

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Оренбургский государственный университет»

Кафедра промышленной электроники и  
информационно-измерительной техники

А.В. ХЛУДЕНЕВ

# САПР РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Рекомендовано к изданию Редакционно-издательским советом  
государственного образовательного учреждения высшего профессионального  
образования «Оренбургский государственный университет»

Оренбург 2009

УДК 621.38 : 681.5 (075.8)  
ББК 32.859+30.2-5-05 я 73  
Х60

Рецензент

доктор технических наук, профессор Н.А.Соловьев

**Хлуденев, А.В.**  
Х60 **САПР радиоэлектронных устройств: методические указания/  
А.В.Хлуденев. – Оренбург: ИПК ГОУ ОГУ, 2009. - 21 с.**

Методические указания содержат рекомендации по подготовке к практическим занятиям и выполнению заданий по дисциплине «САПР устройств промышленной электроники».

Методические указания предназначены для студентов, обучающихся по программам высшего профессионального образования по специальности 210106 «Промышленная электроника», а также могут быть использованы студентами других специальностей, связанных с разработкой аналоговых и цифровых устройств.

ББК 32.859+30.2-5-05 я 73

© Хлуденев А.В., 2009  
© ГОУ ВПО ОГУ, 2009

## Содержание

1 Задание на курсовой проект .....	4
2 Принципы проектирования РЭУ (семинар) .....	9
3 Основы автоматизации проектирования (семинар) .....	10
4 Математические модели в САПР (семинар) .....	11
5 Постановка задач параметрической оптимизации .....	12
6 Постановка задач оптимизации допусков.....	17
7 Задачи конструкторского проектирования (семинар) .....	20
8 Основы CALS-технологий (семинар) .....	21

# **1 Задание на курсовой проект**

## **1.1 Цели и задачи курсового проекта**

Цель выполнения проекта - подготовка к самостоятельной проектно-конструкторской профессиональной деятельности в сфере промышленной электроники, основанной на системном использовании информационных технологий.

В результате выполнения курсового проекта студент должен:

- иметь представление о состоянии и перспективных направлениях развития в области автоматизации проектирования электронных устройств;
- знать основы организации проектно-конструкторской деятельности и ее автоматизации;
- уметь использовать инженерные методы и методы вычислительной математики для расчета и проектирования электронных устройств;
- иметь опыт проектирования электронных устройств с использованием средств учебной и промышленных систем автоматизированного проектирования (САПР) радиоэлектронных устройств (РЭУ).

## **1.2 Организация выполнения курсового проекта**

Над курсовым проектом студенты работают под руководством преподавателя в часы, отводимые расписанием для курсового проектирования, и самостоятельно в свободное от занятий время. Основная роль отводится самостоятельной работе студентов. Возникающие в процессе работы над проектом вопросы студенты могут решать в часы консультаций с руководителем проекта. Планируемое время выполнения проекта составляет 20 часов.

Для контроля хода курсового проектирования назначаются три контрольных срока, следующих с интервалом в четыре недели. В течение каждого интервала необходимо выполнить объем работ, относящихся к одному этапу проектирования.

Готовый проект студент сдает на проверку руководителю не менее чем за 3 дня до защиты. Без предварительной проверки проекты к защите не допускаются. Руководитель в течение 1-2 дней проверяет проект и возвращает его студенту с замечаниями, которые студент должен устранить, или подписанным, если проект допущен к защите.

При защите курсового проекта студент должен сделать короткий доклад по существу проекта, осветив наиболее важные и принципиальные его стороны, и ответить на вопросы. При оценке курсового проекта принимается во внимание:

- знания, умения и навыки студента в области технологии автоматизированного проектирования;
- качество полученных проектных решений;

- обоснование принятия неформальных решений, касающихся выбора различных вариантов реализации объекта и реализации маршрута проектирования;

- степень самостоятельности и освоения средств автоматизации проектирования.

В случае получения неудовлетворительной оценки повторная защита разрешается после исправления проекта, срок повторной защиты назначается руководителем с учетом необходимости дополнительной подготовки студента.

### 1.3 Техническое задание

Техническое задание (ТЗ) на курсовое проектирование содержит словесное описание функционального назначения объекта проектирования, перечень технических требований к его основным параметрам и перечень проектно-конструкторской документации, подлежащей разработке. В состав курсового проекта входят текстовые и графические конструкторские документы:

- пояснительная записка;
- схема электрическая принципиальная;
- сборочный чертеж;
- чертеж печатной платы.

Студент должен, применяя блочно-иерархический подход и другие принципы проектирования сложных технических объектов, сформировать и выполнить сквозной маршрут проектирования заданного объекта, включающий создание всех предусмотренных ТЗ и необходимых промежуточных описаний объекта. Формальные проектные операции и процедуры должны быть выполнены с использованием средств САПР РЭУ в автоматическом или интерактивном режиме. Корректность полученных проектных решений и выполнение всех требований ТЗ должны быть подтверждены результатами анализа определяющих характеристик.

Тема курсового проекта связана с проектированием частотно-избирательных фильтров. Технические требования к амплитудно-частотной характеристике (АЧХ) фильтра которые задаются графиком допусков. Такие графики приведены на рисунке 1.1 для фильтра нижних частот (ФНЧ), для фильтра верхних частот (ФВЧ) и для полосового фильтра (ПФ). Частоты, отделяющие полосу пропускания от переходной области:

- $f_{п}$  - граничная частота полосы пропускания (для ФНЧ и ФВЧ),
- $f_{пн}$ ,  $f_{пв}$  - граничные частоты полосы пропускания (для ПФ).

Частоты, отделяющие переходную область от полосы задерживания:

- $f_{з}$  - граничная частота полосы задерживания (для ФНЧ и ФВЧ),
- $f_{зн}$ ,  $f_{зв}$  - граничные частоты полосы задерживания (для ПФ).

В пределах полосы пропускания модуль коэффициента передачи  $H(f)$  не должен отклоняться от заданного значения  $H_0$  более чем на величину  $\Delta H$  - неравномерности АЧХ в полосе пропускания. То есть, должно выполняться условие

$$H_0 - \Delta H \leq H(f) \leq H_0 \quad (1.1)$$

или

$$H_0 \leq H(f) \leq H_0 + \Delta H. \quad (1.2)$$

В полосе задерживания модуль коэффициента передачи  $H(f)$  не должен превышать некоторого допустимого значения  $H_3$

$$H(f) \leq H_3. \quad (1.3)$$

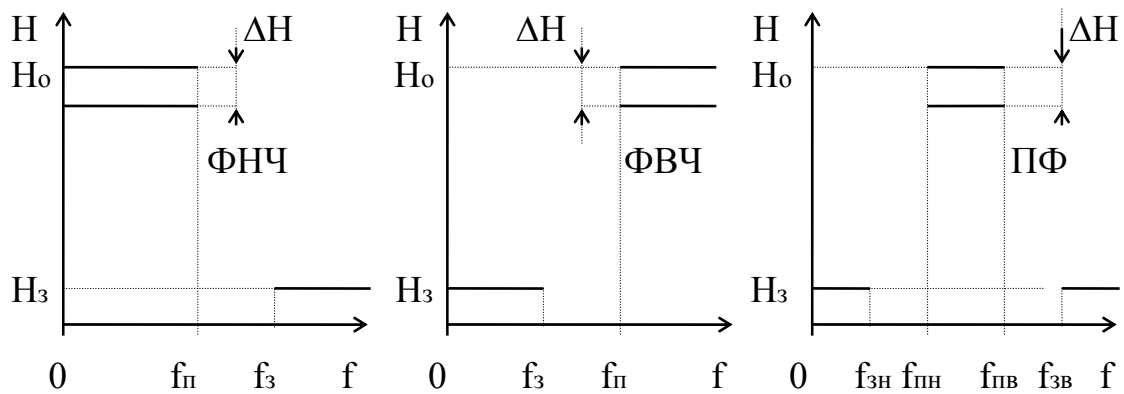


Рисунок 1.1

Численные значения параметров по вариантам заданий приведены в таблицах 1.1 - 1.3.

Необходимо, чтобы фильтр конструктивно был реализован в виде узла с печатным монтажом на серийно выпускаемых интегральных схемах (ИС) и дискретных электрорадиоэлементах (ЭРЭ).

Таблица 1.1 - Варианты заданий для фильтров нижних частот

Номер варианта	$f_{п}$ , Гц	$f_{з}$ , Гц	$H_0$ , дБ	$\Delta H$ , дБ	$H_3$ , дБ
1	3000	6000	0	0.5	-50
2	3000	8000	3	0.5	-60
3	5000	7000	0	1	-45
4	1000	2000	0	0.5	-50
5	700	2000	10	0.5	-50
6	800	1200	0	1	-40
7	3500	10000	6	0.5	-40
8	300	400	0	0.5	-30
9	400	700	3	0.1	-40
10	500	600	0	0.2	-30

Таблица 1.2 - Варианты заданий для фильтров верхних частот

Номер варианта	Фз, Гц	Фп, Гц	Но, дБ	ΔН, дБ	Нз, дБ
11	3000	6000	0	0.5	-50
12	3000	8000	3	0.5	-60
13	5000	7000	0	1	-45
14	1000	2000	0	0.5	-50
15	700	2000	10	0.5	-50
16	800	1200	0	1	-40
17	3500	10000	6	0.5	-40
18	300	400	0	0.5	-30
19	400	700	3	0.1	-40
20	500	600	0	0.2	-30

Таблица 1.3 - Варианты заданий для полосовых фильтров

Номер варианта	Фпн, Гц	Фпв, Гц	Фзн, Гц	Фзв, Гц	Но, дБ	□Н, дБ	Нз, дБ
21	6000	8000	4000	12000	0	1	-30
22	3000	9000	1000	27000	0	0.5	-20
23	300	2000	100	6000	0	1	-35
24	750	1500	580	2000	0	0.5	-20
25	1000	1200	800	1500	10	0.5	-20
26	1000	4000	220	18000	0	1	-30
27	3500	7000	1750	14000	6	0.5	-20
28	2000	4000	1000	8000	0	2	-40
29	300	500	50	3000	20	0.1	-40
30	300	400	200	600	0	1	-30

## 1.4 Содержание курсового проекта

При проектировании сложных устройств используется блочно-иерархический подход, в соответствии с которым представления об объекте проектирования разделяются на аспекты и иерархические уровни. В курсовом проекте подлежат проработке:

- функциональный аспект, отражающий физические или информационные процессы, протекающие в объекте при его функционировании;
- конструкторский аспект, характеризующий структуру, расположение в пространстве и геометрическую форму составных частей объекта.

Представления об объекте проектирования внутри функционального аспекта необходимо разделить на иерархические уровни: функциональный и схемотехнический. При этом проектируемое устройство рассматривается как

система, которую можно разделить на подсистемы более низкого порядка: проектируемое устройство - функциональные подсистемы (звенья, узлы) - ЭРЭ (транзисторы, резисторы и т.д.).

При проектировании аналоговых устройств на функциональном иерархическом уровне разрабатываются структурные или функциональные схемы, элементами которых являются типовые аналоговые звенья и узлы. В процессе схемотехнического проектирования аналоговых устройств выполняют разработку функциональных подсистем звеньев и узлов, а также функциональные и принципиальные электрические схемы для аналогового устройства в целом, элементами которых являются серийные интегральные схемы и ЭРЭ. Таким образом, курсовой проект предусматривает выполнение этапов функционального, схемотехнического, конструкторского проектирования и оформления проектно-конструкторской документации.

### 1.5 Анализ технического задания

В большинстве случаев в ТЗ задают минимально необходимое число технических характеристик, которых оказывается недостаточно для выполнения проектирования. Другие необходимые характеристики определяются расчетом по заданным. В ходе анализа ТЗ необходимо определить достаточность исходных данных для выполнения проектирования и определить необходимые технические требования к характеристикам и параметрам объекта проектирования. Оценка правильности функционирования электронного устройства производится по выполнению условий работоспособности, которые должны быть представлены в виде требуемых соотношений между значениями выходных параметров  $Y_i$  и граничными значениями  $TT_i$  (техническими требованиями)

$$Y_i \leq TT_i, \quad (1.4)$$

$$Y_i \geq TT_i \quad (1.5)$$

или

$$TT_{i \min} \leq Y_i \leq TT_{i \max}. \quad (1.6)$$



## **2 Основы проектирования (семинар)**

### **2.1 План семинара**

- 2.1.1 Аспекты и уровни проектирования.
- 2.1.2 Типовые проектные процедуры.
- 2.1.3 Типовые маршруты проектирования.

### **2.2 Вопросы для подготовки к семинару**

- 2.2.1 С какой целью используется блочно-иерархический подход к проектированию сложных объектов?
- 2.2.2 В чем состоят различия между аспектами и уровнями в блочно-иерархическом подходе?
- 2.2.3 Перечислите типовые аспекты и уровни, используемые при проектировании РЭУ.
- 2.2.4 Приведите конкретный пример иерархической системы представлений о сложном РЭУ.
- 2.2.5 Что называют проектной процедурой?
- 2.2.6 Что называют структурой объекта?
- 2.2.7 Дайте определение проектных процедур синтеза и анализа.
- 2.2.8 Приведите примеры проектных процедур синтеза при проектировании РЭУ.
- 2.2.9 Приведите примеры проектных процедур анализа при проектировании РЭУ.
- 2.2.10 Что называют верификацией?
- 2.2.11 Перечислите принципы построения маршрутов проектирования?
- 2.2.12 Чем обусловлен итерационный характер проектирования?

### **2.3 Материалы для подготовки к семинару**

- 2.3.1 **Хлуденёв, А.В.** САПР устройств промышленной электроники: учебное пособие / А.В. Хлуденев. - Оренбург: ОГУ, 2000. С. 8 – 15.
- 2.3.2 **Норенков, И.П.** Основы автоматизированного проектирования / И.П. Норенков. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. - 336 с.

## **3 Основы автоматизации проектирования (семинар)**

### **3.1 План семинара**

3.1.1 Структура комплекса средств автоматизации проектирования.

3.1.2 Подсистемы САПР.

3.1.3 Подходы к автоматизации проектных задач.

### **3.2 Вопросы для подготовки к семинару**

3.2.1 Перечислите виды обеспечения комплекса средств автоматизации проектирования. Дайте их краткую характеристику.

3.2.2 Что подразумевается под математическим обеспечением САПР?

3.2.3 Что такое подсистема САПР?

3.2.4 Поясните различия между понятиями программно-методического и программно-технического комплексов САПР.

3.2.5 Поясните структуру системы САПР OrCAD 9.2.

3.2.6 Перечислите подходы к автоматизации проектных задач структурного синтеза. Дайте их краткую характеристику.

3.2.7 Перечислите подходы к автоматизации проектных задач параметрического синтеза. Дайте их краткую характеристику.

3.2.8 Перечислите подходы к автоматизации проектных задач анализа. Дайте их краткую характеристику.

### **3.3 Материалы для подготовки к семинару**

3.3.1 **Хлуденёв, А.В.** САПР устройств промышленной электроники: учебное пособие / А.В. Хлуденев. - Оренбург: ОГУ, 2000. С. 15 – 26.

3.3.2 **Норенков, И.П.** Основы автоматизированного проектирования / И.П. Норенков. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. - 336 с.

## **4 Математические модели в САПР (семинар)**

### **4.1 План семинара**

- 4.1.1 Свойства математических моделей.
- 4.1.2 Классификация математических моделей РЭУ
- 4.1.3 Формирование математических моделей

### **4.2 Вопросы для подготовки к семинару**

- 4.2.1 Поясните роль математического моделирования в САПР.
- 4.2.2 Каким требованиям должны удовлетворять математические модели? Какая модель считается адекватной?
- 4.2.3 Почему в САПР используется множество иерархически организованных математических моделей?
- 4.2.4 Чем отличаются структурные и функциональные модели?
- 4.2.5 Чем отличаются аналитические и алгоритмические модели?
- 4.2.6 Чем отличаются модели микро-, макро- и метауровня?
- 4.2.7 Чем отличается формирование математических моделей элементов и систем?
- 4.2.8 Чем отличаются макромоделли и полные модели элементов?
- 4.2.9 Приведите возможные формы представления математических моделей.
- 4.2.10 К какому уровню относятся модели электродинамических объектов? В какой форме они представляются?
- 4.2.11 Какие численные методы используются для моделирования электродинамических объектов?
- 4.2.12 Кратко охарактеризуйте особенности моделей РЭУ схемотехнического уровня.
- 4.2.13 Приведите примеры моделей элементов схемотехнического уровня.
- 4.2.14 Перечислите численные методы, используемые при схемотехническом моделировании.
- 4.2.15 Кратко охарактеризуйте особенности моделей аналоговых РЭУ функционального уровня.
- 4.2.16 Кратко охарактеризуйте особенности моделей цифровых РЭУ функционально-логического уровня?

### **4.3 Материалы для подготовки к семинару**

- 4.3.1 **Хлуденёв, А.В.** САПР устройств промышленной электроники: учебное пособие / А.В. Хлуденев. - Оренбург: ОГУ, 2000. С. 26 – 30.
- 4.3.2 **Норенков, И.П.** Основы автоматизированного проектирования / И.П. Норенков. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. - 336 с.

## 5 Постановка задач параметрической оптимизации

### 5.1 Краткие сведения из теории

Цель занятия - получить практические навыки постановки задач параметрической оптимизации.

Целью параметрической оптимизации является определение значений параметров элементов (вектор внутренних параметров  $X$ ), обеспечивающих наилучшее соответствие выходных характеристик устройства  $Y$  требованиям ТЗ. Одной из наиболее сложных операций при решении задач оптимального проектирования 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

$$\begin{aligned} & \text{extr} F(X), \\ & X \in XD \\ & XD = \{X \mid H(X) \geq 0, G(X) = 0, A \leq X \leq B\}, \end{aligned} \tag{5.1}$$

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 диапазоны номинальных 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 (5.1) требовалось найти минимум целевой функции. В задачах, требующих максимального соответствия оптимизируемого параметра некоторому желаемому значению, обычно используют критерий среднеквадратического отклонения

$$F(\mathbf{X}) = (y(\mathbf{X}) - y^*)^2, \quad (5.2)$$

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

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

$$F(\mathbf{X}) = \sum_{i=1}^n w_i \cdot (y_i(\mathbf{X}) - y_i^*)^2, \quad (5.3)$$

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

$$S_{x_i}^y = -S_{x_j}^y, \quad (5.4)$$

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.

Постановку задачи параметрической оптимизации рассмотрим на примере избирательного усилительного каскада (рисунок 5.1). Требуется оптимизировать частотную характеристику каскада так, чтобы центральная частота  $f_0 = 30$  МГц, а ширина полосы пропускания по уровню минус 3 дБ должна составлять  $\Delta f = 3$  МГц.

Тогда для целевой функции можно использовать взвешенный среднеквадратический критерий:

$$F(R_k, C_k) = w_1 (f_0 - 30 \cdot 10^6)^2 + w_2 (\Delta f - 3 \cdot 10^6)^2. \quad (5.5)$$

В качестве варьируемых параметров целесообразно выбрать параметры колебательного контура каскада. При этом необходимо учитывать, что на значение  $f_0$  – наибольшее влияние оказывают значения емкости  $C_k$  и индуктивности обмотки трансформатора  $L_k$ . Необходимо выбрать только один из этих параметров, иначе в рельефе целевой функции появится “овраг”. На величину  $\Delta f$  существенное влияние оказывает значение сопротивления  $R_k$ .

То есть, задача оптимизации АЧХ усилительного каскада может быть сведена к поиску минимума целевой функции (5.5) в двумерном пространстве параметров  $R_k, C_k$ . При определении границ области поиска необходимо принять во внимание отклонение исходных значений оптимизируемых параметров от желаемых значений.

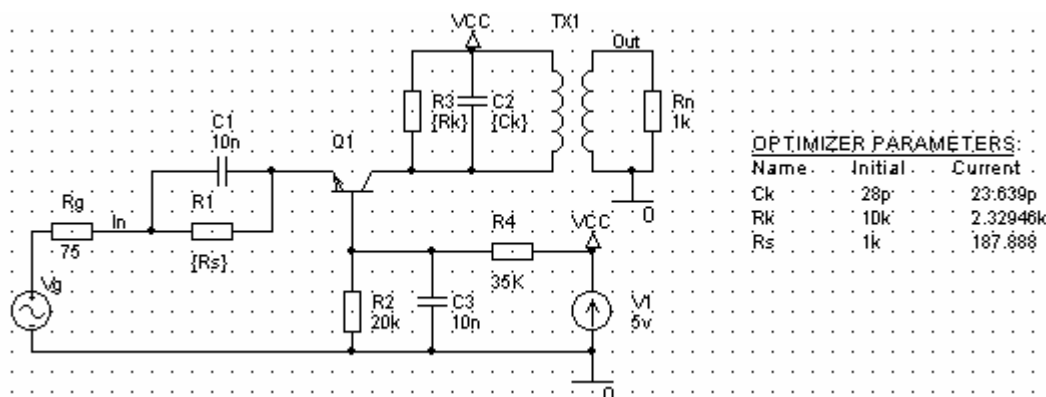
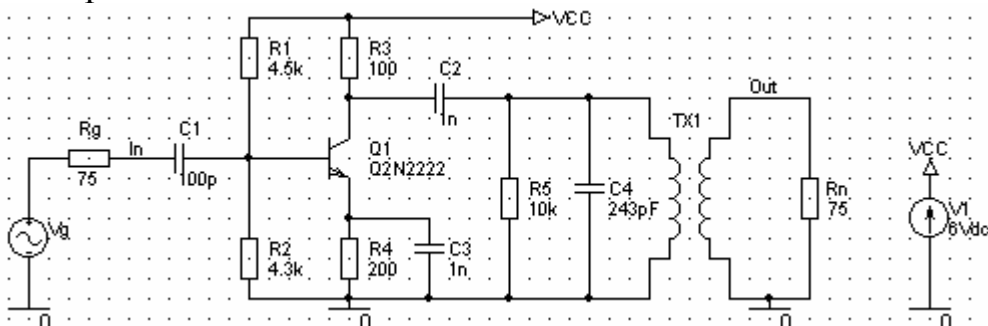


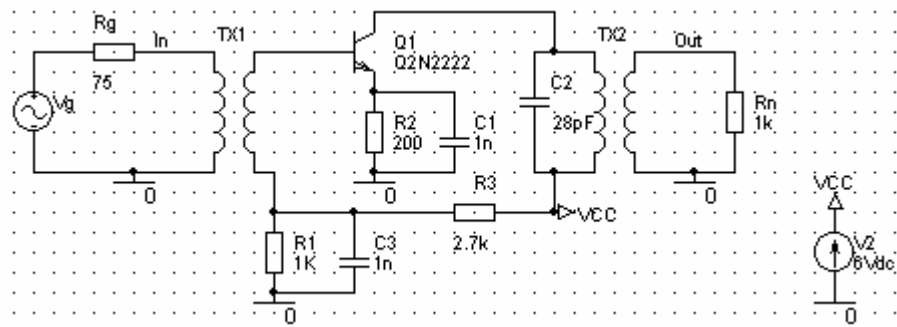
Рисунок 5.1

## 5.2 Варианты заданий

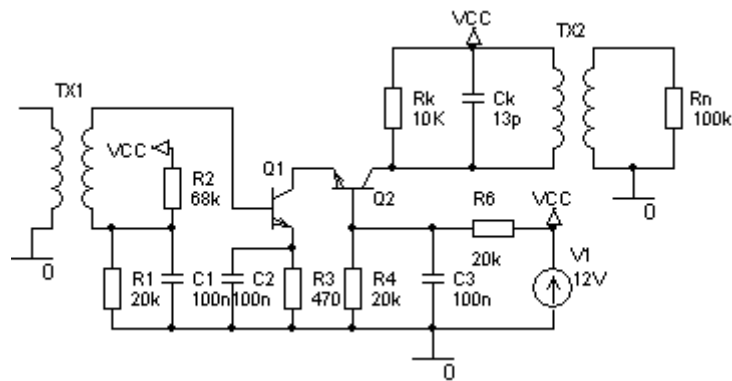
### Вариант 1



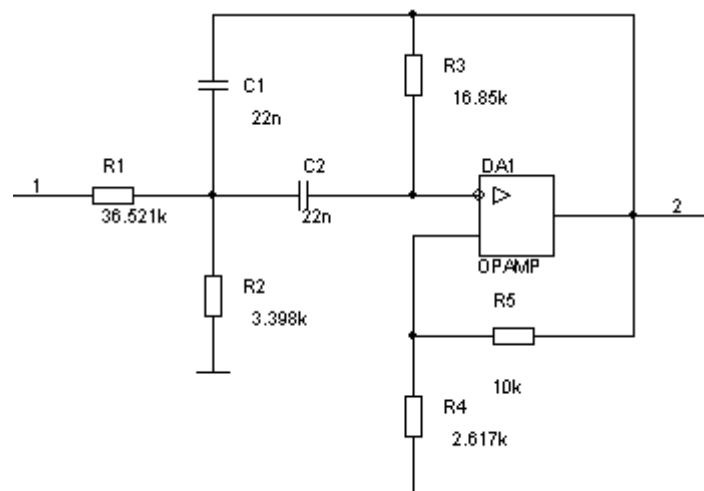
## Вариант 2



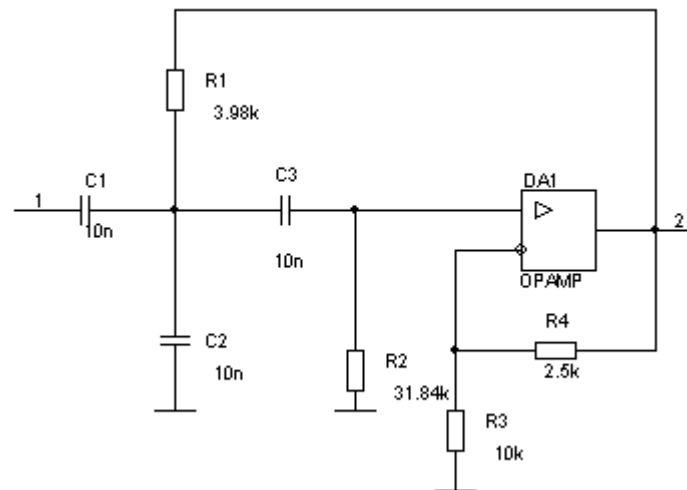
## Вариант 3



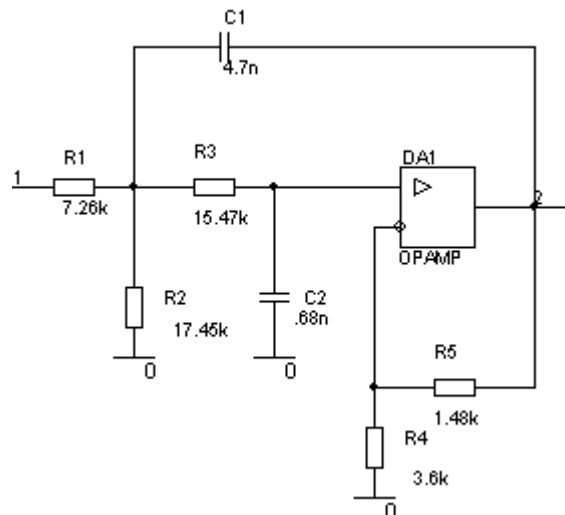
## Вариант 4



## Вариант 5



## Вариант 6



### 5.3 Оформление отчета

Отчет должен содержать постановку задачи оптимизации, включая:

- критерий оптимальности;
- варьируемые параметры;
- ограничения.

### 5.4 Контрольные вопросы

5.4.1 Сформулируйте задачу параметрической оптимизации как задачу математического программирования.

5.4.2 Приведите примеры критериев оптимальности.

5.4.3 Как выбрать состав и диапазон значений варьируемых параметров?

5.4.4 Как зависит сложность задачи оптимизации от числа варьируемых параметров?



## 6 Постановка задач оптимизации допусков

### 6.1 Краткие сведения из теории

Цель занятия - закрепить теоретические знания в области теории чувствительности и оптимизации допусков, приобрести практические навыки постановки задачи оптимизации допусков на параметры ЭРЭ на этапе схемотехнического проектирования.

Методика решения задачи рассматривается на примере активных РС-фильтров, условия работоспособности которых заданы 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. 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 производится по выполнению условий работоспособности, представляющих собой требуемые соотношения между значениями выходных параметров  $y_j$  и граничными значениями  $T_j$  (техническими требованиями), указанными в ТЗ. Для рассматриваемой задачи условия работоспособности имеют вид

$$T_{j \min} < y_j < T_{j \max} . \quad (6.1)$$

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

Этим обеспечиваются запасы работоспособности

$$a_j(\mathbf{X}_0) = \min(|T_{j \max} - y_j(\mathbf{X}_0)|, |T_{j \min} - y_j(\mathbf{X}_0)|) \quad (6.2)$$

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

$$x_{i0} - \Delta x_{i \max} < x_i < x_{i0} + \Delta x_{i \max} , \quad (6.3)$$

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, рассмотрим использование метода равных влияний.

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 операционных усилителей (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

$$t_i = \frac{k \cdot a_j(\mathbf{X}_0) / y_i}{\sqrt{m} \cdot l_i \cdot |S_{x_i}^{y_j}(\mathbf{X}_0)|}, \quad (6.4)$$

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

$$t_i = \frac{w_i \cdot k \cdot a_j(\mathbf{X}_0) / y_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^m w_i^2 \cdot l_i} \cdot |S_{x_i}^{y_j}(\mathbf{X}_0)|}. \quad (6.5)$$

где  $w_j$  - весовой коэффициент, задаваемый по критерию равноценности допусков различных ЭРЭ с технологической и экономической точек зрения.

## 6.2 Варианты заданий

Для заданной схемы (на занятии 5) сформулировать условия работоспособности и определить запасы работоспособности.

Для выполнения задания использовать график АЧХ заданной схемы, полученный при выполнении лабораторной работы 4

Технические требования приведены в таблице 6.1

Таблица 6.1

Вариант	$F_0$ , кГц (центральная частота)	$H(F_0)_{\max}$ , дБ	$H(F_0)_{\min}$ , дБ
1	28000	20	23
2	30000	30	33
3	32000	40	43
4	1	3	0
5	1	6	3
6	1	3	0

### 6.3 Оформление отчета

Отчет должен содержать:

- заданную функциональную схему;
- условия работоспособности в пространстве выходных параметров;
- запасы работоспособности.

### 6.4 Контрольные вопросы

6.4.1 Дайте геометрическую интерпретацию задачи оптимизации допусков.

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

6.4.3 Перечислите методы решения задачи оптимизации допусков.

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

## **7 Задачи конструкторского проектирования (семинар)**

### **7.1 План семинара**

7.1.1 Задачи и маршрут конструкторского проектирования РЭУ.

7.1.2 Математические модели для задач схемно-топологического проектирования печатных плат.

7.1.3 Методы и алгоритмы схемно-топологического проектирования (компоновки, размещения, трассировки).

7.1.4 Анализ свойств конструкций.

### **7.2 Вопросы для подготовки к семинару**

7.2.1 Перечислите задачи синтеза конструкций. Поясните содержание каждой задачи.

7.2.2 В чем состоит различие между задачами разрезания и покрытия?

7.2.3 Приведите примеры математических моделей электрических схем и монтажного пространства.

7.2.4 Почему при компоновке применяются модели схем, представленные в виде гиперграфа?

7.2.5 Почему для решения задач схемно-топологического конструирования получили распространение приближенные последовательные алгоритмы?

7.2.7 В чем сущность последовательного алгоритма покрытия?

7.2.8 В чем сущность последовательного алгоритма размещения?

7.2.9 Перечислите основные шаги алгоритма трассировки печатных плат.

7.2.10 Каким образом строится трасса печатного проводника для цепи волновым алгоритмом? Поясните на примере.

7.2.11 Каким образом определяют основные свойства конструкций? Приведите примеры.

### **7.3 Материалы для подготовки к семинару**

7.3.1 **Хлуденёв, А.В.** САПР устройств промышленной электроники: учебное пособие / А.В. Хлуденев. - Оренбург: ОГУ, 2000. С. 87 – 108.

7.3.2 **Норенков, И.П.** Основы автоматизированного проектирования / И.П. Норенков. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. - 336 с.

## **8 Основы CALS-технологий (семинар)**

### **8.1 План семинара**

- 8.1.1 Стадии жизненного цикла изделия.
- 8.1.2 Концептуальная модель CALS.
- 8.1.3 Электронные конструкторские документы.

### **8.2 Вопросы для подготовки к семинару**

- 8.2.1 Поясните смысл термина – жизненный цикл продукции.
- 8.2.2 Назовите основные стадии жизненного цикла продукции.
- 8.2.3 Какие причины привели к появлению и развитию CALS-технологии?
- 8.2.4 Какие системы принято обозначать CAE, CAD, CAM?
- 8.2.5 Перечислите основные компоненты концептуальной модели CALS.
- 8.2.6 Что понимают под электронным конструкторским документом?
- 8.2.7 Перечислите основные виды электронных конструкторских документов.
- 8.2.8 Что понимают под электронной структурой изделия?
- 8.2.9 Что понимают под электронной моделью изделия?
- 8.2.10 Что понимают под электронным макетом?
- 8.2.11 Перечислите основные виды электронных моделей изделия.
- 8.2.12 Назовите причины появления стандартов STEP.
- 8.2.13 Что называют прикладным протоколом в STEP-технологии?
- 8.2.14 Поясните назначение языка EXPRESS.

### **8.3 Материалы для подготовки к семинару**

- 8.3.1 **Норенков, И.П.** Основы автоматизированного проектирования / И.П. Норенков. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. - 336 с.
- 8.3.2 **ГОСТ 2.051-2006 ЕСКД.** Электронные документы. Общие положения. – Введ. 2006–09–01. – М. : Стандартинформ, 2006. – 12 с.
- 8.3.3 **ГОСТ 2.052-2006 ЕСКД.** Электронная модель изделия. Общие положения. – Введ. 2006–09–01. – М. : Стандартинформ, 2006. – 12 с.
- 8.3.4 **ГОСТ 2.053-2006 ЕСКД.** Электронная структура изделия. Общие положения. – Введ. 2006–09–01. – М. : Стандартинформ, 2006. – 10 с.
- 8.3.5 **ГОСТ 2.104-2006 ЕСКД.** Основные надписи. – Взамен ГОСТ 2.104—68; введ. 2006–09–01. – М. : Стандартинформ, 2006. – 27 с.
- 8.3.6 **ГОСТ 2.601-2006 ЕСКД.** Эксплуатационные документы. – Введ. 2006–09–01. – М. : Стандартинформ, 2006. – 32 с.
- 8.3.7 **ГОСТ 2.610-2006 ЕСКД.** Правила выполнения эксплуатационных документов. – Введ. 2006–09–01. – М. : Стандартинформ, 2006. – 36 с.