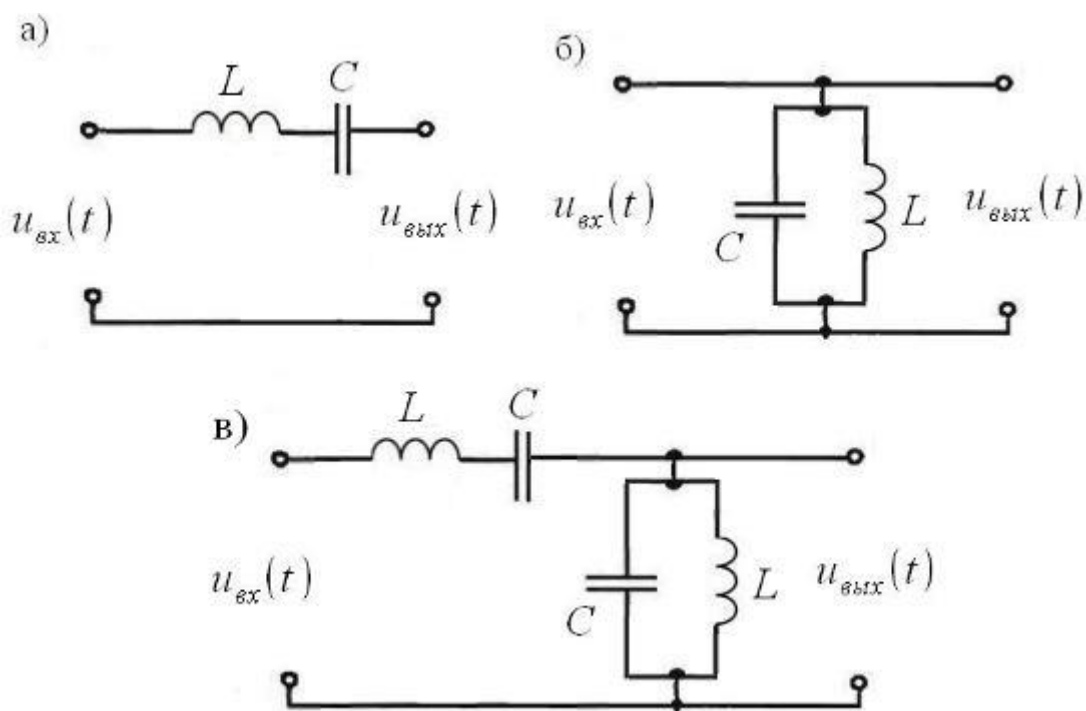


Рис. 4. Полосно-пропускающие фильтры

Если резонансные контуры поменять местами (рис. 4 по отношению к рис. 3), то получаются полосовые фильтры, которые, наоборот, служат для того, чтобы пропустить к приемнику k -ю гармонику, на которую они настроены в резонанс и не пропустить все другие гармоники.

Фильтры, построенные на основе катушек индуктивности и конденсаторов условно называют LC-фильтрами. Они обладают более высокой селективностью по сравнению с RC- и RL-фильтрами из-за использования в своем составе двух элементов, сопротивление которых зависит от частоты сигнала – 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 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.

3. Активные фильтры на операционных усилителях

Активные фильтры реализуются на основе пассивных RC-фильтров и активных компонентов, в качестве которых используют операционные усилители (ОУ) или транзисторы. Подбором свойств цепи обратной связи можно реализовать активные фильтры различных типов: нижних и верхних частот, полосовые и режекторные.

Среди преимуществ активных фильтров по сравнению с пассивными следует выделить отсутствие катушек индуктивности, лучшую избирательность, компенсацию затухания полезных сигналов и даже их усиление, пригодность к реализации в виде интегральных микросхем и др. Особенно преимущество активных фильтров на ОУ проявляется на самых низких частотах, вплоть до долей герц.

К недостаткам активных фильтров можно отнести потребление энергии от источника питания, ограниченный динамический диапазон (отношение наибольшего допустимого значения входного напряжения к наименьшему допустимому) и дополнительные нелинейные искажения сигнала.

Использование активных фильтров с ОУ на частотах свыше десятков мегагерц вообще затруднено из-за малой частоты единичного усиления большинства операционных усилителей широкого применения.

4. Другие виды электрических фильтров

В настоящее время электрические фильтры реализуются не только в виде электрических цепей с катушками индуктивности и конденсаторами, но также практическое применение получили кварцевые, электромеханические и другие. Во многих высокочастотных устройствах, например в радиопередатчиках и приемниках, традиционные пассивные RC-фильтры заменяют кварцевыми фильтрами и фильтрами на поверхностных акустических волнах.

ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ФИЛЬТРОВ

Частотные характеристики показывают, какие частоты пропускаются электрической цепью (после прохождения через электрический фильтр), а какие ослабляются. Основными частотными характеристиками электрических фильтров являются частота среза или полоса пропускаемых фильтром частот, коэффициент передачи, крутизна, амплитудно-частотная и фазо-частотная характеристики (АЧХ и ФЧХ).

Частота среза – это частота, на которой происходит спад амплитуды выходного сигнала до значения равного 0,7 от входного. Отношение выходной электрической величины (напряжения или тока) к входной позволяет вычислить **комплексную передаточную функцию (коэффициент передачи)** $\dot{K}(j\omega) = |\dot{K}| \cdot e^{j\varphi(\omega)}$. Зависимость модуля комплексной передаточной функции $|\dot{K}|$ от частоты ω называется **амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ)**, а частотная зависимость аргумента комплексной передаточной функции $\varphi(\omega)$ – **фазо-частотной характеристикой (ФЧХ)**.

АЧХ и ФЧХ не зависят от значений амплитуд и начальных фаз воздействий, а определяются числом, характером, значениями и видом соединения друг с другом ее элементов. Например, для RC-цепи, изображенной на рис. 1, б, комплексная передаточная функция может быть рассчитана так:

$$\dot{K} = \frac{u_{\text{ВЫХ}}}{u_{\text{ВХ}}} = \frac{R}{R + jX_L} = \frac{R}{R + j\omega L} \cdot \frac{R - j\omega L}{R - j\omega L} = \frac{R}{R^2 + (\omega L)^2} \cdot (R - j\omega L).$$

АЧХ и ФЧХ для этой цепи будут равны, соответственно:

$$K(\omega) = \frac{R}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \text{ и } \varphi(\omega) = -\arctg \frac{\omega L}{R}.$$

На рис. 5 показаны АЧХ некоторых пассивных электрических фильтров.

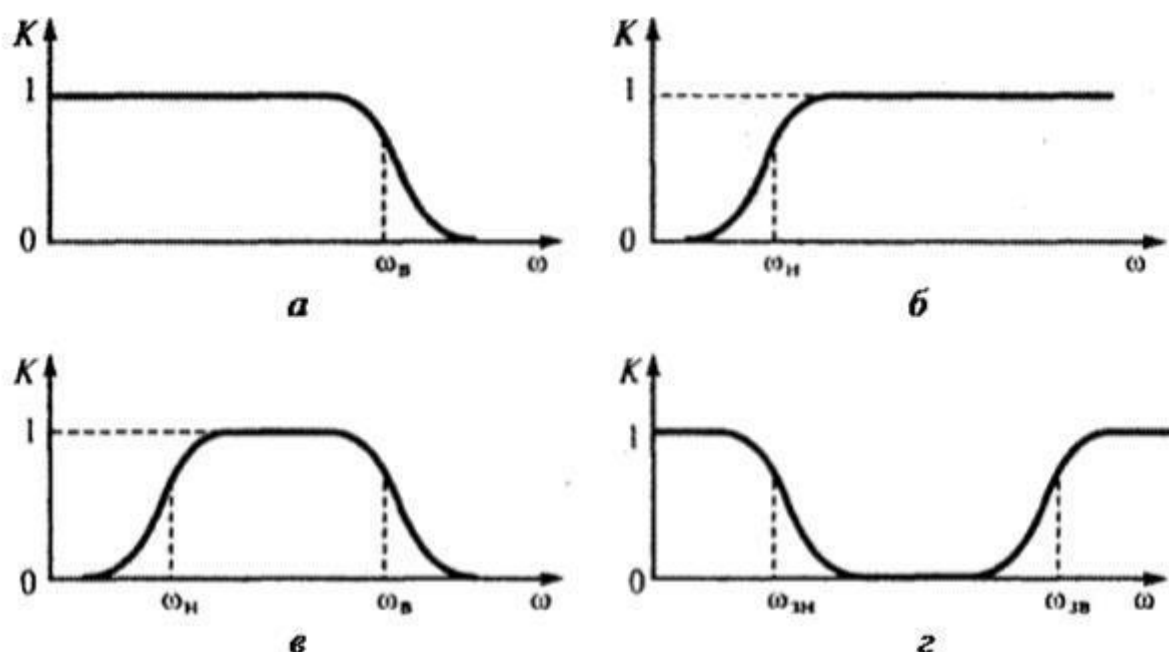


Рис. 5. АЧХ пассивных электрических фильтров:

а – ФНЧ; *б* – ФВЧ; *в* – ППФ; *г* – ПЗФ

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 часто приходится строить АЧХ и ФЧХ в логарифмическом масштабе. ЛАЧХ и ЛФЧХ – это зависимость коэффициента модуля комплексной передаточной функции и фазы, соответственно, от частоты в логарифмическом масштабе. В этом случае коэффициент передачи определяют в децибелах (дБ).

Лабораторная работа № 1

СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПЕРИОДИЧЕСКОГО НЕСИНУСОИДАЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Цель работы: Освоить основные правила составления электрических схем с помощью программы Electronics Workbench и произвести спектральный анализ периодического несинусоидального напряжения.

Краткие теоретические сведения

Периодические несинусоидальные сигналы (функции ЭДС, напряжения и тока) могут быть представлены суммой мгновенных значений гармонических колебаний различных частот $\omega_k = k\omega_1$, где $k = 1, 2, \dots$ порядковый номер гармоники. Теоретически ряд Фурье содержит бесконечно большое число слагаемых, однако форма многих электрических сигналов такова, что ряд быстро сходится, и при расчете можно ограничиться только небольшим числом гармоник. Поэтому при расчете электрических цепей используется разложение периодического несинусоидального сигнала в одну из форм гармонического ряда Фурье. Амплитудно-фазовая форма представления ряда Фурье, например, для периодического несинусоидального источника ЭДС имеет следующий вид:

$$e(t) = E_0 + \sum_{k=1}^{\infty} E_{mk} \sin(k\omega_1 t + \psi_k), \quad (1.1)$$

где $e(t)$ – значение несинусоидальной ЭДС в момент времени t ; $\omega = 2\pi/T$ – угловая частота основной гармоники; E_0 – постоянная составляющая ЭДС источника; E_{mk} – амплитуда k -й гармоники; ψ_k – начальная фаза k -й гармоники; $E_{km} \sin(k\omega t + \psi_k)$ – гармоника высшего порядка (k -я гармоника), имеющая частоту в k раз большую, чем основная гармоника.

Амплитуды гармоник разного порядка зависят только от формы несинусоидальной кривой, а начальные фазы изменяются при изменении начала отсчета времени. Зависимость $E_{km}(k\omega)$ называют **амплитудным спектром**, а

зависимость $\psi_k(k\omega)$ – **фазовым спектром**. Периодические колебания имеют дискретные спектры, в которых расстояние по оси частот между смежными спектральными линиями равно $\Delta\omega = \omega = 2\pi/T$. С увеличением периода T плотность спектральных линий возрастает, а амплитуды гармонических составляющих уменьшаются. По амплитудному спектру можно наглядно установить соотношения между амплитудами гармоник и судить о полосе частот, в пределах которой сигнал несет основную долю энергии.

Порядок выполнения лабораторной работы

1. Запустите программу Electronics Workbench (модуль Multisim). При этом автоматически будет создан и открыт новый файл, который следует сохранить, используя команду **Файл → Сохранить как**.

2. Нарисуйте схему, приведенную на рис. 1.1. Используя манипулятор мышь, перенесите необходимые элементы на рабочую область. Для этого необходимо выбрать раздел на панели инструментов, в котором находится нужный элемент, а затем перенести его на рабочую область.

3. Установите сопротивление резистора согласно своему варианту. Для изменения номиналов и свойств элементов необходимо дважды щелкнуть мышью на нужном элементе, при этом появиться соответствующая закладка, на которой представляются необходимые свойства данного элемента схемы. Заземление осуществляется клеммой GROUND.

4. В качестве источника питания в схеме используется функциональный генератор (XFG1 на рис. 1.1). Выбор формы сигнала осуществляется одной из трех кнопок в верхней части панели: синусоидальная, треугольная и прямоугольная. Ниже устанавливаются частота выходного сигнала, коэффициент заполнения в процентах (для импульсных сигналов это отношение длительности импульса к периоду повторения, а для треугольных сигналов – соотношение между длительностями переднего и заднего фронта), амплитуда выходного сигнала и постоянная составляющая (смещение) выходного сигнала.

5. Соедините выводы элементов для получения необходимой схемы (см. рис. 1.1). Для соединения двух выводов необходимо щелкнуть по одному из них левой кнопкой мыши и, не отпуская кнопку, довести курсор до вывода другого элемента.

6. В окне функционального генератора установите треугольную форму сигнала, задайте коэффициент заполнения (длительность) 10 % и значения амплитуды, частоты и постоянной составляющей (смещения) согласно своему варианту.

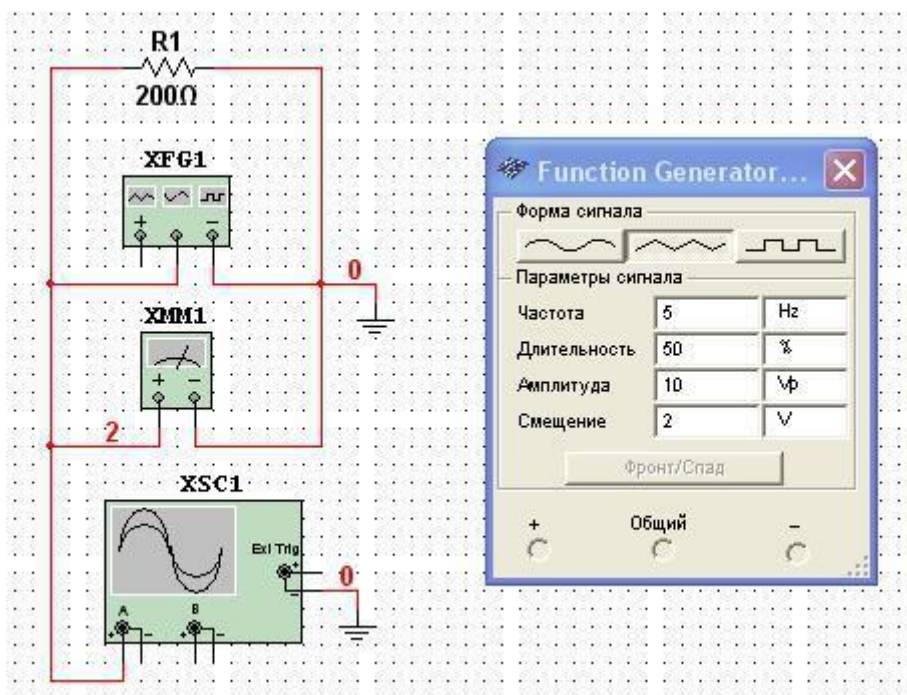


Рис. 1.1

7. Двойным щелчком по осциллографу (XSC1 на рис. 1.1) раскройте его и установите режим развертки Y/T (в этом режиме осциллограф показывает по вертикали сигнал напряжения, а по горизонтали – время). Запишите установленные на осциллографе масштабы напряжения и времени.

8. Запустите моделирование, нажав на изображение выключателя в верхнем правом окне программы или из пункта меню **Моделирование** → **Пуск**. Убедитесь, что на экране осциллографа наблюдается сигнал требуемой формы (тот, кнопка которого нажата в окне функционального генератора). Остановите

моделирование, нажав на изображение выключателя в верхнем правом окне программы или из пункта меню **Моделирование → Стоп**.

9. Сделайте скриншот сигнала напряжения и вставьте его в табл. 1.1.

Таблица 1.1

	Изображение сигнала	Значение коэффициента заполнения (длительности)	Изображение спектра сигнала
1		10	
2		50	
3		90	
4		10	
5		50	
6		90	

10. Проведите спектральный анализ, выбрав пункт меню **Моделирование → Вид анализа → Фурье...** Появится диалоговое окно, в котором установите значение основной частоты и задайте количество гармоник 10. Нажмите кнопку **Моделировать** и получите изображение спектра исследуемого сигнала.

11. Сделайте скриншот спектра сигнала и занесите его в табл. 1.1.

12. Повторите пп. 8–11 для сигнала треугольной формы со значениями коэффициента заполнения (длительности) 90 % и 50 %. Для сигнала с коэффициентом заполнения 50 % запишите в табл. 1.2 значения амплитуд и начальных фаз гармоник.

13. По осциллограмме определите амплитуду напряжения и запишите ее значение в табл. 1.2.

14. Для сигнала с коэффициентом заполнения (длительности) 50 % запишите в табл. 1.2 показания вольтметра (ХММ1 на рис. 1.1) для двух режимов его работы:

- в режиме измерения переменного напряжения (вольтметр показывает действующее значение измеряемого напряжения);
- в режиме измерения постоянного напряжения (вольтметр показывает постоянную составляющую измеряемого напряжения).

Таблица 1.2

Форма сигнала напряжения на ходе цепи		Треугольная	Прямоугольная
Эксперимент	Амплитуда напряжения, U_{max} , В		
	Действующее значение напряжения, U , В		
	Постоянная составляющая напряжения, U_0 , В		
Расчет	Постоянная составляющая напряжения, U_0 , В		
	Амплитуда 1 гармоники напряжения, U_{m1} , В		
	Начальная фаза 1 гармоники напряжения, ψ_1 , °		
	Амплитуда ___ гармоники напряжения, $U_{m_}$, В		
	Начальная фаза ___ гармоники напряжения, $\psi_{_}$, °		
	Амплитуда ___ гармоники напряжения, $U_{m_}$, В		
	Начальная фаза ___ гармоники напряжения, $\psi_{_}$, °		

15. Измените форму входного сигнала напряжения на прямоугольную и повторите пп. 8–14.

16. Для одного из исследуемых сигналов рассчитайте амплитудный спектр и полученный результат сравните с результатами моделирования.

Контрольные вопросы

1. Что такое частотный спектр несинусоидального электрического сигнала и как определить его аналитически?
2. Какие существуют виды симметрии кривых несинусоидальных сигналов и каковы особенности их частотных спектров при этих видах симметрии?
3. Как определить аналитически максимальное, действующее и среднее по модулю значения несинусоидального сигнала?

4. Какие системы приборов применяются для измерения максимального, действующего и среднего по модулю значения несинусоидальной величины?

5. Каким образом по частотному спектру электрического сигнала можно определить полосу частот, в пределах которой сигнал несет основную долю энергии?

6. Перечислите основные этапы работы в программе Electronics Workbench.

7. Как задаются типовые электрические сигналы и свойства (параметры) элементов моделируемой схемы в программе Electronics Workbench?

Лабораторная работа № 2

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОХОЖДЕНИЯ ПЕРИОДИЧЕСКОГО НЕСИНУСОИДАЛЬНОГО СИГНАЛА ЧЕРЕЗ ЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ С РАЗНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Цель работы: Изучить влияние параметров неразветвленной линейной цепи на форму кривой тока при периодическом несинусоидальном напряжении источника питания.

Краткие теоретические сведения

Если к линейной цепи приложено периодическое несинусоидальное напряжение, которое можно разложить на ряд гармоник, то ток в этой же цепи должен раскладываться на такое же количество тех же гармоник. Однако изменение во времени тока зависит от того, какие элементы содержатся в электрической цепи.

Активное сопротивление R не зависит от частоты f , поэтому полное сопротивление цепи остается постоянным для всех гармоник. Вследствие этого изменение во времени тока в цепи подобно изменению во времени напряжения.

Реактивное сопротивление зависит от частоты, поэтому полное сопротивление цепи оказывается зависимым от порядка гармоники k .

Индуктивное реактивное сопротивление ($X_{Lk} = 2\pi k f L$) растет с увеличением номера гармоники, а **емкостное реактивное сопротивление** ($X_{Ck} = \frac{1}{2\pi k f C}$) – уменьшается. Поэтому индуктивность способствует ослаблению высших гармоник тока, а емкость – низших гармоник. Другими словами, емкостный элемент позволяет убрать постоянную составляющую и низкие гармоники (частоты), а индуктивный – высшие гармоники.

Для электрических цепей, изображенных на рис. 1, б и рис. 2, а (ФНЧ и ФВЧ), выходное напряжение снимается с резистора, поэтому кривая напряжения на нем будет совпадать по форме с кривой тока в цепи.

Порядок выполнения лабораторной работы

1. Запустите программу Electronics Workbench (модуль Multisim) и нарисуйте схему, приведенную на рис. 2.1. Величину сопротивления R_2 выберите согласно своему варианту. Заземление осуществляется клеммой GROUND.

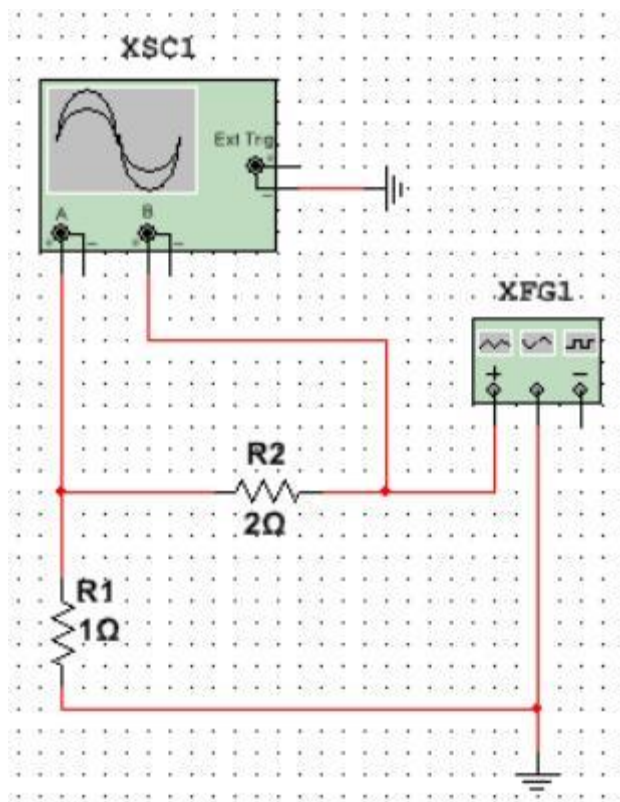


Рис. 2.1

2. В качестве источника питания в схеме используется функциональный генератор (XFG1 на рис. 2.1). Установите согласно своему варианту треугольную или прямоугольную форму сигнала, а также значения его амплитуды и постоянной составляющей (смещения).

3. Двойным щелчком по осциллографу (XSC1 на рис. 2.1) раскройте его и установите режим развертки Y/T (в этом режиме осциллограф показывает по

вертикали сигнал напряжения, а по горизонтали – время). Запишите установленные на осциллографе масштабы напряжения и времени. На вход А осциллографа подается несинусоидальное напряжение с функционального генератора, а на вход В осциллографа – падение напряжения на сопротивлении $R_1 = 1$ Ом (кривая падения напряжения на резисторе R_1 будет совпадать по форме с кривой тока в цепи).

4. Сделайте скриншоты кривых входного напряжения (несинусоидального напряжения генератора) и выходного напряжения (совпадает по форме с током в цепи) для трех разных значений частоты сигнала (частоту второго сигнала установите в 10 раз больше частоты первого сигнала, а частоту третьего сигнала – в 10 раз больше частоты второго сигнала) и сохраните их в табл. 2.1. Сравните формы кривых и сделайте вывод.

Таблица 2.1

		R	L	C
f_1	$u_{\text{вх}}(t)$ $u_{\text{вых}}(t)$			
f_2	$u_{\text{вх}}(t)$ $u_{\text{вых}}(t)$			
f_3	$u_{\text{вх}}(t)$ $u_{\text{вых}}(t)$			

5. Скопируйте рис. 2.1 и в нем замените сопротивление R_2 на индуктивность L . Рассчитайте частоту второго сигнала по формуле $f_2 = \frac{R}{2\pi L}$. Повторите п. 4.

7. Скопируйте рис. 2.1 и замените сопротивление R_2 на емкость C . Рассчитайте частоту второго сигнала по формуле $f_2 = \frac{1}{2\pi RC}$. Повторите п. 4.

8. Сделайте выводы по проделанной работе.

Контрольные вопросы

1. Что такое максимальное, действующее и среднее по модулю значения несинусоидальных токов и напряжений? Как можно их измерить?
2. Какие электрические цепи называются линейными?
3. Как влияет активное сопротивление, не зависящее от частоты, на форму кривой тока при приложенном несинусоидальном напряжении?
4. Как влияет индуктивность на форму кривой тока при приложенном несинусоидальном напряжении?
5. Как влияет емкость на форму кривой тока при приложенном несинусоидальном напряжении?
6. Могут ли индуктивный и емкостный элементы использоваться в качестве частотных фильтров?
7. Можно ли построить частотный фильтр, используя только резисторы? Почему?
8. Будет ли изменяться спектр периодического несинусоидального сигнала после прохождения ФНЧ или ФВЧ?
9. Как рассчитываются АЧХ и ФЧХ электрических фильтров?

Лабораторная работа № 3

ДИФФЕРЕНЦИРУЮЩИЕ И ИНТЕГРИРУЮЩИЕ ЦЕПИ

Цель работы: Исследовать изменение формы прямоугольных сигналов при прохождении через дифференцирующие и интегрирующие цепи и изучить частотные характеристики цепей.

Краткие теоретические сведения

Дифференцирующая цепь представляет собой фильтр высоких частот **и используется в цепях синхронизации, для получения узких импульсов из прямоугольных**, а также для получения переключающих импульсов и меток (для управления работой ряда устройств импульсной техники). **Интегрирующая цепь представляет собой** фильтр низких частот **и используется для выделения полезного сигнала на фоне шумов в радио, телевидении, радиолокаторах и в компьютерах**. Поскольку дифференцирование и интегрирование являются линейными математическими операциями, указанные выше преобразования сигналов могут осуществляться линейными цепями, т. е. схемами, состоящими из постоянных индуктивностей, емкостей и сопротивлений.

1. Дифференцирующей (укорачивающей) называется такая цепь, с выхода которой может сниматься сигнал, пропорциональный производной от входного сигнала:

$$u_{\text{вых}}(t) \approx \frac{du_{\text{вх}}(t)}{dt}. \quad (3.1)$$

Рассмотрим электрическую цепь, состоящую из последовательно соединенных емкости и активного сопротивления (рис. 3.1).

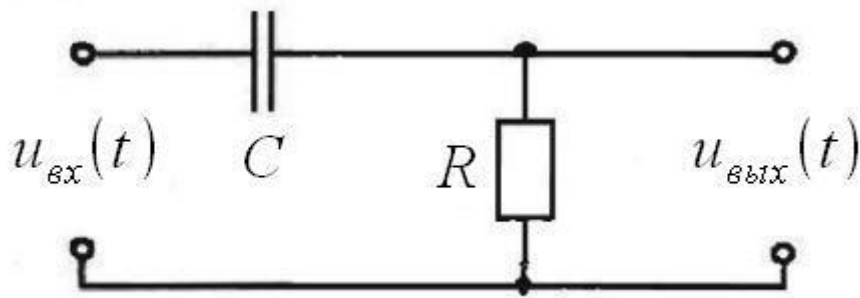


Рис. 3.1. Дифференцирующая RC-цепь

Пусть на входе этой цепи действует напряжение $u_{\text{вх}}(t)$.

Тогда $u_{\text{вх}}(t) = Ri(t) + \frac{1}{C} \int i(t) dt$ и в результате преобразований

$\frac{du_{\text{вх}}(t)}{dt} = R \frac{di(t)}{dt} + \frac{1}{C} i(t)$ и $u_R(t) = Ri(t) = u_{\text{вых}}(t)$, получим

$$\frac{du_{\text{вх}}(t)}{dt} = \frac{du_{\text{вых}}(t)}{dt} + \frac{1}{\tau} u_{\text{вых}}(t), \quad (3.2)$$

где $\tau = RC$ – постоянная времени для данной RC-цепи.

Если для данного сигнала выбрать τ настолько большим, что вкладом второго члена правой части (3.2) можно будет пренебречь, то $u_{\text{вых}}(t) \approx u_{\text{вх}}(t)$. Это значит, что при больших значениях τ выходное напряжение (на сопротивлении) повторяет входное напряжение. В связи с тем, что через конденсатор не может протекать постоянный ток, постоянная составляющая входного напряжения не передается. Такую электрическую цепь целесообразно применять тогда, когда необходимо передать сигнал без постоянной составляющей.

При очень малых значениях τ , вкладом первого члена правой части (3.2) можно будет пренебречь, тогда

$$u_{\text{вых}}(t) \approx RC \frac{du_{\text{вх}}(t)}{dt} = \tau \frac{du_{\text{вх}}(t)}{dt}, \quad (3.3)$$

т. е. при малых постоянных времени τ электрическая цепь, изображенная на рис. 1, осуществляет **дифференцирование** входного сигнала и $|u_{\text{вых}}| \ll |u_{\text{вх}}|$. Такую цепь целесообразно применять тогда, когда необходимо передать сложный сигнал без постоянной составляющей и с ослабленными низкими гармониками.

Если в качестве входного сигнала приложено напряжение прямоугольной формы с периодом T , то вид выходного сигнала зависит от соотношения $T/2$ и τ . Если период входного напряжения $T \ll \tau$, то $\omega \gg 1/\tau$ и такой сигнал можно считать **быстрым**, так как конденсатор в течение $T/2$ не успевает перезарядиться и $u_{\text{вых}}(t) \approx u_{\text{вх}}(t)$. Если период входного напряжения $T \gg \tau$, то $\omega \ll 1/\tau$ и такой сигнал можно считать **медленным**, так как конденсатор в течение $T/2$ почти полностью перезаряжается и $|u_{\text{вых}}| \ll |u_{\text{вх}}|$.

На рис. 3.2 показана зависимость выходного напряжения от частоты входного сигнала прямоугольной формы для дифференцирующей RC-цепи. Чем меньше постоянная времени τ , тем быстрее заряжается и разряжается конденсатор, поэтому тем меньшую длительность имеют выходные импульсы и тем более они остроконечные.

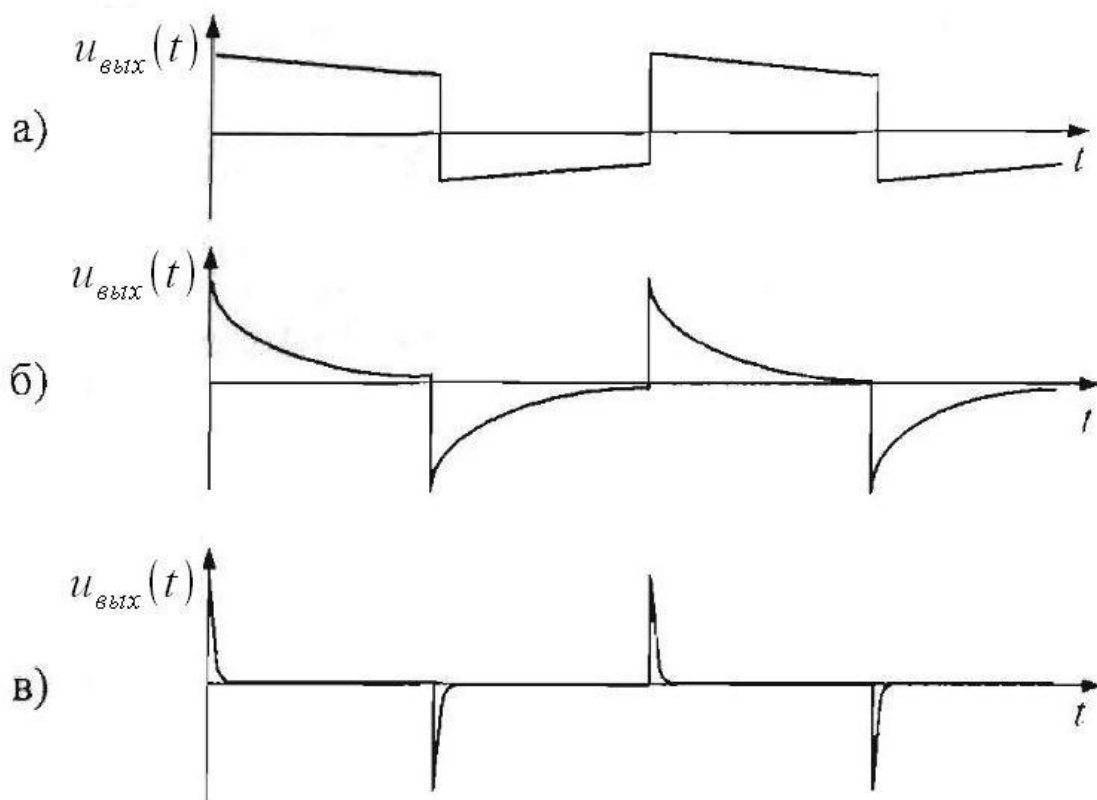


Рис. 3.2. Выходной сигнал дифференцирующей RC-цепи при:

$$a - \omega \leq 10/\tau; \text{ б} - \omega = \omega_0 = 1/\tau; \text{ в} - \omega \geq 0.1/\tau$$

Аналогичный результат можно получить, вычисляя **комплексную передаточную функцию (коэффициент передачи) \dot{K}** , которая находится как отношение выходной электрической величины (напряжения или тока) к входной. Для дифференцирующей RC-цепи (рис. 3.1):

$$\dot{K} = \frac{u_{\text{вых}}}{u_{\text{вх}}} = \frac{R}{R - jX_C} = \frac{R}{R + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{1}{1 + \frac{1}{j\omega\tau}}. \quad (3.4)$$

При малых постоянных времени $\tau \ll 1/\omega$, выражение (3.4) преобразуется в $\dot{K} \approx j\omega\tau$. При этом фаза выходного напряжения (аргумент K) равна $\pi/2$. Сдвиг гармонического сигнала по фазе на $\pi/2$ эквивалентен его дифференцированию. При $\tau \gg 1/\omega$ коэффициент передачи $K \approx 1$.

Зависимость модуля комплексной передаточной функции $K(\omega)$ от частоты называется **амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ)**. Частотная зависимость аргумента комплексной передаточной функции $\varphi(\omega)$ называется **фазо-частотной характеристикой (ФЧХ)**. АЧХ и ФЧХ для дифференцирующей цепи, изображенной на рис. 3.1, равны:

$$K(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{\omega^2\tau^2}}} \text{ и } \varphi(\omega) = \arctg \frac{1}{\omega\tau}.$$

Частотные характеристики линейных электрических цепей позволяют судить о том, колебания каких частот пропускаются цепью, а какие ослабляются. Электрическая цепь, изображенная на рис. 3.1, используется как **фильтр верхних частот (ФВЧ)**. Она передает без изменения сигналы высоких частот и обеспечивает затухание сигналов низких частот.

Таковыми же характеристиками обладает электрическая цепь, состоящая из последовательно соединенных активного сопротивления и индуктивности (см. рис. 3.3) с постоянной времени $\tau = L/R$. Однако, в области низких частот электрические цепи, содержащие в своем составе индуктивности, используются редко.

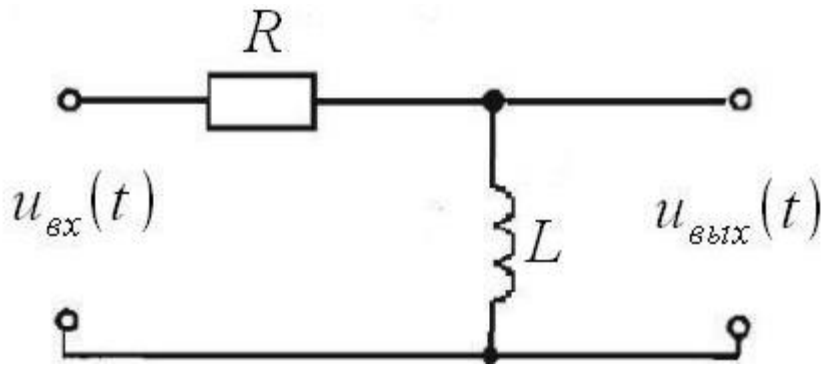


Рис. 3.3. Дифференцирующая LR-цепь

2. **Интегрирующей (удлиняющей)** называется такая цепь, с выхода которой может сниматься сигнал, пропорциональный интегралу входного сигнала:

$$u_{\text{вых}}(t) \approx \int u_{\text{вх}}(t) dt. \quad (3.5)$$

В случае, когда выходным элементом RC-цепи является емкость (рис. 3.4), цепь получается интегрирующей.

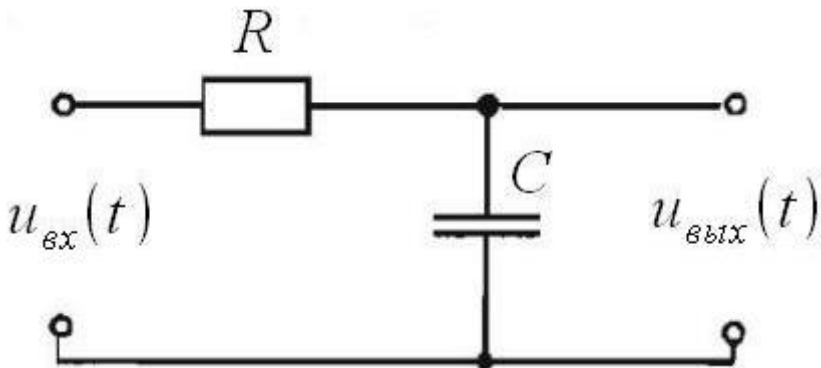


Рис. 3.4. Интегрирующая RC-цепь

Она описывается следующим образом:

$$u_{\text{вх}}(t) = Ri(t) + u_C(t) = RC \frac{du_C(t)}{dt} + u_C(t). \quad (3.6)$$

Для медленных сигналов ($T \gg \tau$) вкладом первого слагаемого правой части (3.6) можно пренебречь и $u_{\text{вых}}(t) = u_C(t) \approx u_{\text{вх}}(t)$. Для быстрых сигналов ($T \ll \tau$) вкладом второго слагаемого правой части (3.6) можно пренебречь и

$$u_{\text{вых}}(t) = u_C(t) \approx \frac{1}{\tau} \int u_{\text{вх}}(t) dt. \quad (3.7)$$

Это значит, что при малых значениях τ выходное напряжение (на конденсаторе) повторяет входное напряжение. С увеличением постоянной

времени τ наклон переходных участков увеличивается. При больших постоянных времени τ электрическая цепь, изображенная на рис. 3.4, осуществляет **интегрирование** входного сигнала и выходное напряжение цепи становится равным среднему значению входного напряжения. Такую цепь целесообразно применять тогда, когда необходимо обеспечить затухание сигналов высоких частот.

На рис. 3.5 показана зависимость выходного напряжения от частоты входного сигнала прямоугольной формы для интегрирующей RC-цепи.

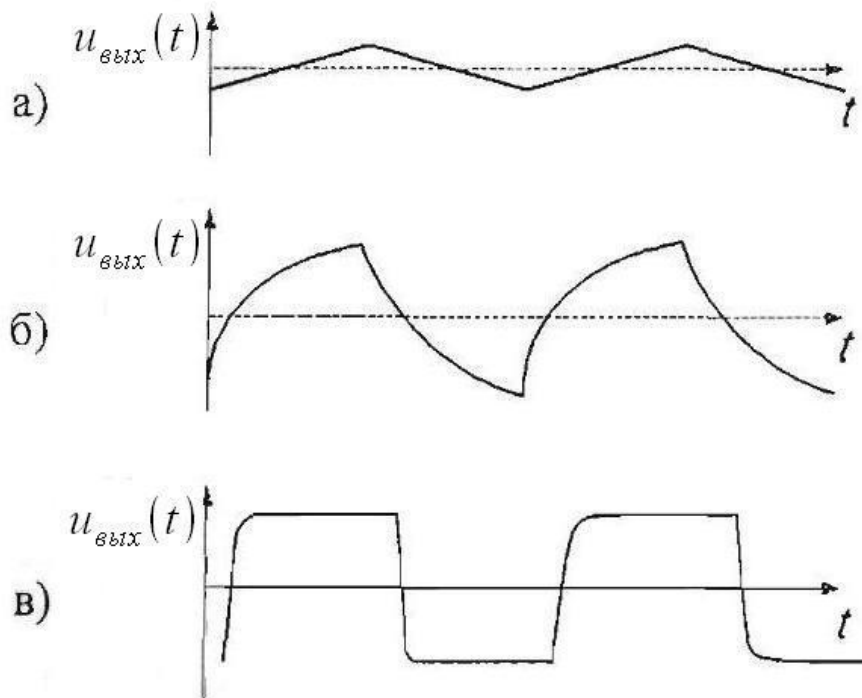


Рис. 3.5. Выходной сигнал интегрирующей цепи при:

a – $\omega \geq 10/\tau$; *б* – $\omega = \omega_0 = 1/\tau$; *в* – $\omega \leq 0,1/\tau$

Коэффициент передачи интегрирующей цепи:

$$\dot{K} = \frac{u_{\text{ВЫХ}}}{u_{\text{ВХ}}} = \frac{-jX_C}{R - jX_C} = \frac{\frac{1}{j\omega C}}{R + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{1}{1 + j\omega\tau}. \quad (3.8)$$

При малых постоянных времени $\tau \ll 1/\omega$, выражение (3.8) преобразуется в $\dot{K} \approx 1$. При $\tau \gg 1/\omega$ коэффициент передачи $\dot{K} \approx 0$.

АЧХ и ФЧХ для дифференцирующей цепи, изображенной на рис. 3.4, равны

$$K(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2\tau^2}} \text{ и } \varphi(\omega) = -\arctg\omega\tau.$$

Электрическая цепь, изображенная на рис. 3.4, используется как фильтр нижних частот (ФНЧ). Она передает без изменения сигналы нижних частот и обеспечивает затухание сигналов высоких частот. Такими же характеристиками обладает электрическая LR-цепь с активным сопротивлением на выходе.

Порядок выполнения лабораторной работы

1. Изучите частотные характеристики дифференцирующих RC-цепей с параметрами R_1, C_1, C_2, C_3, C_4 и интегрирующих с параметрами R_2, C_5, C_6, C_7, C_8 . Величины сопротивлений и емкостей выберите согласно своему варианту. Вычислите постоянную времени τ и частоты среза $f_0 = 1/2\pi\tau$ для всех параметров.

2. Запустите программу Electronics Workbench (модуль Multisim) и нарисуйте схему, показанную на рис. 3.6 (величины сопротивления и емкости по варианту).

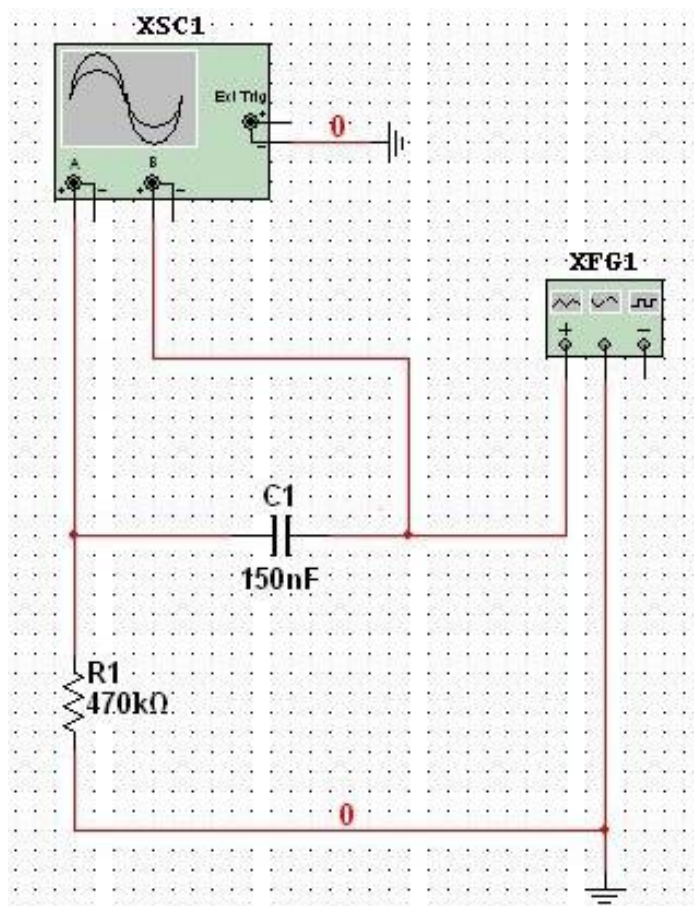


Рис. 3.6

3. При постоянной амплитуде синусоидального напряжения $u_{\text{вх}}$ на входе RC-цепи и постоянной частоте, получите на осциллографе изображения $u_{\text{вых}}$ для разных емкостей C_1, C_2, C_3, C_4 . Сделайте скриншоты с входным и выходным напряжениями для емкостей C_1, C_2, C_3, C_4 и сохраните их в таблицу.

4. Подайте на вход RC-цепи прямоугольный сигнал, сделайте скриншоты с входным и выходным напряжениями для емкостей C_1, C_2, C_3, C_4 и сохраните их в таблицу.

5. Определите постоянную времени τ , равную интервалу времени, в течение которого выходное напряжение изменяется в e раз. Сравните полученные результаты с результатами расчета.

6. Вычислите для емкостей C_1, C_2, C_3, C_4 модуль и аргумент передаточной функции цепи, постройте АЧХ и ФЧХ.

7. Проведите измерение АЧХ и ФЧХ по измерителю АЧХ. Сравните измеренные частотные характеристики с вычисленными. На одной из измеренных АЧХ определите величину τ и сравните это значение с рассчитанным.

8. Прodelайте такие же измерения и вычисления для интегрирующей RC-цепи с параметрами R_2, C_5, C_6, C_7, C_8 .

Контрольные вопросы

1. Как определяется и что характеризует постоянная времени τ ?
2. Для чего нужны дифференцирующие и интегрирующие цепи?
3. Какие электрические сигналы в данной лабораторной работе вы считали быстрыми, а какие медленными?
4. Какие электрические цепи называются интегрирующими?
5. В чем состоит отличие $u_{\text{вых}}(t)$ после прохождения ФВЧ (и ФНЧ), состоящих из RC-элементов и из RL-элементов?
6. Как рассчитываются АЧХ и ФЧХ сложных электрических цепей?
7. Какой формы получается сигнал после прохождения через дифференцирующую цепь сигнала треугольной формы?

Лабораторная работа № 4

ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ ОПЕРАЦИОННОГО УСИЛИТЕЛЯ И АКТИВНЫХ ФИЛЬТРОВ НА ЕГО ОСНОВЕ

Цель работы: Изучение работы операционного усилителя и схем на его основе, исследование частотных характеристик активных фильтров.

Краткие теоретические сведения

Операционные усилители выполняются в виде интегральных микросхем, в состав которых входят несколько десятков или сотен транзисторов. Первоначально операционный усилитель (ОУ) применялся в аналоговых вычислительных машинах для выполнения чисто математических операций, таких, как суммирование, вычитание, интегрирование и дифференцирование. На сегодняшний день многосторонние возможности операционного усилителя сделали его основным унифицированным узлом практически в любой области электроники. Операционные усилители используются в составе нормирующих преобразователей, стабилизаторов напряжения, активных фильтров, генераторов функций, аналого-цифровых преобразователей и цифро-аналоговых, а также многих других устройств.

Операционный усилитель – это унифицированный многокаскадный усилитель постоянных и переменных сигналов с дифференциальным входом и несимметричным выходом с непосредственной связью между каскадами, характеризующийся большим коэффициентом усиления по напряжению, высоким входным и малым выходным сопротивлением с широкой полосой пропускания, а также с низким уровнем шумов при хорошей температурной стабильности, способный устойчиво работать при замкнутой цепи ОС. Следует отметить, что на практике перечисленные характеристики ОУ проявляются в различной степени у ОУ разных марок.

На схемах операционные усилители обычно обозначают в виде треугольника или прямоугольника с изображенным на нем треугольником. ОУ может содержать основное и одно или два дополнительных поля, расположенных по обе стороны от основного (рис. 4.1, а). Основное функциональное назначение усилителя обозначается треугольником на основном поле. Справа от него указывают коэффициент усиления (вместо символа m). Если конкретное значение коэффициента усиления несущественно, его допускается не указывать (можно также вписать знак бесконечности). Дополнительные функции, выполняемые микросхемой, указывают слева от основной (вместо символа F).

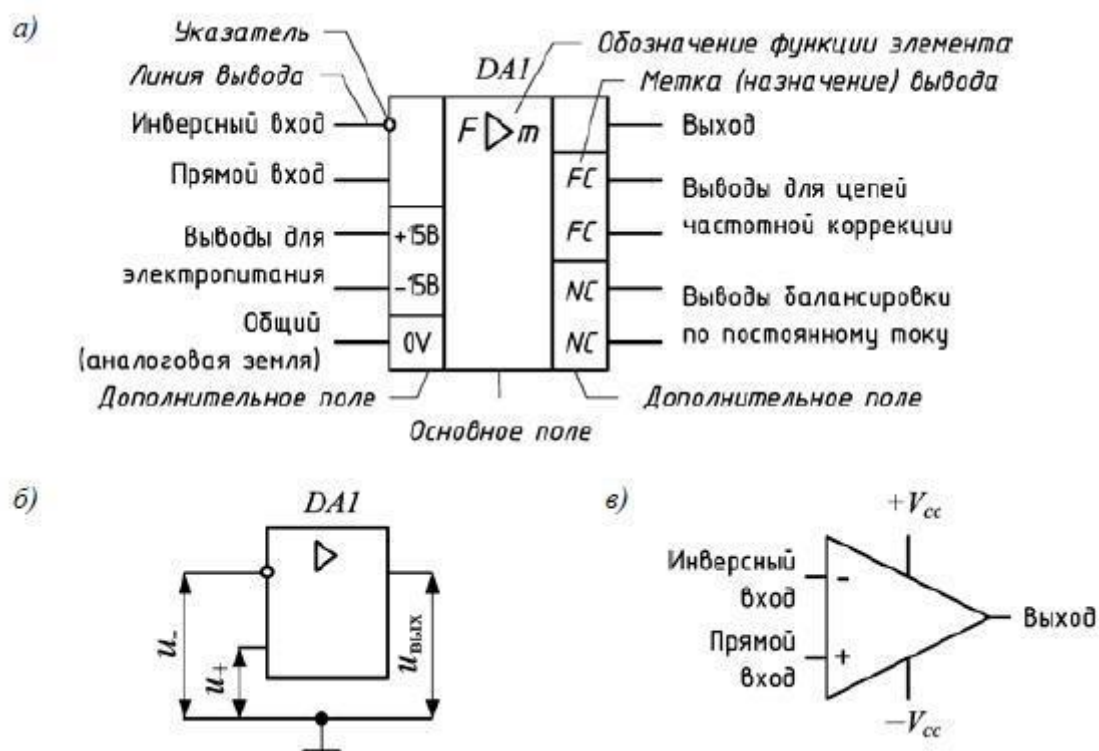


Рис. 4.1. Условное графическое изображение ОУ на схемах:

а – полное обозначение; б – упрощенное обозначение; в – зарубежное обозначение

Большинство операционных усилителей имеют один несимметричный выход и два входа, симметричных по отношению к общему проводу. Прямые входы и выходы обозначают линиями, присоединяемыми к контуру графического изображения ОУ без каких-либо знаков, а с указателем в виде

круга в месте присоединения – инверсные входы и выходы. Прямой вход называют также **неинвертирующим**, так как фаза выходного сигнала совпадает с фазой сигнала, поданного на этот вход. Другой вход называют **инвертирующим**, так как фаза выходного сигнала сдвинута на 180° относительно входного сигнала. Поэтому входы оказывают на выходное напряжение равное в количественном отношении, но противоположное по знаку влияние. Если к входам приложены **синфазные** (действующие одновременно одинаковые по величине и фазе относительно общего провода) сигналы, то их влияние будет взаимно скомпенсировано и выход будет иметь нулевой потенциал, благодаря чему параметры ОУ малочувствительны к изменениям напряжения питания, температуры и других внешних факторов. Напряжение на выходе ОУ должно быть лишь в том случае, когда на его входах действуют различные по уровню или фазе сигналы. Выходное напряжение пропорционально разности уровней сигналов, называемой дифференциальным сигналом. Усиленное выходное напряжение ОУ измеряется относительно общего провода схемы.

Для лучшего понимания и большей наглядности принципиальных схем допускается упрощенное обозначение ОУ, в котором сохраняются лишь основное поле и сигнальные выводы (рис. 4.1, б). Общий провод, играющий роль сигнального вывода, также может быть не показан. В зарубежной литературе используется условное графическое изображение ОУ, приведенное на рис. 1, в.

С целью упрощения анализа схем с ОУ последние часто идеализируют. С идеальным ОУ обычно связывают следующие свойства: бесконечно большой коэффициент усиления в бесконечно большой полосе пропускания, бесконечное входное и нулевое выходное сопротивления.

Операционный усилитель предназначен в основном для работы в устройствах с глубокой отрицательной ОС, т. е. сигнал обратной связи всегда подается на инверсный вход, и параметры устройств определяются преимущественно параметрами цепи ООС. В зависимости от условий подачи усиливаемого сигнала на входы ОУ и подключение к нему внешних элементов

можно получить три основные схемы включения: **инвертирующую**, **неинвертирующую** и **дифференциальную**. Любое схемотехническое решение с применением ОУ базируется на этих схемах.

В схеме **инвертирующего усилителя** (рис. 4.2, а) входное напряжение через резистор R_1 подается на инвертирующий вход, который с помощью резистора обратной связи R_2 охвачен параллельной ООС по напряжению. Неинвертирующий (прямой) вход соединяется с общим проводом. Входной и выходной сигналы усилителя находятся в противофазе (сдвинуты на 180°), что отражает знак минус в формуле коэффициента усиления по напряжению $K = -R_2/R_1$. В результате выходное напряжение инвертирующего усилителя $U_{\text{вых}} = -R_2/R_1 U_{\text{вх}}$.

Таким образом, **инвертирующий усилитель** – это ОУ с ООС, у которого входное и выходное напряжения находятся в противофазе.

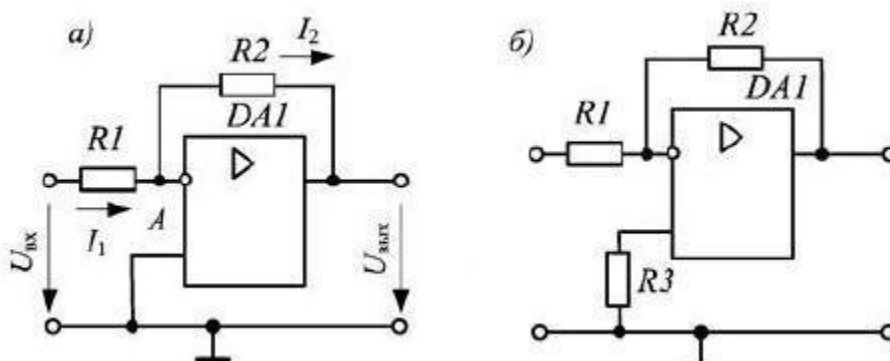


Рис. 4.2. Основные схемы инвертирующего усилителя

Для правильной работы схем с ОУ необходимо, чтобы смещение нуля на выходе было минимальным. Для этого, например, в прямой вход включают сопротивление $R_3 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$, компенсирующее напряжение смещения (рис. 4.2, б). Точку A подключения резисторов R_1 и R_2 к инвертирующему входу называют **мнимой землей**.

Основные свойства инвертирующего усилителя:

- выходной сигнал в противофазе относительно входного;
- отсутствует синфазный сигнал (мнимая земля);

- низкое входное сопротивление;
- простая реализация коэффициента усиления по напряжению, который может быть как больше, так и меньше единицы;
- масштабирование может быть совмещено с суммированием.

Простой инвертирующий усилитель двояко используется в аналоговых цепях: во-первых, как устройство, изменяющее знак (**инвертор**) без изменения величины сигнала при $R_1 = R_2$; во-вторых, когда требуется умножить переменную (сигнал) на константу, ее выбирают равной R_2 / R_1 . Если константа положительная, то вслед за этой схемой следует включить инвертор, чтобы скорректировать знак.

Для **суммирования нескольких напряжений** можно применить следующую схему ОУ в инвертирующем включении (рис. 4.3).

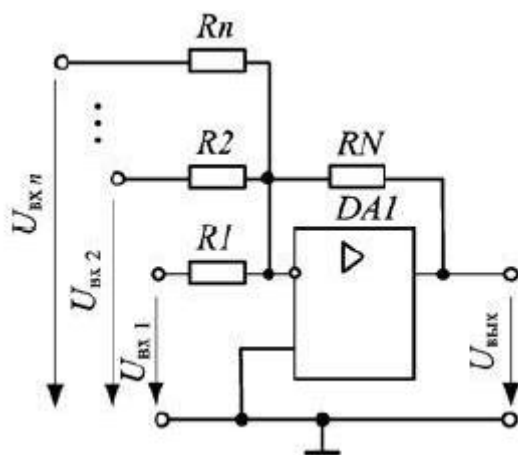


Рис. 4.3. Инвертирующий сумматор

Входные напряжения через добавочные резисторы R_1, R_2, \dots, R_n подаются на инвертирующий вход усилителя. Выходное напряжение такого усилителя определяется выражением $U_{\text{вых}} = -\sum_{i=1}^n U_{\text{вх}i} \frac{R_N}{R_i}$. Если сопротивления всех резисторов равны между собой, то получается что $U_{\text{вых}} = -\sum_{i=1}^n U_{\text{вх}i}$.

В **неинвертирующем усилителе** входной сигнал поступает на прямой вход, а инвертирующий вход с помощью резистивного делителя R_1, R_2 охвачен последовательной ООС по напряжению (рис. 4.4, а). У неинвертирующего

усилителя коэффициент усиления по напряжению $K = 1 + R_2/R_1$ и выходное напряжение $U_{\text{ВЫХ}} = (1 + R_2/R_1)U_{\text{ВХ}}$.

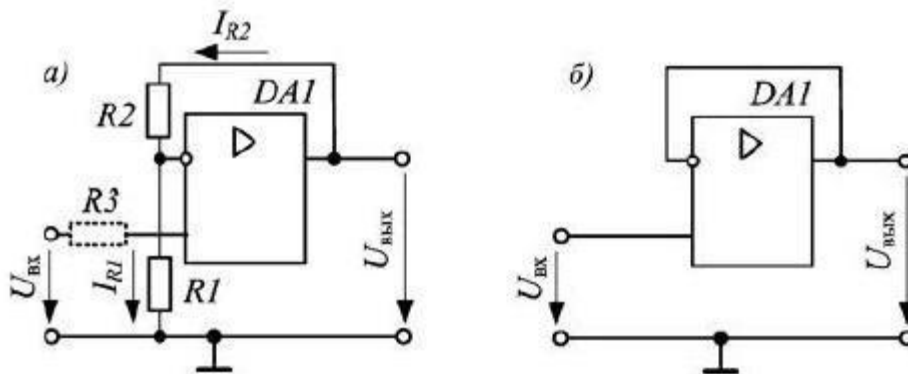


Рис. 4.4. Основные схемы неинвертирующего усилителя

Неинвертирующий усилитель (рис. 4.4) – это ОУ с ООС, у которого входное и выходное напряжения совпадают по фазе.

Для правильной работы схем с ОУ необходимо, чтобы смещение нуля на выходе было минимальным. Для этого, например, в прямой вход включают сопротивление $R_3 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$, компенсирующее напряжение смещения.

Основные свойства неинвертирующего усилителя:

- выходной сигнал совпадает по фазе с входным;
- на входе схемы присутствует синфазный сигнал;
- высокое входное сопротивление;
- коэффициент усиления по напряжению не может быть меньше единицы;
- полоса пропускания неинвертирующего усилителя несколько меньше, чем у инвертирующего.

Повторитель напряжения (операционный повторитель) – частный случай неинвертирующего усилителя (рис. 4.4, б). Он образуется при $R_1 \approx \infty$, $R_2 = 0$. На схеме повторителя все выходное напряжение обратно подается на инвертирующий вход. Операционный повторитель передает входной сигнал без изменения фазы и амплитуды (то есть коэффициент усиления напряжения $K = 1$) и является усилителем с глубокой последовательной ООС по напряжению.

Схема дифференциального включения ОУ приведена на рис. 4.5. В этом случае выходное напряжение $U_{\text{вых}} = \frac{(R_1+R_2)R_4}{R_1(R_3+R_4)}U_2 - \frac{R_2}{R_1}U_1$. При $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$ выходное напряжение определяется как $U_{\text{вых}} = (U_2 - U_1)\frac{R_2}{R_1}$.

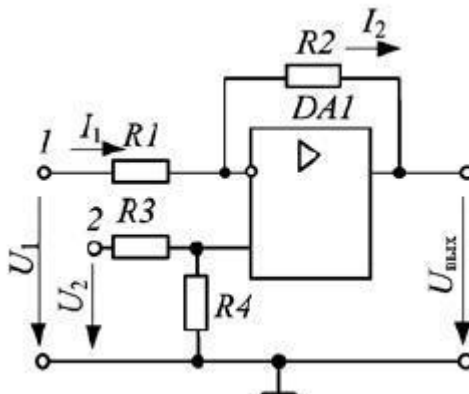


Рис. 4.5. Дифференциальное включение ОУ

Схема на рис. 4.5 фактически представляет собой комбинацию схем инвертирующего и неинвертирующего усилителей. Вход 1 является инвертирующим входом, а вход 2 – неинвертирующим. Если вход 2 заземлить, а на вход 1 подать сигнал, то получившаяся схема эквивалентна инвертирующему усилителю с коэффициентом усиления $-R_2/R_1$. Если вход 1 заземлить, а на вход 2 подать сигнал, то получится неинвертирующий усилитель с коэффициентом усиления R_2/R_1 .

При выполнении условия $R_1/R_2 = R_3/R_4$ усиление дифференциального (полезного) сигнала намного больше усиления синфазного сигнала (помехи), и при этом коэффициент ослабления синфазного сигнала будет максимальным. Таким образом, дифференциальный усилитель усиливает только разность напряжений, поданных на его входы, и не реагирует на синфазное напряжение. На основе дифференциального включения ОУ строят так называемые измерительные усилители, применяемые в измерительной технике для усиления сигналов с датчиков и прочих устройств.

Большой коэффициент усиления, высокое входное и низкое выходное сопротивления операционного усилителя (ОУ) позволяют с успехом строить на его основе так называемые **активные RC-фильтры**. Преимуществом таких

фильтров перед пассивными является возможность получения большой крутизны спадов амплитудно-частотной характеристики при усилении сигнала в полосе пропускания. Активные фильтры на основе ОУ содержат, как правило, не больше резисторов и конденсаторов, чем пассивные, причем их сопротивления и емкости оказываются сравнительно небольшими даже на очень низких частотах. Вследствие этого габариты и масса активных фильтров получаются небольшими.

Интегрирующим усилителем (интегратором) называется электронный усилитель, выходной сигнал которого пропорционален интегралу по времени от его входного сигнала. Простейшая схема интегратора, выполненного на ОУ, приведена на рис. 4.6, а. Данная схема является инвертирующим усилителем, в цепь ООС которого включен частотно-зависимый элемент (конденсатор C_1).

Выходное напряжение $U_{\text{ВЫХ}} = -\frac{1}{R_1 C_1} \int U_{\text{ВХ}} dt + U_{\text{ВЫХ}}(0)$, где $U_{\text{ВЫХ}}(0)$ – начальное значение выходного сигнала в момент времени $t = 0$. Следовательно, в начале интегрирования, когда конденсатор C_1 разряжен и $U_C = 0$, на выходе ОУ имеется напряжение $U_{\text{ВЫХ}}(0)$, значение которого равно напряжению смещения нуля ОУ. Отрицательный знак обусловлен тем, что в основе интегратора лежит инвертирующий усилитель. Пределами интегрирования являются моменты времени начала и окончания наблюдения сигнала. Величина $\tau = R_1 C_1$ называется **постоянной времени** и определяет работу RC-цепи. Считается, что конденсатор заряжается и разряжается на 99 % за время, равное пяти постоянным времени.

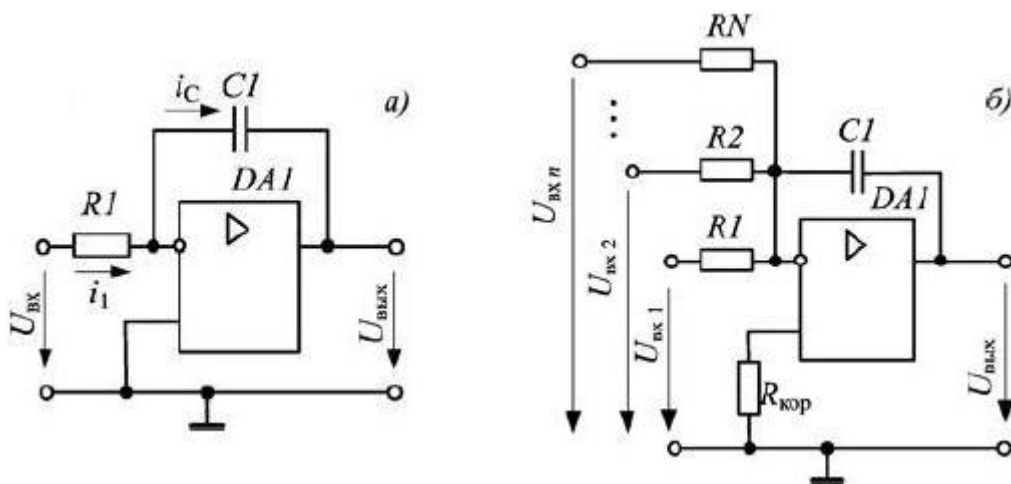


Рис. 4.6. Интеграторы

Интегратор является простейшим вариантом **активного фильтра нижних частот**. С ростом частоты сопротивление конденсатора уменьшается и уменьшается коэффициент усиления интегрирующего усилителя. Интеграторы широко применяются при создании генераторов синусоидального напряжения, точных фазосдвигающих цепей, в качестве фильтров низких частот.

При построении различных устройств часто бывает необходимо получить выходной сигнал, равный интегралу от суммы нескольких напряжений. В этом случае можно воспользоваться схемой **суммирующего интегратора** (рис. 4.6, б). Напряжение на выходе схемы $U_{\text{вых}} = -\sum_{i=1}^N \left(\frac{1}{R_i C_i} \int U_{\text{вxi}} dt \right)$.

При равенстве сопротивлений всех резисторов $R_1 = R_2 = \dots = R_N = R$ выходное напряжение $U_{\text{вых}} = -\frac{1}{RC_1} \int (\sum_{i=1}^n U_{\text{вxi}}) dt$.

Получение треугольных импульсов в процессе интегрирования прямоугольных соответствует математическому интегрированию. Если интегрируется постоянная величина, то в результате получается линейно изменяющаяся функция.

Дифференцирующие устройства реализуют функции, обратные интегрированию. **Дифференцирующим усилителем (дифференциатором)** называется устройство, выходной сигнал которого пропорционален производной от его входного сигнала. Схема идеального дифференциатора, выполненная на ОУ, приведена на рис. 4.7.

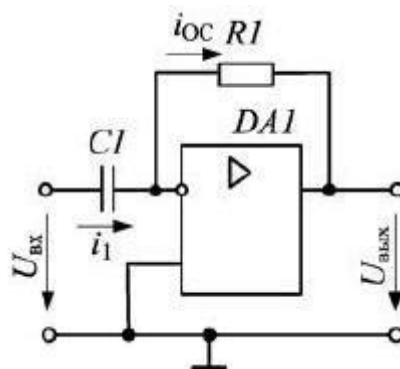


Рис. 4.7. Дифференциатор

Схема дифференциатора представляет собой RC-цепочку, с резистором в роли выходного элемента и является инвертирующим усилителем с ООС, в инвертирующий вход которого включен частотно-зависимый элемент – конденсатор C_1 . Выходное напряжение дифференциатора прямо пропорционально производной входного напряжения: $U_{\text{вых}} = -R_1 C_1 \frac{dU_{\text{вх}}}{dt}$. Фактически дифференциатор является простейшим **активным фильтром высоких частот**.

Процесс получения импульсов малой длительности из прямоугольных импульсов соответствует математической операции дифференцирования. Если дифференцируется постоянная величина, то результат операции равен нулю. Если на вход дифференциатора подать сигнал треугольной формы, то на выходе получается прямоугольное колебание. Здесь очевиден процесс, обратный интегрированию.

Дифференциаторы на основе ОУ применяются в устройствах автоматики, телемеханики и связи для выполнения следующих функций: получение электрическим путем производной какой-либо функции времени в схемах автоматического регулирования; укорочения длительности импульсов для получения синхронизирующих или запускающих импульсов триггеров, меток времени; селекции импульсов по длительности.

Отметим, что с помощью таких схем (рис. 4.6, 4.7) интегрирование и дифференцирование сигналов осуществляется с погрешностью, приблизительно в K раз меньшей, чем с помощью обычных RC-цепей с такими же R и C .

Порядок выполнения лабораторной работы

1. Запустите программу Electronics Workbench (модуль Multisim) и нарисуйте схему инвертирующего масштабного усилителя (рис. 4.8). Величину сопротивления второго резистора выберите согласно своему варианту.

2. Подайте на вход усилителя синусоидальный сигнал с амплитудой $U_{\text{твх}}$ и частотой f , величины которых выберите согласно своему варианту.

3. Запустите моделирование схемы и сохраните осциллограммы входного и выходного сигналов. Укажите значения амплитуды и периода входного и выходного сигналов.

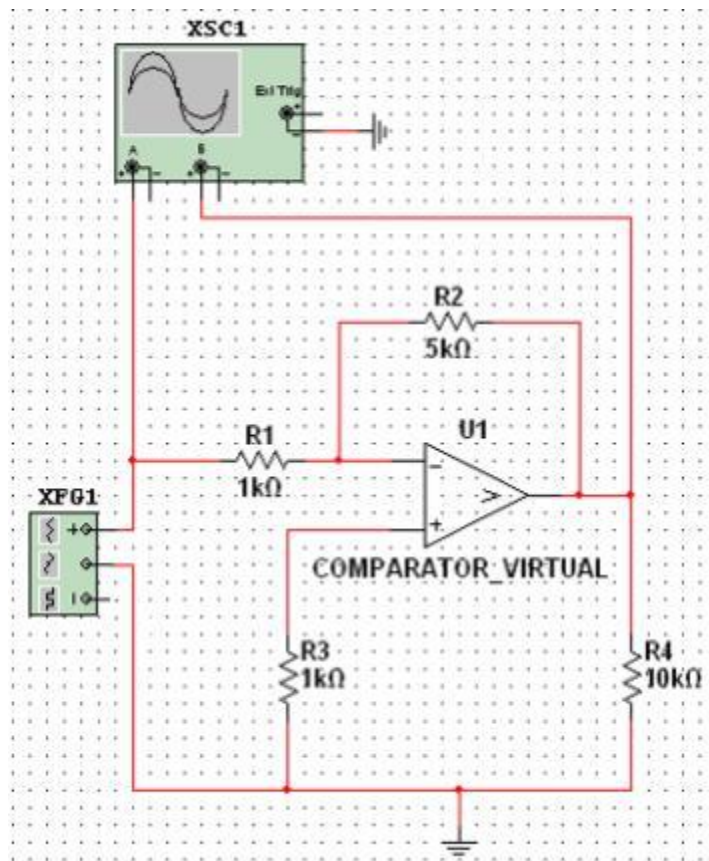


Рис. 4.8. Схема инвертирующего масштабного усилителя

4. Рассчитайте коэффициент усиления напряжения, используя амплитудные значения входного и выходного напряжений: $K = -U_{m\text{вых}}/U_{m\text{вх}}$.

5. Рассчитайте коэффициент усиления напряжения, используя значения номиналов резисторов, которые установлены в цепи ООС и на инвертирующем входе: $K = -R_2/R_1$.

6. Произведите сравнение полученных в пп. 4 и 5 значений коэффициента усиления по напряжению. Сделайте вывод.

7. Изменяя значения амплитуды входного синусоидального напряжения $U_{m\text{вх}}$ от 0,01 до 10 В, измерьте значение амплитуды выходного напряжения $U_{m\text{вых}}$.

8. Измените значение сопротивления в цепи ООС R_2 и повторите п. 7.

9. По результатам измерений постройте на одном графике передаточные характеристики $U_{m\text{ВЫХ}} = f(U_{m\text{ВХ}})$ усилителя с разными значениями сопротивления в цепи ООС R_2 .

10. Сделайте вывод о зависимости коэффициента усиления усилителя от величины сопротивлений резисторов.

11. Нарисуйте схему неинвертирующего масштабного усилителя (рис. 4.9). Сопротивление 4-го резистора выберите равным $R_4 = 10R_2$.

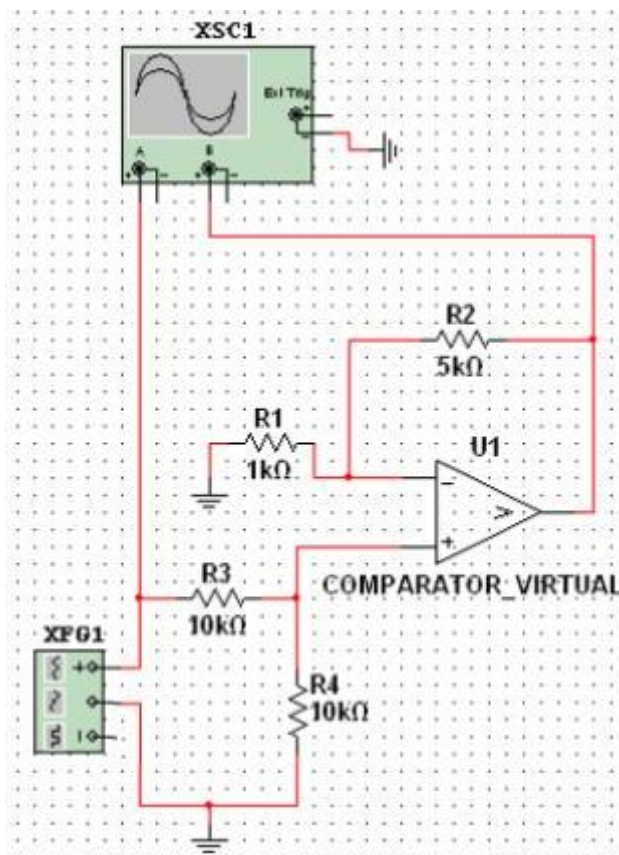


Рис. 4.9. Схема неинвертирующего масштабного усилителя

12. Выполните пп. 2–10 для неинвертирующего усилителя. При расчете коэффициента усиления неинвертирующего усилителя следует воспользоваться соотношениями: $K = U_{m\text{ВЫХ}}/U_{m\text{ВХ}}$ и $K = R_2/R_1$.

13. Нарисуйте схему интегратора (рис. 4.10). Подайте на вход интегратора прямоугольный сигнал. На этой схеме конденсатор в цепи обратной связи ОУ подсоединен между суммирующим входом и выходом интегратора. Следовательно, напряжение на конденсаторе приблизительно равно выходному напряжению.

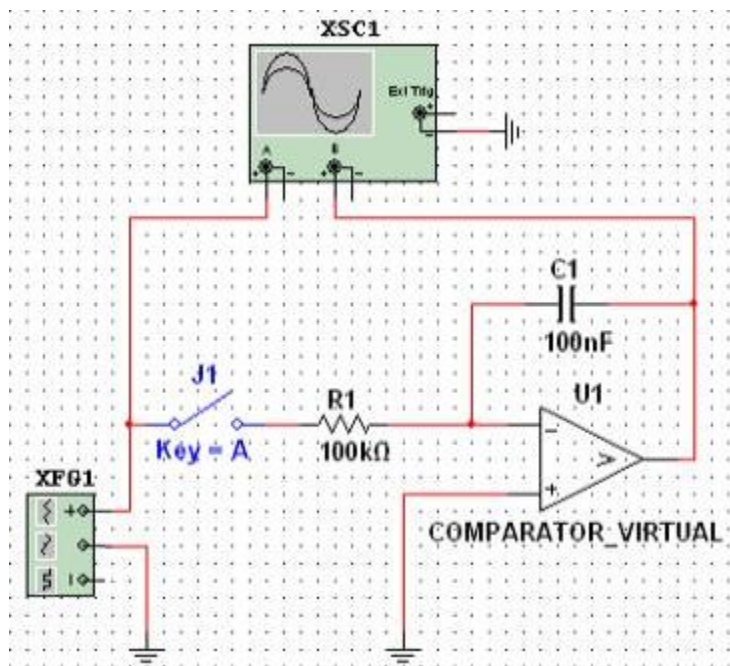


Рис. 4.10. Схема интегратора

14. Запустите моделирование схемы и сохраните осциллограммы входного и выходного сигналов. Измените величины сопротивления R_1 и емкости C_1 по своему усмотрению, сделайте выводы.

15. Проведите измерение амплитудно-частотной и фазово-частотной характеристик (АЧХ и ФЧХ) интегрирующей цепи по измерителю АЧХ.

16. Нарисуйте схему пассивного RC-фильтра нижних частот (см. лабораторную работу № 3) с такими же величинами сопротивления R_1 и емкости C_1 . Измерьте и сравните частотные характеристики (АЧХ и ФЧХ) пассивного и активного RC-фильтров.

17. Нарисуйте практическую схему дифференцирующего усилителя (рис. 4.11). R_2 и C_2 вносят дополнительное затухание, обеспечивающее устойчивость усиления и подавления высокочастотных помех.

18. Подайте на вход усилителя треугольный сигнал. Запустите моделирование схемы и сохраните осциллограммы входного и выходного сигналов. Изменяя величину емкости конденсатора C_1 , посмотрите форму выходного сигнала и сделайте выводы.

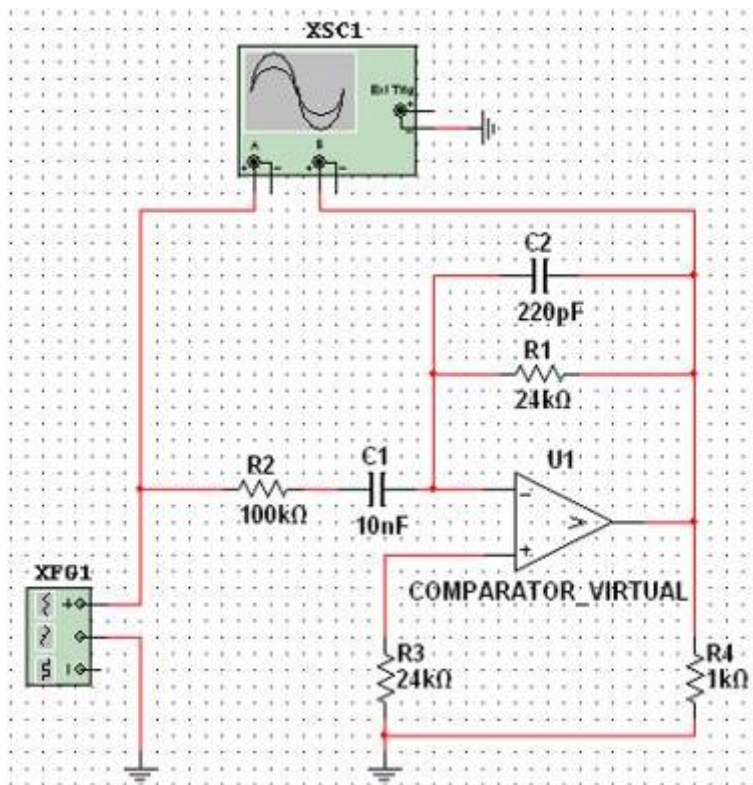


Рис. 4.11. Схема дифференцирующего усилителя

19. Нарисуйте схему двухвходного сумматора (рис. 4.12).

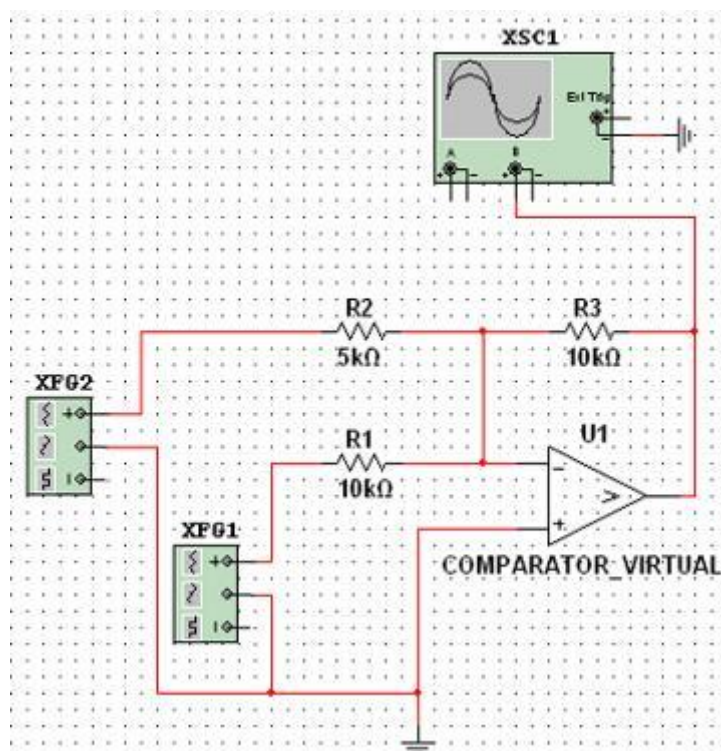


Рис. 4.12. Схема двухвходного сумматора

20. Проведите расчет выходного напряжения сумматора по формуле $U_{\text{вых}} = - \sum_{i=1}^n U_{\text{вх}i} \frac{R_N}{R_i}$ при указанных на схеме и в вашем варианте параметрах и сравните полученные данные с результатами моделирования.

Контрольные вопросы

1. Какое напряжение нужно приложить ко входам ОУ, чтобы выходной сигнал был отличен от нуля? Почему?
2. Какое напряжение нужно приложить ко входам ОУ, чтобы выходной сигнал был равен нулю?
3. Для чего применяется отрицательная обратная связь в усилителях?
4. Что такое АЧХ и ФЧХ усилителя?
5. В качестве каких устройств используются схемы на основе инвертирующего усилителя?
6. Почему инвертирующий усилитель обладает низким входным сопротивлением?
7. В качестве каких устройств используются схемы на основе неинвертирующего усилителя?
8. Сравните достоинства и недостатки инвертирующего и неинвертирующего усилителей.
9. Принципы работы интегрирующего и дифференцирующего усилителей.
10. Каким образом интегрирование прямоугольных импульсов соответствует математическому?
11. В качестве каких частотных фильтров можно использовать интегратор и дифференциатор?
12. Назовите основные недостатки пассивных дифференцирующих и интегрирующих цепей по сравнению с активными.

ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ

ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Лабораторная работа № 1. Спектральный анализ периодического несинусоидального напряжения

	Вариант									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$U_m, В$	10	9	8	7,1	9,5	11	8,5	7,5	8,2	5
$U_0, В$	2	1	0	0,1	1	0,5	1,5	0,2	1,2	0,4
$f, Гц$	50	40	30	20	25	10	60	70	80	90
$R, Ом$	200	205	215	100	180	150	160	140	130	120

	Вариант									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$U_m, В$	12	13	14	15	16	17	18	19	19,5	20
$U_0, В$	2,5	3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	-0,5	-1
$f, Гц$	15	14	13	12	11	20	16	17	18	19
$R, Ом$	110	210	220	225	240	250	255	270	280	300

Лабораторная работа № 2. Исследование прохождения периодического несинусоидального сигнала через линейные электрические цепи с разными элементами

	Вариант									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$U_m, В$	10	9,5	8	7,1	9	8,8	11	7,5	8,2	6,6
$U_0, В$	2	1	0	0,1	1	0,5	1,5	0,2	1,2	0,4
$R_2, Ом$	2	2,5	1,5	1,7	1,8	1,5	1,6	1,4	1,3	1,2
$L, мГн$	10	11	12	15	16	18	20	22	25	28
$C, мкФ$	22	27	30	9	10	31	33	38	20	15

	Вариант									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$U_m, В$	12	13	10,6	12,5	11,4	15	7,2	14	15,5	20
$U_0, В$	2,5	3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	-0,5	-1
$R_2, Ом$	1,1	2,1	2,2	2,5	2,4	2,9	2,6	2,7	2,8	3
$L, мГн$	20	30	33	36	39	47	50	60	75	100
$C, мкФ$	10	11	12	13	14	15	16	18	19	20

Лабораторная работа № 3. Дифференцирующие и интегрирующие цепи

Вариант	R_1 , кОм	R_2 , кОм	C_1 , нФ	C_2 , нФ	C_3 , пФ	C_4 , пФ	C_5 , нФ	C_6 , нФ	C_7 , нФ	C_8 , мкФ
1	470	200	150	6,8	240	68	1	24	51	0,51
2	475	200	130	6,2	220	62	1	27	56	0,47
3	510	210	160	6,2	200	75	1	22	47	0,56
4	500	210	180	7	270	82	2	30	47	0,62
5	500	220	200	7	300	75	2	30	51	0,68
6	400	220	150	6,8	200	82	2	27	56	0,75
7	410	230	120	6,3	210	64	1	21	48	0,48
8	420	230	110	6,4	200	65	1	21	49	0,49
9	430	220	140	6,4	230	70	1	23	50	0,5
10	440	220	115	6,5	230	72	1	25	51	0,51
11	450	210	125	6,5	240	75	2	23	52	0,52
12	460	210	135	6,6	240	78	2	25	53	0,53
13	480	205	145	6,6	250	78	2	26	54	0,54
14	490	205	150	6,7	250	80	2	28	55	0,55
15	495	200	155	6,7	260	80	3	29	55	0,65
16	445	210	180	7	270	67	1	21	48	0,49
17	465	220	200	7	300	69	1	22	50	0,5
18	475	220	150	6,8	200	71	1	24	51	0,55
19	485	230	120	6,5	210	73	2	23	52	0,52
20	450	230	110	6,4	200	66	2	25	53	0,53

**Лабораторная работа № 4. Изучение работы операционного усилителя
и активных фильтров на его основе**

Вариант	R_2 , кОм	U_m , В	f , Гц	Форма первого входного сигнала (рис. 4.12)	Форма второго входного сигнала (рис. 4.12)
1	5	0,1	1000	синусоидальный	прямоугольный
2	4	0,2	900	синусоидальный	прямоугольный с $U_{m2}=U_{m1}/2$
3	3	0,3	800	синусоидальный	прямоугольный с $U_{m2}=2U_{m1}$
4	2	0,4	700	треугольный	синусоидальный
5	6	0,5	600	треугольный	синусоидальный с $U_{m2}=U_{m1}/2$
6	7	0,6	500	треугольный	синусоидальный с $U_{m2}=2U_{m1}$
7	8	0,7	400	синусоидальный	треугольный
8	9	0,8	300	прямоугольный	синусоидальный
9	10	0,9	200	прямоугольный	синусоидальный с $U_{m2}=U_{m1}/2$
10	2,5	1	100	прямоугольный	треугольный
11	1	0,5	200	синусоидальный	треугольный с $U_{m2}=U_{m1}/2$
12	5	0,6	300	синусоидальный	треугольный
13	4	0,7	400	синусоидальный	треугольный с $U_{m2}=U_{m1}/3$
14	3	0,8	500	прямоугольный	синусоидальный
15	2	0,9	250	прямоугольный	синусоидальный $U_{m2}=U_{m1}/2$
16	6	1	1000	прямоугольный	синусоидальный $U_{m2}=2U_{m1}$
17	7	0,4	800	синусоидальный	треугольный $U_{m2}=U_{m1}/4$
18	8	0,3	500	синусоидальный	треугольный $U_{m2}=4U_{m1}$
19	9	0,2	750	синусоидальный	прямоугольный с $U_{m2}=U_{m1}/5$
20	10	0,1	1000	треугольный	прямоугольный с $U_{m2}=U_{m1}/2$

КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

В ПРОГРАММЕ ELECTRONICS WORKBENCH

Панель контрольно-измерительных приборов содержит цифровой мультиметр, функциональный генератор, двухканальный осциллограф, измеритель амплитудно-частотных и фазо-частотных характеристик, генератор слов (кодовый генератор), 8-канальный логический анализатор и логический преобразователь. Общий порядок работы с приборами такой: иконка прибора курсором переносится на рабочее поле и подключается проводниками к исследуемой схеме. Для приведения прибора в рабочее (развернутое) состояние необходимо дважды щелкнуть левой кнопкой мыши на его иконке.

Мультиметр (Multimeter) используется для измерения напряжения (постоянного и переменного), тока (постоянного и переменного), сопротивления, уровня напряжения в децибелах. Лицевая панель мультиметра показана на рис. 1. На лицевой панели мультиметра расположен дисплей для отображения результатов измерения, клеммы для подключения к схеме и кнопки управления.

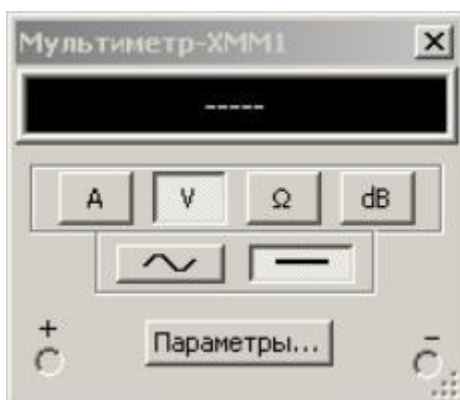


Рис. 1. Лицевая панель мультиметра

При нажатии на кнопку Settings открывается диалоговое окно настроек прибора:

- Ammeter resistance – внутреннее сопротивление вольтметра;
- Voltmeter resistance – входное сопротивление вольтметра;

- Ohmmeter current – ток через контролируемый объект;
- Decibel standard – установка эталонного напряжения при измерении ослабления или усиления в децибелах.

Функциональный генератор (Function Generator) используется для получения сигналов синусоидальной (выбрана по умолчанию), треугольной и прямоугольной формы, показан на рис. 2. На лицевой панели генератора можно устанавливать частоту (Frequency) сигнала, коэффициент заполнения (Duty cycle) в % (для импульсных сигналов это отношение длительности импульса к периоду повторения – величина обратная скважности), амплитуду (Amplitude) сигнала и смещение (постоянную составляющую) сигнала (Offset).

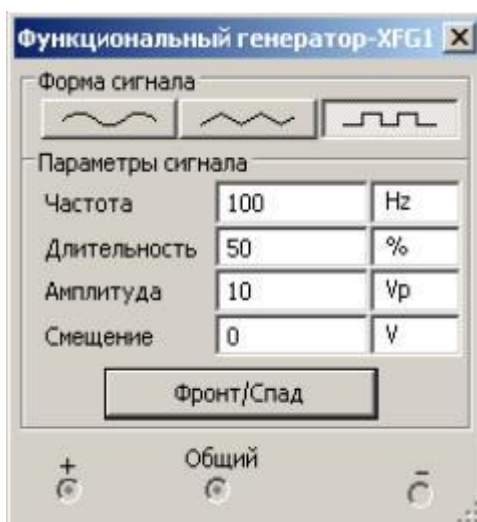


Рис. 2. Лицевая панель функционального генератора

Осциллограф (Oscilloscope) (см. рис. 3) имеет два канала (Channel A и Channel B) с отдельной регулировкой чувствительности в диапазоне от 10 мкВ/дел ($\mu\text{V}/\text{Div}$) до 5 кВ/дел (kV/Div) и регулировкой смещения по вертикали (Y position). Выбор режима по входу осуществляется нажатием кнопок [AC], [0], [DC]. Режим [AC] предназначен для наблюдения только сигналов переменного тока (его еще называют режимом «закрытого входа»). В режиме [0] входной зажим замыкается на землю. В режиме [DC] (включен по умолчанию) можно проводить осциллографические измерения как постоянного, так и переменного тока. Этот режим еще называют режимом «открытого входа».

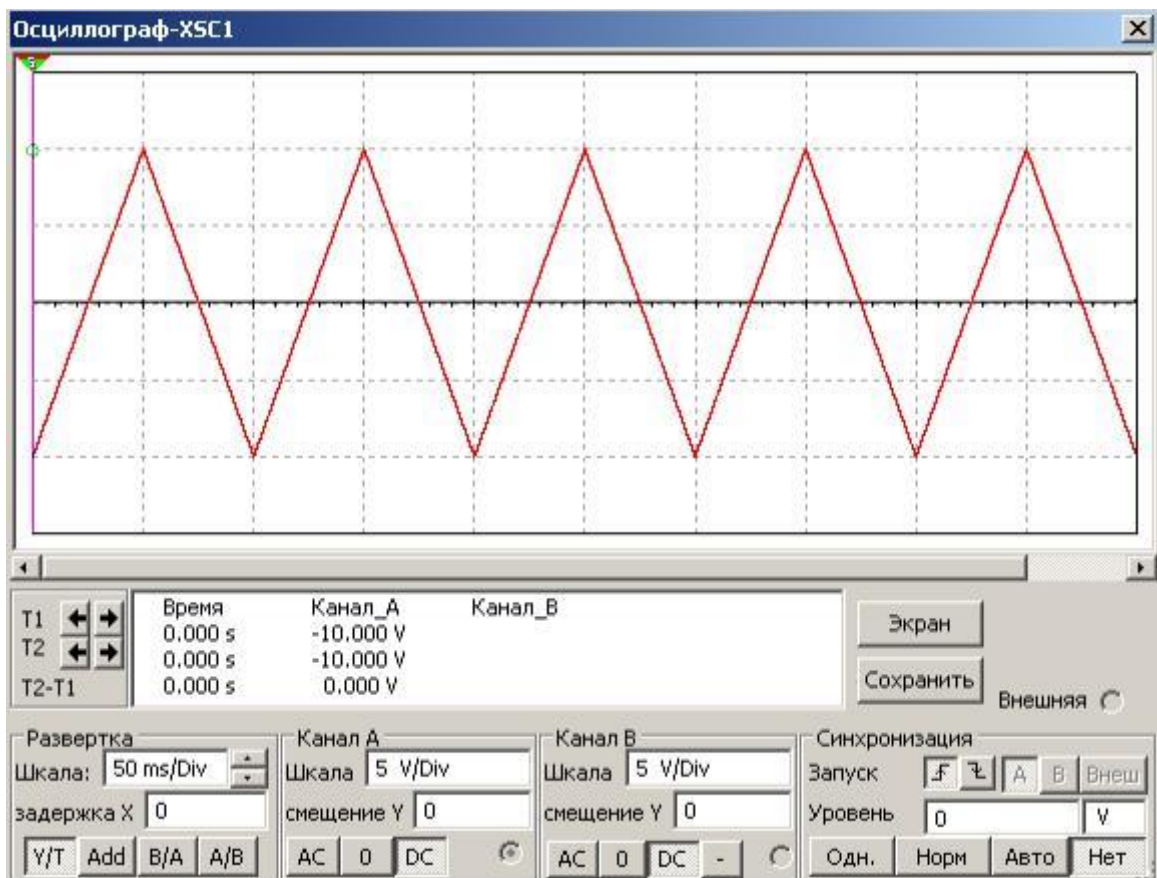


Рис. 3. Лицевая панель осциллографа

Режим развертки выбирается кнопками Y/T, B/A, A/B. В режиме Y/T (обычный режим, включен по умолчанию) реализуются следующие режимы развертки: по вертикали – напряжение сигнала, по горизонтали – время. В режиме B/A: по вертикали – сигнал канала B, по горизонтали – сигнал канала A. В режиме A/B: по вертикали – сигнал канала A, по горизонтали – сигнал канала B. В режиме развертки Y/T длительность развертки (Time base) может быть задана в диапазоне от 0,1 нс/дел до 1 с/дел с возможностью установки смещения в тех же единицах по горизонтали (X position).

Измеритель АЧХ и ФЧХ (Bode Plotter) предназначен для измерения АЧХ и ФЧХ электрических цепей. Лицевая панель измерителя АЧХ и ФЧХ показана на рис. 4. Прибор имеет четыре зажима: два входных (IN) и два выходных (OUT). Для измерения отношения амплитуд или фазового сдвига нужно подключить положительные выводы входов IN и OUT (левые выводы соответствующих входов) к исследуемым точкам, а два других вывода заземлить. При двойном

щелчке мышью по уменьшенному изображению измерителя открывается его увеличенное изображение. Верхняя панель плоттера Режим (MODE) задает вид получаемой характеристики АЧХ или ФЧХ. Для получения АЧХ нажмите кнопку Амплитуда (MAGNITUDE), для получения ФЧХ – кнопку Фаза (PHASE).

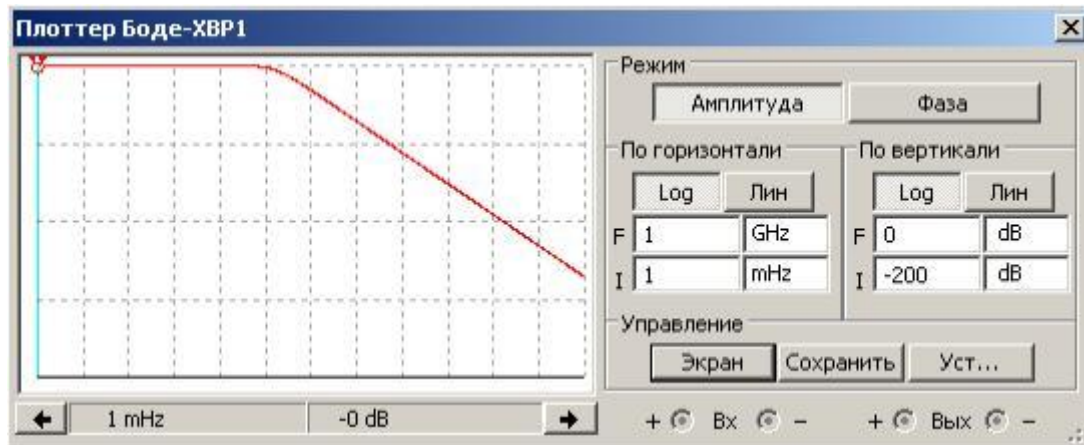


Рис. 4. Измеритель АЧХ и ФЧХ

Левая панель управления (HORIZONTAL) задает начальное (I – initial) и конечное (F – final) значения параметров, откладываемых по вертикальной оси, а также вид шкалы вертикальной оси – логарифмическая (LOG) или линейная (LIN). Правая панель управления (VERTICAL) настраивается аналогично. При получении АЧХ по вертикальной оси откладывается отношение напряжений в линейном масштабе от 0 до 10^9 и в логарифмическом масштабе от –200 до 200 дБ. При получении ФЧХ по вертикальной оси откладываются градусы – от -720° до 720° . По горизонтальной оси всегда откладывается частота в герцах или производных единицах. В начале горизонтальной шкалы расположен курсор. Его можно перемещать нажатием на кнопки со стрелками, расположенными справа от экрана, либо перемещать с помощью мыши. Координаты точки пересечения курсора с графиком характеристики выводятся на информационных полях внизу справа.

Размещение компонентов:

1. На панели инструментов открыть пиктограмму группы, содержащий необходимый компонент.
2. Установить на нем курсор, нажать левую кнопку мыши и удерживая ее в нажатом состоянии перетащить компонент на рабочую область экрана. Отпустить кнопку мыши.
3. Для соединения компонентов следует подвести курсор к выводу одного из них. Появится черная точка. Нажать левую кнопку мыши и, удерживая ее в нажатом состоянии, подвести курсор к выводу второго компонента. При появлении черной точки отпустить кнопку мыши.
4. Подключить соединительный проводник можно и к уже имеющемуся проводнику. В месте, к которому можно подключиться, появляется маленькая окружность.
5. Свойства компонентов открываются двойным щелчком.
6. При вводе значений параметров в качестве разделителя десятичной дроби следует использовать точку.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ И РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Иванов И.И., Соловьев Г.И., Равдоник В.С.* Электротехника. – СПб.: Лань, 2003. – 496 с.
2. *Атабеков Г.И.* Линейные электрические цепи. – Ч. 1. – М.: Энергия, 2007. – 592 с.
3. *Атабеков Г.И.* Основы теории цепей. – СПб.: Лань, 2009. – 432 с.
4. *Пряшников В.А., Петров Е.А., Осипов Ю.М.* Электротехника и ТОЭ в примерах и задачах. – СПб.: КОРОНА-Век, 2008. – 336 с.
5. *Пряшников В.А.* Электроника: полный курс лекций. – СПб.: Учитель и ученик: КОРОНА принт, 2003. – 416 с.
6. *Быковская Л.В., Голубь Н.В.* Исследование режимов работы линейных электрических цепей в системе «Electronics Workbench»: методические указания к лабораторному практикуму. – Оренбург: ОГУ, 2001. – 24 с.
7. *Немцов М.В.* Электроника и электротехника: учебник для вузов. – М.: Изд-во МЭИ, 2003. – 616 с.
8. *Лоторейчук Е.А.* Теоретические основы электротехники. – М.: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2009. – 320 с.
9. *Данилов И.А.* Общая электротехника. – М.: Юрайт, 2012. – 673 с.
10. *Титце У., Шенк К.* Полупроводниковая схемотехника. – М.: Мир, 1982. – 512 с.
11. *Хоровиц П., Хилл У.* Искусство схемотехники. – М.: Мир, 2003. – 704 с.
12. Введение в Multisim: трехчасовой курс. – М.: National Instruments. – 42 с.
– URL: http://tedupol.spbstu.ru/images/b/b5/Introduction_to_multisim.pdf.