

# Формирование электрических схем

## 1.1 Краткие сведения из теории

Цель занятия - получить практические навыки работы с графическими средствами для автоматизированного формирования электрических схем.

В соответствии с ГОСТ 2.701-84 к основным конструкторским документам относятся электрические схемы, на которых в виде условных изображений или обозначений показываются составные части изделия и связи между ними.

Электрическая *структурная* схема определяет основные функциональные части изделия (элементы, устройства, функциональные группы), их назначение и связи. *Функциональная* схема - служит для разъяснения определенных процессов, протекающих в отдельных функциональных цепях изделия или в изделии в целом, на ней обычно не указываются элементы и связи, не влияющие на принципы функционирования устройства: соединители, цепи коррекции, питания и т.д. Эти схемы используются при изучении принципов работы изделий, при их наладке, контроле и ремонте.

*Принципиальная* схема определяет полный состав элементов и связи между ними и, как правило, дает детальное представление о принципах работы изделия. Она служит основанием для разработки других конструкторских документов, в том числе, чертежей конструктивов. Принципиальная схема используется также при наладке, контроле и ремонте устройства. На ней изображаются все электрические элементы и устройства, необходимые для осуществления контроля в изделии заданных электрических процессов, все электрические связи между ними, а также элементы (соединители, зажимы и т.п.), которыми заканчиваются входные и выходные цепи.

Общие требования к выполнению схем вручную и автоматизированным способом регламентируются ГОСТ 2.301-68 и ГОСТ 2.004-79. ГОСТ 2.702-75 определяет правила выполнения электрических схем изделий всех отраслей промышленности и энергетических сооружений. ГОСТ 2.743-91 и 2.759-82 определяют соответственно условные графические обозначения (УГО) элементов цифровой и аналоговой техники.

Формирование электрических схем радиоэлектронных устройств (РЭУ) выполняется в интерактивном режиме в среде специальных графических редакторов, ориентированных на решение этой задачи. Примером схемного редактора является программа OrCAD Capture [1]. Кроме того, OrCAD Capture служит управляющей оболочкой, из которой можно запускать другие программы системы OrCAD. Он позволяет выполнять в интерактивном режиме значительную часть проектных процедур структурного синтеза на функциональном и схемотехническом иерархических уровнях. Сформированные схемы можно вывести на графопостроитель или принтер для получения конструкторской документации. Графический редактор OrCAD Capture предназначен для создания и редактирования электрических схем и библиотек схемных элементов.

Библиотеки схемных элементов содержат информацию о геометрической форме, размерах УГО элементов электронных схем, а также дополнительную информацию об имени, номерах и типе каждого их вывода. Информация о схемных элементах хранится в библиотечных файлах \*.olb.

Библиотеки (файлы \*.olb) программы OrCAD Capture содержат более 30 тысяч элементов. Однако не все из них имеют УГО, соответствующие отечественным стандартам. Поэтому часто возникает необходимость редактировать УГО элементов и лишь иногда - пополнять библиотеки новыми элементами.

В среде OrCAD Capture возможно создавать символы компонентов и затем помещать их в существующие или новые библиотеки. Для создания нового символа создается новая или открывается существующая библиотека и затем выбирается команда **Design>New>Part**. Для редактирования символа компонента открывается существующая библиотека по команде **File>Open>Library**. После нажатия на значок «+» на строке с именем библиотеки выводится ее каталог. Приступить к редактированию выбранного элемента можно двойным щелчком курсора.

Чтобы привести элемент библиотеки в соответствие требованиям отечественных стандартов, достаточно выполнить редактирование их УГО, сохраняя при этом информацию о структуре и компоновке элемента. В работе рассматривается задача редактирования элементов библиотеки 7400.olb. В этой библиотеке приведены интегральные схемы (ИС) серии SN74, полным аналогом которых являются ИС серии К155 отечественного производства. Соответствие некоторых ИС серий SN74 и К155 приведено в таблице 1.1

Таблица 1.1

Серия SN74	Серия К155	Функция
7400	К155ЛА3	ЧЕТЫРЕ "2И-НЕ"
7401	К155ЛА8	ЧЕТЫРЕ "2И-НЕ" О.К.
7402	К155ЛЕ1	ЧЕТЫРЕ "2ИЛИ-НЕ"
7403	К155ЛА9	ЧЕТЫРЕ "2И-НЕ" О.К.
7404	К155ЛН1	ШЕСТЬ ИНВЕРТОРОВ
7405	К155ЛН2	ШЕСТЬ ИНВЕРТОРОВ С О.К.
7406	К155ЛН3	ШЕСТЬ ИНВЕРТОРОВ С О.К.
7408	К155ЛИ1	ЧЕТЫРЕ "2И"
7410	К155ЛА4	ТРИ "3И-НЕ"
7412	К155ЛА10	ТРИ "3И-НЕ" С О.К.
7420	К155ЛА1	ДВА "4И-НЕ"
7422	К155ЛА7	ДВА "4И-НЕ" С О.К.
7425	К155ЛЕ3	ДВА "4ИЛИ-НЕ" СТРОБ.
7427	К155ЛЕ4	ТРИ "3ИЛИ-НЕ"
7430	К155ЛА2	ОДИН "8И-НЕ"
7432	К155ЛЛ1	ЧЕТЫРЕ "2ИЛИ"
7472	К155ТВ1	ТРИГГЕР "J-K"
7474	К155ТМ2	ДВА D-ТРИГГЕРА

В верхней части окна OrCAD Capture находится выпадающее меню, а немного ниже — панель инструментов, на которой размещены кнопки команд. Проектирование новой схемы начинается с создания нового проекта. Для этого надо выполнить команду **File>New>Project** или щелкнуть на кнопке Create document, расположенной на панели инструментов. На экране появится диалоговая панель New Project, в которой надо задать имя проекта (верхнее поле), например PR1, выбрать тип проекта и определить, где он будет располагаться на жестком диске (нижнее поле). Можно указать для проекта несуществующую папку — OrCAD Capture создаст ее автоматически.

В OrCAD определены четыре типа проектов — это видно на диалоговой панели New Project. Выберем проект типа Analog or Mixed-Signal Wizard. Этот тип проекта рекомендуется для решения основных задач курса, когда сформированные схемы необходимо моделировать на функциональном и схемотехническом уровнях с помощью программы Pspice A/D.

В начале создания проекта предусмотрена загрузка прототипа при выборе в диалоговом окне опции Create based upon an existing project. Рекомендуется выбрать опцию Create a blank project, при этом создается стандартный проект простой структуры, допускающий возможность моделирования схемы с помощью программы Pspice A/D.

После нажатия кнопки «ОК» загружается менеджер проекта с заданным именем (PR1). Проект имеет папки Design Resources, Outputs и PSpice Resources. Папка Design Resources содержит проект схемы PR1.dsn и папку библиотек схемных элементов Library. Чтобы открыть проект схемы необходимо щелкнуть по значку “+”. Он содержит папку SCHEMATIC1, в которой находится страница схемы: PAGE1. Эти имена легко изменить в менеджере проекта, щелкнув правой кнопкой мыши на неудобном имени и указав в открывшемся контекстном меню команду **Rename**. Проект схемы также содержит папку Design Cache (кэш проекта).

Чтобы открыть страницу схемы необходимо дважды по ней щелкнуть. При этом в окне OrCAD Capture в левой части будет расположен менеджер проекта, а правую часть занимать окно схемы. Обратите внимание: содержимое меню команд зависит от того, какое из названных окон активно.

Активизируя окно схемы, переведем редактор в режим формирования схемы. При этом появится палитра инструментов Tool Palette, с помощью которой проектируется схема. По умолчанию панель Tool Palette располагается вертикально в правой части экрана и дублирует команды меню **Place**. Наиболее часто используемые кнопки расположены в верхней части панели. Для выполнения работы достаточно использовать кнопки:

- **Select** - для переключения курсора мыши в режим выбора (выделения) объектов схемы (элементов, цепей, имен и т. п.);
- **Place Part** - позволяет размещать элементы схемы;
- **Place wire** - для соединения элементов проводниками (цепями);
- **Place junction** - для электрического соединения пересекающихся проводников (цепей);
- **Place Gnd** - для размещения «земли»;

- **Place Power** - для размещения элементов питания;
- **Place net alias** – для ввода имен проводников (цепей).

Для более сложных схем, в том числе имеющих иерархическую структуру, необходимо дополнительно использовать кнопки:

- **Place bus** - для размещения линий групповой связи (шин);
- **Place bus entry** - для соединения проводников с «жилами» шины;
- **Place hierarchical block** - для размещения иерархических блоков;
- **Place pin** - для размещения выводов иерархического блока;
- **Place no connect** - для отметки незадействованных выводов элементов.

Формирование схемы рекомендуется выполнять в следующей последовательности:

- разместить элементы (**Place Part** и **Place Gnd, Place Power**);
- соединить их выводы между собой (**Place wire**);
- при необходимости задать имена цепей (**Place net alias**).

Щелчком на пиктограмме **Place Part** (разместить элемент). Появится диалоговая панель с одноименным названием, на которой видны имена подключенных к проекту библиотек (левое нижнее окно) и список имеющихся в них элементов. Справа находится кнопка Add Library, нажатие которой позволяет добавить выбранную библиотеку. Для выполнения задания рекомендуется использовать библиотеки из папки ..Capture\Library\PSpice:

- analog.olb – базовая библиотека аналоговых элементов;
- source.olb – библиотека источников сигналов;
- sourcstm.olb – библиотека источников сигналов Stimulus Editor;
- 7400 – библиотека ИС серии SN74;
- bipolar.olb – библиотека биполярных транзисторов.

Щелкните на любом имени элемента, и его условное графическое изображение (УГО) появится в правом нижнем окне. О функции элемента можно судить по его имени или УГО.

Выделим компонент R (резистор) из библиотеки analog.olb. Нажмем кнопку ОК и укажем в окне схемы желаемое место. Чтобы зафиксировать положение элемента, щелкнем левой кнопкой мыши. Обратите внимание: рядом с УГО появилось имя R1 — это позиционное обозначение компонента. Переместим курсор в другое место и опять нажмем левую кнопку. На экране появится еще один такой же элемент с именем R2. Таким образом, можно размещать сколько угодно копий, пока Вы не нажмете клавишу [Esc] или правую кнопку мыши, исполнив затем команду **End Mode** в открывшемся контекстном меню. Есть еще один способ снять активность текущей команды — переместить курсор мыши на пиктограмму **Select** и щелкнуть левой кнопкой.

Чтобы удалить ненужный элемент подведем курсор к нему и выделим его щелчком мыши. Выделенный элемент помечается красным цветом. Нажмем клавишу Del, и элемент исчезнет с экрана. Как размещаемые, так и уже размещенные можно вращать и зеркально отображать. Для этого нажатием правой кнопки мыши активизируется панель с командами **Rotate, Mirror Vertically, Mirror Horizonttally**.

Размещенные резисторы имеют одинаковые значения параметра Value = 1K (сопротивление 1 кОм). Чтобы изменить значения этого параметра, необходимо дважды щелкнуть по нему.

Аналогичным образом выполняется размещение всех элементов схемы. УГО общей точки схемы («земли») размещаются аналогично командой **Place Ground** – необходимо использовать элемент «0» из библиотеки source.olb, УГО питания схемы – командой **Place Power** (элемент VCC из библиотеки Capsym). Чтобы получить законченную схему, размещенные элементы необходимо соединить проводниками. Для этого надо щелкнуть на пиктограмме **Place wire** (разместить проводник). Обратите внимание: курсор мыши изменил свою форму, теперь он похож на небольшое перекрестие. Выполним все необходимые соединения, нажимая левую кнопку мыши для обозначения начала и конца каждого проводника.

Чтобы нарисовать сложную цепь, неоднократно меняющую направление, необходимо в точках излома фиксировать уже нарисованную часть проводника щелчком левой кнопки мыши. Чтобы закончить рисование цепи, надо нажать правую кнопку мыши, а затем исполнить команду **End Wire** либо произвести двойной щелчок в точке, где заканчивается проводник. При постоянно нажатой кнопке мыши рисование цепи прекращается, если кнопку отпустить при достижении вывода элемента. При этом активность команды не снимается. Чтобы закончить процесс рисования проводников надо нажать клавишу [Esc] или щелкнуть на пиктограмме **Select** (или выбрать новую команду).

Линии связи и выводы элементов схемы допускается соединять между собой только встык, без наложения. Визуальный контроль подключения цепи к контакту весьма прост: свободный вывод компонента заканчивается небольшим квадратиком, который исчезает, если произошло соединение. И наоборот, если проводник подключается к другой цепи, то в точке их соприкосновения появляется так называемое Junction-соединение (довольно жирная точка малинового цвета). Добавим, что если проводники соприкасаются своими концами, то создаваемый электрический контакт не порождает Junction-соединения.

Заканчивая проектирование схемы, можно назначить имена входным, выходным и другим цепям. Щелкнем на пиктограмме **Place net alias** - откроется панель Place Net Alias, используемая для задания имени цепи. Введем с клавиатуры имя, например In, и нажмем кнопку ОК. Теперь надо указать, для какой цепи это имя предназначено. По этой причине габаритный прямоугольник, привязанный к курсору мыши и показывающий размеры имени, необходимо «прижать» непосредственно к той цепи, которую мы именуем.

Эту операцию необходимо проделать для всех шин и их ответвлений. Другие цепи можно не именовать. В этом случае они получают системные имена, которые им присвоил графический редактор (неудобные для визуального восприятия). Поэтому рекомендуется именовать также цепи, сигналы которых представляют интерес при моделировании схемы.

Проверка правильности схемы выполняется по команде **Tools>Design Rules Check (DRC)**, при этом формируется отчет (файл с расширением .drc), в который помещаются сообщения о всех обнаруженных ошибках и нарушениях.

## 1.2 Описание последовательности выполнения задания

### 1.2.1 Редактирование УГО компонента

Определить аналог заданной ИС из состава серии SN74.

Открыть библиотеку 7400.olb командой **File>Open>Library**.

Открыть окно редактирования символа выбранного компонента.

Удалить существующие элементы изображения УГО командой **Edit>Delete**. При этом штрих-пунктирный прямоугольник будет ограничивать габариты УГО символа. Размеры этого прямоугольника при необходимости можно изменить «буксировкой» его углов. Выводы компонента будут размещены вне этого прямоугольника, соприкасаясь с ним.

Сформировать новое изображение УГО командой **Place** из следующих элементов: Rectangle (прямоугольник), Line (линия), Ellipse (эллипс, окружность), Arc (дуга), Text (текст), IEEE Symbols (специальные символы).

Отечественные стандарты допускают упрощенное изображение цепей питания интегральных схем, при этом выводы питания и «земли» удобно сделать невидимыми (нулевой длины). Для этого двойным щелчком следует выделить редактируемый вывод и в открывшейся панели изменить значение параметра Shape на Zero Length.

Выполнить редактирование свойств компонента командой **Options> Package Properties**. В диалоговом окне этой команды содержатся следующие данные:

- Name — имя символа;
- Part Reference Prefix — префикс позиционного обозначения (следует привести в соответствие отечественным стандартам, например, R - для резистора, C - для конденсатора, DA - для аналоговой ИС, DD - для цифровой ИС и т.п.);
- PCB Footprint — тип корпуса компонента;
- Create Convert View — необходимость создания преобразованного изображения символа;
- Parts per Package — общее количество секций в корпусе компонента;
- Homogeneous или Heterogeneous — выбор между компонентами с секциями одинакового или разного типа;
- Alphabetic или Numeric — выбор между обозначениями секций многосекционных компонентов буквами латинского алфавита, например DD1A, DD1B, DD1C и т.д. или цифрами, например DD1-1, DD1-2, DD1-3 (следует выбрать второй вариант);
- Part Aliases — определение псевдонимов символов (например, компоненту 7400 можно присвоить псевдоним LA3 или K155LA3);
- Attach Implementation — подключение модели PSpice;
- Pin Numbers Visible — отображение на схеме номеров выводов.

Выполнить просмотр изображений всех секций многосекционного компонента по команде **View>Package**, при необходимости перейти к редактированию отдельной секции щелчком курсора.

Представить полученные результаты преподавателю на проверку.

Закрывать окно редактирования, подтвердив сохранение внесенных изменений **Save changes to Part**.

Закрывать библиотеку 7400.olb, подтвердив сохранение внесенных изменений.

### 1.2.2 Формирование схемных решений

Создать новый проект командой **File\New\Project**.

Открыть страницу Page 1.

Установить требуемые для работы параметры страницы командой **Options\Design Template** (закладка Page Size).

Разместить на странице элементы схемы командой **Place\Part**.

При необходимости разместить на странице элементы «земли» и питания командами **Place Ground, Place Power**.

Соединить проводниками выводы элементов командой **Place wire**.

При необходимости выполнить редактирование позиционных обозначений и параметров схемных элементов.

Назначить имена входным и выходным цепям командой **Place net alias**.

Записать сформированный проект командой **File>Save**;

Выполнить проверку правил выполнения схем командой **Tools>Design Rules Check**. Если были выявлены грубые ошибки, устранить их и повторно выполнить проверку.

Представить полученные результаты преподавателю на проверку.

Закрывать окно редактирования, подтвердив сохранение внесенных изменений.

## 1.3 Контрольные вопросы

1.3.1 Какие функции выполняет редактор схем при автоматизированном проектировании электронных устройств?

1.3.2 Для каких целей используются библиотеки схемных элементов?

1.3.3 Какая информация о схемных элементах заносится в библиотеку?

1.3.4 Перечислите основные типы электрических схем, назовите их назначение и основные правила построения.

1.3.5 Из каких основных элементов формируется изображение схемы?

1.3.6 Перечислите основные команды OrCAD Capture и поясните их назначение.

## 2 Функциональное проектирование аналоговых РЭУ

### 2.1 Краткие сведения из теории

Цель работы - получить практические навыки проектирования аналоговых РЭУ на этапе функционального проектирования.

При проектировании аналоговых РЭУ на функциональном иерархическом уровне разрабатываются структурные или функциональные схемы, базовыми элементами которых являются типовые функциональные звенья и узлы.

На рисунке 2.1 приведена структурная схема датчика пламени. Датчики пламени предназначены для работы в составе системы защитной автоматики газовых теплогенераторов. Они должны вырабатывать сигнал аварийного отключения подачи газа при пропадании факела газовой горелки. Интенсивность светового потока от газового факела изменяется во времени. Частотный спектр полезного сигнала, вырабатываемого фотоприемником, лежит в диапазоне 4 - 8 Гц. Кроме полезного сигнала на датчик пламени воздействуют помехи в виде естественного освещения (0 – 0.1 Гц) и искусственного освещения (100 Гц и высшие гармоники).

Схема датчика пламени (рисунок 2.1) содержит:

- фотодатчик (ФД);
- частотно-избирательный усилитель (У);
- амплитудный детектор (Д);
- пороговый элемент (ПЭ).

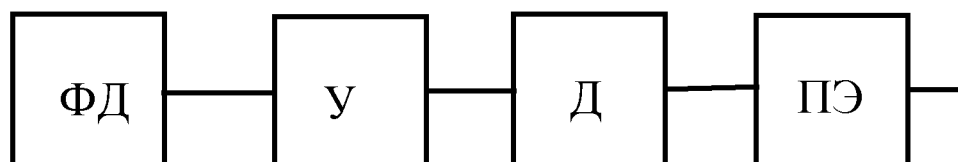


Рисунок 2.1 - Структурная схема датчика пламени

Основными требованиями, предъявляемыми к датчикам пламени, являются надежность срабатывания (в основном определяется избирательностью усилителя) и время срабатывания (определяется длительностью переходных процессов в узлах схемы). Требуется обеспечить значение коэффициента передачи усилителя в полосе пропускания на уровне 70 дБ, а в полосе задерживания – не более 0 дБ. Неравномерность коэффициента усиления в полосе пропускания не должна превышать 3 дБ. Время срабатывания датчика пламени при пропадании газового факела не должно превышать 0.4 с.

В ходе выполнения задания необходимо по исходным данным рассчитать параметры элементов схемы, а в случае необходимости скорректировать ее структуру. Результаты синтеза необходимо контролировать выполнением расчетов амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) частотно-избирательного усилителя, а также расчетов реакции датчика пламени во временной области на появление и пропадание полезного сигнала.



## 2.2 Порядок выполнения работы

2.2.1 Для построения схемы частотно-избирательного усилителя используем подход трансформации описания. В качестве исходного описания необходима математическая модель объекта, допускающая ее разложение на модели базовых элементов. Такую модель будем искать в виде передаточной функции в операторной форме. Исходные данные для построения передаточной функции частотно-избирательного усилителя задаются параметрами графика допусков АЧХ (рисунок 2.2).

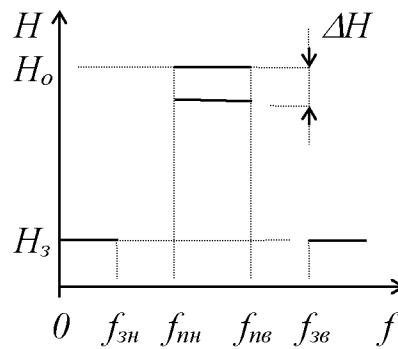


Рисунок 2.2

Решите задачу аппроксимации АЧХ частотно-избирательного усилителя с помощью программы Arrg. Если частотно-избирательный усилитель предполагается построить на избирательных усилительных каскадах, то в этом случае его частотная характеристика должна быть симметричной:

$$f_{zn} \cdot f_{zv} = f_{nn} \cdot f_{nv}, \quad (2.1)$$

а передаточная функция будет иметь вид:

$$H(s) = \prod_{i=1}^{n/2} K_{0i} \frac{(\omega_i/Q_i)s}{s^2 + (\omega_i/Q_i)s + \omega_i^2}, \quad (2.2)$$

где  $n$  - порядок передаточной функции;

$\omega_i$  - частота полюса;

$Q_i$  - добротность полюса.

Программа запрашивает у пользователя исходные данные:

- тип фильтра (полосно-пропускающий);
- значения граничных частот полосы задерживания  $f_{zn}, f_{zv}$  и пропускания  $f_{nn}, f_{nv}$ ;
- вид аппроксимации (Баттерворта или Чебышева);
- неравномерность АЧХ в полосе пропускания  $\Delta H$ ;
- затухание АЧХ на границах полосы задерживания  $(H_0 - H_3)$ .

Если условие (2.1) не выполняется, то программа предложит выполнить расчет для более жестких условий работоспособности с расширением полосы пропускания или задерживания. После завершения расчетов записать в отчет результаты:  $n$ ,  $\omega_i/Q_i$ ,  $\omega_i^2$ . Задаться значениями  $K_{oi}$ .

Частотно-избирательный усилитель также можно построить из каскадов, ослабляющих верхние частоты, и каскадов, ослабляющих нижние частоты. У первой группы каскадов передаточная функция имеет в общем случае вид:

$$H(s) = \frac{s}{s + \omega_1} \prod_{i=2}^{(n+1)/2} \frac{s^2}{s^2 + (\omega_i/Q_i)s + \omega_i^2} \quad (2.3)$$

а у второй группы каскадов передаточная функция имеет в общем случае вид:

$$H(s) = \frac{\omega_1}{s + \omega_1} \prod_{i=2}^{(n+1)/2} \frac{\omega_i^2}{s^2 + (\omega_i/Q_i)s + \omega_i^2} \quad (2.4)$$

В этом случае задачу аппроксимации необходимо искать отдельно для передаточных функций вида (2.3) и (2.4), задавая соответствующий тип.

Так как модель частотно-избирательного усилителя получена в виде произведения сомножителей первого и второго порядка, то его можно построить из включенных каскадно усилительных звеньев первого и второго порядка. В качестве модели усилительных каскадов с передаточными функциями, входящими в (2.2), (2.3) и (2.4) в качестве сомножителей, можно использовать элемент LAPLACE из библиотеки ABM.olb

2.2.2 Модель амплитудного детектора можно представить звеном идеализированного выпрямителя - элемент TABLE и фильтра нижних частот (ФНЧ) - элемент LAPLACE.

Определите параметры графика допусков АЧХ ФНЧ амплитудного детектора:  $f_n$ ,  $f_3$ . Решите задачу аппроксимации АЧХ ФНЧ с помощью программы Arrg. Программа запрашивает у пользователя исходные данные:

- тип фильтра (ФНЧ);
- значения граничных частот полосы пропускания  $f_n$  и задерживания  $f_3$ ;
- вид аппроксимации (Баттерворта или Чебышева);
- неравномерность АЧХ в полосе пропускания  $\Delta H = 3$  дБ;
- затухание АЧХ в полосе задерживания  $(H_o - H_3) = 20$  дБ.

В ходе решения задачи аппроксимации определяют передаточную функцию фильтра в операторной форме в виде (2.4). Запишите в отчет результаты:  $n$ ,  $\omega_i/Q_i$ ,  $\omega_i^2$ .

2.2.3 Для формирования функциональной схемы создайте проект \CAD\LR2\lr2 командой **File>New>Project**. Откройте в менеджере проекта страницу SCHEMATIC1:PAGE1.

Сформируйте функциональную схему датчика пламени, используя элементы звеньев LAPLACE и TABLE из библиотеки abm.olb.

Параметры NUM и DENOM определяют числители и знаменатели передаточных функций элементов LAPLACE. Например, для звена второго порядка, имеющего передаточную функцию  $H(s) = 10 \cdot 63s / (s^2 + 63s + 3400)$ , параметры NUM=10\*63\*s, DENOM= s\*s+63\*s+3400.

Параметры ROW1 – ROW5 элементов TABLE определяют координаты характерных точек статической передаточной характеристики. Для двухполупериодного амплитудного детектора можно использовать аппроксимацию передаточной характеристики, представленную на рисунке 2.3. Аналогично можно задать модель порогового элемента.

Рисунок 2.3

В программе OrCAD Pspice AD модель появляющегося и пропадающего сигнала от фотодатчика можно получить путем перемножения мгновенных значений э.д.с. двух источников напряжения – гармонического (SIN) и импульсного (PULSE). Эквивалентная схема модели входного сигнала представлена на рисунке 2.4. Источник V3 имитирует помеху частотой 100 Гц. В схеме использованы сумматор SUM и умножитель MULT из библиотеки abm.olb.

Рисунок 2.4

Чтобы получить требуемые параметры входного сигнала, необходимо задать параметры источников напряжения. Параметры модели импульсного сигнала представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 - Параметры импульсного сигнала

Обозначение	Параметр	Размерность
V1	Начальное значение	В
V2	Максимальное значение	В
TD	Задержка переднего фронта	с
TR	Длительность переднего фронта	с
TF	Длительность заднего фронта	с
PW	Длительность импульса	с
PER	Период повторения	с

Параметры модели гармонического сигнала представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 - Параметры гармонического сигнала

Обозначение	Параметр	Размерность
VOFF	Постоянная составляющая	В
VAMPL	Амплитуда	В
FREQ	Частота	Гц
TD	Задержка	с
DF	Коэффициент затухания	1/с
PHASE	Фаза	град.

2.2.4 Создайте профиль моделирования командой **PSpice>New Simulation Profile** для расчета частотной характеристики усилителя, для этого на закладке Analysis:

- установите вид анализа (Analysis type) – AC Sweep/Noise;
- задайте закон изменения AC Sweep Type: Linear и пределы изменения частоты (Start Frequency =  $\langle f_{3H} \rangle$ , End Frequency =  $\langle f_{3G} \rangle$ , Total Points = 100);
- закройте окно редактирования нажатием кнопки ОК.

Выполните моделирование командой **PSpice>Run**. При этом выполняется запуск программы PSpice A/D.

Выведите на экран график АЧХ, для этого командой **Trace>Add Trace** откройте окно Add Trace и в окне Trace Expression задайте значение  $DB(V(OutA)/V(In))$ , подтвердите выбор нажатием клавиши ОК (OutA – имя выходного узла усилителя, In - имя входного узла усилителя).

Определите затухание АЧХ ( $H_0 - H_3$ ) на границах полосы задерживания, коэффициент усиления и его неравномерность в полосе пропускания.

Оцените соответствие формы и основных параметров АЧХ заданным требованиям, при наличии существенных отклонений определите причины и устраните их, повторите расчет АЧХ. Зарисуйте график АЧХ. Удалите график командой **Trace>Delete All Traces**.

2.2.5 Для анализа реакции на появление и пропадание факела активируйте окно программы OrCAD Capture. Выполните редактирование профиля моделирования командой **PSpice>Edit Simulation Profile** для расчета во временной области, для этого на закладке Analysis:

- задайте вид анализа (Analysis type) – Time Domain (Transient);
- задайте значение интервала расчета Run to Time = 1s;
- закройте окно редактирования нажатием кнопки ОК.

Выполните моделирование во временной области командой **PSpice>Run**. Выведите на экран графики сигналов V(In), V(OutA), V(OutD), V(Out). Для этого командой **Trace>Add Trace** откройте окно Add Trace и выберите эти сигналы, подтвердите выбор нажатием клавиши ОК (In - имя входного узла усилителя, OutA – имя выходного узла усилителя, OutD - имя выходного узла детектора, Out - имя выходного узла устройства).

Оцените задержку реакции устройства на пропадание сигнала пламени и сравните с требованиями задания. В случае необходимости скорректируйте значения параметров элементов датчика пламени, повторите расчеты АЧХ и переходных процессов. Зарисуйте графики. Представьте результаты преподавателю.

### **2.3 Оформление отчета**

Отчет должен содержать:

- исходные данные (условия работоспособности);
- функциональную схему датчика пламени;
- результаты расчета параметров элементов схемы;
- результаты анализа (график АЧХ усилителя, временные диаграммы сигналов, значения выходных параметров);
- выводы.

### **2.4 Контрольные вопросы**

2.4.1 К какому этапу проектирования относится выполненная работа?

2.4.2 Перечислите выполненные проектные процедуры.

2.4.3 Какие типовые подходы были использованы к выполнению каждой проектной процедуры?

2.4.4 Каким образом можно оценить корректность разработанной схемы?

2.4.5 Каким образом в использованной модели учитывается влияние помех?

## 3 Формирование схемных решений

### 3.1 Краткие сведения из теории

Цель работы - получить практические навыки формирования схемных решений для аналоговых РЭУ на этапе схемотехнического проектирования.

При проектировании аналоговых РЭУ на схемотехническом иерархическом уровне разрабатываются функциональные и принципиальные схемы, базовыми элементами которых являются электрорадиоэлементы (ЭРЭ). Маршрут схемотехнического проектирования начинается с уточнения технического задания и синтеза варианта структуры (схемного решения).

На современном этапе формализация этой задачи в большинстве случаев сталкивается со значительными трудностями, поэтому ее решение в значительной степени возлагается на человека. В современных подсистемах автоматизации схемотехнического проектирования используются подходы, основанные на переборе законченных структур и выделении варианта из обобщенной структуры. В качестве обобщенной структуры можно рассматривать банк типовых схемных решений (БСР). В состав БСР могут входить принципиальные или функциональные электрические схемы РЭУ, а также схемные решения для типовых функциональных звеньев и узлов (подсхем), известные администратору БСР. В этом случае инженер-схемотехник, опираясь на свои знания и интуицию, проводит синтез схемы в режиме диалога с ЭВМ путем поиска или перебора вариантов решений из тех, которые хранятся в БСР.

Если исходное описание проектируемого устройства представлено в виде структурной схемы, полученной на этапе функционального проектирования, то в этом случае разработчик может построить функциональную схему РЭУ путем поиска в БСР функциональных подсхем для каждого элемента структурной схемы. При соединении отдельных подсхем между собой в соответствии с исходной структурной схемой следует учитывать вопросы согласования уровней сигналов, нагрузочной способности и т.д. Таким образом, реализуется типовой подход выделения варианта схемного решения для звена из обобщенной структуры – БСР.

Применение в процессе автоматизированного схемотехнического проектирования БСР значительно расширяет информационные возможности разработчика, концентрирует его внимание на лучших схемных решениях, известных в мировой практике. При этом удается повысить качество проектных решений, значительно сократить сроки проектирования, а также снизить требования к квалификации разработчика РЭУ в области схемотехники.

В ходе выполнения лабораторной работы может быть использован БСР для частотно-избирательных фильтров, который реализован в виде иерархически структурированного набора данных, выполненного в среде схемного графического редактора Capture. Схема верхнего уровня Filters.dsn служит классификационной схемой частотно-избирательных фильтров. Ее элементы указывают на готовые схемные решения для активных RC-фильтров первого-второго порядка.

Для найденных подсхем, как правило, необходимо решать задачу расчета параметров элементов для обеспечения требуемых значений выходных параметров. Могут использоваться аналитический или численный подходы. В данной работе можно ограничиться аналитическими расчетами по инженерным методикам.

Корректность полученных проектных решений необходимо проверить выполнением процедуры анализа с помощью программы PSPICE.

## 3.2 Порядок выполнения работы

### 3.2.1 Структурный и параметрический синтез

Создать проект \CAD\LR4\lr4 командой **File>New>Project**. Открыть в менеджере проекта страницу SCHEMATIC1:PAGE1.

Открыть проект \CAD\BSR\filters.opj командой **File>Open>Project**. Открыть в менеджере проекта страницу схемы верхнего уровня Filter:PAGE1. По ключевым признакам найти в классификационной схеме БСР элементы, указывающие на необходимые подсхемы.

Сформировать функциональную схему фильтра высокого порядка, используя подсхемы звеньев первого или второго порядка из БСР.

Выделить найденный элемент правой кнопкой мыши, затем нажать левую кнопку мыши и выполнить команду Descend Hierarchy. В открывшейся странице БСР выделить подсхему и скопировать в буфер обмена (Edit>Copy). Закрыть страницу подсхемы. Активировать рабочую страницу создаваемой схемы и скопировать на нее подсхему из буфера обмена (Edit>Paste).

Выполнить редактирование позиционных обозначений элементов схемы.

Рассчитать значения параметров элементов схемы. Для этого с командной строки запустить на выполнение программу NE.exe с параметром <имя>.txt (указывается через пробел). В окне редактора NE.exe задать требуемые значения выходных параметров. Нажать левый Shift и клавишей ↓ выделить текст с расчетными формулами. Нажать клавишу F9, а затем два раза клавишу F5. Записать в отчет рассчитанные значения параметров элементов. Подставить рассчитанные значения в поле Value элементов схемы.

Сохранить схему в наборе данных на жестком диске.

### 3.2.2 Анализ частотных характеристик

Создать профиль моделирования командой **PSpice>New Simulation Profile** для расчета частотной характеристики фильтра

Выполнить моделирование командой **PSpice>Run**.

Вывести на экран график АЧХ. Определить затухание АЧХ ( $H_0 - H_3$ ) на границах полосы задерживания, коэффициент усиления и его неравномерность в полосе пропускания.

Оценить соответствие формы и основных параметров АЧХ заданным требованиям, при наличии существенных отклонений определить причины и устранить их, повторить расчет АЧХ. Зарисовать график АЧХ. Удалить график командой **Trace>Delete All Traces**.

### **3.3 Оформление отчета**

Отчет должен содержать:

- исходные данные;
- функциональную схему фильтра;
- результаты расчета параметров элементов схемы;
- результаты анализа (график АЧХ);
- выводы.

### **3.4 Контрольные вопросы**

3.4.1 К какому этапу проектирования относится выполненная работа?

3.4.2 Перечислите выполненные проектные процедуры.

3.4.3 Какие типовые подходы были использованы к выполнению каждой проектной процедуры?

3.4.4 Каким образом можно оценить корректность разработанной схемы?

3.4.5 Какие режимы проектирования использованы при выполнении проектных операций и процедур?



## 4 Параметрическая оптимизация

### 4.1 Краткие сведения из теории

Цель занятия - получить практические навыки применения методов и средств параметрической оптимизации для решения задачи параметрической синтеза на этапе схемотехнического проектирования.

Целью параметрической оптимизации является определение значений параметров элементов (вектор внутренних параметров  $X$ ), обеспечивающих наилучшее соответствие выходных характеристик устройства  $Y$  требованиям ТЗ. Среди задач схемотехнического проектирования, которые целесообразно решать с привлечением методов оптимизации, можно выделить задачи уточнения значений параметров элементов схемы, полученных в результате использования аналитического подхода (инженерных методик расчета).

Одной из наиболее сложных операций при решении задачи параметрической оптимизации является этап математической формулировки задачи, которая включает в себя выбор критерия оптимальности, определение варьируемых параметров и задание ограничений.

Параметрическая оптимизация электронных схем в определенном смысле эквивалентна настройке схемы при ее натурном макетировании. Можно выделить следующие этапы оптимизации, соответствующие этапам настройки:

- описание оптимизируемых характеристик устройства и критериев оптимальности (выбор настраиваемых характеристик и определение требований к ним);
- выбор варьируемых параметров элементов схемы (определение регулируемых элементов схемы);
- выбор методов оптимизации и их параметров (определение последовательности и плана настройки);
- выполнение процедуры оптимизации (собственно настройка схемы);
- анализ результатов, принятие решения о продолжении или прекращении поиска, корректировка задания на оптимизацию (оценка соответствия характеристик настраиваемой схемы требованиям ТЗ и принятие решения).

Для формализации задачи вводится критерий оценки качества каждого из вариантов - целевая функция  $F(X)$ , выбираются варьируемые параметры  $X$ , а задача параметрической оптимизации формулируется в виде задачи математического программирования

$$\begin{aligned} & \text{extr} F(X), \\ & X \in XD \\ & XD = \{X \mid H(X) \geq 0, G(X) = 0, A \leq X \leq B\}, \end{aligned} \tag{4.1}$$

Функциональные ограничения в виде неравенств  $H(X) \geq 0$  и равенств  $G(X) = 0$  обычно представляют собой условия работоспособности для выходных

параметров, не участвующих в формировании целевой функции. Прямые ограничения  $A \leq X \leq B$  могут вытекать из условий физической реализуемости, например, для резисторов и конденсаторов это допустимые диапазоны значений сопротивлений и емкостей. Однако на практике прямые ограничения обычно задают более жестко для сокращения размеров области поиска и снижения вычислительных затрат.

Для различных задач могут оказаться предпочтительными определенные способы задания целевой функции. Как правило, критерии оптимальности формируются таким образом, чтобы в задаче (4.1) требовалось найти минимум целевой функции. В задачах, требующих максимального соответствия оптимизируемого параметра некоторому желаемому значению, обычно используют критерий среднеквадратического отклонения

$$F(\mathbf{X}) = (y(\mathbf{X}) - y^*)^2, \quad (4.2)$$

где  $y^*$  - желаемое значение параметра  $y$ .

Если требуется обеспечить соответствие желаемым значениям нескольких оптимизируемых параметров, то следует воспользоваться взвешенным критерием среднеквадратического отклонения

$$F(\mathbf{X}) = \sum_{i=1}^n w_i \cdot (y_i(\mathbf{X}) - y_i^*)^2, \quad (4.3)$$

где  $w_i$  – весовой коэффициент, отражающий важность  $i$ -го параметра и выполняющий его нормирование.

При выборе варьируемых параметров необходимо учитывать, что включение одного дополнительного элемента приводит к увеличению числа координат в пространстве поиска на единицу. Если для пары варьируемых параметров  $x_i$  и  $x_j$  при любых их значениях выполняется условие

$$S_{x_i}^y = -S_{x_j}^y, \quad (4.4)$$

где  $S_{x_i}^y$  и  $S_{x_j}^y$  - чувствительности параметра  $y$  к вариациям параметров  $x_i$  и  $x_j$ , появляется бесконечное множество пар значений этих параметров, для которых целевая функция не изменяет своего значения. Такая ситуация называется «овражной». Решение задачи параметрической оптимизации с «овражной» целевой функцией сопряжено со значительными трудностями. Поэтому при постановке задачи оптимизации следует исключать из вектора варьируемых параметров любой из пары параметров, порождающей «овраг».

С другой стороны, состав вектора варьируемых параметров должен обеспечивать достижение поставленной цели оптимизации. То есть, в вектор варьируемых параметров необходимо включать минимально возможное число тех параметров, изменение которых обеспечивает такое влияние на значения выходных параметров, при котором обеспечивается цель оптимизации. Для грамотного

выбора варьируемых параметров необходимы знания из области схемотехники. Прямые ограничения определяют линейные размеры области поиска по каждой координате. Грамотный выбор прямых ограничений должен обеспечивать сокращение размеров области поиска при условии, что оптимальное решение находится внутри нее.

Среди локальных алгоритмов оптимизации для целей схемотехнического проектирования получили распространение поисковые алгоритмы, использующие информацию о градиенте целевой функции.

В пакете OrCAD параметрическая оптимизация выполняется методом наискорейшего спуска путем взаимодействия модуля PSpice Optimizer с графическим редактором схем (OrCAD Capture), программой моделирования PSpice и постпроцессором Probe.

При создании схемы с помощью OrCAD Capture список варьируемых параметров задается по команде **PSpice>Place Optimizer Parameters**.

Критерий оптимизации задается непосредственно в программе PSpice Optimizer, которая вызывается из меню **PSpice** программы OrCAD Capture по команде **Run Optimizer**.

В правой верхней части этого окна помещен список значений функций, которые могут быть частными критериями или ограничениями (раздел Specifications), в нижней — перечень варьируемых параметров (раздел Parameters).

Функции частных критериев или ограничений задаются следующим образом:

- целевые функции Goal Function программы Probe, записанные в файл с расширением имени \*.PRB;

- выражения, заданные в программе PSpice Optimizer.

Целевые функции программы Probe позволяют рассчитать:

- минимум MIN(y) или максимум MAX(y) функции y;

- центральную частоту CenterFreq(ydB,1) по уровню 1 дБ;

- полосу пропускания BandWidth(ydB,3) по уровню 3 дБ и другие.

По команде **Specifications** меню **Edit** открывается окно со списком спецификации функций. Нажатием кнопки **Add** открывается меню спецификации новой функций. Это же окно открывается щелчком по имени функции из списка. В окне спецификации вводятся следующие данные:

- *Name* — имя функции;

- *Enabled* — включение режима расчета функций на следующей итерации;

- *Reference* — выбор между внутренней спецификацией (*Internal*), задаваемой в диалоговом окне, и внешней (*External*), адресуемой к имени файла данных;

- *Weight* — весовой коэффициент целевой функции (с их помощью устанавливается важность каждой целевой функции и учитываются различия их абсолютных значений).

Внутренняя спецификация задается параметрами:

- *Target* — желаемое значение функции;

- *Range* — ширина допустимого диапазона значений функции;

*Constraint* — включение/выключение режима учета ограничений. Если режим *Constraint* включен, задаваемая в этом окне функция является *ограничением*, в противном случае — *целевой функцией*;

- *Type* — тип-ограничения: =target — равно, >=target — больше или равно, <=target — меньше или равно заданному значению функции.

Запуск процесса оптимизации выполняется в меню **Tune**. По команде **Update Performance** рассчитываются характеристики схемы для начальных и текущих значений каждого параметра. Это может использоваться для проверки корректности постановки задачи оптимизации. Значения целевых функций для начальных значений параметров отображаются в главном окне программы, что позволяет оценить близость этих значений к оптимальным.

По команде **Update Derivatives** вычисляются чувствительности каждой целевой функции к изменению каждого параметра, равные частным производным. Информация о чувствительностях позволяет выбрать параметры, к изменению которых целевые функции наиболее чувствительны. Матрица чувствительностей отображается на экране по команде **Show Derivatives**.

Оптимизация в автоматическом режиме запускается по команде **Auto>Start**. Сначала вычисляется матрица чувствительностей и определяется направление изменения параметров. Движение в этом направлении происходит до тех пор, пока не перестанет уменьшаться разность между текущим и требуемым значениями оптимизируемых функций. После этого снова вычисляется матрица чувствительностей и новое направление изменения параметров. По достижении оптимума процесс оптимизации завершается или его нужно остановить по команде **Auto>Terminate**. Результаты оптимизации отображаются в главном окне программы.

## 4.2 Порядок выполнения

4.2.1 Выполнить расчет частотных характеристик звена при идеальных и реальных значениях параметров модели ОУ.

Определить частные критерии формы АЧХ (команда **Trace>Eval Goal Function**), например:

- центральную частоту полосы пропускания  $f_0$  ( `CenterFreq(VdB(Out),1)` );
- ширину полосы пропускания  $\Delta f$  ( `Bandwidth(VdB(Out),3)` );
- максимум коэффициента передачи ( `MAX(VdB(Out))` ).

Сравнить полученные результаты. Оценить отклонения значений частных критериев.

4.2.2 Составить задание на оптимизацию с целью достижения формы АЧХ, которую имеет звено с идеальными ОУ.

4.2.3 Выполнить оптимизацию АЧХ. Оценить полученные значения частных критериев формы АЧХ и критерия оптимальности (RMS Error).

При неудовлетворительных результатах повторить п.п. 2 – 3 для другого набора варьируемых параметров, диапазонов их изменения, другого набора частных критериев формы АЧХ.

4.2.4 Передать найденные параметры элементов в редактор схем (команда **Edit>Update Schematic**). Рассчитать АЧХ звена и оценить результаты оптимизации.

### **4.3 Оформление отчета**

Отчет должен содержать:

- постановку задачи оптимизации, включая: критерий оптимальности, варьируемые параметры, ограничения;
- результаты оптимизации, включая значения параметров элементов и АЧХ до выполнения и после оптимизации.

### **4.4 Контрольные вопросы**

4.4.1 К какому этапу проектирования относится выполненная работа?

4.4.2 Перечислите выполненные проектные процедуры.

4.4.3 Какие типовые подходы были использованы к выполнению каждой проектной процедуры?

4.4.4 Сформулируйте задачу параметрической оптимизации как задачу математического программирования.

4.4.5 Приведите примеры критериев оптимальности.

4.4.6 Как сформировать критерий оптимальности в программе PSpice Optimizer.

4.4.7 Как выбрать состав и диапазон значений варьируемых параметров?

4.4.8 Как зависит сложность задачи оптимизации от числа варьируемых параметров?

## 5 Оптимизация допусков

### 5.1 Краткие сведения из теории

Цель работы - приобрести практические навыки решения задачи оптимизации допусков на параметры электрорадиоэлементов (ЭРЭ) на этапе схемотехнического проектирования.

Методика решения задачи рассматривается на примере активных RC-фильтров, условия работоспособности которых заданы в графиком попусков для АЧХ.

Среди задач схемотехнического проектирования РЭУ наиболее сложной и трудоемкой является задача выбора оптимальных допусков на параметры ЭРЭ. Она решается при выбранной структуре устройства и после расчета (оптимизации) значений параметров ЭРЭ. При промышленном проектировании расчетные значения параметров ЭРЭ должны быть заменены номинальными значениями из стандартных рядов (для постоянных резисторов и для постоянных конденсаторов определяются ГОСТ 28884-90). Реальные значения параметров ЭРЭ распределяются случайным образом около номинальных значений в пределах производственных допусков и приводят к производственному разбросу выходных параметров РЭУ.

Оценка правильности функционирования РЭУ устройства производится по выполнению условий работоспособности, представляющих собой требуемые соотношения между значениями выходных параметров  $y_i$  и граничными значениями  $T_i$  (техническими требованиями), указанными в ТЗ. Для рассматриваемой задачи условия работоспособности имеют вид

$$T_{j \min} < y_j < T_{j \max} . \quad (5.1)$$

где  $y_j$  - значение АЧХ на частоте  $F_j$ .

Этим обеспечиваются запасы работоспособности

$$\alpha_j(\mathbf{X}_0) = \min(|T_{j \max} - y_j(\mathbf{X}_0)|, |T_{j \min} - y_j(\mathbf{X}_0)|) \quad (5.2)$$

Область в пространстве параметров ЭРЭ, в которой все условия работоспособности выполняются, называется областью работоспособности. Задача оптимизации допусков может быть геометрически интерпретирована, как задача вписывания в область работоспособности допусковой области, задаваемой неравенствами

$$x_{i0} + \Delta x_{i \max} < x_i < x_{i0} - \Delta x_{i \max} , \quad (5.3)$$

где  $x_{i0}$  - номинальное значение параметра  $i$ -го ЭРЭ;

$\Delta x_{i \max}$  - абсолютное значение его допуска.

Для снижения стоимости проектируемого РЭУ следует стремиться к решению задачи с максимально возможными значениями относительных допусков  $t_i = \Delta x_{i\max}/X_{i0}$ .

Известны различные методы решения подобных задач, в данной лабораторной работе используется метод равных влияний [2].

Предположим, что в пределах области работоспособности значения функций чувствительности существенно не меняются. Тогда использование их значений в опорной точке  $\mathbf{X}_0$ , координаты которой задаются номинальными значениями параметров ЭРЭ, позволяет обеспечить допустимую погрешность метода. Будем полагать, что разброс параметров интегральных ОУ, охваченных глубокой отрицательной обратной связью, существенно не влияет на разброс выходных параметров и его можно не учитывать.

Тогда, полагая равный вклад отклонений параметров ЭРЭ в отклонение выходного параметра, получим

$$t_i = \frac{k \cdot a_j(\mathbf{X}_0) / y_i}{\sqrt{m \cdot l_i \cdot |S_{x_i}^{y_j}(\mathbf{X}_0)|}}, \quad (5.4)$$

где  $m$  - число параметров всех ЭРЭ, принимаемых во внимание;

$k$  - коэффициент, зависящий от планируемого процента выхода годных изделий (для 68 % -  $k = 1$ , для 95 % -  $k = 1/2$ , для 99.8 % -  $k = 1/3$ );

$l_i$  - коэффициент, зависящий от закона распределения параметров ЭРЭ (для нормального закона  $l_i = 1/3$ , для равномерного закона  $l_i = 1/\sqrt{3}$ ).

$S_{x_i}^{y_j}(\mathbf{X})$  - функция относительной чувствительности  $y_j$  к вариации параметра  $x_i$ .

С экономической и технологической точек зрения целесообразно ввести весовые коэффициенты, позволяющие определять вклад отклонений параметров ЭРЭ в соответствии с зависимостями допуск – стоимость. Для ЭРЭ, у которых рост стоимости при снижении значений допусков выше, следует установить более высокие значения весовых коэффициентов  $w_i$ , тогда

$$t_i = \frac{w_i \cdot k \cdot a_j(\mathbf{X}_0) / y_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^m w_i^2 \cdot l_i \cdot |S_{x_i}^{y_j}(\mathbf{X}_0)|}}. \quad (5.5)$$

где  $w_j$  - весовой коэффициент, задаваемый по критерию равноценности допусков различных ЭРЭ с технологической и экономической точек зрения. Рассчитанные значения допусков должны быть заменены допустимыми для данных ЭРЭ стандартными значениями (в процентах) из ряда:

20, 10, 5, 2, 1, 0.5, 0.2, 0.1, 0.05, 0.02, 0.01 ,

при сохранении выполнения условий работоспособности.

По результатам расчета допусков необходимо выбрать подходящий ряд номинальных значений параметров и заменить расчетные значения параметров ЭРЭ номинальными значениями из стандартного ряда. Ряды для определения номинальных сопротивлений и емкостей приведены в таблицах 5.1 и 5.2

Таблица 5.1 - Ряды номинальных значений параметров при допускаемых отклонениях 20, 10, 5 %

E6	E12	E24	E6	E12	E24
1.0		1.1	3.3		3.6
	1.2	1.3		3.9	4.3
1.5		1.6	4.7		5.1
	1.8	2.0		5.6	6.2
2.2		2.4	6.8		7.5
	2.7	3.0		8.2	9.1

Таблица 5.2 - Ряды номинальных значений параметров при допускаемых отклонениях менее 5 %

С помощью программы PSpice AD можно рассчитать значения функций чувствительности и выполнить оценку разброса частотных характеристик для заданных значений допусков пассивных ЭРЭ.

## 5.2 Описание последовательности выполнения задания

Открыть проект \CAD\LR4\Bp6 командой **File\Open\Project**.

Открыть в менеджере проекта схему РЭУ SCHEMATIC1:PAGE1.

Выполнить редактирование параметра AC=1 источника входного сигнала Vg.

Выполнить редактирование профиля моделирования командой **PSpice> Edit Simulation Profile** для расчета разброса частотных характеристик по наихудшему случаю и значений чувствительностей, для этого на закладке Analysis:

- установить вид анализа (Analysis type) – AC Sweep/Noise;
- установить флажок для опции Monte Carlo/Worst Case;
- выбрать вид анализа Worst-case/Sensitivity и выходную переменную V(2);
- нажать кнопку More Setting, задать Find: The maximum Value (MAX), выбрать Worst-Case direction: Hi;
- для опции General Setting задать закон изменения AC Sweep Type: Logarithmic/Decade и пределы изменения частоты (Start Frequency = 500, End Frequency = 2000, Points/Decade = 100);
- закрыть окно редактирования нажатием кнопки ОК.

Выполнить моделирование командой **PSpice>Run**. При этом выполняется запуск программы PSpice AD.



Вывести на экран график АЧХ, для этого командой **Trace>Add Trace** открыть окно Add Trace и в окне Trace Expression задать значение (V(2)), подтвердить выбор нажатием клавиши ОК. Зарисовать график разброса АЧХ.

Определить значения функций чувствительности командой **View> Output File**.

Используя найденные значения функций чувствительности по формуле (5.5) определить допуски на параметры ЭРЭ. Заменить рассчитанные значения допусков стандартными значениями. Присвоить эти значения параметрам Tolerance элементов схемы.

Выполнить расчет разброса частотных характеристик методом Монте-Карло, для этого на закладке Analysis:

- выбрать вид анализа Monte-Carlo, выходную переменную V(2), число испытаний Number of Runs: 10; равномерный закон распределения Use Distribution: Uniform;

- закрыть окно редактирования нажатием кнопки ОК.

Выполнить моделирование командой **PSpice>Run**. При этом выполняется запуск программы PSpice AD.

Вывести на экран график АЧХ, для этого командой **Trace>Add Trace** открыть окно Add Trace и в окне Trace Expression задать значение (V(2)), подтвердить выбор нажатием клавиши ОК. Зарисовать график разброса АЧХ.

Оценить полученные результаты. Принять решение о прекращении или продолжении процесса оптимизации допусков.

Заменить расчетные значения параметров ЭРЭ номинальными значениями из стандартных рядов, соответствующих найденным значениям допусков.

Выполнить анализ рассеяния частотных характеристик. Если условия работоспособности не выполняются, принять решение относительно дальнейших действий:

- попытаться выбрать другие номинальные значения параметров ЭРЭ (допускается использование последовательно или параллельно включенных пассивных ЭРЭ);

- продолжить решение задачи оптимизации допусков;

- определить ЭРЭ, параметры которых необходимо подбирать при регулировке.

### 5.3 Оформление отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

- функциональную схему фильтра;

- расчетные значения параметров ЭРЭ и их допусков;

- найденные номинальные значения параметров ЭРЭ и стандартные значения их допусков;

- результаты анализа рассеяния частотных характеристик фильтра и сравнения их с заданными условиями работоспособности.

## **5.4 Контрольные вопросы**

5.4.1 Дайте геометрическую интерпретацию задачи оптимизации допусков.

5.4.2 Перечислите способы нормирования внутренних параметров и критерии оптимальности в задачах оптимизации допусков.

5.4.3 Перечислите методы решения задачи оптимизации допусков.

5.4.4 Как влияют значения допусков ЭРЭ на технико-экономические показатели электронных устройств?