

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича
Столетовых»
(ВлГУ)

ПРОЕКТИРОВАНИЕ, КОНСТРУИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

ПРАКТИКУМ ДЛЯ БАКАЛАВРОВ
НАПРАВЛЕНИЯ 220400 – УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Профиль подготовки:

Управление и информатика в технических системах

Квалификация (степень) выпускника: бакалавр

Составитель
В.П. ГАЛАС

Владимир 2015

УДК 681.38: 681.3.06

Рецензент

Зав. лабораторией ЗАО «Автоматика плюс»

Дерябин В.М.

Печатается по решению редакционно-издательского совета
Владимирского государственного университета

Проектирование, конструирование и технология систем управления. Практикум для бакалавров направления 220400 – управление в технических системах профиль подготовки: управление и информатика в технических системах квалификация (степень) выпускника: бакалавр/ Сост.: В.П. Галас. Владимир, 2015. 140 с.

Приводится краткий теоретический материал, методики расчетов, задания и примеры решения задач для десяти практических занятий к курсу «Проектирование, конструирование и технология систем управления». Материал практикума включает синтез цифровых и расчет аналоговых устройств, выбор и расчет источников вторичного электропитания, расчет конструктивно-технологических параметров печатной платы, конструирование корпусов функциональных узлов, расчет тепловых режимов аппаратуры, выбор способа охлаждения и расчет надежности элементов функциональных блоков радиоэлектронных устройств.

Предназначено для бакалавров направления подготовки: 220400 - управление в технических системах.

Табл. 16. Ил. 72. Библиогр.: 36 назв.

УДК 681.38: 681.3.06

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №1	
СИНТЕЗ ЦИФРОВЫХ КОМБИНАЦИОННЫХ УСТРОЙСТВ.....	6
Краткие теоретические сведения	6
Варианты задания	17
Литература.....	21
ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №2	
СИНТЕЗ ЦИФРОВЫХ УСТРОЙСТВ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ТИПА	22
Краткие теоретические сведения	22
Задание	35
Литература.....	37
ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №3	
РАСЧЕТ ИСТОЧНИКОВ ВТОРИЧНОГО ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ	
ВЫБОР И РАСЧЕТ СХЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ ПОСТОЯННОГО ТОКА	38
Краткие теоретические сведения	38
Задание	49
Литература.....	50
ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №4	
ВЫБОР И РАСЧЕТ ВЫПРЯМИТЕЛЯ И ПОНИЖАЮЩЕГО	
ТРАНСФОРМАТОРА.....	51
Краткие теоретические сведения	51
Задание	59
Литература.....	59
ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №5	
РАСЧЕТ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ.....	60
Краткие теоретические сведения	60
Задание	67
Литература.....	68

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №6

СОЗДАНИЕ СИМВОЛОВ КОМПОНЕНТОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СХЕМЫ 72

Краткие сведения 72

Задание 91

Литература 92

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №7

КОНСТРУКТИВНЫЙ РАСЧЕТ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ 100

Краткие сведения 100

Задание 105

Литература 106

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №8

ВЫБОР МЕТОДА КОНСТРУИРОВАНИЯ И РАЗРАБОТКА

КОНСТРУКЦИИ КОРПУСА ФУНКЦИОНАЛЬНОГО УЗЛА 107

Краткие теоретические сведения 107

Задание 120

Литература 120

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №9 121

РАСЧЕТ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ АППАРАТУРЫ, ВЫБОР 121

СПОСОБА ОХЛАЖДЕНИЯ 121

Краткие теоретические сведения 121

Задание 132

Литература 132

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №10 133

РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ БЛОКОВ
РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ 133

Краткие сведения 133

Задание 139

Литература 139

ВВЕДЕНИЕ

Роль и значение работ, связанных с разработкой конструкции и технологии производства, в общем процессе создания электронной аппаратуры (ЭА) все более возрастает. Это связано, с одной стороны, с ростом степени интеграции применяемой микроэлектронной элементной базы, что требует новых подходов к решению задач компоновки, помехоустойчивости, обеспечения нормальных тепловых режимов и высокой надежности. С другой стороны — расширением сфер применения ЭА, что требует использования современных методов конструирования и технологических процессов, обеспечивающих оптимальное сочетание необходимых эксплуатационных и экономических характеристик. Поэтому от правильного решения конструкторских и технологических проблем при проектировании ЭА зависят в конечном итоге ее потребительские качества.

Разработчики (инженеры - системотехники, инженеры - схемотехники, программисты, специалисты по сетям и техническому обслуживанию) при решении специфических задач должны хорошо ориентироваться в вопросах построения конструкции, разработки технологических процессов и организации производства ЭА. Это позволит получать не только самые совершенные эксплуатационные показатели создаваемой ЭА, но и обеспечит возможность организации ее производства с применением передовых технологий и достижением высоких экономических показателей.

Предлагаемый практикум отражает современные тенденции разработки и расчета конструкций и устройств электронной аппаратуры различного назначения: радиоэлектронной, электронно-вычислительной, транспортируемой, бытовой и пр. В нем приведены краткие теоретические сведения по этим проблемам, по мнению автора достаточные для решения поставленных задач. Материалы практикума базируются на лекциях, читаемых автором по дисциплине «Проектирование конструирование и технология систем управления» бакалаврам и магистрам направления 220400 - Управление в технических системах.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №1

СИНТЕЗ ЦИФРОВЫХ КОМБИНАЦИОННЫХ УСТРОЙСТВ

Цель работы: изучение методов минимизации формул двоичных функций, получение навыков синтеза схем цифровых комбинационных устройств

Краткие теоретические сведения

Любая цифровая комбинационная схема (логическая схема без памяти) полностью описывается таблицей истинности. При этом не обязательно чтобы все комбинации входных цифровых сигналов были полезными. Возможна ситуация, когда только часть комбинаций входных логических сигналов является полезной. В этом случае выходные сигналы цифрового устройства для оставшихся комбинаций входных логических сигналов могут быть доопределены произвольно. Обычно при этом стараются выбирать цифровые значения выходных сигналов таким образом, чтобы схема цифрового устройства получилась простейшей.

Для реализации цифровых логических схем с произвольной таблицей истинности используется сочетание простейших логических элементов "И" "ИЛИ" "НЕ". Существует два способа синтеза цифровых схем, реализующих произвольную таблицу истинности. Это СКНФ (логическое произведение суммы входных сигналов) и СДНФ (сумма логических произведений входных сигналов).

При синтезе цифровой схемы, реализующей произвольную таблицу истинности, **каждый выход анализируется (и строится схема) отдельно и независимо**. В настоящее время наиболее распространены цифровые микросхемы, совместимые с ТТЛ технологией, а в этой технологии производства микросхем проще всего получить логические элементы "И". Поэтому первым рассмотрим способ реализации произвольной таблицы истинности основанный на СДНФ.

Совершенная дизъюнктивная нормальная форма (СДНФ)

Для реализации таблицы истинности при помощи логических элементов "И" (СДНФ) достаточно рассмотреть только те строки таблицы истинности, которые содержат логические "1" в выходном сигнале. Строки, содержащие в выходном сигнале логический 0 в построении цифровой схемы не участвуют. Каждая строка, содержащая в выходном сигнале логическую "1", реализуется схемой логического элемента "И" с количеством входов, совпадающим с количеством входных сигналов в таблице истинности.

Входные сигналы, описанные в таблице истинности логической единицей, подаются на вход этого логического элемента непосредственно, а входные сигналы, описанные в таблице истинности логическим нулем, подаются на вход этого же логического элемента "И" через инверторы. Объединение сигналов с выходов логических элементов "И", реализующих отдельные строки таблицы истинности, производится при помощи логического элемента "ИЛИ". Количество входов в логическом элементе "ИЛИ" определяется количеством строк в таблице истинности, в которых в выходном сигнале присутствует логическая единица.

Рассмотрим конкретный пример. Пусть необходимо реализовать таблицу истинности, приведенную на рисунке 1.1:

Входы				Выходы	
In0	In1	In2	In3	Out0	Out1
0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	1	0
0	0	1	0	0	0
0	0	1	1	0	0
0	1	0	0	0	0
0	1	0	1	0	1
0	1	1	0	1	0
0	1	1	1	0	0
1	0	0	0	0	0
1	0	0	1	0	1
1	0	1	0	0	0
1	0	1	1	0	0
1	1	0	0	1	0
1	1	0	1	0	0
1	1	1	0	0	0
1	1	1	1	0	1

Рисунок 1.1- Произвольная таблица истинности.

Для синтеза цифровой схемы, реализующей сигнал Out0, достаточно рассмотреть строки, выделенные красным цветом. В таблице истинности три строки, содержащие единицу в выходном сигнале Out0, поэтому в формуле СДНФ будет содержаться три произведения входных сигналов — **термов**, а точнее минтермов:

$$Out0 = \overline{In0} \cdot \overline{In1} \cdot \overline{In2} \cdot In3 + \overline{In0} \cdot In1 \cdot \overline{In2} \cdot \overline{In3} + \overline{In0} \cdot In1 \cdot In2 \cdot In3$$

Так как количество переменных в каждом терме (ранг терма) данного логического выражения равно, то такое логическое выражение называется совершенным. (Совершенная Дизъюнктивная Нормальная Форма — СДНФ)

Полученное логическое выражение реализуется микросхемой D2 в схеме, приведенной на рисунке 1.2. Как и в формуле, каждая строка (терм) реализуется своим логическим элементом "И", затем выходы этих логических элементов объединяются при помощи логического элемента "ИЛИ". Количество входов логического элемента "И" (дизъюнкция) в СДНФ однозначно определяется количеством входных сигналов в таблице истинности. Количество этих элементов, а значит и количество входов в логическом элементе "ИЛИ" определяется количеством строк с единичным сигналом на реализуемом выходе цифровой схемы.

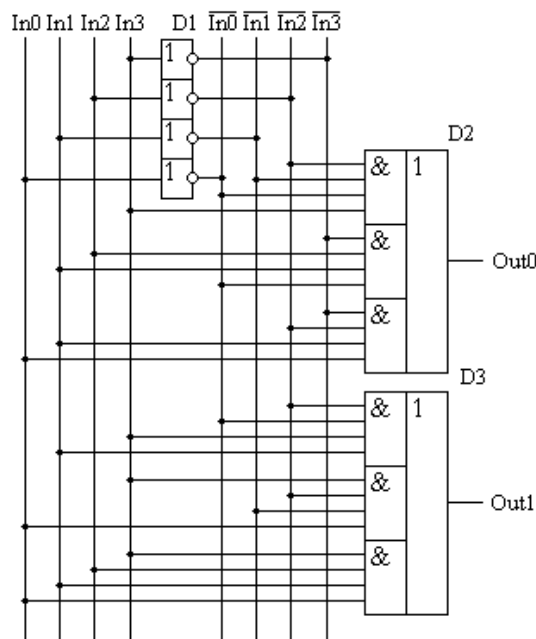


Рисунок 1.2 - Принципиальная схема, реализующая таблицу истинности, приведенную на рисунке 1.1

Для построения схемы, реализующей сигнал Out1, достаточно рассмотреть строки, выделенные зеленым цветом. Эти строки реализуются микросхемой D3. Принцип построения этой схемы не отличается от примера, рассмотренного выше. В таблице истинности присутствуют всего три строки, содержащие единицу в выходном сигнале Out1, поэтому в формуле СДНФ выхода Out1 будет содержаться три произведения входных сигналов:

$$Out1 = \overline{In0} \cdot In1 \cdot \overline{In2} \cdot In3 + In0 \cdot \overline{In1} \cdot \overline{In2} \cdot In3 + In0 \cdot In1 \cdot In2 \cdot In3$$

Обычно при построении цифровых схем после реализации таблицы истинности производится минимизация схемы, но для упрощения понимания материала сейчас минимизация производиться не будет. Это оправдано еще и с той точки зрения, что неминимизированные схемы обычно обладают максимальным быстродействием. При реализации схемы на ТТЛ микросхе-

мах быстродействие всего узла будет равно быстродействию одиночного инвертора.

По СДНФ форме логического выражения обычно строятся современные микросхемы большой интеграции — программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС), такие как программируемые логические матрицы (ПЛМ), программируемые матрицы логики ПМЛ или CPLD.

Совершенная конъюнктивная нормальная форма (СКНФ)

Еще одним способом реализации цифровых комбинационных схем является запись логического выражения в совершенной конъюнктивной нормальной форме (СКНФ). Применение СКНФ оправдано при большом количестве логических единиц в выходном сигнале проектируемой цифровой схемы, как это показано в качестве примера в таблице 1.1 истинности, или в ЭСЛ-микросхемах.

Таблица 1.1 - Пример таблицы истинности

№ комбинации	Входы				Выходы	
	8	4	2	1	a	b
0	0	0	0	0	1	1
1	0	0	0	1	0	1
2	0	0	1	0	1	1
3	0	0	1	1	1	1
4	0	1	0	0	0	1
5	0	1	0	1	1	0
6	0	1	1	0	1	0
7	0	1	1	1	1	1
8	1	0	0	0	1	1
9	1	0	0	1	1	1

Для реализации цифрового комбинационного устройства по таблице истинности при помощи логических элементов "ИЛИ" (СКНФ) достаточно рассмотреть только те строки таблицы истинности, которые содержат логические "0" в выходном сигнале. Строки, содержащие в выходном сигнале логическую "1" в построении логического выражения, а, следовательно, и принципиальной схемы цифрового устройства не участвуют. Каждая строка, содержащая в выходном сигнале логический "0", реализуется схемой логи-

ческого элемента "ИЛИ" с количеством входов, совпадающим с количеством входных сигналов в таблице истинности.

Для построения схемы, реализующей сигнал Out0, достаточно рассмотреть строки, выделенные курсивом. В рассматриваемой таблице истинности имеются всего две строки, содержащие логический ноль в выходном сигнале а, поэтому в формуле СКНФ будет содержаться две суммы входных сигналов:

$$a = (8 + 4 + 2 + \bar{1}) \cdot (8 + \bar{4} + 2 + 1)$$

Входные сигналы, описанные в таблице истинности логическим нулём, подаются на вход этой схемы непосредственно, а входные сигналы, описанные в таблице истинности логической единицей, подаются на логического элемента "ИЛИ" через инверторы. Объединение сигналов с выходов схем "ИЛИ", реализующих отдельные строки таблицы истинности, производится при помощи схемы логического элемента "И". Количество входов в схеме "И" определяется количеством строк в таблице истинности, в которых в выходном сигнале присутствует логическая единица.

Полученная формула в схеме на рисунке 1.3 реализуются микросхемой D2.

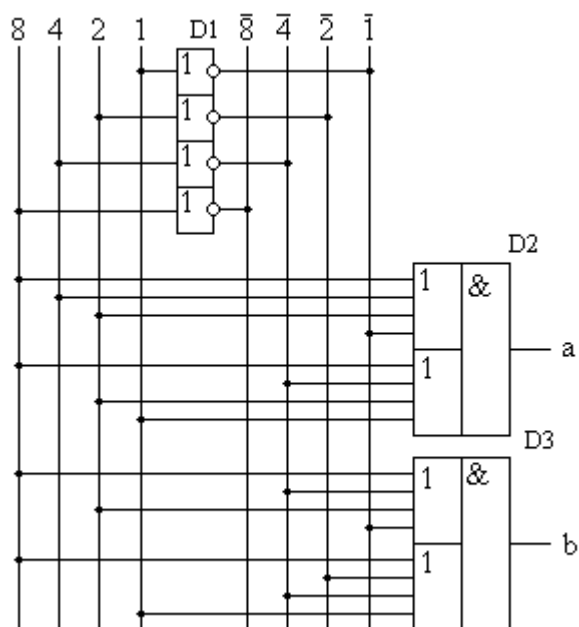


Рисунок 1.3 - Схема, реализующая сигнал Out0

Для построения схемы, реализующей сигнал b , достаточно рассмотреть строки, выделенные жирным шрифтом. Эти строки в схеме на рисунке 3 реализуются микросхемой D3. Принцип построения этой схемы не отличается от примера, рассмотренного выше. В таблице истинности присутствуют всего две строки, содержащие ноль в выходном сигнале b , поэтому в формуле СКНФ выхода b будет содержаться две суммы входных сигналов:

$$a = (8 + \bar{4} + 2 + \bar{1}) \cdot (8 + \bar{4} + \bar{2} + 1)$$

Минимизация формул двоичных функций:

Цель: получение такого вида формул, чтобы построенный по ним автомат содержал минимального количества ЛЭ.

Минимизация заключается в отыскании ДФ функции, содержащей минимальное число аргументов. Такие ДФ называют минимальными.

Метод Квайна:

Основан на законе склеивания.

1 этап. Получение сокращенной ДНФ (СДНФ) путем склеивания смежных минтермов по различающемуся аргументу. Смежные минтермы отличаются формой вхождения в них лишь одного аргумента (например, $x_1x_2x_3x_4$ и $x_1x_2x_3\bar{x}_4$ - различие в x_4).

$$\text{Склеивание } x_1x_2x_3x_4 + x_1x_2x_3\bar{x}_4 = x_1x_2x_3$$

$$x_1x_2x_3x_4 + x_1x_2\bar{x}_3x_4 = x_1x_2x_4$$

$$x_2x_3x_4 \text{ и } x_1x_2x_3 - \text{импликанты.}$$

Импликанты между собой тоже могут склеиваться, в результате чего приходим к простым импликантам. Простые импликанты и несклеиваемые минтермы входят в СДНФ.

2 этап. Исключение избыточных импликант из СДНФ путем склеивания.

$$y = x_1x_2x_3 + x_1x_2\bar{x}_3 + x_1\bar{x}_2x_3 + x_1\bar{x}_2\bar{x}_3$$

$$y = \underbrace{x_2 x_3}_{\text{импл.1}} + \underbrace{x_1 x_3}_{\text{импл.2}} + \underbrace{x_1 \bar{x}_2}_{\text{импл.3}}$$

В результате, как видно, импликанта 1 покрывает 1 и 2 минтермы, импликанта 3 покрывает 3 и 4 минтермы, т.е. импликанта 2 является избыточной, поскольку все минтермы покрыты другими импликантами.

СДНФ без избыточных импликант называется тупиковой.

ТДНФ $y = x_2 x_3 + x_1 \bar{x}_2$

ТДНФ может получиться нескольких видов. Та ТДНФ, которая содержит минимальное число аргументов и есть минимальная (МДНФ).

Поиск тупиковых форм значительно облегчается использованием карт Карно (диаграмм Вейча) – это прямоугольные таблицы, разделенные на клетки, число которых равно числу минтермов (Рисунок 1.4).

$$P = 2^p$$

				x_1	
				0	1
				$\bar{x}_1 \bar{x}_2$	$\bar{x}_1 x_2$
				$x_1 \bar{x}_2$	$x_1 x_2$
x_3	0	0	$\bar{x}_3 \bar{x}_4$		
		1	$\bar{x}_3 x_4$		
	1	1	$x_3 x_4$		
	1	0	$x_3 \bar{x}_4$		
				x_2	

Рисунок 1.4- Схема карты Карно

Чтобы смежные минтермы находились в соседних ячейках (для склеивания) существует определенный порядок их размещения.

Аргументы разбиваются на две группы. Например, $x_2 x_3$.

Порядок перестановки аргументов должен соответствовать перестановке цифр в циклическом коде.

Упрощение функций табличным способом

В ячейки карты записываются значения функций (1 или 0) соответствующих минтермов. Если для какого – нибудь минтерма функция не определена, производят их до определения (т.е. берут равным 0 или 1 для лучшего склеивания).

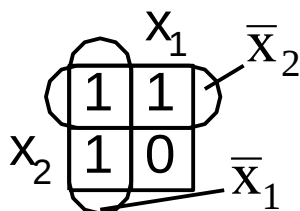
Например, для штрих Шеффера:

Функция задана таблицей 1.2:

Таблица 1.2

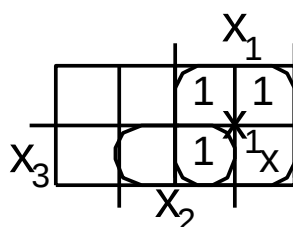
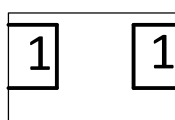
Аргумент			Функция	
x_1	x_2	x_3	заданная	до определения
0	0	0	1	1
0	0	1	0	0
0	1	0	0	0
0	1	1	1	1
1	0	0	1	1
1	0	1	x	1
1	1	0	x	1
1	1	1	x	1

Решение:



$$y = \overline{x_1} + x_2 = \overline{x_1 x_2}$$

Склеиваемые минтермы охватывают контурами (если минтермы находятся на краях таблицы, то незамкнутыми)



Отсюда $y = x_1 + x_2x_3 + \overline{x_2x_3}$. x_1 на исчезает, т.к. везде без инверсии.

Принцип логического проектирования комбинационных устройств

Такие устройства характеризуются тем, что в них состояние выходов в каждый момент времени однозначно определяется состоянием входов (элементы памяти отсутствуют).

Типовой порядок проектирования КУ с одним выходом включает следующие этапы:

1. кодирование входных и выходных переменных и переход от словесного задания оператора к табличному.
2. переход от табличного вида к алгебраическому в виде СДНФ
3. упрощение СДНФ оператора и получение его минимальной ДНФ.
4. переход от МДНФ к минимальной форме в базисе функционально полного набора функций, реализуемых логическими элементами
5. составление структурной схемы автомата

Проиллюстрируем этот порядок на примере наиболее распространенных схем.

Схема контроля состояний

Содержательное описание – имеются 3 датчика с двоичными выходными сигналами. Используя элементы Шеффера надо обеспечить индикацию состояний, когда единичные значения принимают по меньшей мере два из трех сигналов.

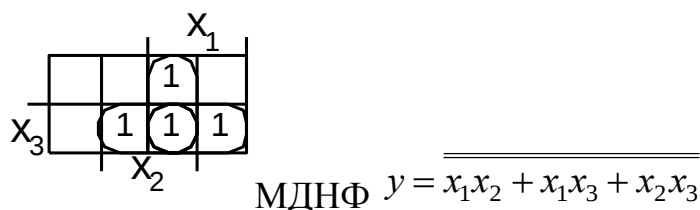
1. Переходим к табличному заданию (Рисунок 1.5):

Аргументы			Функция
x_1	x_2	x_3	y
0	0	0	0
0	0	1	0
0	1	0	0
0	1	1	1
1	0	0	0
1	0	1	1
1	1	0	1
1	1	1	1

Рисунок 1.5 – Таблица истинности схемы контроля состояний

$$2. \quad y = x_1 x_2 x_3 + x_1 x_2 \overline{x_3} + x_1 \overline{x_2} x_3 + x_1 \overline{x_2} \overline{x_3}$$

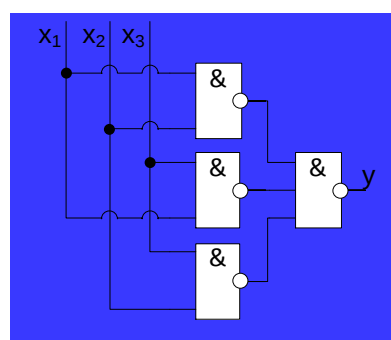
Таблица Карно свидетельствует о возможности попарного склеивания минтермов.



3. Двукратное инвертирование приводит к мин. форме y в базисе функций Шеффера

$$y = \overline{\overline{x_1 x_2} \overline{x_1 x_3} \overline{x_2 x_3}}$$

4. Структурная схема:



К узлам комбинационного типа относятся такие шифраторы и дешифраторы, преобразователи кодов, сумматоры, мультиплексоры и др. цифровые устройства.

Схемы преобразования кодов

Под преобразованием кодов понимается преобразование n -разрядных двоичных чисел, представляющих информацию в одном заданном коде, в m -разрядные двоичные числа, представляющие эту информацию в другом коде. Наиболее распространены следующие два подхода к построению преобразователей кодов.

Первый подход - синтез m независимых одновыходных функций по заданной таблице истинности – таблице соответствия кодов. В таблице истинности слева записывается один из преобразуемых кодов, справа – другой.

Допустим, имеется таблица истинности преобразователя 2-х разрядного двоичного кода в 3-х разрядный:

a_1	a_0	b_2	b_1	b_0
0	0	1	0	0
0	1	0	0	1

1	0	0	1	1
1	1	0	0	0

Считая b_0 , b_1 и b_2 независимыми одно выходными функциями, запишем для каждой из них булевы выражения.

$$b_0 = \bar{a}_1 a_0 + a_1 \bar{a}_0,$$

$$b_1 = a_1 \bar{a}_0,$$

$$b_2 = \bar{a}_1 \bar{a}_0.$$

Используя приведенные булевы выражения с учетом того, что инверсии некоторых переменных и произведение $a_1 \bar{a}_0$ встречаются не в одной функции, составляем схему преобразователя (Рисунок 1.6) с применением (где это возможно) одних и тех же логических элементов:

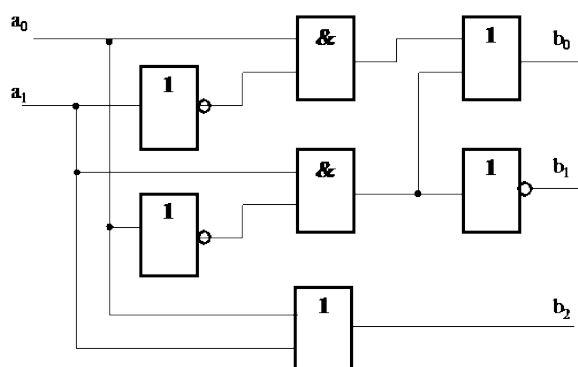


Рисунок 1.6 – Схема преобразователя кодов

Второй подход - построение преобразователя кодов по методу "дешифратор-шифратор".

В этом случае по заданной таблице истинности составляется таблица соответствия десятичных цифр. В рассмотренном примере эта таблица запишется следующим образом

A	B
0	4
1	1
2	3
3	0

Метод построения преобразователя заключается в следующем.

Сначала строится схема преобразователя двоичного кода в унарный, т.е. такой код, когда "1" может быть только на одном из N выходов преобразователя, номер которого совпадает с числом, представленным входным двоичным кодом. (такой преобразователь называется дешифратором). Число выходов дешифратора равно $N = 2^n$, где n – число разрядов входного кода дешифратора.

Затем строится схема преобразователя, осуществляющего обратную операцию, т.е. преобразование унарного кода в двоичный. Число входов такого преобразователя, который называется шифратором, равно $M = 2^m$, где m – число разрядов выходного кода шифратора.

Схема преобразователя кода образуется соединением выходов дешифратора и входов шифратора в соответствии с таблицей соответствия десятичных цифр (Рисунок 1.7). Здесь DC – обозначение дешифратора (DECODER), CD – обозначение шифратора (ENCODER).

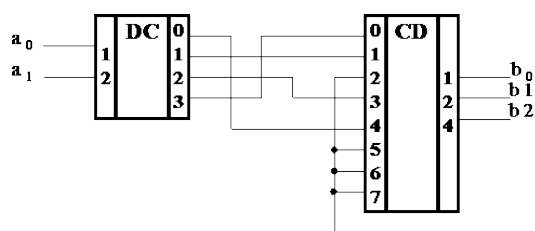


Рисунок 1.7 – Реализация схемы преобразователя кодов на ИС

ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЯ

Вариант 1

1. Синтезировать 2-х входовой преобразователь нормального двоичного кода в циклический код (код Грэя). Минимизацию проводить с помощью карт Карно для каждого из выходов, в базисе логических элементов "Штрих Шеффера".
2. Записать СДНФ и СКНФ функции (Стрелка Пирса). Получить МДНФ методом Квайна и с помощью карт Карно.

Вариант 2

1. Синтезировать 3-ех входовой преобразователь нормального двоичного кода в циклический код(код Грэя). Минимизацию проводить с помощью

карт Карно для каждого из 3-ех выходов, в базисе логических элементов” Штрих Шеффера”.

2. Записать СДНФ и СКНФ функции Логическая равнозначность. Получить МДНФ методом Квайна и с помощью карт Карно.

Вариант 3

1. Синтезировать 4-ех входовой преобразователь нормального двоичного кода в циклический код (код Грэя). Минимизацию проводить с помощью карт Карно для каждого из 4-ех выходов, в базисе логических элементов” Штрих Шеффера”.
2. Записать СДНФ и СКНФ функции Логическая неравнозначность. Получить МДНФ методом Квайна и с помощью карт Карно.

Вариант 4

1. Синтезировать 2-х входовой преобразователь нормального двоичного кода в циклический код (код Грэя). Минимизацию проводить с помощью карт Карно для каждого из выходов, в базисе логических элементов” Стрелка Пирса”.
2. Записать СДНФ и СКНФ функции тавтология X1. Получить МДНФ методом Квайна и с помощью карт Карно.

Вариант 5

1. Синтезировать 3-ех входовой преобразователь нормального двоичного кода в циклический код (код Грэя). Минимизацию проводить с помощью карт Карно для каждого из 3-ех выходов, в базисе логических элементов”Стрелка Пирса”.
2. Записать СДНФ и СКНФ функции тавтология X2. Получить МДНФ методом Квайна и с помощью карт Карно.

Вариант 6

1. Синтезировать 4-ех входовой преобразователь нормального двоичного кода в циклический код (код Грэя). Минимизацию проводить с помощью карт Карно для каждого из 4-ех выходов, в базисе логических элементов” Стрелка Пирса”.
2. Записать СДНФ и СКНФ функции импликация от X2 к X1. Получить МДНФ методом Квайна и с помощью карт Карно.

Вариант 7

1. Синтезировать цифровой автомат, обеспечивающий индикацию состояний трех датчиков, когда 0 значения принимают, по меньшей мере, два из

трех сигналов. Автомат реализовать в базисе логических элементов “Стрелка Пирса”.

2. Записать СДНФ и СКНФ функции тавтология от X_1 к X_2 . Получить МДНФ методом Квайна и с помощью карт Карно.

Вариант 8

1. Синтезировать цифровой автомат, обеспечивающий индикацию состояний 4-ех датчиков, когда 0 значения принимают, по меньшей мере, два из 4-ех сигналов. Автомат реализовать в базисе логических элементов “Стрелка Пирса”.
2. Записать СДНФ и СКНФ функции (Стрелка Пирса). Получить МДНФ методом Квайна и с помощью карт Карно.

Вариант 9

1. Синтезировать цифровой автомат, обеспечивающий индикацию состояний трех датчиков, когда 1 значения принимают, по меньшей мере, два из трех сигналов. Автомат реализовать в базисе логических элементов “Штрих Шеффера”.
2. Записать СДНФ и СКНФ функции Логическая равнозначность. Получить МДНФ методом Квайна и с помощью карт Карно.

Вариант 10

1. Синтезировать цифровой автомат, обеспечивающий индикацию состояний 4-ех датчиков, когда 1 значения принимают, по меньшей мере, два из 4-ех сигналов. Автомат реализовать в базисе логических элементов “Стрелка Пирса”.
2. Записать СДНФ и СКНФ функции Логическая неравнозначность. Получить МДНФ методом Квайна и с помощью карт Карно.

Вариант 11

1. Синтезировать цифровой автомат, обеспечивающий индикацию состояний 4-ех датчиков, когда 1 значения принимают, по меньшей мере, 3 из 4-х сигналов. Автомат реализовать в базисе логических элементов “Штрих Шеффера”.
2. Записать СДНФ и СКНФ функции тавтология X_1 . Получить МДНФ методом Квайна и с помощью карт Карно.

Вариант 12

1. Синтезировать цифровой автомат, обеспечивающий индикацию состояний 4-ех датчиков, когда 0 значения принимают, по меньшей мере, 3 из 4-х сигналов. Автомат реализовать в базисе логических элементов “Штрих Шеффера”.
2. Записать СДНФ и СКНФ функции тавтология X_2 . Получить МДНФ методом Квайна и с помощью карт Карно.

Вариант 13

1. Синтезировать цифровой автомат, обеспечивающий индикацию состояний 5-ти датчиков, когда 1 значения принимают, по меньшей мере, три из трех сигналов. Автомат реализовать в базисе логических элементов “Штрих Шеффера”.
2. Записать СДНФ и СКНФ функции импликация от X_2 к X_1 . Получить МДНФ методом Квайна и с помощью карт Карно.

Вариант 14

1. Синтезировать цифровой автомат, обеспечивающий индикацию состояний 5-ех датчиков, когда 1 значения принимают, по меньшей мере, два из 5-ти сигналов. Автомат реализовать в базисе логических элементов “Стрелка Пирса”.
2. Записать СДНФ и СКНФ функции тавтология от X_1 к X_2 . Получить МДНФ методом Квайна и с помощью карт Карно.

Вариант 15

1. Синтезировать цифровой автомат, обеспечивающий индикацию состояний 5-ех датчиков, когда 1 значения принимают, по меньшей мере, 4 из 5-ти сигналов. Автомат реализовать в базисе логических элементов “Штрих Шеффера”.
2. Записать СДНФ и СКНФ функции (Стрелка Пирса). Получить МДНФ методом Квайна и с помощью карт Карно.

Вариант 16

1. Синтезировать цифровой автомат, обеспечивающий индикацию состояний 5-ех датчиков, когда 0 значения принимают, по меньшей мере, 3 из 5-ти сигналов. Автомат реализовать в базисе логических элементов “Штрих Шеффера”.
2. Записать СДНФ и СКНФ функции Логическая равнозначность. Получить МДНФ методом Квайна и с помощью карт Карно.

Вариант 17

1. Синтезировать на элементах “И-НЕ” преобразователь нормального двоичного кода в десятичный.
2. Записать СДНФ и СКНФ функции Логическая неравнозначность. Получить МДНФ методом Квайна и с помощью карт Карно.

Вариант 18

1. Синтезировать на элементах ИЛИ-НЕ преобразователь нормального двоичного кода в восьмеричный
2. Записать СДНФ и СКНФ функции тавтология X1. Получить МДНФ методом Квайна и с помощью карт Карно.

Вариант 19

1. Синтезировать на элементах ИЛИ-НЕ преобразователь нормального двоичного кода в десятичный.
2. Записать СДНФ и СКНФ функции тавтология X2. Получить МДНФ методом Квайна и с помощью карт Карно.

Вариант 20

1. Синтезировать на элементах “И-НЕ” преобразователь нормального двоичного кода в восьмеричный.
2. Записать СДНФ и СКНФ функции импликация от X2 к X1. Получить МДНФ методом Квайна и с помощью карт Карно.

Примечание:

Номера вариантов совпадают с номерами в групповом списке студентов.

Литература

1. Микушин А.В., Сажнев А.М., Сединин В.И. Цифровые устройства и микропроцессоры. СПб, БХВ-Петербург, 2010.
2. Угрюмов Е. П. Цифровая схемотехника. СПб, БХВ-Петербург, 2004.
3. Шило В. Л. Популярные цифровые микросхемы. М, Радио и связь, 1987.
4. Дж. Ф. Уэкерли Проектирование цифровых устройств. М, Постмаркет, 2002.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №2

СИНТЕЗ ЦИФРОВЫХ УСТРОЙСТВ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ТИПА

Цель работы: изучение принципов логического проектирования и синтеза схем цифровых устройств последовательного типа

Краткие теоретические сведения

2.1 Общие сведения о цифровых устройствах последовательного типа

В таких устройствах выходное состояние определяется не только состоянием входов ($x_1, x_2, \dots, x_n$) в рассматриваемый момент времени, но также состоянием выхода ($z_1, z_2, \dots, z_m$) на предыдущем временном интервале. Таким образом, последовательные устройства используют память для запоминания предыдущего состояния и имеют обратную связь с выхода на вход.

Модель такого устройства (рисунок 2.1) включает комбинационную часть, формирующую сигнал y^t и $z_{вых} = z^t$ и цепь обратной связи (это для асинхронного автомата).

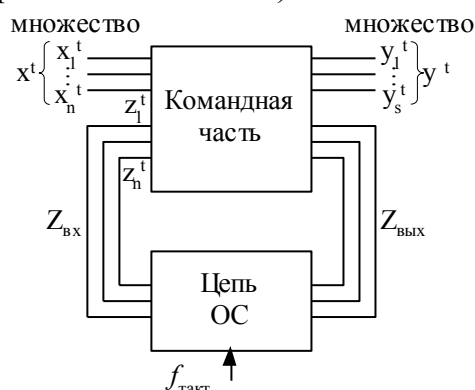


Рисунок 2.1- Модель цифровых устройствах последовательного типа

Для синхронных автоматов выполняется равенство $z_{вых} = z^{t+1}$ - это означает, что благодаря задержке в цепи ОС в 1 такт на входе всегда еще и сигнал предыдущего такта (т.е. на 1 меньше z^t).

$$y_1^t = y_1(x_1^t, x_2^t, \dots, x_n^t; z_1^t \dots z_m^t)$$

Зависимость

.....

называется

$$y_s^t = y_s(x_1^t, x_2^t, \dots, x_n^t; z_1^t \dots z_m^t)$$

функцией выходов автомата,

а зависимость , $z_1^{t+1} = z_1(x_1^t, x_2^t, \dots, x_n^t; z_1^t \dots z_m^t)$ где $x_1^t, x_2^t, \dots, x_n^t$ -

$$z_m^{t+1} = z_m(x_1^t, x_2^t, \dots, x_n^t; z_1^t \dots z_m^t)$$

множество входных переменных, а $z_1^t \dots z_m^t$ - множество внутренних состояний, называется **функцией переходов** последовательного автомата. Этим функциям соответствует одноименная таблица. Таблица, объединяющая таблицы выходов и переходов, называется **таблицей состояний**.

При применении синхронных элементов задержки переходные состояния не оказывают какого-либо влияния, поскольку тактовые импульсы, разрешающие передачу сигналов, подаются по истечении динамической части тактов. Наиболее простым примером последовательного автомата является триггер (рисунок 2.2).

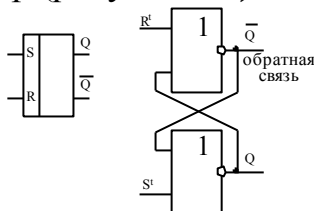


Рисунок 2.2- Триггер

Счетчики Т – типа, задержки Д – типа, асинхр. или тактируемый RS – триггера, универсальный JK – триггера.

В более сложных последовательностных автоматах триггеры чаще всего используются в качестве запоминающих элементов.

При синтезе последовательных автоматов принципиально новой задачей в сравнении с синтезом комбинационных устройств является обеспечение требуемого вида функций переходов автомата. Каждое управление функцией переходов (см. выше) определяет переходы одного из триггеров синтезируемого автомата ($z_i = Q_i$). Любому из уравнений переходов может быть придана форма

$z_i^{t+1} = Q_i^{t+1} = q_{1i}^t Q_i^t + q_{2i}^t \overline{Q_i^t}$, то есть функция прямого и инверсного выходов триггера, где

q_{1i}^t и q_{2i}^t - функции множества внутренних состояний z^t и множества входных переменных X^t .

Это уравнение определяет переход каждого триггера в соответствии с выполняемыми или функциями в автомате, поэтому оно получило наименование **прикладного управления триггера**.

С другой стороны, переход каждого триггера определяется его **характеристическим уравнением**, его в общем виде можно представить как:

$$Q_i^{t+1} = C_{1i}^t Q_i^t + C_{2i}^t \overline{Q_i^t}, \text{ где}$$

C_{1i}^t и C_{2i}^t - функции входных переменных триггера в течение такта t (например, R и S для RS – триггера, J и K для JK - триггера).

Для определения структуры комбинационных ветвей автомата необходимо установить связь входных переменных каждого триггера с множеством

входных и внутренних переменных автомата, которая описывается **уравнениями входов**.

Синтез последовательного автомата рассмотрим на примере синтеза счетчиков. Основными исходными данными при этом являются:

1. модуль счета (емкость) - $K_{сч}$
2. порядок изменения состояния счетчика
3. режим счета (суммирующий, вычитающий, реверсивный)
4. разрешающая способность – t_p
5. время установки кода счетчика – $t_{узм}$.

Исходя из модуля определяют количество m – триггеров:

$$m = \lceil \lg_2 K_{сч} \rceil - \text{округляется до большего целого числа.}$$

Разрешающую способность и время установки учитывают при выборе серии интегральных микросхем и способы пересечения (синхронный, асинхронный). При асинхронном способе $t_{узм}$ увеличивается с увеличением m , при синхронном способе $t_{узм}$ – постоянно.

Синтез счетчика основывается на табличном методе, суть которого поясним на примерах.

2.2 Синтез суммирующего счетчика

Исходные данные:

1. модуль счета $K_{сч} = 8$
2. порядок изменения двоичный
3. режим счета – суммирующий
4. $t_p = 1 \mu\text{с}$
5. $t_{узм} = \text{const}$

Исходя из 4 и 5 условий выбираем синхронную схему счетчика на триггере ИС серии 133ТК1 ($f_{\max} = 10\text{МГц}$).

Количество триггеров в счетчике $m = \lg_2 K_{сч} = 3$.

Исходя из заданного порядка изменения состояния счетчика (суммирующий, двоичный) составляем **таблицу его функционирования** (рисунок 2.3).

Таблица отражает предыдущие и последующие состояния счетчика (суммирующий). На основе таблицы составляют карты Карно, отражающие переход данного триггера из предыдущего состояния в последующее для всех трех триггеров (прикладные таблицы).

Q	номер состояния							
	0	1	2	3	4	5	6	7
Q_1^t	0	1	0	1	0	1	0	1
Q_2^t	0	0	1	1	0	0	1	1

Q_3^t	0	0	0	0	1	1	1	1
Q_1^{t+1}	1	0	1	0	1	0	1	0
Q_2^{t+1}	0	1	1	0	0	1	1	0
Q_3^{t+1}	0	0	0	1	1	1	1	0

Рисунок 2.3- Таблица функционирования суммирующего счетчика

Для этого в клетки карты, соответствующие номерам предыдущих состояний счетчика, вписываются 2-разрядные двоичные числа, выражающие переход триггера $Q_i^t \rightarrow Q_i^{t+1}$ при изменении состояния счетчика.

Q_1^t			Q_2^t		
	01	01	01	01	
Q_1^t	10	10	10	10	
			Q_3^t		

Q_2^t			Q_2^t		
	00	00	11	11	
Q_1^t	01	01	10	10	
			Q_3^t		

Q_3^t			Q_2^t		
	00	11	11	00	
Q_1^t	00	11	10	01	
			Q_3^t		

Далее потребуется характеристическая таблица используемого триггера. Для JK – триггера (133ТК1) таблица имеет вид (рисунок 2.4):

$Q^t \rightarrow Q^{t+1}$	J^t	K^t
00	0	*
01	1	*
10	*	1
11	*	0

Рисунок 2.4- Характеристическая таблица JK – триггера

Далее строим карты Карно для функции J^t каждого триггера, заменив 2 – х разрядные числа в клетках прикладных таблиц, соответствующими значениями функций из характеристической таблицы JK – триггера.

J_1^t			Q_2^t		
	1	1	1	1	
Q_1^t	*	*	*	*	
			Q_3^t		

J_2^t			Q_2^t		
	00	00	*	*	
Q_1^t	01	01	*	*	
			Q_3^t		

J_3^t			Q_2^t		
	00	*	*	00	
Q_1^t	00	*	*	01	
			Q_3^t		

Производим склеивание (проводим контура) с учетом доопределения. Из карт получаем

$$J_1^t = 1, \quad J_2^t = Q_1^t, \quad J_3^t = Q_1^t Q_2^t.$$

Аналогично для K^t .

$$K_1^t = 1, \quad K_2^t = Q_1^t, \quad K_3^t = Q_1^t Q_2^t$$

Из полученных МДНФ следует, что при синтезе структуры на J и K входы первого триггера должна быть подана логическая 1. J и K входы второго триггера необходимо соединить с прямым выходом 1 – го триггера, а на J и K входы третьего триггера подается сигнал, являющийся конъюнкцией прямых выходов первого и второго триггера.

2.3 Синтез вычитающего счетчика

Здесь номер последующего состояния на 1 меньше номера предыдущего состояния. Таблица функционирования для него будет следующая (рисунок 2.5):

Q	номер состояния							
	7	6	5	4	3	2	1	0
Q_1^t	1	0	1	0	1	0	1	0
Q_2^t	1	1	0	0	1	1	0	0
Q_3^t	1	1	1	1	0	0	0	0
Q_1^{t+1}	0	1	0	1	0	1	0	1
Q_2^{t+1}	1	0	0	1	1	0	0	1
Q_3^{t+1}	1	1	1	0	0	0	0	1

Рисунок 2.5- Таблица функционирования вычитающего счетчика

Далее порядок проектирования остается тот же.

2.4 Синтез реверсивного счетчика

Реверсивный счетчик – это соединение в одной схеме суммирующего и вычитающего счетчиков. Режим работы изменяется с помощью схемы управления (например, вспомогательным сигналом $T(\bar{T})$).

Если сравнить МДНФ суммирующего и вычитающего счетчиков:

СУМ: $J_1^t = K_1^t = 1; \quad J_2^t = K_2^t = Q_1^t; \quad J_3^t = K_3^t = Q_1^t Q_2^t$

ВЫЧИТ: $J_1^t = K_1^t = 1; \quad J_2^t = K_2^t = \bar{Q}_1^t; \quad J_3^t = K_3^t = \bar{Q}_1^t Q_2^t$, то видно, что логические переменные входов 2 и 3 –го триггеров меняются на инверсные, т.е. для реверсирования необходимо произвести перекоммутацию выходов 1-го и 2-го триггеров (например, с помощью сигнала Т). Тогда логические уравнения, описывающие работу схемы управления следующие:

$$J_2^t = K_2^t = TQ_1^t + \overline{T}\overline{Q_1^t} \text{ и } J_3^t = K_3^t = TQ_1^t Q_2^t + \overline{T}\overline{Q_1^t} \overline{Q_2^t}.$$

При $T=1$ обеспечивается режим сложения, при $T=0$ – вычитания. С учетом $J_1^t = K_1^t = 1$ можно приступить к составлению структурной схемы.

Подобно рассмотренному проектируются и другие типы счетчиков, как то: счетчики с произвольным порядком счета, недвоичные счетчики с $K_{сч} = 3, 5, \dots$ и т.д., двоично – десятичные счетчики, кольцевые и др.

2.5 Принцип логического проектирования регистров

Регистры предназначены для кратковременного хранения и преобразования многоразрядных двоичных чисел.

По способу ввода и вывода подразделяются на:

- параллельные (регистры памяти), ввод и вывод числа в параллельном коде
- последовательные (регистры сдвига), ввод и вывод в последовательном коде (разряд за разрядом)
- параллельно – последовательные

По способу представления вводимой и выводимой информации:

- однофазные (ввод в прямом либо обратном коде)
- парафазные (одновременно в прямом и обратном)

Одно- и многоканальные в зависимости от числа источников входных сигналов.

Так как число X_1 может вводиться в прямом и обратном коде, то для управления вводом и выводом применяются управляющие сигналы:

$T_{\text{п}}$ – сигнал ввода числа в прямом коде

$T_{\text{о}}$ – сигнал ввода числа в обратном коде

$T_{\text{вп}}$ – сигнал вывода числа в прямом коде

$T_{\text{ов}}$ – сигнал вывода числа в обратном коде

$T_{\text{г}}$ – сигнал установки регистра в нулевое состояние.

Синтез регистра сводится к выбору типа триггера и определению структуры устройства ввода и вывода информации исходя из назначения регистра.

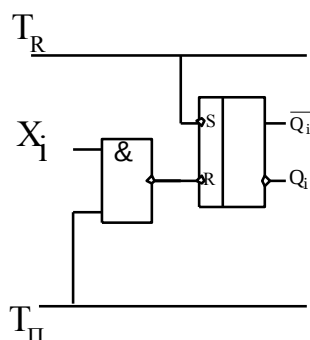
При выборе триггера необходимо учитывать сложность структуры самого триггера. Так, например, если регистр предназначен только для хранения числа целесообразно использовать тактируемый Д – триггер (не требуется предварительной установки триггеров в нулевое состояние).

RS – триггер требует предварительной установки регистра в нулевое состояние (либо поразрядного ввода). Это усложняет схему. Но RS – триггер обладает большими операционными возможностями.

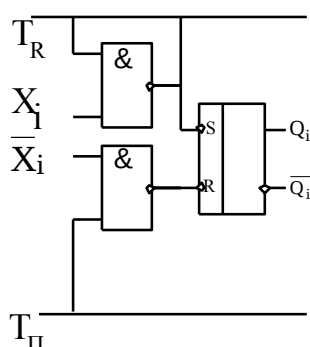
Триггер можно также синтезировать на основе ЛЭ. В этом случае синтез устройства производится совместно с синтезом триггера.

Примеры регистров памяти:

1. однофазный регистр на RS – триггерах



2. парафазный регистр на RS – триггерах



3. регистр на тактируемых Д – триггерах

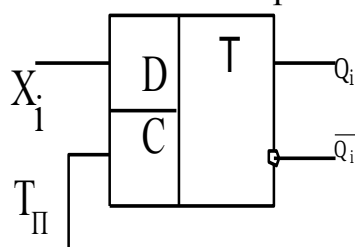


Рисунок 2.6 - Примеры регистров памяти

В регистрах сдвига (последовательных регистрах) в отличие от параллельных осуществляется с помощью сдвигающих импульсов T_c .

Ввод и вывод информации в таких регистрах может производиться как последовательно, так и параллельно (рисунок 2.7).

Регистр	Ввод информации	Вывод информации
последовательный	последовательный	Последовательный
Параллельно-последовательный	параллельный	Последовательный
Последовательно-параллельный	последовательный	параллельный

Рисунок 2.7 - Ввод и вывод информации в таких регистрах

РС могут быть одноктактные и многотактные – когда сдвиг осуществляется после завершения серии из N – импульсов, а также с обратной связью (кольцевые счетчики).

Синтез РС сводится к определению межтриггерных связей с учетом типа применяемых триггеров.

Порядок синтеза рассмотрим на примере РС на JK - триггерах.

Положим, что тактовые импульсы T_c сдвигают содержимое регистра вправо, т.е. с входа на выход.

Составим таблицу возможных переходов i – го триггера (табл. 2.1) из предыдущего в последующее состояние.

Таблица - 2.1

Q_{i-1}^t	0101
Q_i^t	0011
Q_{i+1}^t	0101

Здесь: Q_i^t – состояние рассматриваемого триггера в настоящий момент времени t .

Q_{i-1}^t – состояние предыдущего триггера.

Q_i^{t+1} – новое состояние рассматриваемого триггера после прихода сдвигающего импульса T_c .

На основании полученной таблицы составим прикладную таблицу (в виде карты Карно).

Прикладная таблица с помощью характеристической таблицы для JK – триггера (рисунок 2.8) преобразуется в карты Карно для J и K входов i – го триггера.

$Q^t \rightarrow Q^{t+1}$	J	K
00	0	*
01	1	*
10	*	1
11	*	0

Рисунок 2.8- Характеристическая таблица JK – триггера

Из полученных карт следует:

$$J_i^t = Q_{i-1}^t, \quad K_i^t = \overline{Q_{i-1}^t}.$$

Из равенств следует, что при построении схемы РС необходимо прямой и инверсный выходы предыдущего JK – триггера соединить с входами J и K последующего триггера, соответственно. сдвигающие импульсы T_c подаются на тактовые входы с всех триггеров. Здесь приведена схема РС на ИС серии 133 (рисунок 2.8).

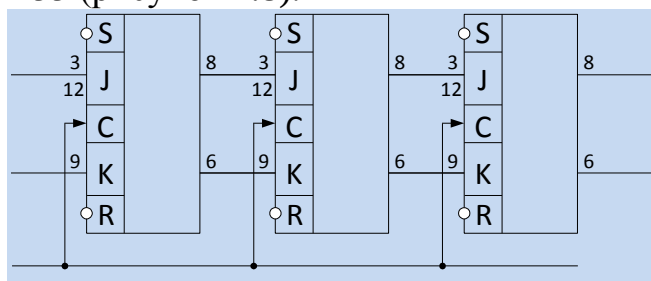


Рисунок 2.8 - схема РС на ИС серии 133 (133TK1)

Аналогично для РС на Д – триггерах получаем уравнение $D_i^t = Q_{i-1}^t$ и схема РС на (133TK1) следующая (рисунок 2.9):

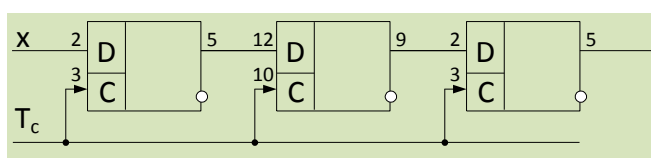


Рисунок 2.9 - схема РС на на Д – триггерах

Как видно, она проще.

Подобным образом можно произвести синтез регистров на триггерах других типов, реверсивного последовательного регистра (в этом случае изменяется таблица возможных переходов и добавляется логика управления, как в реверсивных счетчиках) и РС с обратными связями (кольцевые счетчики). В последнем случае подходит метод проектирования счетчиков.

2.6 Синтез цифрового автомата с заданным порядком счета

Исходные данные:

1. Заданная последовательность из таблицы вариантов, например:

0	8	2	9	4	5	6	7	1	3	11	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----

2. Число возможных состояний – $K_{сч} = 12$
3. $t_p = 1 \mu c$
4. $t_{ycm} = const$

Исходя из 2 и 3 условий выбираем синхронную схему автомата на триггерах ИС серии 133TK1 ($f_{max} = 10 МГц$).

Количество триггеров в цифровом автомате $m = \log_2 K_{сч} = 4$.

Исходя из заданной последовательности порядка изменения состояния счетчика составляем **таблицу его функционирования**.

Таблица отражает переход из предыдущего в последующее состояние триггеров автомата (рисунок 2.10). На основе таблицы составляют карты Карно, отражающие переход данного триггера из предыдущего состояния в последующее для всех трех триггеров (прикладные таблицы).

Q	номер состояния											
	0	8	2	9	4	5	6	7	1	3	11	10
Q_1^t	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	1	0
Q_2^t	0	0	1	0	0	0	1	1	0	1	1	1
Q_3^t	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0
Q_4^t	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1
Q_1^{t+1}	0	0	1	0	1	0	1	1	1	1	0	0
Q_2^{t+1}	0	1	0	0	0	1	1	0	1	1	1	0
Q_3^{t+1}	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0
Q_4^{t+1}	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0

Рисунок 2.10- Таблица функционирования цифрового автомата

Для этого в клетки карты, соответствующие номерам предыдущих состояний автомата, для каждого из 4-х триггеров вписываются 2-х разрядные двоичные числа, выражающие переход триггера $Q_i^t \rightarrow Q_i^{t+1}$ при изменении состояния автомата.

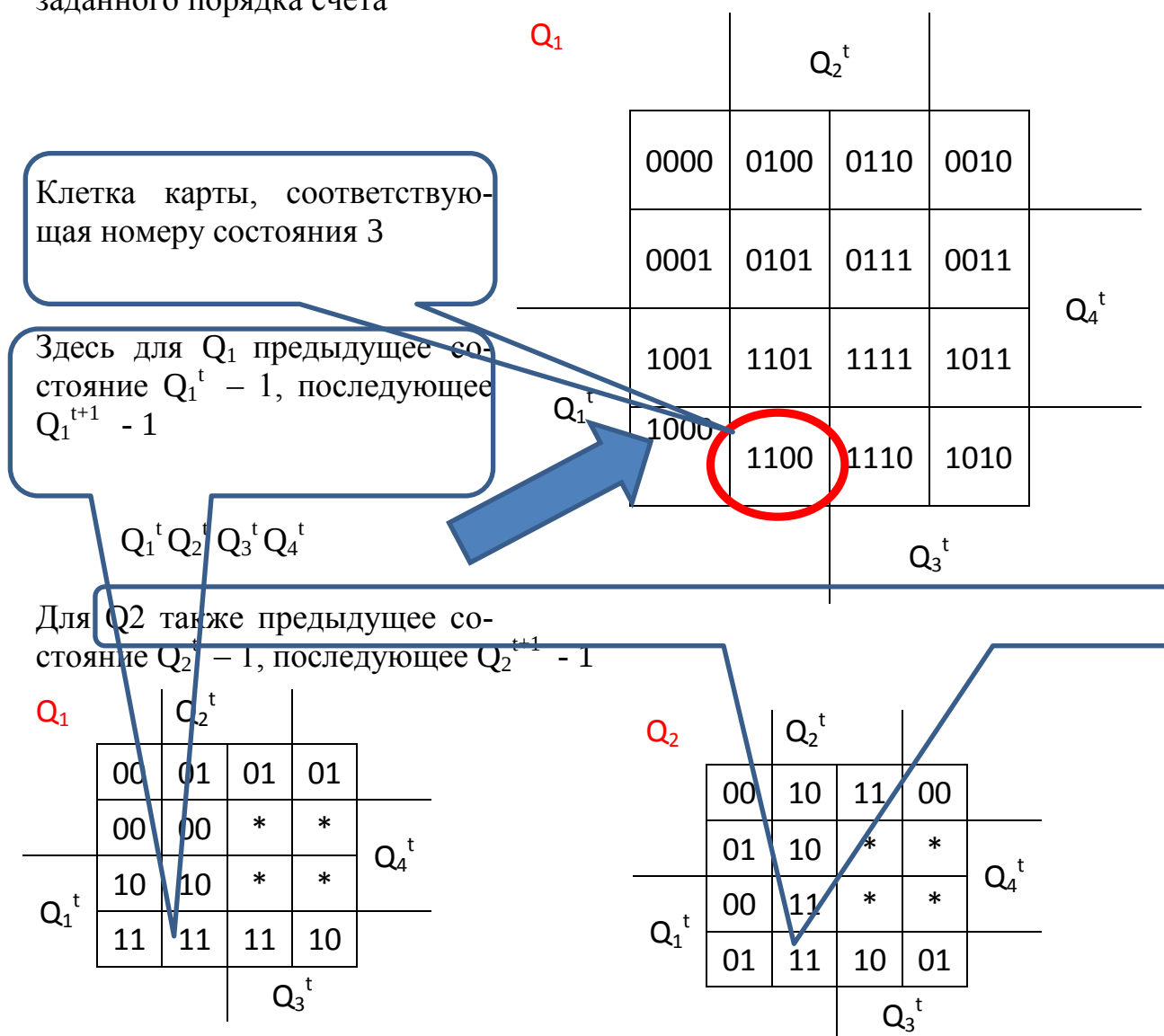
Для триггера Q1



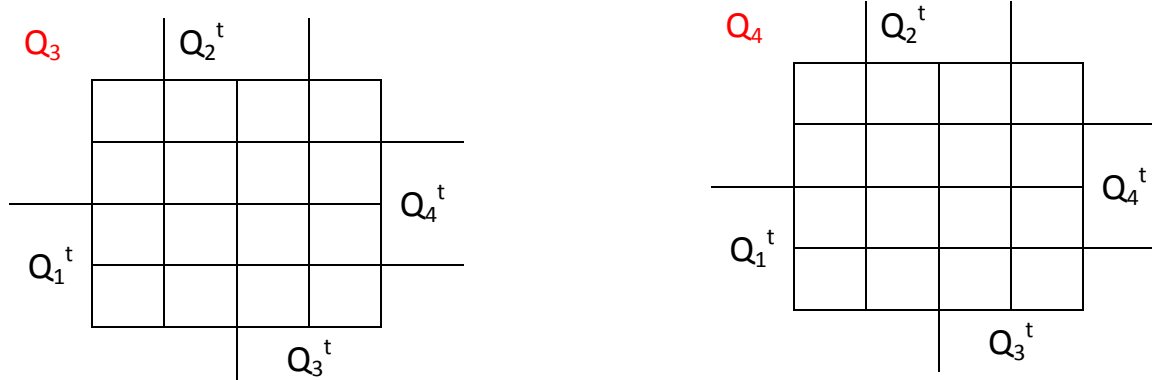
Для триггера Q2



Номера предыдущих состояний автомата в клетках карты Карно для заданного порядка счета



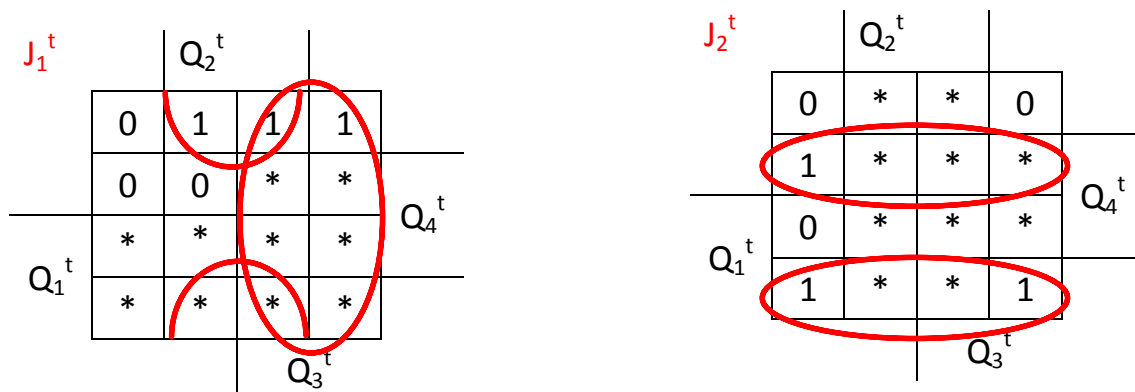
Подобные действия выполняются для триггеров Q_3 и Q_4



Далее потребуется характеристическая таблица используемого триггера. Для JK – триггера (133ТК1), как указывалось выше она имеет вид изображенный на рисунке 2.8.

:

Далее строим карты Карно для функции J^t каждого триггера (рисунок 2.11), заменив 2 – х разрядные числа в клетках прикладных таблиц, соответствующими значениями функций из характеристической таблицы JK – триггера и производим склеивание (проводим контура) с учетом доопределения.



Подобные действия выполняются для входов J_3 J_4 триггеров

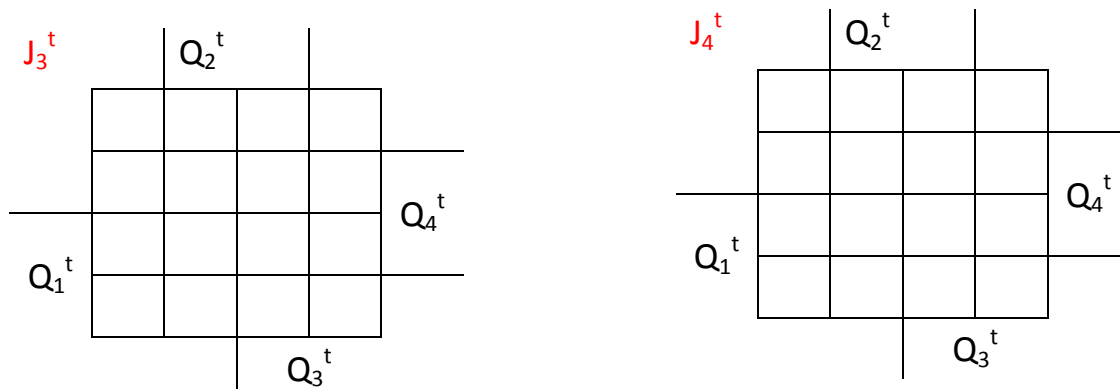
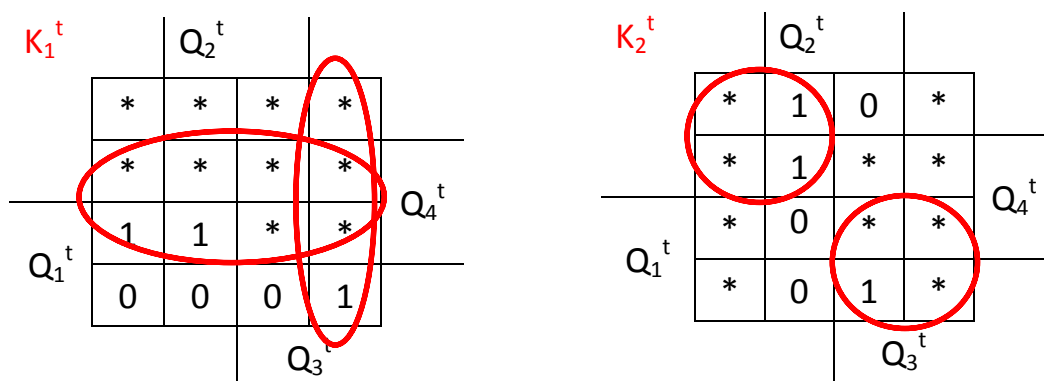


Рисунок 2.11 – Построение карт Карно для функции J^t каждого триггера

И далее для функции K^t каждого триггера (рисунок 2.12)



Подобные действия выполняются входов K_3 K_4 триггеров

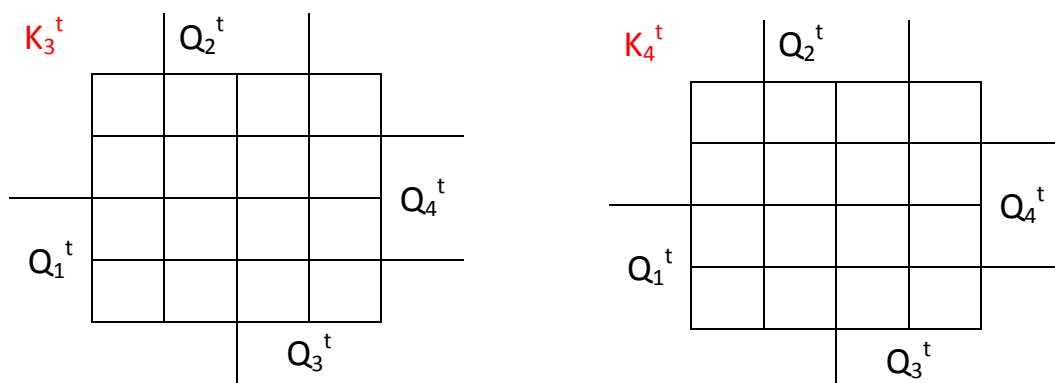


Рисунок 2.12 – Построение карт Карно для функции K^t каждого триггера

В результате склеивания контуров из карт получаем

$$J_1^t = Q_2^t \bar{Q}_4^t + Q_3^t, \quad J_2^t = \bar{Q}_1^t Q_4^t + Q_1^t \bar{Q}_4^t, \quad J_3^t = \dots\dots\dots J_4^t = \dots\dots\dots$$

Аналогично для K^t .

$$K_1^t = Q_4^t + \bar{Q}_2^t Q_3^t, \quad K_2^t = \bar{Q}_1^t \bar{Q}_3^t + Q_1^t Q_3^t, \quad K_3^t = \dots\dots\dots, \quad K_4^t = \dots\dots\dots$$

Полученные соотношения для МДНФ необходимо привести к базису логических элементов «Штрих Шеффера» (и-не), для этого используют законы Булевой алгебры (в частности правило Де Моргана - см. лекционный материал).

После преобразования

$$J_1^t = Q_2^t \bar{Q}_4^t + Q_3^t = \overline{\overline{Q_2^t} \overline{\bar{Q}_4^t} \bar{Q}_3^t}, \quad J_2^t = \bar{Q}_1^t Q_4^t + Q_1^t \bar{Q}_4^t = \overline{\overline{\bar{Q}_1^t} \overline{Q_4^t} \overline{Q_1^t} \overline{\bar{Q}_4^t}}, \quad J_3^t = \dots\dots\dots$$

$$K_1^t = Q_4^t + \bar{Q}_2^t Q_3^t = \overline{\overline{Q_4^t} \overline{\bar{Q}_2^t} \bar{Q}_3^t}, \quad K_2^t = \bar{Q}_1^t \bar{Q}_3^t + Q_1^t Q_3^t = \overline{\overline{\bar{Q}_1^t} \overline{\bar{Q}_3^t} \overline{Q_1^t} \overline{Q_3^t}}, \quad K_3^t = \dots\dots\dots, \quad K_4^t = \dots\dots\dots$$

Из полученных МДНФ следует, что при синтезе структуры автомата на вход J первого триггера должен быть подан сигнал, представляющий собой инверсию конъюнкции двух сигналов, первый из которых является сигналом с инверсного выхода 3-го триггера, второй – является инверсией конъюнкции сигналов с прямого выхода 2-го триггера и с инверсного выхода 4-го триггера. Коммутация остальных входов и выходов триггеров автомата и дополнительных логических схем для реализации необходимых логических функций выполняется аналогично, согласно полученным соотношениям.

Схемы, реализующие коммутацию входов 1-го и 2-го триггеров приведены на рисунке 2.13.

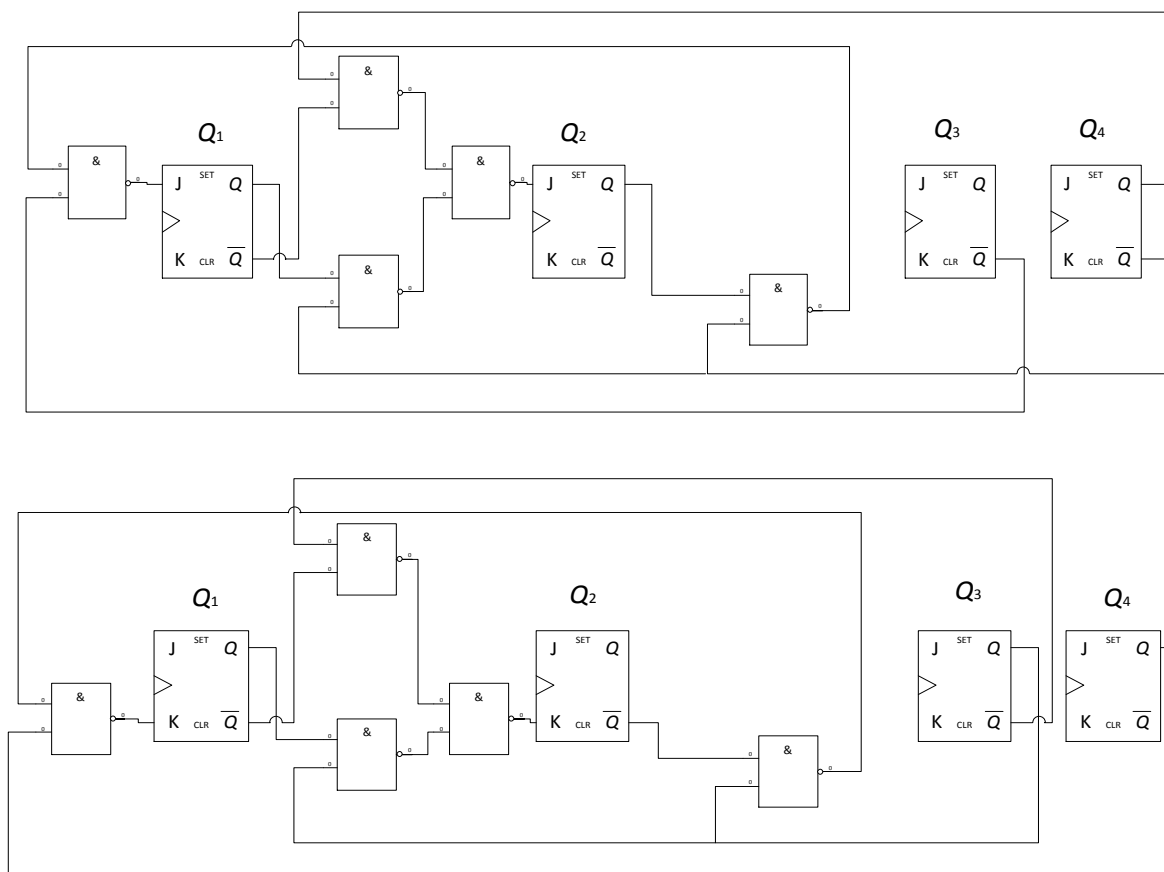


Рисунок 2.13 – Схемы, реализующие коммутацию входов 1-го и 2-го триггеров

Конъюнкторы И-НЕ (элементы Штрих-Шеффера) на входах J и K в принципе можно не ставить, поскольку J-K триггеры большинства серий логических элементов на входах J и K содержат встроенные конъюнкторы.

Схемы для всех входов триггеров объединяются в одну общую схему – это и будет принципиальная схема цифрового автомата, реализующего заданную функцию.

Задание

Произвести синтез программатора, на выходе которого синхронно с тактовой частотой f_m и с цикличностью, равной N импульсов тактовой частоты формируется сигнал постоянного напряжения, амплитуда которого с каждым тактом принимает новое значение, определяемое из таблицы вариантов.

В программаторе предусмотреть возможность получения выходного сигнала в цифровой форме, соответствующего восьмеричному (8), десятичному (10) или коду Грэя (Г), согласно номеру варианта.

№ ва ри ан та	Состояние выхода в десятичном эквиваленте												Тип преобразо- вателя
1	2												3
1	0	1	3	8	11	9	2	4	6	5	10	7	Двоично- восьмеричный
2	9	0	5	1	2	3	4	8	10	11	7	9	Двоично- десятичный
3	6	1	3	4	11	0	9	5	2	7	10	8	Двоичный - в код Грэя
4	9	4	0	1	3	2	6	5	7	8	10	11	Двоично- восьмеричный
5	8	3	4	2	10	5	6	1	0	9	11	7	Двоично- десятичный
6	3	11	5	6	1	0	2	4	10	8	7	9	Двоичный - в код Грэя
7	8	0	3	1	2	5	11	7	4	6	10	9	Двоично- восьмеричный
8	6	3	11	4	0	1	2	5	10	8	9	7	Двоично- десятичный
9	8	0	4	1	6	2	3	7	5	10	11	9	Двоичный - в код Грэя
10	4	8	11	0	2	1	3	9	5	6	7	10	Двоично- восьмеричный
11	2	11	1	5	3	6	0	4	9	10	7	8	Двоично- десятичный
12	8	3	1	2	10	5	11	6	4	0	9	7	Двоичный - в код Грэя
13	0	6	11	9	1	2	3	5	4	8	7	10	Двоично- восьмеричный
14	8	2	0	7	5	4	1	3	11	6	10	9	Двоично- десятичный
15	0	11	10	4	1	2	5	3	6	8	9	7	Двоичный - в код Грэя
16	8	5	4	0	1	6	7	3	2	11	10	9	Двоично- восьмеричный
17	6	4	0	11	5	1	2	3	7	9	8	10	Двоично- десятичный

18	9	0	4	1	2	3	6	10	5	7	8	11	Двоичный - в код Грэя
19	8	2	11	3	0	1	6	4	5	10	7	9	Двоично-восьмеричный
20	9	3	2	0	6	1	5	11	4	7	8	10	Двоично-десятичный

Примечание:

Номера вариантов совпадают с номерами в групповом списке студентов.

Литература

1. Проектирование импульсных и цифровых устройств радиотехнических систем. Учебн. пособие для радиотехн. спец. вузов. Под ред. Ю.М.Казаринова. – М.: Высш. шк., 1985. – 319 с.
2. Мищенко В.А. Многофункциональные автоматы и элементная база цифровых ЭВМ. – М.: Радио и связь, 1981. – 240 с., ил.
3. Потемкин И.С. Функциональные узлы цифровой автоматики. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 320 с., ил.
4. Лазарев В.Г. и др. Проектирование дискретных устройств автоматики. – М.: Радио и связь, 1985. – 272 с.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №3

РАСЧЕТ ИСТОЧНИКОВ ВТОРИЧНОГО ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ.

ВЫБОР И РАСЧЕТ СХЕМЫ

СТАБИЛИЗАЦИИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Цель работы: изучение принципов работы схем стабилизации постоянного тока, выбор и расчет конкретной схемы стабилизатора.

Краткие теоретические сведения

3.1 Расчет параметрических стабилизаторов

Если потребуется запитать какое-нибудь не слишком привередливое электронное устройство, то можно воспользоваться простейшей схемой параметрического стабилизатора (ПС) изображенной на рисунке 1. При изменении входного напряжения ток через балластный резистор тоже изменяется, изменяется напряжение на нем, а вот напряжение на стабилитроне остается практически неизменным. А, значит, и нагрузка получает практически неизменное питание.

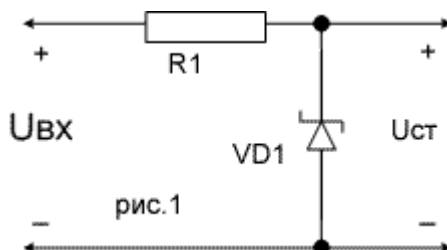


Рисунок 3.1- Схема параметрического стабилизатора напряжения

Рассмотрим один из самых простых грубых расчетов такого стабилизатора.

Задаются требуемым напряжением стабилизации на выходе $U_{ст}$ и током I , который должен включать в себя не только ток стабилитрона, но и ток нагрузки (Рисунок 3.2).

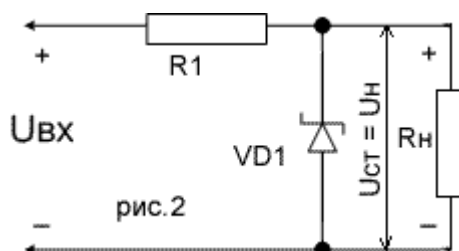


Рисунок 3.2- Расчетная схема параметрического стабилизатора напряжения

Используя формулу

$$I = (U_{вх} - U_{ст})/R_1,$$

находят $R_1 = (U_{вх} - U_{ст})/I$.

Для любителей более точных и изощренных расчетов предлагается способ посложнее. Здесь исходными данными будут стабилизированное напряжение $U_{ст} = U_n$ на нагрузке R_n , предельные значения тока нагрузки $I_{n \min}$ и $I_{n \max}$ и наибольшие относительные ожидаемые отклонения входного напряжения питания Δ_n и Δ_v от его номинального значения $U_{вх \text{ ном}}$.

Исходя из соображений надежности аппаратуры мощность, рассеиваемая на стабилитроне, должна обязательно быть ниже предельной. Учитывая это, рекомендуется принимать при расчете наибольшее рабочее значение тока через стабилитрон не более 0,8 от указанного в справочнике $I_{ст \max}$. Это принятое значение тока обозначим $I_{ст.p \max}$.

При токе $I_{ст \min}$, регламентированном техническими условиями, динамическое сопротивление гд стабилитрона существенно увеличивается по сравнению со значением, соответствующим номинальному току стабилизации. Это ухудшает стабильность выходного напряжения в режиме наибольших значений тока нагрузки и при напряжении $U_{вх}$, близком к нижнему пределу.

Для того, чтобы обеспечить приемлемый коэффициент стабилизации, минимальное рабочее значение тока через стабилитрон $I_{ст.p \min}$ принимают при расчете в 3 раза большим, чем $I_{ст \min}$. При расчете необходимо учитывать, что чем больше $I_{ст.p \min}$ и чем меньше $I_{ст.p \max}$, тем больше необходимое значение напряжения $U_{вх}$. Сначала проверяют пригодность выбранного по напряжению стабилизации стабилитрона при заданных пределах тока нагрузки и питающего напряжения:

$$(I_{ст.p \max} + I_{n \min}) \times (1 - \Delta_n) - (I_{ст.p \min} + I_{n \max}) \times (1 + \Delta_v) > 0, \quad \text{где} \quad \Delta_n = \frac{U_{ном} - U_{min}}{U_{ном}} \quad \text{и} \\ \Delta_v = \frac{U_{max} - U_{min}}{U_{ном}}.$$

Если неравенство не выполняется и нет возможности применить более мощный стабилитрон, то придется задаться меньшими значениями Δ_n и Δ_v , уменьшить $I_{n \max}$ или увеличить $I_{n \min}$.

В тех случаях, когда нагрузка включена постоянно и нагрузочный ток не изменяется, можно принять $I_{n \max} = I_{n \min}$. Если же, наоборот, надо предусмотреть режим холостого хода стабилизатора, то во избежание по-

вреждения стабилитрона выбирают $I_{н\ min} = 0$. Ток выражают в миллиамперах.

Номинальное значение напряжения $U_{вх}$, которое должен обеспечить выпрямитель, вычисляют по формуле:

$$U_{вх} = U_{ст} \times \frac{(I_{ст,р\ max} + I_{н\ min}) - (I_{ст,р\ min} + I_{н\ max})}{(I_{ст,р\ max} + I_{н\ min}) \times (1 - \Delta_{н}) - (I_{ст,р\ min} + I_{н\ max}) \times (1 + \Delta_{в})}$$

Сопротивление (в Омах) балластного резистора R1 равно:

$$R_1 = \frac{U_{вх} \times (\Delta_{в} + \Delta_{н}) \times 10^3}{(I_{ст,р\ max} + I_{н\ min}) - (I_{ст,р\ min} + I_{н\ max})}$$

Вычисляют рассеиваемую на резисторе R1 максимальную мощность (в ваттах):

$$P_{R1} = \frac{[U_{вх} \times (1 + \Delta_{в}) - U_{ст}]^2}{R1}$$

Коэффициент стабилизации:

$$K_{стаб} = \frac{R1 \times U_{н}}{r_{д} \times U_{вх}}$$

Теперь еще один расчет с небольшим экскурсом. При работе параметрического стабилизатора для поддержания выходного напряжения на требуемом уровне используется участок обратного электрического пробоя стабилитрона (Рисунок 3.3).

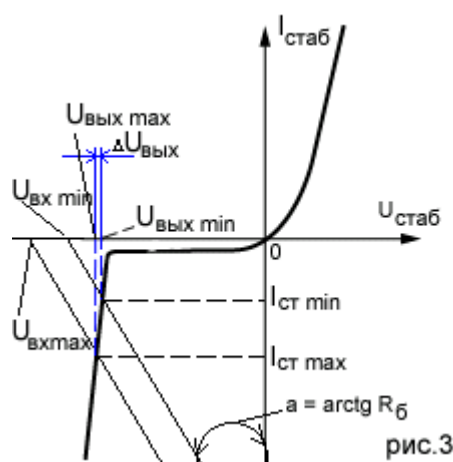


Рисунок 3.3 – Вольтамперная характеристика стабилитрона

Предположим, что заданы выходное напряжение $U_{\text{вых}}$, сопротивление нагрузки $R_{\text{н}}$ и диапазон входного напряжения $U_{\text{вх max}}$ и $U_{\text{вх min}}$. Отложим на оси напряжений вольтамперной характеристики значения минимального и максимального напряжений и через эти точки проведем прямые, угол наклона которых определяется сопротивлением балластного резистора $R_{\text{б}}$. Точки пересечения характеристики стабилитрона с проведенными прямыми дадут значения соответствующих выходных напряжений устройства.

При этом будем полагать, что $R_{\text{н}} \gg R_{\text{б}}$ и $I_{\text{б}} = I_{\text{ст}}$. Очевидно, что вследствие нелинейности ВАХ стабилитрона изменению $\Delta U_{\text{вх}} = U_{\text{вх max}} - U_{\text{вх min}}$ будет соответствовать изменение выходного напряжения $\Delta U_{\text{вых}} = U_{\text{вых max}} - U_{\text{вых min}}$, причем $\Delta U_{\text{вх}} \gg \Delta U_{\text{вых}}$.

Коэффициент стабилизации устройства ориентировочно можно определить в предположении, что $\Delta U_{\text{вх}} \gg \Delta U_{\text{вых}} = 0$ и $R_{\text{н}} = \text{const}$. Тогда $\Delta I_{\text{вх}} = \Delta U_{\text{вх}} / R_{\text{б}}$ и $\Delta U_{\text{вых}} = \Delta I_{\text{вх}} \cdot r_{\text{д}}$, где $r_{\text{д}}$ - дифференциальное сопротивление стабилитрона.

$$\text{Отсюда } \Delta U_{\text{вых}} / \Delta U_{\text{вх}} = \Delta I_{\text{вх}} \cdot r_{\text{д}} / \Delta I_{\text{вх}} \cdot R_{\text{б}};$$

$$K_{\text{ст}} = (\Delta U_{\text{вх}} / U_{\text{вх}}) / (\Delta U_{\text{вых}} / U_{\text{вых}}) = U_{\text{вых}} \cdot R_{\text{б}} / U_{\text{вх}} \cdot r_{\text{д}}, \text{ где } U_{\text{вх}} = (U_{\text{вх max}} + U_{\text{вх min}}) / 2.$$

Расчет параметрического стабилизатора может быть выполнен из условия $I_{\text{ст min}} \leq I_{\text{ст}} \leq I_{\text{ст max}}$ с использованием выражений:

$$(U_{\text{вх min}} - U_{\text{вых}}) / R_{\text{б}} = U_{\text{вых}} / R_{\text{н min}} + I_{\text{ст min}}; \quad (1)$$

$$(U_{\text{вх max}} - U_{\text{вых}}) / R_{\text{б}} = U_{\text{вых}} / R_{\text{н max}} + I_{\text{ст max}} \quad (2)$$

3.2 Пример расчета ПС

Рассчитать параметрический стабилизатор напряжения при следующих условиях: выходное напряжение $U_{\text{вых}} = 5,6\text{В}$; изменение тока нагрузки $5...15\text{мА}$; изменение входного напряжения $+15...-20\%$.

Решение:

1. По заданному напряжению выберем тип стабилитрона. Заданное напряжение обеспечивает стабилитрон КС456А, имеющий следующие параметры: $U_{ст\ min} = 5,04В$ при $I_{ст} = 10мА$; $U_{ст\ max} = 6,16В$ при $I_{ст} = 10мА$; $I_{ст\ min} = 3мА$; $I_{ст\ max} = 140мА$; $r_d = 7Ом$.
2. Зададим минимальный рабочий ток стабилитрона $I_{ст\ min\ p} = 5мА$ и найдем соответствующее ему максимально возможное напряжение стабилитрона:
 $U'_{ст\ max} = U_{ст\ max} - \Delta I'_{ст} * r_d = 6,16 - (10 - 5) * 10^{-3} * 7 = 6,125В$.
3. Зададим максимальный рабочий ток стабилитрона $I_{ст\ max\ p} = 50мА$ и найдем соответствующее ему максимально возможное напряжение стабилитрона:
 $U'_{ст\ min} = U_{ст\ min} + \Delta I''_{ст} * r_d = 5,04 + (50 - 10) * 10^{-3} * 7 = 5,32В$.
4. Значение номинального входного напряжения $U_{вх\ ном}$ и R_b найдем из выражения (1) и (2) - (см. выше):

$$\frac{0,8 \times U_{вх\ ном} - U'_{ст\ max}}{R_b} = \frac{U'_{ст\ max}}{R_{н\ min}} + I_{ст\ min\ p}$$

$$\frac{1,15 \times U_{вх\ ном} - U'_{ст\ min}}{R_b} = \frac{U'_{ст\ min}}{R_{н\ max}} + I_{ст\ max\ p}$$

Здесь надо учесть, что минимальное значение нагрузки будет при максимальном потреблении тока, т.е. $R_{н\ min} = U_{вых} / I_{ст\ max\ p} = 5,6В / 0,015мА = 373,333\ Ом$; максимальное значение нагрузки будет при минимальном потреблении тока, т.е. $R_{н\ max} = U_{вых} / I_{ст\ min\ p} = 5,6В / 0,005мА = 1120\ Ом$.

Выразим R_b из каждого уравнения. Получим:

$$R_b = \frac{0,8 \times U_{вх\ ном} - U'_{ст\ max}}{\frac{U'_{ст\ max}}{R_{н\ min}} + I_{ст\ min\ p}} \quad R_b = \frac{1,15 \times U_{вх\ ном} - U'_{ст\ min}}{\frac{U'_{ст\ min}}{R_{н\ max}} + I_{ст\ max\ p}}$$

Поскольку левые части уравнений - это одно и то же, значит и правые равны между собою, т.е.

$$\frac{0,8 \times U_{вх\ ном} - U'_{ст\ max}}{\frac{U'_{ст\ max}}{R_{н\ min}} + I_{ст\ min\ p}} = \frac{1,15 \times U_{вх\ ном} - U'_{ст\ min}}{\frac{U'_{ст\ min}}{R_{н\ max}} + I_{ст\ max\ p}}$$

Подставив известные значения, получим:

$$\frac{0.8 \times U_{\text{вх ном}} - 6.125}{0.0214} = \frac{1.15 \times U_{\text{вх ном}} - 5.32}{0.055}$$

Далее получаем: $(0,8 \times U_{\text{вх ном}} - 6,125) \times 0,055 = (1,15 \times U_{\text{вх ном}} - 5,32) \times 0,0214$.

Раскрывая скобки, получим: $0,044 \times U_{\text{вх ном}} - 0,337 = 0,0246 \times U_{\text{вх ном}} - 0,114$. Откуда $0,0194 \times U_{\text{вх ном}} = 0,223$.

Находим $U_{\text{вх ном}} = 11,5\text{В}$.

Далее возвращаемся на три формулы выше и находим по любому нам понравившемуся из двух уравнений значение $R_{\text{б}}$. Оно будет около 143 Ом. Выбираем ближайшее стандартное значение сопротивления, т.е. 150 Ом.

5. Минимальное и максимальное входное напряжение при заданной в условии погрешности равно: $U_{\text{вх max}} = 1.15 \times U_{\text{вх ном}} = 1,15 \times 11,5 = 13,2\text{В}$ и $U_{\text{вх min}} = 0,8 \times U_{\text{вх ном}} = 0,8 \times 11,5 = 9,2\text{В}$
6. Для найденных $U_{\text{вх min}}$ и $U_{\text{вх max}}$ при нагрузке от $R_{\text{н min}} = 373,333\text{Ом}$ до $R_{\text{н max}} = 1120\text{ Ом}$ и заданном выходном напряжении $U_{\text{вых}} = 5,6\text{В}$ определим реальные токи стабилизации $I_{\text{ст max}}$ и $I_{\text{ст min}}$:

$$I_{\text{ст min}} = \frac{U_{\text{вх min}} - U'_{\text{ст max}}}{R_{\text{б}}} - \frac{U'_{\text{ст max}}}{R_{\text{н min}}} = \frac{9.2 - 6.125}{150} - \frac{6.125}{373.333} = 0.0041\text{А} = 4.1\text{mA}$$

$$I_{\text{ст max}} = \frac{U_{\text{вх max}} - U^*_{\text{ст min}}}{R_{\text{б}}} - \frac{U^*_{\text{ст min}}}{R_{\text{н max}}} = \frac{13.2 - 5.32}{150} - \frac{5.32}{1120} = 0.0478\text{А} = 47.8\text{mA}$$

Полученные значения лежат в рабочем диапазоне токов выбранного стабилитрона.

7. Найдем коэффициент стабилизации стабилитрона согласно выражения, оговоренного выше, а именно: $K_{\text{ст}} = (\Delta U_{\text{вх}} / U_{\text{вх}}) / (\Delta U_{\text{вых}} / U_{\text{вых}}) = U_{\text{вых}} \times R_{\text{б}} / U_{\text{вх}} \times \eta$, где $U_{\text{вх}} = (U_{\text{вх max}} + U_{\text{вх min}}) / 2$

$$K_{\text{ст}} = \frac{5,6\text{В} \times 150\text{Ом}}{\left(\frac{13,2\text{В} + 9,2\text{В}}{2}\right) \times 7\text{Ом}} = 9,95$$

Стандартная величина коэффициента стабилизации параметрического стабилизатора лежит в пределах $K_{\text{ст}} = 10 \dots 30$. Для получения коэффициента стабилизации напряжения с коэффициентом до 1000 и более применяют

3.3 Компенсационные стабилизаторы

Принцип работы компенсационного стабилизатора (КС) основан на использовании цепи отрицательной обратной связи (далее в тексте - ООС). Для реализации указанного принципа устройство кроме регулирующего (исполнительного) элемента РЭ должно содержать исполнительный элемент ИЭ, элемент сравнения и источник эталонного напряжения $U_{эт}$ (Рисунок 3.4).

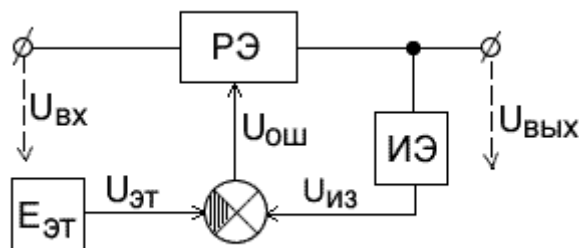


Рисунок 3.4- Расчетная схема компенсационного стабилизатора

Выходное напряжение измерительного элемента, пропорциональное стабилизированному параметру, сравнивается в элементе сравнения с эталонным напряжением, и полученный сигнал ошибки $U_{ош} = U_{эт} - U_{из}$ управляет коэффициентом передачи РЭ. Увеличение $U_{ош}$, вызванное уменьшением выходного напряжения, увеличивает коэффициент передачи РЭ, что ведет к увеличению выходного напряжения. И, наоборот, увеличение выходного напряжения, уменьшая сигнал ошибки, вызывает уменьшение коэффициента передачи РЭ, что в свою очередь ведет к уменьшению выходного напряжения.

В зависимости от вида выполнения РЭ различают непрерывные и ключевые компенсационные стабилизаторы напряжения. В непрерывных компенсационных стабилизаторах в качестве РЭ используют биполярный или полевой транзистор, ключевых - импульсные усилители мощности. Мы остановимся на первом варианте. Типовая схема компенсационного стабилизатора приведена на рисунке 3.5.

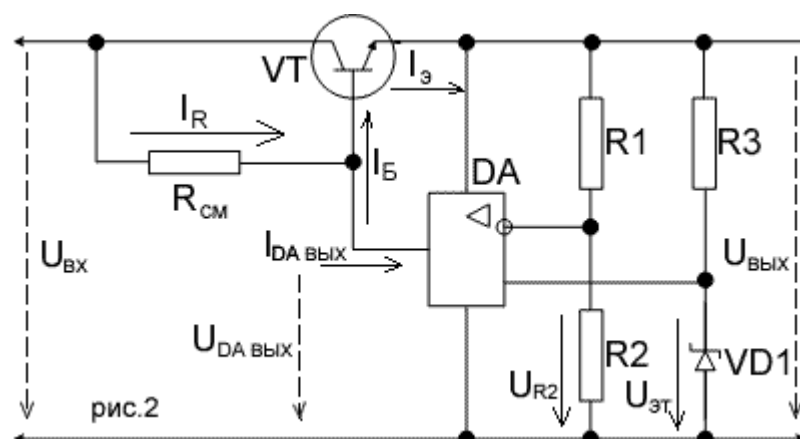


Рисунок 3.5 - Типовая схема компенсационного стабилизатора

Рассмотрим теперь не структурно, как на рис.3.4, а подетально его работу. Выходное напряжение стабилизатора равно разности его входного напряжения и падения напряжения между выводами эмиттера и коллектора регулирующего транзистора VT: $U_{\text{вых}} = U_{\text{вх}} - U_{\text{кэ}}$.

В свою очередь, для $U_{\text{кэ}}$ справедливо выражение $U_{\text{кэ}} = U_{\text{кб}} + U_{\text{бэ}} \cong U_{\text{кб}} + \text{const}$. Напряжение $U_{\text{кб}}$ определяется падением напряжения на резисторе смещения $R_{\text{см}}$ ($U_{\text{кб}} = I_{\text{Р}} \cdot R_{\text{см}} = U_{\text{вх}} - U_{\text{ДАвых}}$).

Операционный усилитель включен DA включен по схеме с дифференциальным входом, поэтому его выходное напряжение $U_{\text{ДАвых}} = KU_0 \cdot (U_{\text{эт}} - U_{\text{R2}})$.

Здесь KU_0 - коэффициент усиления операционного усилителя DA по напряжению. Так как цепь ООС (отрицательная обратная связь - подача сигнала с выхода на вход) в усилителе отсутствует, то из-за большого KU_0 можно считать, что во всех режимах работы $U_{\text{эт}} - U_{\text{R2}} = 0$ и, следовательно, выходное напряжение стабилизатора $U_{\text{вых}} = U_{\text{эт}} \cdot (R_1 + R_2) / R_2$. Возникновение любых отклонений выходного напряжения от указанного уровня приводит к нарушению условия $U_{\text{эт}} - U_{\text{R2}} = 0$. Это изменяет выходное напряжение операционного усилителя, а следовательно, и напряжение $U_{\text{кб}}$ транзистора VT, компенсируя возникшие отклонения.

Допустим, выходное напряжение стабилизатора увеличилось. Тогда $U_{\text{R2}} > U_{\text{эт}}$, что приводит к уменьшению напряжения $U_{\text{ДАвых}}$ и соответствующему увеличению $U_{\text{Рсм}}$ и $U_{\text{кэ}}$ транзистора VT, что компенсирует возникшие отклонения, потому как $U_{\text{вых}} = U_{\text{вх}} - U_{\text{кэ}}$.

И, наоборот, при уменьшении $U_{\text{вых}}$ увеличивается $U_{\text{ДАвых}}$, уменьшается $U_{\text{Рсм}}$ и $U_{\text{кэ}}$ транзистора VT и выходное напряжение увеличивается.

Таким образом, если коэффициент усиления операционного усилителя

KU_0 близок к бесконечности (а коэффициенты от 1000 и более считаются как бесконечность), то выходное напряжение стабилизатора полностью определяется значением эталонного напряжения $U_{эт}$ (оно снимается с параметрического стабилизатора на элементах R_3 и VD_1) и коэффициентом передачи делителя на резисторах R_1 и R_2 .

3.4 Пример расчета КС

Рассчитать непрерывный компенсационный стабилизатор напряжения, предназначенный для питания нагрузки, при $U_n = 5В$, $I_n = 1А$. Диапазон изменения входного напряжения 9,2...13,2В. Ожидаемый коэффициент стабилизации $KU_0 > 1000$.

Решение.

1. Выберем силовой транзистор из условия $I_{k\max} \geq I_k/K_{зап}$, где $K_{зап}$ - коэффициент запаса, равный 0,7...0,8.; $U_{кэ\max} \geq U_{вх\max}/K_{зап} = 19В$; $P_k \geq I_{k\max} \cdot (U_{вх\max} - U_{вых}) = 8,2Вт$. Этим требованиям удовлетворяет транзистор КТ817А. У него $U_{кэ\max\text{ доп}} = 40В$, $R_{бэ} \leq 1кОм$, $I_{k\max\text{ доп}} = 5А$, $P_k = 25Вт$, $h_{21э} = 25$.

2. Максимальный ток базы транзистора $I_b = I_n/(h_{21э} + 1) = 1/26 = 0,03846А = 38,46мА$. Согласно схеме рис.3.5 в случае холостого хода ($R_n = \infty$) этот ток должен протекать в выходной цепи операционного усилителя. Однако, этот ток превышает выходной ток типовых операционных усилителей, выполненных в виде ИС. Поэтому для согласования базового тока транзистора с выходным током операционного усилителя необходимо либо выбрать другой транзистор с большим значением $h_{21э}$, либо в качестве регулирующего элемента использовать схему составного транзистора.

В рассматриваемом случае воспользуемся схемой составного транзистора, дополнив транзистор КТ817А транзистором КТ315А. Дальнейшее наименование элементов привяжем к рис.3.6. В этом случае максимальный управляющий ток регулирующего элемента

$$I_{упр} = \left(\frac{I_n}{h_{21э1} + 1} + \frac{U_{бэ1}}{R_{бэ1}} \right) \times \frac{1}{h_{21э2} + 1} + \frac{U_{бэ2}}{R_{бэ2}}$$

Здесь $R_{бэ1}$ - резистор, шунтирующий эмиттерный переход. Его сопротивление оговаривается в справочных данных на транзистор. Для транзистора КТ315А имеем: $h_{21э} = 30$, $R_{бэ} = 10кОм$ (в задаче это будет $R_{бэ2}$). Тогда, полагая, что $U_{бэ1} = U_{бэ2} = 1$, получаем

$$I_{упр} = \left(\frac{1}{25 + 1} + \frac{1}{1 \times 10^3} \right) \times \frac{1}{30 + 1} + \frac{1}{10 \times 10^3} = 1,373 \times 10^{-3} А$$

3. Сопротивление резистора $R_{см}$ выбираем из условия обеспечения протекания тока $I_{упр}$ при наименьшем входном напряжении:

$R_{см} = (U_{вх\ min} - U_{вых})/I_{упр} = (9,5 - 5)/1,373 \cdot 10^{-3} = 3,059\text{кОм}$. С запасом выбираем $R_{см} = 2,7\text{кОм}$. В этом случае максимальный выходной ток операционного усилителя $U_{DAвых\ max} = (U_{вх\ max} - U_{вых})/R_{см} = (13,2 - 2)/2,07 = 3,03\text{ А}$.

4. В качестве источника эталонного напряжения используем параметримеский стабилизатор напряжения на стабилитроне. Стабилитрон выбираем из условия $U_{ст0} < U_{вых}$. Используем стабилитрон типа КС133А. Его справочные параметры: $U_{ст0\ min} = 2,97\text{ В}$; $U_{ст0\ max} = 3,63\text{ В}$ при $I_{ст} = 10\text{мА}$; $r_{ст}(гд) = 65\text{Ом}$. Сопротивление баластного резистора R_3 выберем в предположении, что $I_{вх}$ операционного усилителя равно нулю и $I_{ст\ min} = 10\text{мА}$:

$$R_3 = \frac{U_{вых} - U_{ст0\ max}}{I_{ст0\ min}} - r_{ст} = \frac{5 - 3,63}{10 \times 10^{-3}} - 65 = 72\text{ Ом}$$

При выбранном R_3 максимально возможный ток стабилитрона

$$I_{ст\ max} = (U_{вых} - U_{ст0\ min})/(R_3 + r_{ст}) = (5 - 2,97)/(72 + 65) = 0,0148\text{ А} = 14,8\text{мА},$$

что меньше максимально допустимого тока стабилитрона.

5. Считая $U_{ст0} = 3,3\text{ В}$ (т.е. $(U_{ст0\ min} = 2,97 + U_{ст0\ max} = 3,63)/2 = 3,3$), найдем требуемый коэффициент передачи делителя на резисторах R_2, R_3 :

$$K_{дел} = U_{ст0}/U_{вых} = 3,3/5 = 0,66.$$

Тогда, полагая $R_2 = 1\text{кОм}$, определяем значение R_1 .

6. Определим допустимый диапазон изменения сопротивления резистора R_1 в предположении, что $R_2 = \text{const} = 1\text{кОм}$:

$$R_{1\ max} = \frac{R_2 \times (U_{вых} - U_{ст0\ min})}{U_{ст0\ min}} = \frac{1 \times (5 - 2,97)}{2,97} = 683\text{ Ом}$$

$$K_{дел\ min} = U_{ст0\ min}/U_{вых} = 2,97/5 = 0,59$$

$$U'_{ст0\ max} = U_{ст0\ max} + \Delta I_{ст} \times r_{ст} = U_{ст0\ max} + (I_{ст\ max} - I_{ст\ min}) \times r_{ст} = 3,63 + (14,8 - 10) \times 10^{-3} =$$

$$R_{1min} = \frac{R_2 \times (U_{\text{ВЫХ}} - U_{\text{СТ0 max}})}{U_{\text{СТ0 max}}} = \frac{1 \times (5 - 3.962)}{3.962} = 262 \text{ Ом}$$

$$K_{\text{дел max}} = U_{\text{СТ0 max}} / U_{\text{ВЫХ}} = 3.962 / 5 = 0.792$$

Возможное изменение $R_1 = R_{1\text{max}} - R_{1\text{min}} = 683 - 262 = 421 \text{ Ом}$.

7. Для коэффициента операционного усилителя получим:

$$K_{U0 \text{ min}} > \frac{K_{\text{уст}} \times \Delta U_{\text{вх}}}{2 \times U_{\text{ВЫХ}} \times K_{\text{дел min}}} = \frac{1000 \times (13.2 - 9.2)}{2 \times 5 \times 0.59} = 678$$

7. Операционный усилитель выбираем из условия $K_{U0} = 678$; $I_{\text{вых}} \geq 3,03 \text{ мА}$. Этим условиям отвечает усилитель типа К140УД17.

Принципиальная электрическая схема рассчитанного стабилизатора на рисунке.3.6. Ее особенностью является питание операционного усилителя непосредственно от входного напряжения. Это обусловлено тем, что максимально допустимое напряжение его питания больше входного напряжения стабилизатора. Для точной подстройки выходных параметров, т.е. для подстройки R_1 введено дополнительное подстроечное сопротивление $R_{\text{доп}}$ номиналом 270 Ом .

Полученная схема стабилизатора:

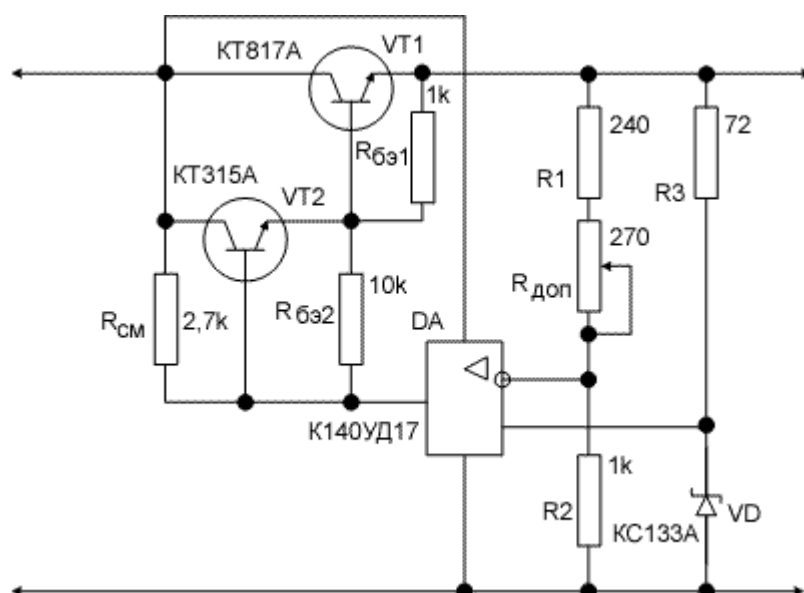


Рисунок 3.6 - Принципиальная электрическая схема рассчитанного стабилизатора

Задание

Выбрать и рассчитать схему стабилизации постоянного тока для питающего устройства функционального блока радиоэлектронной аппаратуры (ФБРЭА), включающего, выбранный в соответствии с вариантом задания (табл.1) функциональный узел (ФУ) и цифровой автомат (ЦА), синтезированный в результате выполнений практических занятий №1 и №2. Для этого:

1. Определить необходимые напряжение питания и максимальный потребляемый ток заданных по варианту ФУ и ЦА.

2. Исходя из назначения ФУ, приблизительно оценить требования к диапазону изменения напряжения на выходе стабилизатора и, исходя из этого, выбрать его тип.

3. Определиться с элементами стабилизатора, выбрать и рассчитать их номинальные значения.

Таблица 1- Варианты схем функционального узла

№ вар-та	№ выпуска	№ страницы	№ вар-та	№ выпуска	№ страницы
1	83	29	16	99	29
2	83	53	17	99	56
3	83	54	18	99	63
4	83	55	19	101	6
5	83	57	20	101	63
6	87	23	21	101	88
7	87	32	22	101	89
8	87	35	23	108	4
9	88	16	24	108	7
10	88	32	25	108	25
11	88	35	26	108	29
12	88	37	27	112	32
13	88	59	28	112	39
14	99	24	29	112	43
15	99	28	30	112	61

Примечание:

Номера вариантов совпадают с номерами в групповом списке студентов.

Название источника схемы ФУ: Выпуск «В помощь радиолюбителю», сборник. – М. ДОСААФ: Патриот (Выпуски 83-112).

Литература

1. Микросхемы для линейных источников питания и их применение / А. А. Перебаскин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : ДОДЕКА-XXI, 2001. – 292 с.
2. Источники электропитания РЭА : справочник / под ред. Г. С. Найвельта. – М. : Радио и связь, 1986. – 726 с.
3. Ромаш, Э. М. Источники вторичного электропитания радиоэлектронной аппаратуры / Э. М. Ромаш. – М. : Радио и связь, 1981. – 421 с.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №4

ВЫБОР И РАСЧЕТ ВЫПРЯМИТЕЛЯ И ПОНИЖАЮЩЕГО ТРАНСФОРМАТОРА

Цель работы: изучение методов выбора и расчета схем выпрямления и понижающего трансформатора

Краткие теоретические сведения

4.1 Упрощенный расчет трансформатора питания

Схема блока питания, обеспечивающего нужное выходное напряжение постоянного тока, приведена на рисунке 4.1. В нем использован трансформатор питания, включаемый первичной обмоткой (I) в осветительную розетку и понижающий напряжение (оно снимается с обмотки II) до заданного значения, двухполупериодный выпрямитель на диодах VD1 -VD4 и конденсатор C1, сглаживающий пульсации выпрямленного напряжения. Полученное в итоге почти постоянное напряжение (пульсации его при подключении нагрузки все же будут) снимают с выходных гнезд XS1 и XS2.

Расчет блока питания начинают с выпрямителя. Задача расчета - правильно выбрать выпрямительные диоды и конденсатор фильтра, а также определить необходимое переменное напряжение, снимаемое для выпрямления со вторичной (II) обмотки сетевого трансформатора.

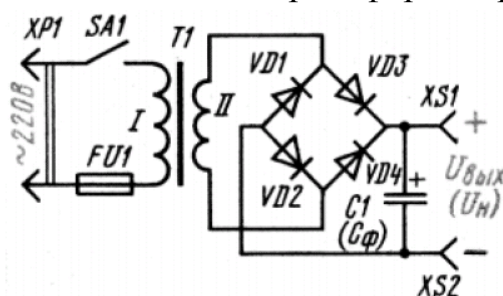


Рисунок 4.1 - Схема блока питания

Исходными данными для расчета выпрямителя служат требуемое напряжение на нагрузке (U_H) и потребляемый ею максимальный ток (I_H). Порядок расчета следующий: Сначала определяют переменное напряжение U_{II} , которое должно быть на вторичной обмотке трансформатора:

$$U_{II} = BU_H,$$

где U_H - постоянное напряжение на нагрузке, вольт; B -коэффициент, зависящий от тока нагрузки, который определяют по таблице 4.1.

Таблица 4.1

Коэффициент	Ток нагрузки, А					
	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
В	0,8	1	1,2	1,4	1,5	1,7
С	2,4	2,2	2	1,9	1,8	1,8

По току нагрузки определяют максимальный ток, протекающий через каждый диод выпрямительного моста:

$$I_d = 0,5C I_n,$$

где I_d - ток через диод, ампер ; I_n - максимальный ток нагрузки, А; C - коэффициент, зависящий от тока нагрузки и определяемый из таблицы 1.

Далее подсчитывают обратное напряжение, которое будет приложено к каждому диоду выпрямителя:

$$U_{обр} = 1,5U_n$$

где $U_{обр}$ - обратное напряжение, В; U_n - напряжение на нагрузке, В.

Теперь надо выбрать диоды, у которых значения выпрямленного тока и допустимого обратного напряжения равны или превышают полученные расчетные значения. В заключение можно определить емкость конденсатора фильтра:

$$C_f = 3200 I_n / U_n K_p$$

где C_f - емкость конденсатора фильтра, мкФ; I_n - максимальный ток нагрузки, А; U_n - напряжение на нагрузке, В; K_p - коэффициент пульсаций выпрямленного напряжения (отношение амплитудного значения переменной составляющей частотой 100 Гц на выходе выпрямителя к среднему значению выпрямленного напряжения).

Коэффициент пульсаций выбирают самостоятельно в зависимости от предполагаемой нагрузки, допускающей питание постоянным током вполне определенной «чистоты». К примеру, для питания малогабаритных транзисторных радиоприемников и магнитофонов коэффициент пульсаций выпрямленного напряжения может достигать $10^{-3} \dots 10^{-2}$, усилителей радио и промежуточной частоты - $10^{-4} \dots 10^{-3}$ предварительных каскадов усилителей звуковой частоты и микрофонных усилителей - $10^{-5} \dots 10^{-4}$. В дальнейшем, когда необходимо будет строить подобные выпрямители с последующей стабилизацией выпрямленного напряжения транзисторным стабилизатором, расчетную емкость фильтрующего конденсатора можно будет уменьшить в 5...10 раз.

Следующий этап - это расчет трансформатора питания.

Данные на него у уже есть - необходимое напряжение на вторичной обмотке (U_{II}) и максимальный ток нагрузки (I_{II}). Здесь тоже существует определенная последовательность расчета. Сначала определяют максимальное значение тока, протекающего через вторичную обмотку: $I_{II} = 1,5 I_n$

где I_{II} - ток через вторичную обмотку трансформатора, А; I_n - максимальный ток нагрузки, А.

Далее определяют мощность, потребляемую выпрямителем от вторичной обмотки трансформатора: $P_{II} = U_{II} I_{II}$,

где P_{II} - максимальная мощность, потребляемая от вторичной обмотки, Вт; U_{II} - напряжение на вторичной обмотке, В; I_{II} - максимальный ток через вторичную обмотку, А.

Затем подсчитывают мощность трансформатора: $P_{тр} = 1,25 P_{II}$

где $P_{тр}$ - мощность трансформатора, Вт; P_{II} - максимальная мощность, потребляемая от вторичной обмотки трансформатора, Вт. Если изготавливают трансформатор с несколькими вторичными обмотками, то сначала подсчитывают максимальную мощность, потребляемую от каждой вторичной обмотки, потом их суммарную мощность, а затем и мощность самого трансформатора.

Теперь можно подсчитать ток, протекающий через первичную обмотку:

$$I_I = P_{тр} / U_I,$$

где I_I - ток через обмотку I, А; $P_{тр}$ - подсчитанная мощность трансформатора, Вт; U_I - напряжение на первичной обмотке трансформатора (сетевое напряжение),

После этого рассчитывают необходимую площадь сечения сердечника магнитопровода:

$$S = 1,3 P_{тр}$$

где S - сечение сердечника магнитопровода, $см^2$; $P_{тр}$ - мощность трансформатора, Вт.

Определяют число витков первичной (сетевой) обмотки:

$$W_I = 50 U_I / S,$$

где W_I - число витков обмотки; U_I - напряжение на первичной обмотке, В; S - сечение сердечника магнитопровода, $см^2$.

Подсчитывают число витков вторичной обмотки:

$$W_{II} = 55 U_{II} / S.$$

Где W_{II} - число витков вторичной обмотки; U_{II} - напряжение на вторичной обмотке, В; S - сечение магнитопровода, $см^2$.

В заключение определяют диаметр провода обмоток:

$$d = 0,02 I,$$

где (d - диаметр провода, мм; I - ток через обмотку, мА. Иногда диаметр провода удобнее выбрать по таблице 4.2.

Таблица 4.2

$I_{\text{обм}}, \text{ мА}$	25	25...60	60...100	100...160	160...250	250...400	400...700	700...1000
$d, \text{ мм}$	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,4	0,5	0,6

По полученным данным можно подбирать подходящее железо и провод и изготавливать трансформатор. Правда, нелишне сначала прикинуть, разместится ли весь провод на каркасе будущего трансформатора при данных Ш - образных пластинах, ведь однотипные (по ширине средней части) пластины имеют неодинаковую площадь окна.

Для приблизительной оценки достаточно подсчитанную ранее мощность трансформатора $P_{\text{тр}}$ умножить на 50 и сравнить полученный результат (это необходимая площадь окна в мм^2) с измеренной площадью окна имеющихся пластин. При выборе сердечника магнитопровода следует придерживаться и еще одного правила - отношение ширины средней части сердечника к толщине набора (отношение сторон сердечника) должно быть в пределах 1...2.

4.2 Расчет трансформатора импульсного блока питания

Надежность импульсного лабораторного блока питания во многом зависит от того, насколько правильно выполнен расчет трансформатора. Небольшое отклонение его параметров от оптимальных для конкретного источника питания приводит к снижению КПД и ухудшению характеристик.

Порядок расчета:

1. Принимаем $P_{\text{исп}} = 1,3 P_{\text{н}}$ ($P_{\text{н}}$ — мощность, потребляемая нагрузкой). Далее, задавшись габаритной мощностью $P_{\text{габ}}$, которая должна удовлетворять условию $P_{\text{габ}} \geq P_{\text{исп}}$, необходимо подобрать подходящий тороидальный ферритовый магнитопровод. Параметры магнитопровода связаны с $P_{\text{габ}}$ соотношением $P_{\text{габ}} = S_c S_0 f B_{\text{max}} / 150$, Вт.

Здесь f — частота преобразования напряжения, Гц; $S_c = (D-d)h/2$ — площадь сечения магнитопровода, см^2 (D и d — соответственно наружный и внутренний диаметры, h — высота кольца, см); $S_0 = \pi d^2/4$ — площадь окна магнитопровода, см^2 ; B_{max} — максимальное значение индукции (в тесла), которое зависит от марки феррита и может быть определено по справочнику, содержащему сведения о ферромагнитных материалах.

2. После этого, зная напряжение на первичной обмотке трансформатора U_1 , находят число витков $w_1 = 0,25h \cdot 10^4 U_1 / f B_{\max} S_c$.

Для преобразователя (см. рисунок 4.2) $U_1 = U_{\text{пит}}/2 - U_{\text{кэ нас}}$, где $U_{\text{пит}}$ — напряжение питания преобразователя, а $U_{\text{кэ нас}}$ — напряжение насыщения коллектор — эмиттер транзисторов VT1, VT2.

Рассчитанное значение w_1 нужно округлить в большую сторону (во избежание насыщения магнитопровода).

3. Далее необходимо определить максимальный ток (в амперах) первичной обмотки: $I_1 \max = P_n / \eta U_1$ (η — КПД преобразователя, обычно 0,8) и диаметр (в миллиметрах ее провода: $d_1 = 0,6 \sqrt{I_1 \max}$).

4. Затем находят число витков вторичной обмотки трансформатора: $w_2 = w_1 U_2 / U_1$ и диаметр провода: $d_2 = 0,6 \sqrt{I_2}$ (U_2 и I_2 — соответственно напряжение и ток вторичной обмотки).

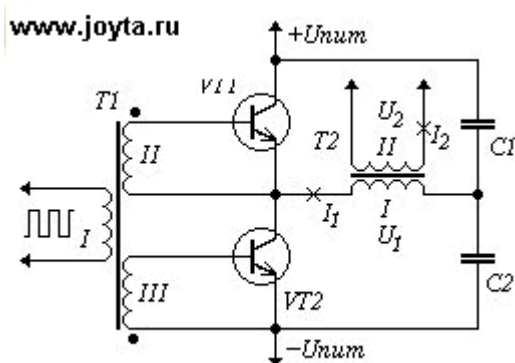


Рисунок 4.2 - Расчетная схема трансформатора импульсного блока питания

4.3 Пример расчета трансформатора для импульсного блока питания.

Рассчитаем высокочастотный трансформатор блока питания, например стереофонического усилителя, имеющего следующие выходные напряжения и токи: $U_2 = (25+25)$ В, $I_2 = 3$ А, $U_3 = 20$ В, $I_3 = 1$ А, $U_4 = 10$ В, $I_4 = 3$ А.

Мощность нагрузки $P_n = 200$ Вт.

Используемая мощность этого трансформатора $P_{\text{исп}} = 1,3 \cdot 200 = 260$ Вт. Частоту преобразования f выберем равной 105 Гц. В качестве магнитопровода используем кольцо типоразмера K38x24x7 из феррита марки 2000НН ($B_{\max} = 0,15$ Т [2]). Определим площадь сечения $S_c = (3,8 - 2,4) \cdot 0,7/2 = 0,49$ см² и площадь окна выбранного магнитопровода $S_o = \pi \cdot 2,42/4 = 4,5$ см², рассчитаем габаритную мощность трансформатора $P_{\text{габ}} = 0,49 \cdot 4,5 \cdot 105 \cdot 0,25/150 = 367$ Вт. Условие $P_{\text{габ}} \geq P_{\text{исп}}$ выполняется.

Теперь определим напряжение на первичной обмотке трансформатора и ее число витков: $U_1 = (285/2) \cdot 1,6 = 141 \text{ В}$; $w_1 = 0,25 \cdot 10^4 \cdot 0,7 \cdot 141 / 105 \cdot 0,15 \cdot 10^3 \cdot 0,49 \approx 29$. Для исключения насыщения магнитопровода выбираем $w_1 = 30$.

Далее рассчитаем максимальный ток в первичной обмотке и диаметр провода: $I_{\max} = 200 / 0,8 \cdot 141 = 1,75 \text{ А}$; $d_1 = 0,6\sqrt{1,75} = 0,8 \text{ мм.}$

И в заключении этого определяем число витков и диаметр провода выходных обмоток: $w_2 = 30 \cdot 25 / 141 = 5$; $d_2 = 0,6\sqrt{3} = 1 \text{ мм}$; $w_3 = 30 \cdot 20 / 141 = 4$; $d_3 = 0,6\sqrt{1} = 0,6 \text{ мм}$; $w_4 = 30 \cdot 10 / 141 = 2$; $d_4 = 0,6\sqrt{3} = 1 \text{ мм}$.

4.4 Пример расчет выпрямителя (работающий на емкостный фильтр)

В результате расчета определяются параметры и тип вентиля и параметры трансформатора.

Исходными данными являются:

- 1) Номинальное выпрямленное напряжение – $U_0 = 12 \text{ В}$
- 2) Номинальный выпрямленный ток – $I_0 = 0,56 \text{ А}$
- 3) Напряжение на первичной обмотке трансформатора – $U_1 = 220 \text{ В}$
- 4) Частота сети – $f_c = 50 \text{ Гц}$
- 5) Коэффициент пульсаций – $K_{\text{п max}} \leq 0,15$

Напряжение U_0 выбрано как среднее значение между пределами допустимых напряжений для стабилизатора КР142ЕН5А.

1. В качестве устройства выпрямления будем использовать однофазную мостовую схему (рисунок. 4.3).

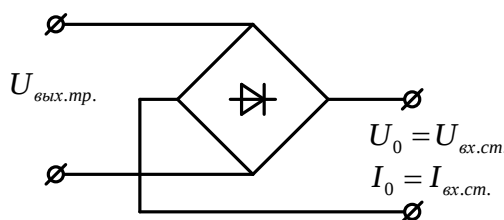


Рисунок 4.3 – Однофазная мостовая схема выпрямления

Для выбора вентиля определим вспомогательные параметры: среднее значение выпрямленного тока диода – $I_{\text{вс}}$ и амплитудное обратное напряжение на диоде – $U_{\text{обр}}$ по приближенным формулам:

$$I_{\text{вс}} = I_0 / 2 = 0,56 / 2 = 0,28 \text{ А};$$

$$U_{\text{обр}} = U_0 \cdot 1,5 = 12 \cdot 1,5 = 18 \text{ В};$$

Этим параметрам удовлетворяет диод КЦ410А со следующими параметрами: $I_{\text{пр.ср. max}} = 3 \text{ А}$; $U_{\text{пр}} = 1,2 \text{ В}$ (при $I_{\text{пр}} = 3 \text{ А}$); $U_{\text{обр.и. max}} = 50 \text{ В}$.

Оценим максимальный импульсный ток диода

$$I_{\text{пр.и.маx}} = 6 \cdot I_{\text{пр.ср.маx}} = 18 \text{ А}$$

Для выбранного вентиля находим его сопротивление:

$$r_{\text{с}} = \frac{U_{\text{np}}}{I_{\text{сc}}} \quad r_{\text{с}} = \frac{1,2}{0,28} \approx 4,286 \text{ Ом}$$

2. Определим активное сопротивление фазы выпрямителя:

$$r = r_{\text{mp}} + 2r_{\text{с}},$$

$$r_{\text{mp}} = 2,35 \cdot \frac{U_0 j}{f_c B_m} \sqrt{\frac{f_c B_m j}{1,6 \cdot U_0 I_0}} - \text{активное сопротивление обмоток трансформатора, приведенное ко вторичной обмотке};$$

$j = 3 \text{ А/мм}^2$ – средняя плотность тока в обмотках трансформатора;

$B_m = 1,2 \text{ Тл}$ – индуктивность для пластинчатых трансформаторов;

$$r_{\text{mp}} = 2,2 \cdot \frac{12 \cdot 3}{0,56 \cdot 50 \cdot 1,2} \sqrt{\frac{50 \cdot 1,2 \cdot 3}{1,6 \cdot 12 \cdot 0,56}} = 4,768 \text{ Ом};$$

Таким образом, активное сопротивление фазы выпрямителя будет равно:

$$r = 4,768 + 2 \cdot 4,286 = 13,339 \text{ Ом.}$$

3. Определение основного расчётного параметра A и угла отсечки Θ .

$A = \frac{\pi r}{n R_{\text{н}}}$, где $n = 2$ – число полупериодов для выбранной схемы выпрямления.

$$R_{\text{н}} = \frac{U_0}{I_0} = \frac{12}{0,56} = 21,429 \text{ Ом} - \text{номинальное сопротивление нагрузки.}$$

$$A = \frac{3,14 \cdot 13,339}{2 \cdot 21,429} = 0,978$$

Угол отсечки Θ найдём из трансцендентного уравнения:

$$\text{tg } \Theta = \Theta + A;$$

$$\text{tg } \Theta - \Theta - A = 0;$$

$$\text{tg } \Theta - \Theta - 0,978 = 0;$$

$$\Theta = 1,127 \text{ рад } (\approx 64,6^\circ)$$

4. Определение расчётных коэффициентов.

$$K_{\text{с}} = \sin \Theta - \Theta \cdot \cos \Theta = 0,42$$

$$F_{\text{с}} = \frac{\pi \cdot (-\cos \Theta)}{K_{\text{с}}} = 4,275$$

$$B_{\text{с}} = 0,707 / \cos \Theta = 1,648$$

$$D_{\Theta} = \frac{\sqrt{\pi \cdot \left[\Theta \cdot \left(1 + \frac{\cos 2\Theta}{2} \right) - \frac{3 \sin 2\Theta}{4} \right]}}{K_{\Theta}} = 1,841$$

5. Расчёт параметров трансформатора и проверка параметров вентиля.

$U_2 = U_0 \cdot B_{\Theta} = 12 \cdot 1,648 = 19,773$ В – напряжение на вторичной обмотке трансформатора;

$$I_{\text{в. max}} = \frac{I_0}{n} F_{\Theta} = \frac{0,56}{2} \cdot 4,275 = 1,197 \text{ А} \quad \text{– пиковое значение тока вентиля;}$$

$$I_{\text{в}} = \frac{I_0}{n} D_{\Theta} = \frac{0,56}{2} \cdot 1,841 = 0,515 \text{ А} \quad \text{– действующее значение тока вентиля;}$$

$$I_2 = \sqrt{2} \cdot I_{\text{в}} = 1,41 \cdot 0,515 = 0,729 \text{ А} \quad \text{– ток вторичной обмотки.}$$

Коэффициент пульсаций:

$$K_{\text{п}} = \frac{\left(\frac{1}{n} + \frac{\Theta}{\pi} \right)}{2 f_c C_1 R_{\text{н}}}$$

$C_1 = 3300$ мкФ – конденсатор после выпрямителя. Выбор номинала конденсатора произведен с запасом.

$$K_{\text{п}} = \frac{\left(\frac{1}{2} + \frac{1,127}{3,14} \right)}{2 \cdot 50 \cdot 3300 \cdot 10^{-6} \cdot 21,429} = 0,121$$

т.е. коэффициент пульсаций равен 12,1 %

6. Проверочный расчёт.

$$I_{\text{в. max}} \leq I_{\text{пр. и. max}} (1,197 \text{ А} < 18 \text{ А});$$

$$K_{\text{п}} \leq K_{\text{п max}} (0,121 < 0,15);$$

$$P_{\text{потр}} = U_2 \cdot I_2 = 19,773 \cdot 0,729 = 14,412 \text{ Вт};$$

$$P_{\text{н}} = U_0 \cdot I_0 = 12 \cdot 0,56 = 6,72 \text{ Вт};$$

$$\eta = \frac{P_{\text{н}}}{P_{\text{потр}}} = \frac{6,72}{14,412} = 0,466$$

7. Найдём коэффициент трансформации

$$n_{21} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{19,773}{220} \approx 0,09$$

Задание

Выбрать и рассчитать схему выпрямления и трансформатор для питающего устройства функционального блока радиоэлектронной аппаратуры (ФБРЭА), включающего, выбранный в соответствии с вариантом задания (табл.1) функциональный узел (ФУ) и цифровой автомат (ЦА), синтезированный в результате выполнений практических занятий №1 и №2. Для этого:

1. Исходя из результатов расчета стабилизатора определиться с исходными данными для расчета фильтра и выпрямителя, которыми являются номинальное выпрямленное напряжение (U_0), номинальный выпрямленный ток (I_0) и коэффициент пульсаций K_p .
2. Выбрать тип выпрямителя, параметры вентиля и фильтра, определить требования к выходным параметрам трансформатора, подключаемого к входу выпрямителя.
3. Выполнить проверочный расчет.
4. Для заданного вариантом функционального узла схемы РЭУ и выбранного типа блока питания, исходя из предыдущих расчетов выпрямительного и стабилизирующего устройств, определить исходные данные для расчета трансформатора, а именно: выходное напряжение, максимальный ток нагрузки, коэффициент мощности (КПД).
5. Произвести расчёт трансформатора, определив тип и сечение сердечника, а также намоточные данные.
6. Выполнить по справочнику поиск стандартного (типового) трансформатора с выходными данными, удовлетворяющими результатам расчета, привести его полную характеристику.

Литература

1. Источники электропитания РЭА : справочник / под ред. Г. С. Найвельта. – М. : Радио и связь, 1986. – 726 с.
2. 12. Мазель, К. Б. Трансформаторы электропитания / К. Б. Мазель. – М. : Энергоиздат, 1982. – 326 с.
3. 13. Ромаш, Э. М. Источники вторичного электропитания радиоэлектронной аппаратуры / Э. М. Ромаш. – М. : Радио и связь, 1981. – 421 с.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №5

РАСЧЕТ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Цель работы: изучение методов расчета схем пьезоэлектрических преобразователей, выполненных из различных материалов.

Краткие теоретические сведения

Принцип действия пьезоэлектрических преобразователей основан на использовании прямого или обратного пьезоэффектов. Прямой пьезоэффект заключается в способности некоторых материалов генерировать электрические заряды при приложении механической нагрузки, обратный — в изменении механического напряжения или геометрических размеров образца материала под воздействием электрического поля. В качестве пьезоэлектрических материалов используются кварц, турмалин и искусственно поляризованная керамика на основе титанатов и цирконатов бария и свинца.

Наиболее распространен кварц; он имеет незначительный коэффициент линейного расширения, высокое удельное электрическое сопротивление и сравнительно незначительную зависимость пьезомодуля от температуры.

Пьезокерамика является продуктом отжига спрессованной смеси, содержащей мелко раздробленные сегнетоэлектрические кристаллы; пьезоэлектрические свойства такая керамика приобретает после поляризации в электрическом поле. Пьезокерамика на основе ниобата свинца (НБС) и цирконата-титаната свинца (ЦТС) более стабильна, чем на основе титаната бария, однако уступает им по чувствительности.

Все природные пьезоматериалы имеют кристаллическую структуру.

Как видно, ячейка в целом электрически нейтральна (Рисунок 5.1).

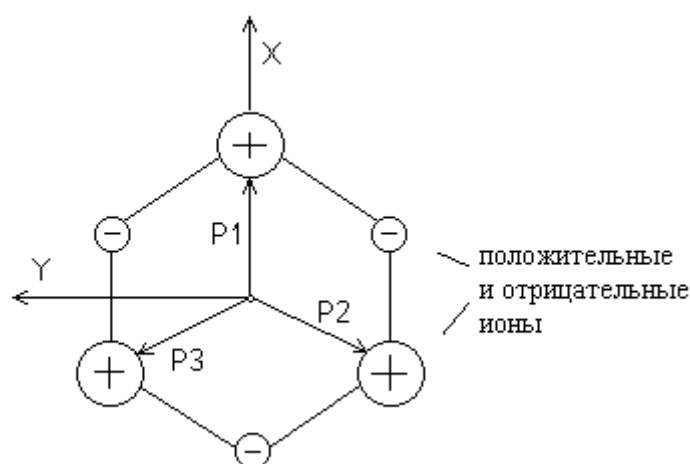


Рисунок 5.1 – Структура пьезоматериала

P_1 , P_2 , P_3 — векторы поляризации, их геометрическая сумма равна нулю.

Если к кристаллу вдоль оси X приложена сила F , то в результате деформации ячейки её электрическая нейтральность нарушается. Сумма проекций векторов P_2 и P_3 на ось X становится меньше вектора P_1 . Появляется равнодействующая P_1' вектора поляризации, обуславливающая поляризационные заряды на гранях, перпендикулярных оси X (Рисунок 5.2).

Как видно, вдоль оси Y электрическое состояние не изменяется, т.к. сумма проекций векторов P_2 и P_3 на ось Y и в том и в другом случае равна нулю.

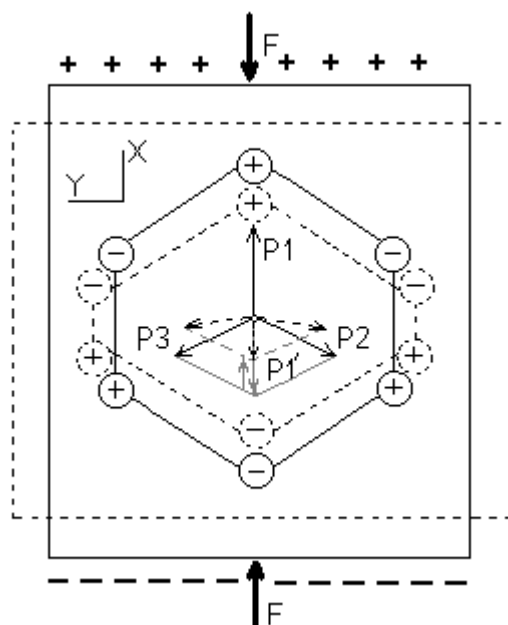


Рисунок 5.2 – Продольный пьезоэффект

Образование поляризационных зарядов на нагружаемых гранях называется **продольным пьезоэффектом**.

Если сила F приложена перпендикулярно оси Y , геометрическая сумма проекций векторов P_2 и P_3 на ось Y также равна нулю. Поэтому заряды на гранях, перпендикулярных оси Y не образуются. Но сумма проекций P_2 и P_3 на ось X не равна вектору P_1 , а превышает его. В результате на нижней грани образуются положительные заряды, на верхней — отрицательные (Рисунок 5.3).

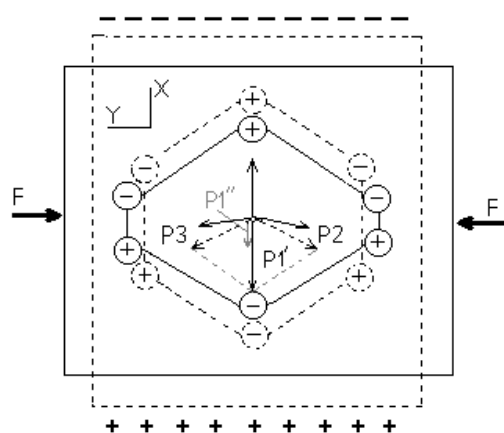


Рисунок 5.3 – Поперечный пьезоэффект

Эффект образования зарядов на гранях, перпендикулярных нагружаемым граням, называется **поперечным пьезоэффектом**.

При равномерном нагружении со всех сторон кристалл остается электрически нейтральным.

Нейтральным он остается и при нагружении по оси Z . Это направление называется **оптической осью кристалла**.

Усилия могут быть приложены к кристаллу и таким образом, что

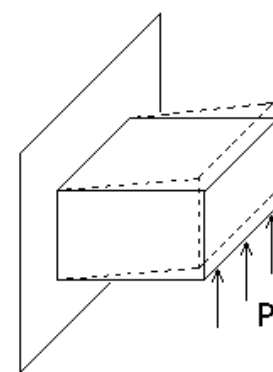


Рисунок 5.4 – Сдвиговая деформация

возникают сдвиговые напряжения (Рисунок 5.4). Это сложная деформация также обуславливает электризацию кристалла. При определении зарядов на гранях в этом случае необходимо учитывать все действующие механические напряжения.

Виды пьезоэлементов

1. Пьезоэлектрик. Полностью электрически уравновешенный кристалл. При равномерном нагружении по всем граням он остается электрически нейтральным (к ним относятся кристаллы кварца).
2. Пироэлектрик. Элементы, у которых имеется одно или несколько взаимно неуровновешенных полярных направлений. Он поляризуется и при всестороннем давлении или тепловом расширении (отсюда и название пироэлектрика). (Турмалин).
3. Сегнетоэлектрик. Кристалл разбит на домены, в пределах которых существует упорядоченная структура и своё полярное направление. Однако полярные направления ориентированы по-разному. Т.е. их строение подобно ферромагнетику, и поэтому их часто называют ферроэлектрическим материалом. Типичным представителем сегнетоэлектриков является сегнетова соль или монокристаллический титанат бария.
4. Пьезокерамика (или сегнетоэлектрическая пьезокерамика) — это продукт отжига спрессованной смеси, состоящей из мелкоизмельченного сегнетоэлектрического кристалла с присадками. Поляризация его происходит в сильном электрическом поле. Материалом служат титанаты бария или свинца, цирконат свинца или смеси цирконато-титанаты свинца.

Расчет пьезопреобразователей

Если на грань пьезоэлемента действует сила F , то в зависимости от вида пьезоэффекта на соответствующих гранях возникает заряд $Q=dF$, где d — коэффициент пропорциональности, называемый *пьезомодулем* (Кл/Н).

Поверхностная плотность δ этого заряда $\delta=d\sigma$,

где σ — механическое напряжение;

$$\sigma=F/S.$$

На пьезоэлемент в общем случае могут действовать напряжения по осям X, Y, Z (Рисунок 5.5). Тогда сдвиговые напряжения:

$$\sigma_1=F_x/S_x, \quad \sigma_2=F_y/S_y, \quad \sigma_3=F_z/S_z$$

и, кроме того, сдвиговые напряжения $\sigma_4, \sigma_5, \sigma_6$, вызывающие деформацию граней ZY, XY и ZX соответственно.

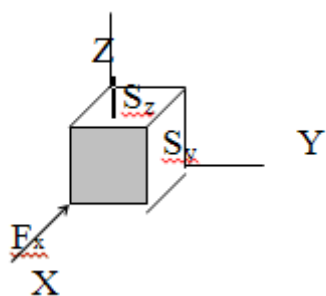


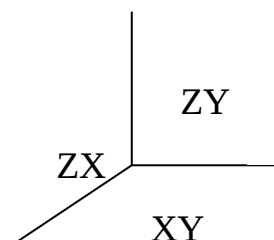
Рисунок 5.5 – Действие сил

Для расчета зарядов в случае деформации любого вида используются пьезомодули d , записанные в виде матрицы, которая состоит из трех строк (фронтальная, профильная и горизонтальная грани элемента, т.е. ZY, ZX и XY) и шести столбцов, соответствующих напряжениям σ в пьезоэле-

менте (по осям и сдвиговые).

З а р я д	по осям			сдвиговые		
	x	y	z	zy	xy	zx
	d_{11}	d_{12}	d_{13}	d_{14}	d_{15}	d_{16}
	d_{21}	d_{22}	d_{23}	d_{24}	d_{25}	d_{26}
	d_{31}	d_{32}	d_{33}	d_{34}	d_{35}	d_{36}

Фронта-
льные



Например, индекс пьезомодуля d_{13} означает, что рассматривается заряд на фронтальной грани ZY при действии напряжения вдоль оси Z.

Индекс пьезомодуля d_{24} означает, что рассматривается заряд на грани XZ при действии сдвигового напряжения, вызывающего деформацию грани ZY.

При определении знаков зарядов за положительное принимается направление поля, совпадающее с положительным направлением соответствующей оси.

В таблице 1 приведены матрицы пьезомодулей для наиболее типичных структур материалов.

Таблица 1

Материал	Пьезомодули $d_{ij} \cdot 10^{-12} \text{ Кл} / \text{Н}$					
Пьезоэлектрик (кварц)	-2,31	+2,31	0	-0,67	0	0
	0	0	0	0	0,67	4,62
	0	0	0	0	0	0
Пьезокерамика (титанат бария)	0	0	0	0	250	0
	0	0	0	250	0	0
	-78	-78	190	0	0	0
Пирозлектрик (турмалин)	0	0	0	0	3,7	-0,46
	-0,23	0,23	0	3,7	0	0
	0,28	0,28	1,9	0	0	0

Пользуясь таблицей можно рассчитать поверхностные плотности зарядов на гранях пьезоэлементов при деформациях.

Например, для кварца:

Если сила действует вдоль оси X, вызывая деформацию сжатия, то плотность заряда на фронтальной грани ZY

$$\delta = -d_{11}\sigma_1 = 2.31 \cdot 10^{-12} \sigma_1$$

Если силы действуют по трем осям, вызывая деформацию сжатия, то на той же фронтальной грани

$$\delta = -d_{11}\sigma_1 - d_{12}\sigma_2 - d_{13}\sigma_3 = 2.31 \cdot 10^{-12} \sigma_1 - 2.31 \cdot 10^{-12} \sigma_2 = 0$$

При сдвиговой деформации по оси Z, вызывающей деформацию грани ZY, на фронтальной грани ZX

$$\delta = d_{14}\sigma_4 = -0.67 \cdot 10^{-12} \sigma_4.$$

По поверхностным площадям заряда рассчитывается заряд

$$Q = \delta S; \quad \delta = d\sigma.$$

При продольном пьезоэффекте заряд не зависит от размеров пьезоэлемента, т.к. нагружаемая грань является гранью, на которой образуется заряд (рисунок 5.5). Так, при сжатии по оси X:

$$Q = \delta S_1 = -S_1 d_{11} \frac{F_1}{S_1} = -d_{11} F_1$$

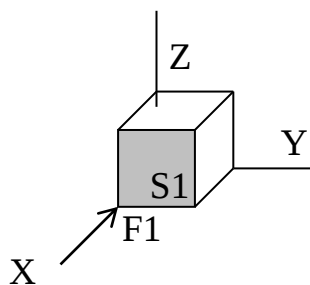


Рисунок 5.5 – Действие сил при продольном пьезоэффекте

При поперечном пьезоэффекте заряды образуются на грани, перпендикулярной нагружаемой, поэтому заряд может быть увеличен соответствующим выбором площадей граней пьезоэлемента (рисунок 5.6).

$$Q = \delta S_1 = -S_1 d_{12} \frac{F_2}{S_2} = -d_{11} F_2 \frac{ZY}{ZX} = d_{11} F_2 \frac{Y}{X}$$

При расчете выходного напряжения пьезопреобразователя надо учитывать его выходную емкость и емкость линии связи, соединяющей его с измерительной цепью.

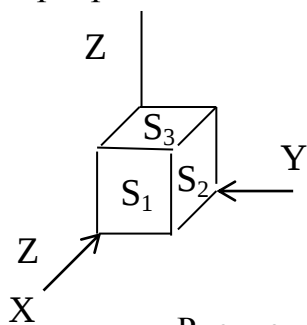


Рисунок 5.6 – Действие сил при поперечном пьезоэффекте

Эквивалентная схема пьезопреобразователя, соединенного линией с измерительной цепью выглядит следующим образом (рисунок 5.7, X и Y – длины ребер граней):

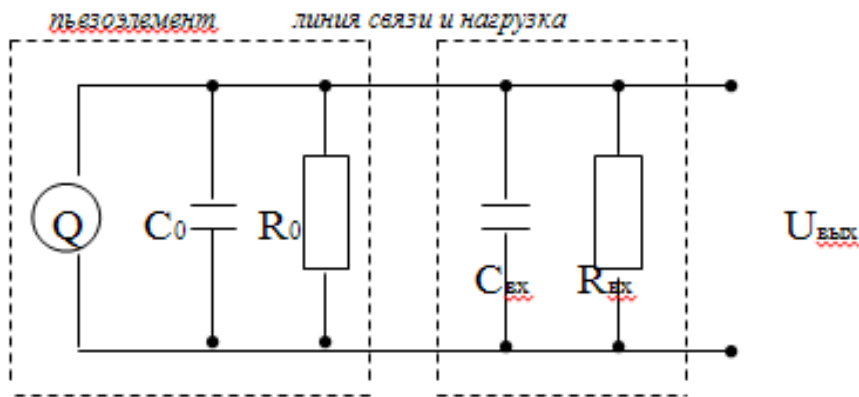


Рисунок 5.7 – Эквивалентная схема пьезопреобразователя

C_0 , R_0 – параметры пьезоэлемента; $C_{вх}$, $R_{вх}$ – параметры измерительной цепи линии связи.

Эта схема упрощается (рисунок 5.8):

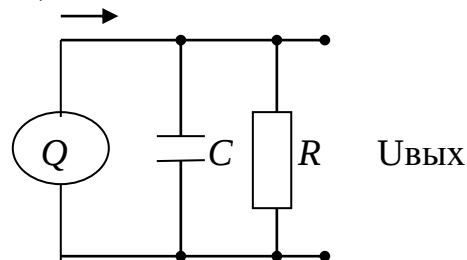


Рисунок 5.8 – Упрощенная эквивалентная схема пьезопреобразователя

где
$$R = \frac{R_0 R_{вх}}{R_0 + R_{вх}}, \quad C = C_0 + C_{вх}.$$

Тогда $U_{вых}$ с подключенной к нему измерительной цепью

$$\dot{U}_{вых} = \dot{I} \frac{R}{j\omega RC + 1}.$$

Если приложенная сила F изменяется по синусоидальному закону $f = F_m \sin \omega t$, то мгновенное значение тока $i = d_{ij} \dot{F}$ и $\dot{I} = j\omega d_{ij} \dot{F}$.

$$\dot{U}_{вых} = d_{ij} \dot{F} \frac{R}{j\omega RC + 1}.$$

Тогда

Как видно из полученного выражения, амплитуда U и сдвиг фаз между U и F зависят от частоты ω .

Чувствительность преобразователя определяется формулой:

$$S = d_{11} n \sqrt{C_{вх} + nC_0},$$

где C_0 – емкость одной пластины,

n – число параллельно соединенных пластин пьезоэлементов.

Конструктивно ИП представляет собой пластину из пьезоматериала, на две грани которого наносятся электроды для подключения к измерительной схеме.

Для увеличения выходного сигнала из пластин набирают батарею из последовательно включенных пьезоэлементов (Рисунок 5.9, б). Для измерения деформации сдвига конструкция ИП представляет собой цилиндр 1 из пьезокерамики с электродами 2, 3 (Рисунок 5.9, в). Под действием силы F происходит деформация сдвига плоскостей, параллельных направлению поляризации, что вызывает генерацию заряда.

При измерении параметров изгиба ИП представляет собой две одинаковые склеенные между собой пластины; при изгибе одна пластина удлиняется, а другая укорачивается. В зависимости от схемы подключения можно получить сигнал, пропорциональный сумме зарядов (Рисунок 5.9, г) или сумме напряжений (Рисунок 5.9, д),

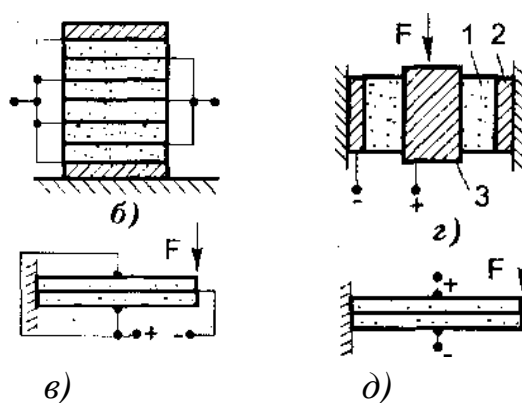


Рисунок 5.9 - Конструкции пьезоэлектрических ИП (б, в, г, д)

Преобразователи с обратным пьезоэффектом используются в качестве источников ультразвуковых и звуковых колебаний (при гидродинамических измерениях и в акустике), в исполнительных устройствах автоматики (перемещение зеркал оптических приборов), в качестве обратных ИП и др.

Погрешности пьезоэлектрических ИП определяются температурной нестабильностью пьезомодуля, неправильной установкой пластин, недостаточной избирательностью по направлению измеряемых деформаций (чувствительность к боковым силам) и зависимостью коэффициента преобразования от частоты (например, верхняя рабочая частота таких ИП достигает 200 кГц при чувствительности $0,004 \text{ пКл}/(\text{м}/\text{с}^2)$, однако при предельной чувствительности $1000 \text{ пКл}/(\text{м}/\text{с}^2)$ она снижается до 1 кГц).

Достоинства пьезоэлектрических ИП: простота конструкции, малые габариты и стоимость, высокая надежность, возможность измерения быстропеременных величин; недостатки: невысокая чувствительность, непригодность к измерению статических величин, высокое входное сопротивление измерительной цепи, относительно невысокий уровень выходного сигнала, что требует дополнительного усиления.

Задание

1. Рассчитать заряды на гранях пьезоэлемента, выполненного в виде параллелепипеда с заданными по варианту материалом и соотношением сторон при деформации сжатия (растяжения или сдвига), если сила $F_x=F_y=F_z=1\text{кг}$ действует вдоль заданной по варианту оси.
2. Определить размеры кристалла кварца, если на его фронтальной грани необходимо получить заданный по варианту заряд при деформации сжатия (растяжения). Действующая сила вдоль оси, площадь и высота грани, на которую действует сила также определяются вариантом задания.

Таблица вариантов задания

№ Ва- ри- ан- та	Вид дефор- мации	Материал	Соотно- шение сторон $Y=Z$ $Z/X=$	Направ- ление действую- щей силы вдоль оси	Вели- чи-на заряда Q $\cdot 10^{-11}$ кл	Пло- щадь грани, на ко- торую дей- ству-ет сила F (см^2)	Вы- со- та гра- ни Z (см)
1	Растяжение	кварц	0,25	Z	1	1	1
2	Растяжение	турмалин	0,25	X	2	1,5	1,5
3	Сдвиг	Титанат бария	0,5	ZY	3	2	2
4	Растяжение	кварц	0,5	Y	4	1	1
5	Растяжение	турмалин	0,75	X	5	1,5	1,5
6	Сжатие	Титанат бария	0,75	Z	1	2	2
7	Сжатие	кварц	0,25	Y	2	1	1
8	Сдвиг	турмалин	0,25	XY	3	1,5	1,5
9	Сжатие	Титанат бария	0,5	X	4	2	2
10	Сжатие	кварц	0,5	Y	5	1	1
11	Растяжение	турмалин	0,75	Y	1	1,5	1,5
12	Растяжение	Титанат бария	0,75	X	2	2	2
13	Сдвиг	кварц	0,25	ZX	3	1	1
14	Растяжение	турмалин	0,25	Y	4	1,5	1,5

15	Сжатие	Титанат бария	0,5	X	5	2	2
16	Сжатие	кварц	0,5	Y	1	1	1
17	Сжатие	турмалин	0,75	Y	2	1,5	1,5
18	Сдвиг	Титанат бария	0,75	ZY	3	2	2
19	Сжатие	кварц	0,25	Z	4	1	1
20	Сжатие	турмалин	0,5	Y	5	1,5	1,5

Примечание:

1. Номера вариантов совпадают с номерами в групповом списке студентов.
2. При сдвиговой деформации касательное напряжение $\tau = 9,8 \cdot 10^4 \text{ Н/м}^2$, $X=1 \text{ см}$.

Литература

1. *Най Дж.* Физические свойства кристаллов. — М.: Иностранная литература, 1967. — 386 с.
2. *Левшина К. С., Новицкий И. В.* Электрические измерения физических величин. — М.: Энергоатомиздат, 1973. — С. 107-130.
3. *Яффе Б., Кук У., Яффе Г.* Пьезоэлектрическая керамика. — М.: Мир, 1974. — 289 с.
4. *Малов Б. В.* Пьезорезонансные датчики. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 272 с.
5. *Богуш М. В.* Пьезоэлектрическое приборостроение: сборник в 3 томах. — Ростов-на-Дону: Издательство СКНЦ ВШ, 2006. — Т. 3. Пьезоэлектрические датчики для экстремальных условий эксплуатации. — 346 с.

Примеры решений при выполнении задания

Задача: 1

Рассчитать заряд на гранях кристаллита, выполненного в виде параллелепипеда с одинаковыми сторонами $y=z=0,5x$ при деформации сжатия, если силы $F_x = F_y = F_z = 1 \text{ кГ}$ действуют:

1. вдоль оси y (пьезоэлектрик кварц)
2. вдоль оси z (титанат бария)
3. вдоль трех осей (титанат бария)
4. вдоль оси x (турмалин)
5. Совершая одностороннюю деформацию грани zy (титанат бария); если касательное напряжение $\tau = 9,8 \cdot 10^{-4} \text{ Н/м}^2$, $x = 1 \text{ см}$.

мт. деп.

Решение

1. Из табл. пьезомодулей следует, что заряд возникает на фронтальной грани S_x .
Поскольку сила действует по оси y , т.е. на грани S_y , то возникает поперечный пьезоэффект

на тор. грани S_z попер.

$$Q_{\text{фр}} = \delta_* S_x;$$

$$\delta_* = -d_{12} \sigma_2;$$

$$\sigma_2 = \frac{F_y}{S_y};$$

$$Q = -S_x d_{12} \frac{F_y}{S_y} = -2,31 \cdot 10^{-12} \cdot 9,8 \cdot 0,5 =$$

$$\frac{S_x}{S_y} = \frac{y \cdot z}{x \cdot z} = \frac{y}{x} = 0,5$$

$$\begin{aligned} \delta_{\text{поп}} &= \delta S_z \\ \delta &= -d_{22} \sigma_2 \\ \sigma_2 &= \frac{F_y}{S_y} \\ Q &= -\delta \cdot S_z = -S_z d_{22} \frac{F_y}{S_y} = \\ &= 98 \cdot 10^{-12} \cdot 1 \cdot 9,8 = \end{aligned}$$

$$= -1,13 \cdot 10^{-11} \text{ Кл}$$

2. Заряд возникает на грани S_z (продольный пьезоэффект)

$$Q_{\text{пр}} = \delta S_z; \quad \sigma_3 = \frac{F_z}{S_z};$$

$$\delta = -d_{33} \sigma_3;$$

$$Q = -190 \cdot 10^{-12} F_z \frac{S_z}{S_z} = -1,86 \cdot 10^{-9} \text{ Кл.}$$

$$Q = -d_{33} \sigma_3 S_z = -d_{33} \frac{F_z}{S_z} \cdot S_z$$

3. Запрос на деформацию равен.

$$Q_{\text{деп}} = \delta S_z$$

$$\delta = -d_{31} \sigma_1 - d_{32} \sigma_2 - d_{33} \sigma_3$$

$$Q = S_z \left(-d_{31} \frac{F_x}{S_x} - d_{32} \frac{F_y}{S_y} - d_{33} \frac{F_z}{S_z} \right) =$$

$$= 4,9 \cdot 10^{-10} \text{ Кл.}$$

4. Запрос возникает на прод. и попер. гранях

$$Q_{\text{прод}} = \delta_n S_y$$

$$S_y = XZ \quad S_z = XY$$

$$Q_{\text{поп}} = \delta_r S_z$$

$$S_x = YZ$$

$$\frac{S_y}{S_x} = \frac{X}{Y} = 2$$

$$\delta_n = -d_{21} \sigma_1$$

$$Q_n = -d_{21} \frac{F_x S_y}{S_x} = -0,23 \cdot 9,8 \cdot 2 \cdot 10^{-12}$$

$$\frac{S_z}{S_x} = \frac{X}{Z} = 2$$

$$\delta_r = -d_{31} \sigma_1$$

$$Q_r = -d_{31} \frac{F_x S_z}{S_x} = -5,49 \cdot 10^{-12}$$

1 и 2

5. Запрос возникает на прод. грани

Косая деформация

$$Q_{\text{прод}} = \delta S_y$$



$$\tau = \sigma \gamma \text{ (закон Гука)}$$

$$\delta = -d_{25} \sigma_5$$

σ - абсолют. напряж.
 γ - относит. деформ.

$$Q_{\text{пр}} = -d_{25} \tau S_y = -250 \cdot 10^{-12} \cdot 9,8 \cdot 10^4 \cdot 0,5 \cdot 10^{-4} =$$

$$= -1,22 \cdot 10^{-9} \text{ Кл.}$$

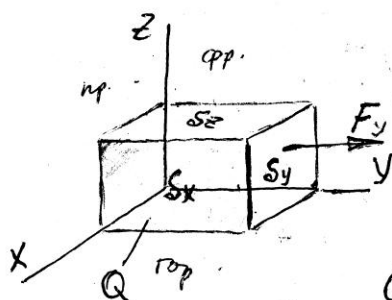
$$S_y = XZ; X = 1 \cdot 10^{-2} \text{ (м)}$$

$$Z = 0,5 X = 0,5 \cdot 10^{-2} \text{ (м)}$$

$$XZ = 0,5 \cdot 10^{-4}$$

Задача 2.

Определить размер кристалла кварца, если на его фронтальной грани периодически поступит заряд $Q = 5 \cdot 10^{-11}$ Кл при деформации растяжения и действующей силе вдоль оси y $F = 1$ кГ. Площадь грани, на которую действует сила $S_y = 0,25 \text{ см}^2$, высота кристалла $Z = 0,5 \text{ см}$.



Поперечной координатой.

$$Q = \delta S_x$$

$$\delta = d_{12} \sigma_2$$

$$Q = d_{12} \sigma_2 S_x = d_{12} S_x \frac{F_y}{S_y}$$

$$S_x = \frac{Q S_y}{d_{12} F_y} = Z \cdot Y$$

$$Y = \frac{Q S_y}{d_{12} F_y Z} = \frac{5 \cdot 10^{-11} \cdot 0,25 \cdot 10^{-4}}{2,31 \cdot 10^{-12} \cdot 9,8 \cdot 0,5 \cdot 10^{-2}} = 1,1 \cdot 10^{-2} (\text{м}) = 1,1 \text{ см}$$

$$x = \frac{S_y}{Z} = \frac{0,25}{0,5} = 0,5 (\text{см})$$

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №6

СОЗДАНИЕ СИМВОЛОВ КОМПОНЕНТОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СХЕМЫ

Цель работы: изучение приемов создания и редактирования символов компонентов электрической схемы с помощью программы Altium Designer

Краткие сведения

6.1 Сведения о системе сквозного проектирования *Altium Designer*



Altium Designer - комплексная система проектирования высокоскоростных электронных устройств на базе печатных плат, которая позволяет разработчику создавать проекты, начиная с принципиальной схемы и описания ПЛИС, проводить моделирование полученных схем, подготовить файлы для производства, а концепция Live Design, так называемое живое проектирование, позволяет завершить проект его отладкой на плате NanoBoard. Контроль целостности проекта позволяет отслеживать изменения в частях проекта и синхронизировать их. Используя плату отладки NanoBoard возможно отлаживать ПЛИС проекты на этапе создания принципиальной схемы.

Расширенный инструментарий **редактора схем** позволяет создавать проекты любой сложности, а готовые блоки простейших логических элементов позволяют уйти от описания к созданию структуры из готовых наработок.

Работа с большим набором документов проекта упрощается наличием миниатюрного окна просмотра, которое появляется при наведении курсора на название документа в структуре проекта (рисунок 6.1.).



Рисунок 6.1- Окно просмотра

При разработке электрических принципиальных схем имеется возможность задавать конструктивные параметры будущей платы, например, формировать классы цепей и группы компонентов, а также описывать дифференциальные пары. На созданные классы цепей и дифференциальные пары можно сразу же установить ограничительные правила, такие как длину и толщину проводника, а также значение импеданса (рисунок 6.2).



Рисунок 6.2 – Окно задания конструктивных параметров

Библиотеки программы содержат более 80000 компонентов и постоянно обновляются, причем имеется возможность импорта уже готовых библиотек из PCAD 2000-2006. Кроме этого, имеется возможность создавать собственные библиотеки символов, посадочных мест, трехмерных моделей и текстовых SPICE-моделей для моделирования (рисунок 6.3).

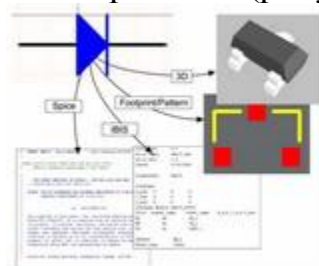


Рисунок 6.3– Окно задания библиотеки символов

Разработку библиотечных элементов можно проводить в режиме мастера, который позволяет путем последовательного ввода информации о компоненте получить готовую модель с минимальными затратами времени (рисунок 6.4).



Рисунок 6.4 - Окно режима мастера

Altium Designer позволяет выполнять стандартный набор процедур смешанного цифро-аналогового **моделирования**. Запуск цифро-аналогового моделирования на базе SPICE 3f5/XSpice происходит непосредственно с введенной принципиальной схемы и предоставляет в распоряжение разработчика мощные средства анализа (рисунок 6.5),

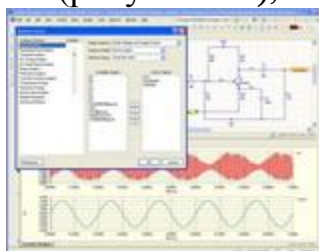


Рисунок 6.5- Окно режима анализа

включая такие, как вариация параметров и статистический анализ методом Монте-Карло. В комплект поставки включено более 20 000 математических моделей.

Предварительный расчет импеданса и возможных отражений может быть выполнен на схемотехническом уровне еще до этапа компоновки и трассировки печатной платы, позволяя предотвратить возможные проблемы на ранних стадиях проектирования и правильно подобрать элементную базу. Импедансы, отражения и возможные перекрестные отражения могут быть уточнены (перерасчитаны) на заключительных этапах разработки и контроля топологии. Целостность сигналов может быть проанализирована при верификации (функция DRC) топологии.

Редактор печатных плат с помощью мощной, полностью визуализированной системы задания и проверки правил проектирования, позволяет получать полный контроль над процессом разработки топологии (рис.6).



Рисунок 6.6 – Окно редактора печатных плат

Пользователь может описать требуемые толщины проводников и зазоры между ними, которые будут жестко соблюдаться во время интерактивной и автоматической трассировки.

Топологические алгоритмы трассировки позволяют выполнять трассировку очень эффективно даже при использовании компонентов сложной формы, при этом удастся избежать лишних этапов "зачистки" топологии. Последняя версия трассировщика значительно повышает процент завершенности трассировки и улучшает работу с экранными и "расщепленными" экранными слоями, а также повышает эффективность применения перешейков проводников у планарных контактных площадок.

Встроенный **помощник импорта** проектов позволяет импортировать схемы, платы, библиотеки из систем **PCAD, OrCAD, PADs, DxDesigner, Allegro PCB**, преобразовывая их в проекты Altium Designer

В Altium Designer возможно открыть готовый узел РЭУ с установленными в нем одной или несколькими платами и разрабатывать далее плату с учетом ее сопряжения с механическими деталями и другими платами (рисунок 6.7).



Рисунок 6.7- Окно создания трехмерных изображений

Изменения, внесенные в одну из ячеек плат или механических деталей, можно мгновенно перенести обратно в MCAD. Аналогично, исправив деталь корпуса или плату в MCAD, путем обновления моделей в Altium Designer, вносятся все изменения в редактор плат. В редакторе плат можно постоянно переключаться между *двумерным и трехмерным режимом*, учитывая сопряженность деталей в сборке и внося изменения на плоскости платы. Altium Designer - первая система проектирования устройств, реализуемых в виде печатной платы, признающая важность и актуальность программируемой логики в современных электронных устройствах. Подобное понимание реализуется в виде обширного инструментария для проектирования устройств на базе **ПЛИС**, при этом от разработчика не требуется знания языка VHDL - проект может быть введен в виде принципиальной схемы с использованием поставляемых библиотек готовых логических устройств (подобные библиотеки полностью синтезированы и протестированы).

Утомительная и кропотливая работа по синхронизации распиновки ПЛИС и топологии теперь может выполняться автоматически (рисунок 6.8).



Рисунок 6.8 - Окно распиновки ПЛИС

Инструментарий автоматического (или ручного) свапирования выводов автоматически оптимизирует распиновку ПЛИС для более качественной трассировки топологии.

Altium Designer поддерживает широкий перечень выходных форматов, таких как: ODB++, Gerber, NC Drill, IPC-D-356, VHDL, может генерировать списки соединений в форматах большинства сторонних систем проектирования, а также генерировать разнообразные отчеты. Встроенная и полностью интегрированная с системой проектирования топологии система технологического анализа и предпроизводственной доработки топологий CAMtastic позволяет выполнять 18 разнообразных проверок на технологичность проекта с возможностью автоматического устранения большинства ошибок, мощные средства редактирования фотошаблонов, файлов сверловки и фрезеровки позволяют внести необходимые коррективы (рисунок 6.9).



Рисунок 6.9 - Окно коррективки

Среди представленного инструментария присутствует обширный набор функций графического редактирования, создание многоместных шаблонов (в том числе и на основе разных топологий) и т.д. Отличительной особенностью Altium Designer является наличие возможности работы с *русифицированным интерфейсом* (рисунок 6.10).

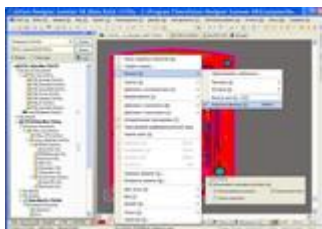


Рисунок 6.10 - Русификация интерфейса

Имеется возможность использовать полностью русифицированную программу или включить только всплывающие подсказки на русском языке, в то время как весь интерфейс будет представлен в стандартном англоязычном виде. Для этого необходимо активировать настройку *Use localized resources* на вкладке *System-General* диалогового окна *Preferences*. Диалоговое окно вызывается командой DXP/Preferences.

Altium Designer позволяет выполнять все задачи в рамках единой программной среды Design Explorer (DXP), которая запускается одновременно с запуском программы и предоставляет интерфейс работы со всеми редакторами.

Интуитивно понятный и динамический пользовательский интерфейс Altium Designer может индивидуально настраиваться под требования конкретного пользователя.

Главное окно Altium Designer содержит следующие основные элементы (рисунок 6.11):

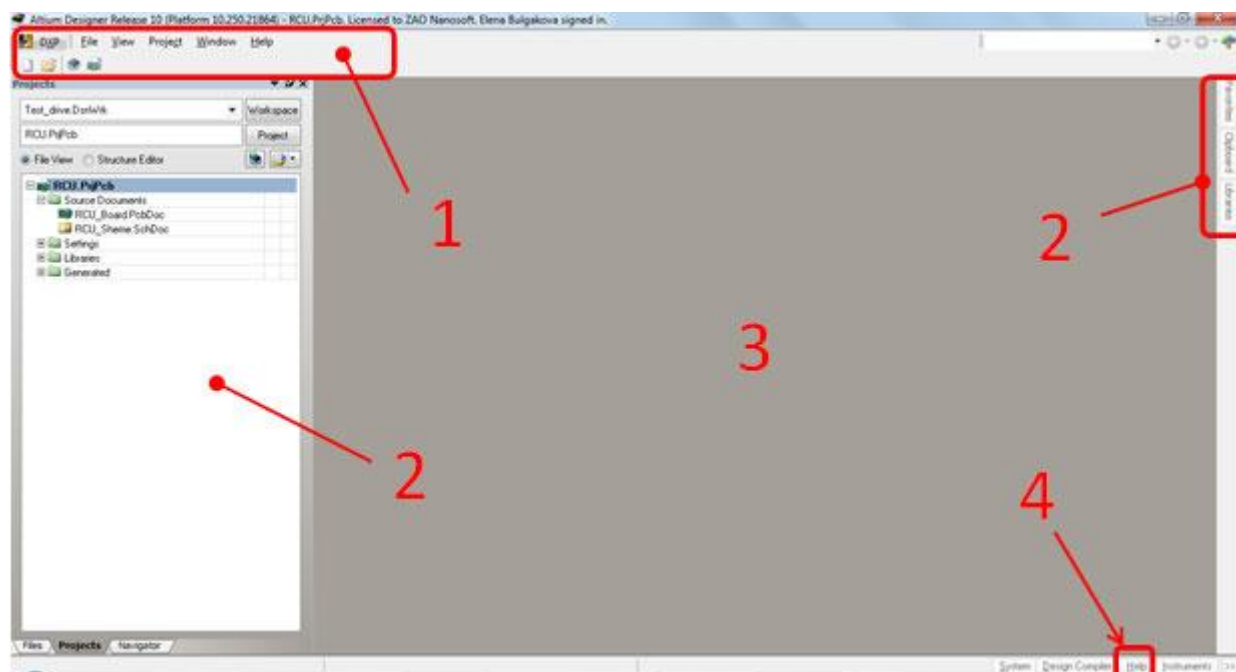


Рисунок 6.11- Главное окно Altium Designer

Здесь:

1. системное меню и панели инструментов, наполнение и состав которых меняются в зависимости от типа активного документа;
2. вспомогательные панели, которые имеют несколько режимов отображения;
3. рабочая область;
4. интегрированная поддержка Altium Designer, обеспечивающая доступ к страницам встроенной справки и ресурсам, расположенным в сети Интернет (Altium Wiki).

6.2 Разработка условного графического обозначения компонентов

Для создания новой библиотеки необходимо выполнить: *File > New > Library > Schematic Library*. Для работы с библиотекой символов необходимо открыть панель (которая вызывается по кнопке *SCH > SCH Library* в нижней левой части окна) и разместить её слева от рабочей области после чего интерфейс Altium Designer будет иметь вид, показанный на рисунке 6.12.

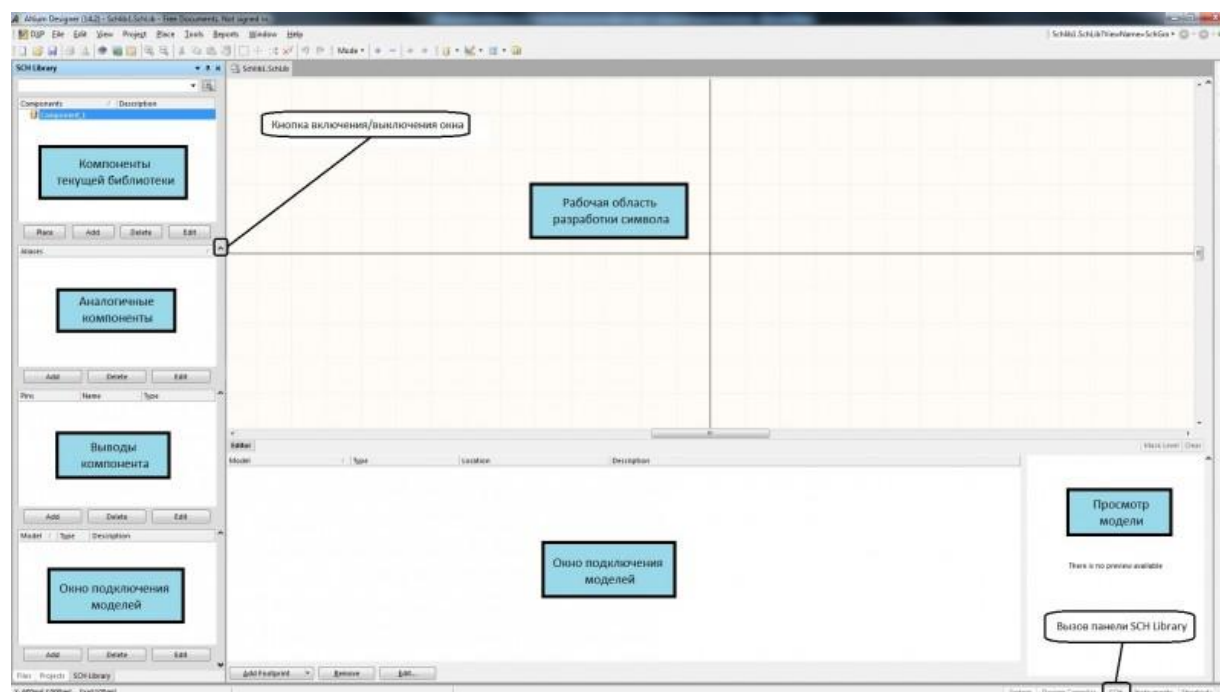


Рисунок 6.12 - Интерфейс редактора компонентов

Прежде чем приступить к разработке нового символа, необходимо настроить рабочую область, т.е. выбрать необходимые единицы измерения и сетки. Данная настройка производится в окне *Library Editor Work space*, которое вызывается командой *Tools>Document Options*. В появившемся окне на вкладке *Units* выбираются единицы измерения, причём они могут быть метрические и дюймовые (в нашем случае следует установить миллиметры). На вкладке *Library Editor Options* следует установить шаг сетки 2,5 мм для двух видов сеток (*Snap* – сетка перемещения курсора в режиме графической команды, *Visible* – сетка, отображаемая на экране). Кроме сеток, на данной вкладке могут быть установлены дополнительные параметры (рисунок 6.13).

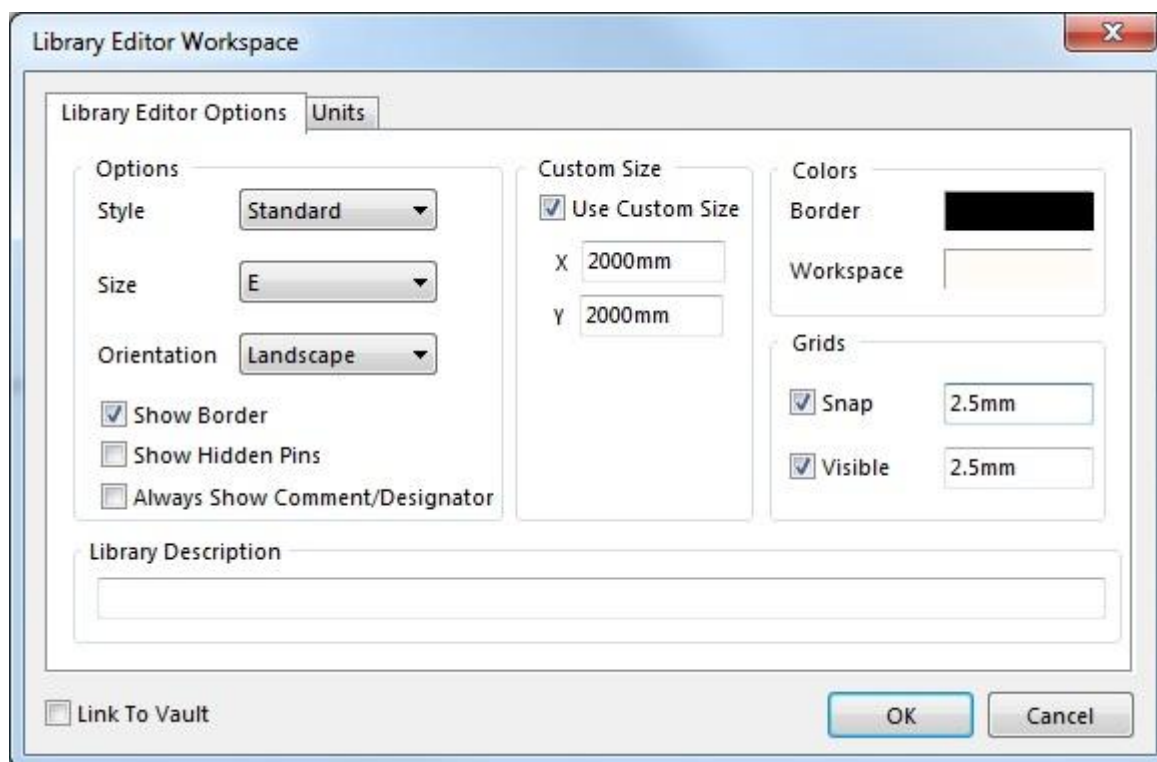


Рисунок 6.13 - Настройки рабочей области редактора символов

6.3 Алгоритм создания компонента на примере микросхемы.

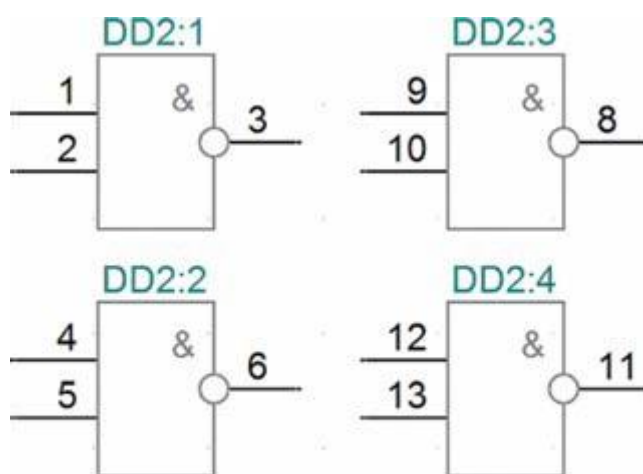


Рисунок 6.14 - Пример компонента – микросхема К1554ЛА3

Для создания компонента следует нажать кнопку *Add* под списком компонентов данной библиотеки в панели *SCH Library* и в появившемся окне написать название нового компонента. В результате этого новый компонент добавляется в список библиотеки. Далее процесс создания компонента можно разбить на три этапа:

- установка выводов компонента;
- рисование графики символа;
- установка параметров (атрибутов).

1. Выводы компонента устанавливаются командой *Place > Pin*, причём сразу после выполнения этой команды вывод становится привязанным к курсору, и в этот момент необходимо нажать клавишу *Tab* для установки свойств вывода. В открывшемся окне (рисунок 6.15) следует указать название и позиционное обозначение вывода, которое соответствует номеру вывода корпуса микросхемы. Обязательно следует указать длину вывода, кратную 2,5 мм; остальные параметры, такие как электрический тип вывода и специальные символы, добавляются позже.

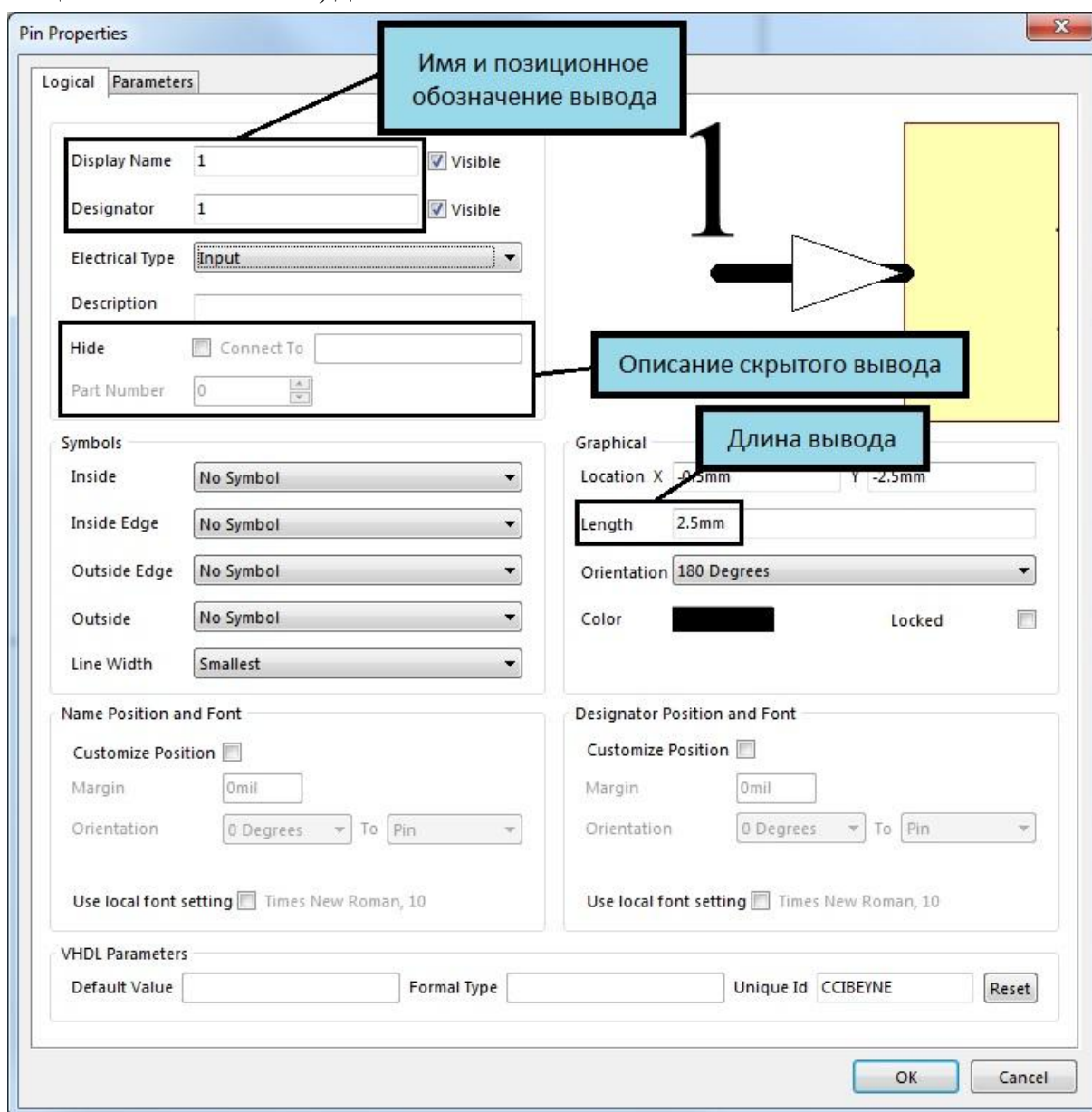


Рисунок 6.15 - Свойства вывода компонента

При установке вывода он привязан к курсору большим вертикальным крестом, с другой стороны маленький диагональный крестик показывает электрическое окончание вывода (рисунок 6.16).

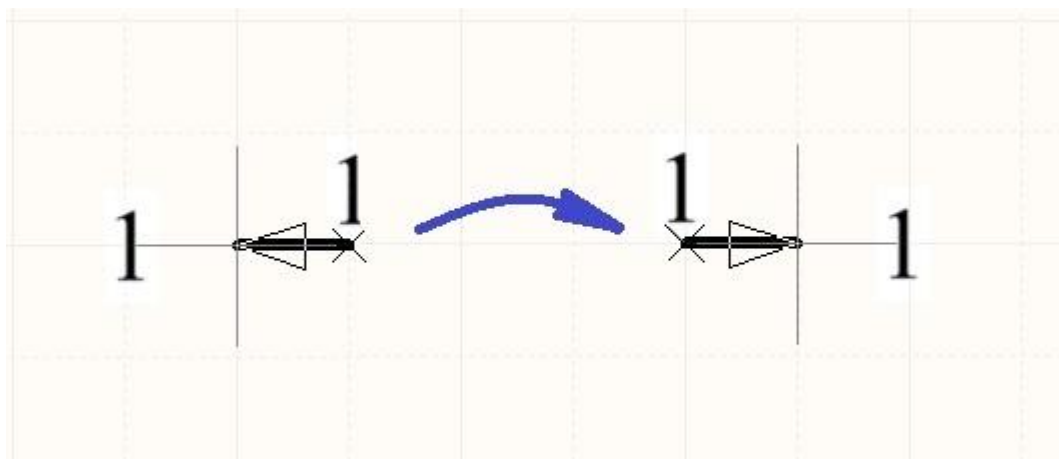


Рисунок 6.16 - Установка вывода

Для размещения первого вывода данного компонента его следует развернуть на 180 градусов нажатием клавиши *Space* (пробел). Установка вывода производится нажатием левой кнопки мыши, причём после установки в электрическом окончании вывода показаны четыре белые точки. Установим три вывода, как показано на рисунке 3, причём у вывода 3 следует отобразить инверсию, для чего в свойствах компонента пара метру *Outside Edge* (символ снаружи на границе контура) выбирается значение *Dot* (Знак инверсии).

2. На втором этапе создаётся графика УГО, для чего используются команды рисования (*line*, *Ellipses*, *Arc* и др.). В нашем случае выбираем команду *Place > Line* и рисуем прямоугольник, как показано на рисунке 3. Толщина и свойства рисуемой линии могут быть изменены во время рисования при нажатии клавиши *Tab*, причём толщина линии задаётся условно *Smallest*, *Small*, *Medium* и *Large* (*Small* соответствует толщине 2,54 мм).

При рисовании линии могут быть использованы пять режимов, переключение между которыми выполняется клавишей *Space* (Пробел). Во время рисования графики символа может возникнуть необходимость переключения шага сетки. Для переключения между стандартными режимами сеток (установка которых будет рассмотрена в следующей статье) необходимо нажать клавишу *G* (при этом сетка будет циклично переключаться между значениями 1, 2,5 и 5 мм). При необходимости включить шаг сетки, отличный от указанных выше, нажмите последовательно клавиши *V* и *G*, после чего в появившемся выпадающем меню выберите команду *Set Snap Grid*.

Создав первую ячейку микросхемы, необходимо повторить первые два шага и создать остальные три ячейки, при этом на символе позиционные обозначения выводов должны совпадать с реальными номерами выводов микросхемы. Для создания новой ячейки внутри одного компонента выпол-

няется команда *Tools > New Part*. В рассматриваемом случае выводы 7 и 14 относятся к питанию и земле и не должны быть показаны на символе.

Для установки скрытых выводов необходимо (командой *Place > Pin*) зайти в свойства компонента нажатием клавиши *Tab*. В свойствах компонента после установки соответствующего обозначения и названия следует включить опцию *Hide* и в поле *Connect To* задать название цепи, к которой по умолчанию будет подключаться данный вывод. Кроме этого, для таких выводов обычно ставят значение 0 в поле *Part Number*, что говорит о непринадлежности данного вывода к какой-то конкретной ячейке микросхемы. Результат создания символа показан на рисунке 6.17.

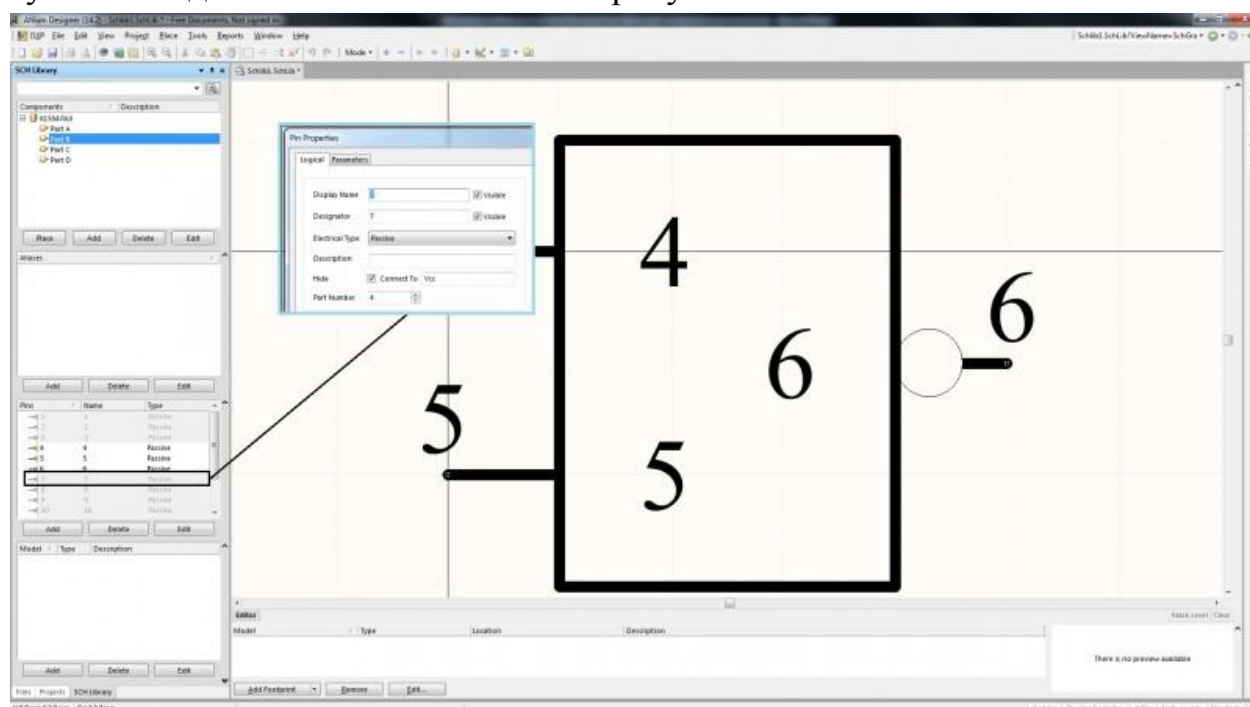


Рисунок 6.17 - Установка скрытых выводов

3. При создании символа в программе PCAD после вышеописанных шагов требовалось указать точку привязки и установить обязательный атрибут *RefDes*. В программе Altium Designer точка привязки определяется началом координат рабочей области (перекрестие в центре экрана), а позиционное обозначение (*RefDes*) автоматически добавляется над корпусом микросхемы.

Третьим этапом при создании символа является добавление атрибутов, которые в дальнейшем могут быть использованы для оформления текстовой документации (перечней и спецификаций). В программе PCAD этот этап выполнялся последним, при создании компонента в приложении *Library Executive*. В программе Altium Designer в связи с тем, что изменена структура библиотек, компонент создаётся уже сейчас! Для установки атрибутов

компонента необходимо выполнить двойной щелчок мыши на его названии в панели *SCH Library*. В появившемся окне свойств компонента (рисунок 6.18) необходимо указать префикс позиционного обозначения компонента и при необходимости добавить параметры, которые в дальнейшем могут быть использованы для создания спецификации и перечня элементов.

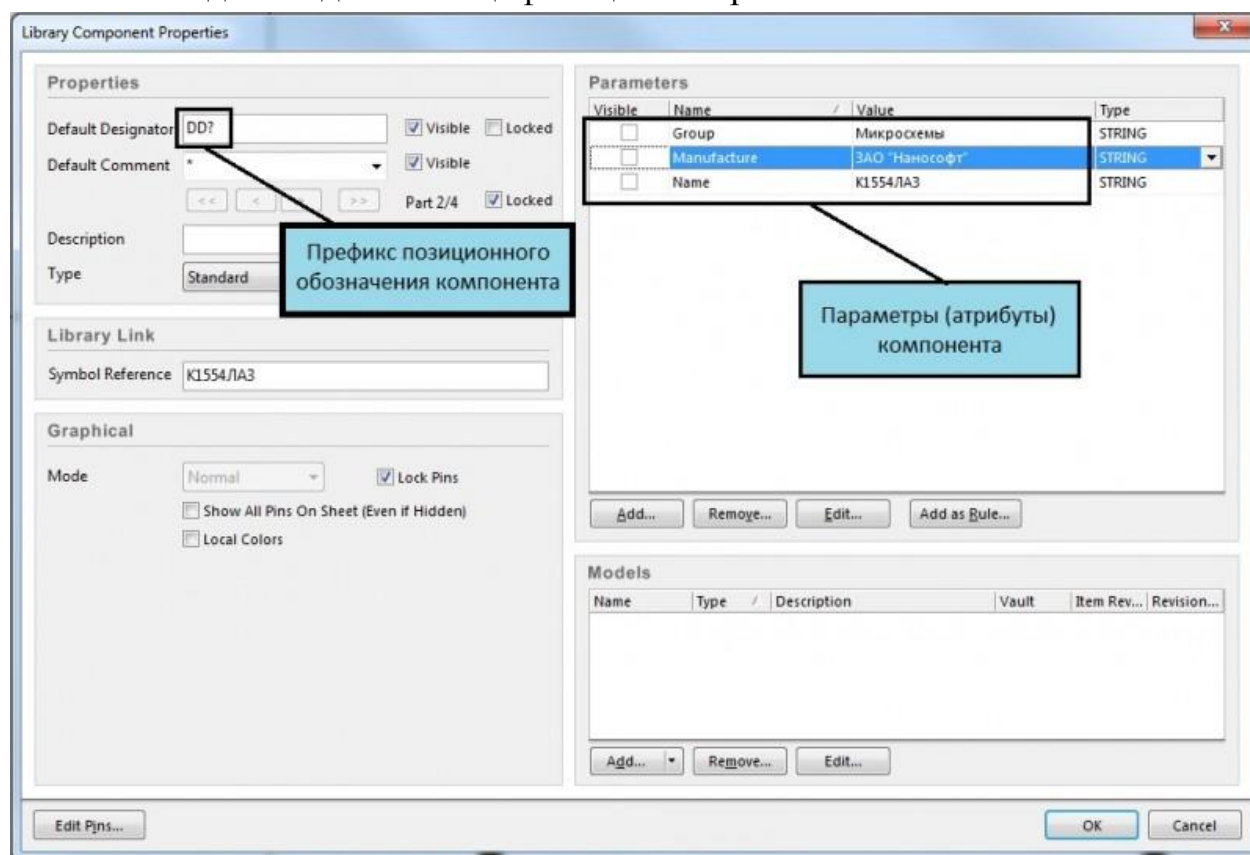


Рисунок 6.18 - Свойства компонента

После нажатия кнопки *OK* можно выполнить сохранение библиотеки нажатием пиктограммы с изображением дискеты.

6.4 Создание топологического посадочного места компонента в Altium Designer

При реализации баз компонентов в программе PCAD использовались библиотеки одного типа (с расширением .lib). Эти библиотеки можно было назвать интегрированными, т.к. внутри них хранились символы, посадочные места и сами компоненты. В программе Altium Designer, как было показано выше, для каждого типа объектов имеются свои библиотеки. При этом библиотеки символов, по сути, представляют собой библиотеки компонентов, однако библиотеки посадочных мест имеют отдельное расширение; остальные три типа моделей (3D, Spice, IBIS) не имеют своего типа библиотек и хранятся в виде отдельных файлов.

Итак, после создания компонента в виде символа микросхемы K1554ЛА3 приступим к созданию посадочного места этой микросхемы. Начнём с создания новой библиотеки, для чего выполним команду *File > New > Library > PCB Library*.

Для работы с редактором посадочных мест используется панель *PCB Library*, которая может не запуститься автоматически. Для отображения указанной панели необходимо найти её в группе панелей *PCB* в левой нижней части экрана. После этого интерфейс программы примет вид, показанный на рисунке 6.19, причём нетрудно заметить, что по умолчанию новый документ запускается в милах (mil). Такие операции, как настройка рабочей области, сетки, свойства линии и других графических объектов «по умолчанию» мы будем рассматривать в следующей статье; в данном случае установим параметры только для текущей библиотеки.

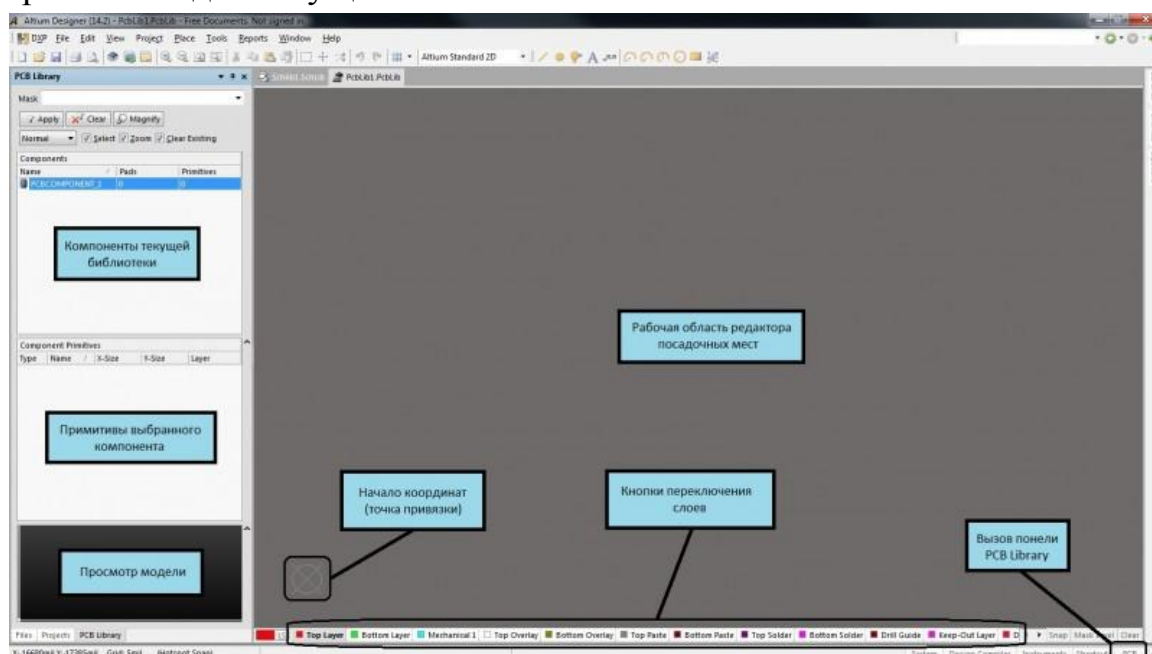


Рисунок 6.19 - Интерфейс редактора посадочных мест

Для установки параметров выполним команду *Tools>Library Options*, и на экране появится окно, показанное на рисунке 6.20, где выставляются единицы измерения (в поле *Units*) и шаг привязки (в поле *Snap Options*) устанавливаем «*1x Snap Grid*», что означает шаг привязки равен шагу сетки, нажати-ем кнопки *OK*.

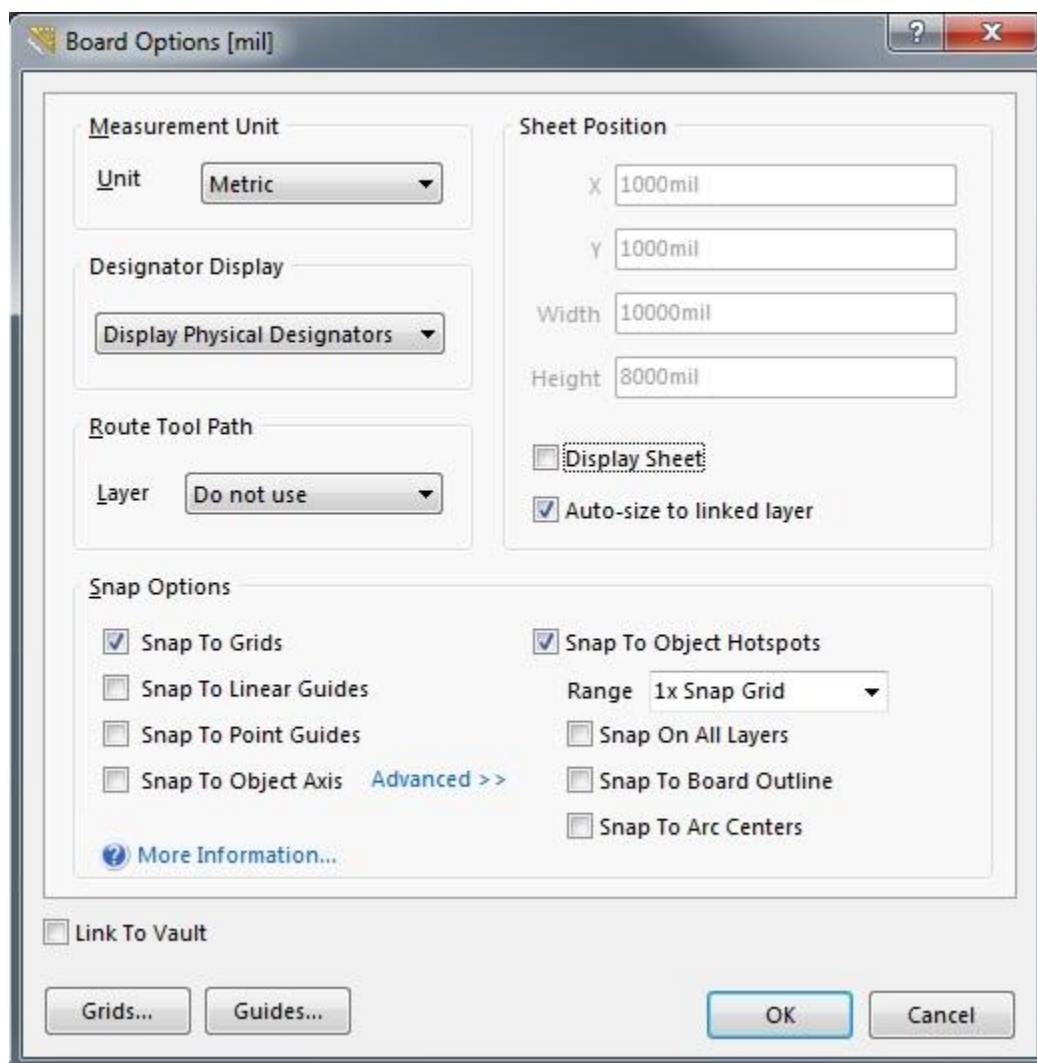


Рисунок 6.20 - Настройки рабочей области редактора посадочных мест

Приступим непосредственно к созданию посадочного места, которое состоит из двух этапов:

- Установка контактных площадок;
- разработка графического изображения корпуса компонента.

Создание посадочного места может быть выполнено двумя способами: вручную и с помощью мастера. Сначала рассмотрим «ручной» вариант на примере посадочного места резистора, а затем с помощью мастера реализуем посадочное место для описанной выше микросхемы.

Для создания нового посадочного места выполним команду *Tools > New Blank Component*, после чего в панели *PCB Library* появится новое посадочное место с условным названием. Чтобы задать необходимое название создаваемому корпусу, необходимо выполнить двойной щелчок мыши на его надписи в панели *PCB Library* (в нашем случае вводим название Resistor).

1. Для установки контактных площадок выполним команду *Place > Pad*, и нажмём клавишу *Tab* для описания параметров контактной площадки.

2. Вторым этапом создания посадочного места является разработка графики, причём она должна быть выполнена в определённом слое. Более подробно работа со слоями в программе Altium Designer будет рассмотрена в одной из последующих статей. В нашем случае контур корпуса компонента должен быть выполнен в слое *Top Overlay*. Выбор слоёв производится кнопками с их названиями в нижней части экрана (см. рис. 1). Теперь в выбранном слое будем создавать контур компонента с помощью команды *Place > Line*, которая имеет некоторые отличия от аналогичной команды, используемой в редакторе символов. Во-первых, переключение сеток при нажатии клавиши *G* здесь происходит не между заранее заданными значениями, а путём выбора сетки из списка (можно задать пользовательское значение *Set Snap Grid*). Во-вторых, вместо пяти режимов рисования каждый режим разбит на подрежимы, как показано на рисунке 6.22.

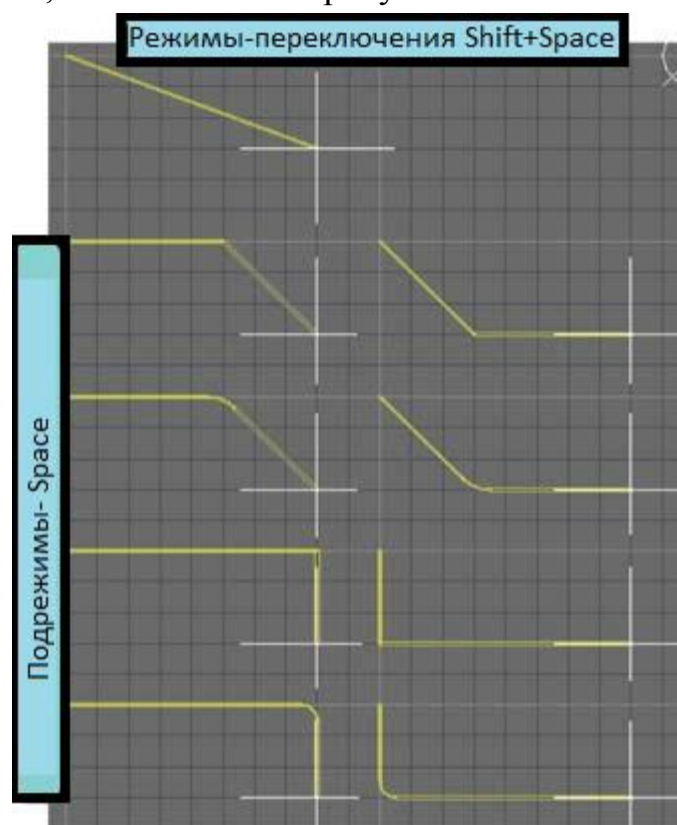


Рисунок 6.22 - Режимы рисования линии

Режимы переключаются комбинацией клавиш *Shift + Space* и отличаются ортогональностью. Подрежимы переключаются клавишей *Shift* и отличаются положением начального сегмента. После завершения рисования корпуса резистора изображение на экране должно соответствовать рисунку 6.23.

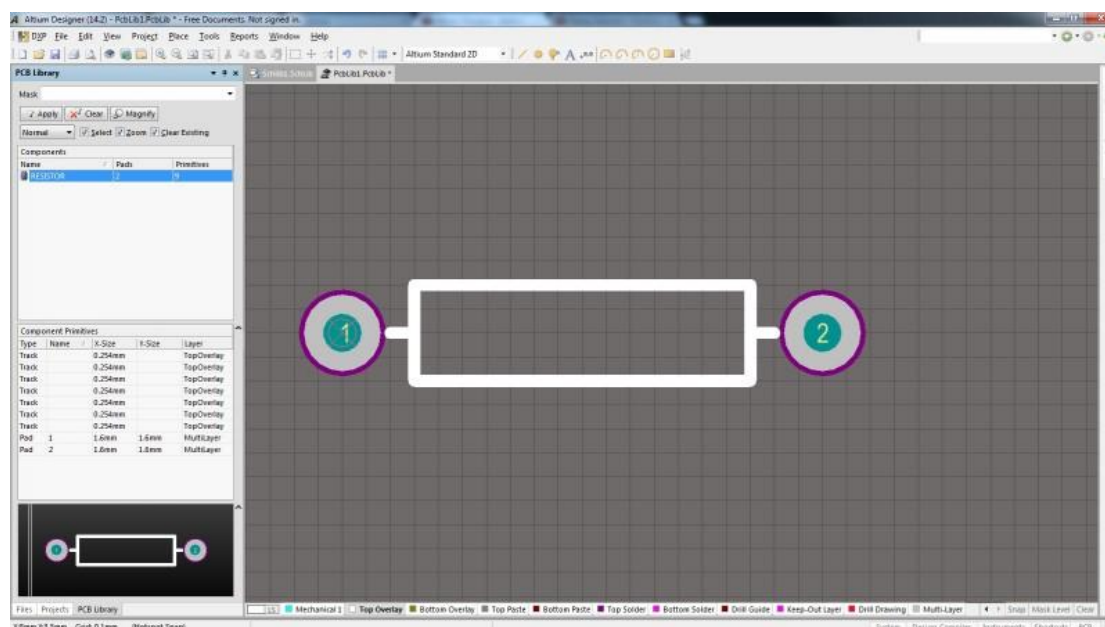


Рисунок 6.23 - Готовое посадочное место

В качестве особенностей данного редактора (по сравнению с PCAD Pattern Editor) необходимо отметить следующие:

- Не ставится атрибут *RefDes*; здесь, как и в редакторе символов, он будет установлен автоматически над корпусом компонента;
- Не задаётся точка привязки, и отсутствуют элементы *Glue Point* (точка приклейки), *Pick Point* (точка захвата для автоматической установки) и *Test Point* (тестовая точка). Точка привязки по умолчанию задана в начале координат, а точки *Glue Point* и *Pick Point* с ней совпадают, поэтому, если возникает необходимость в их использовании, следует располагать начало координат в геометрическом центре компонента. Данную операцию удобно выполнять по окончании разработки посадочного места (с помощью команды *Edit>SetReference>Center*). Когда разработка посадочного места резистора закончена, покажем, как создать более сложное посадочное место микросхемы в режиме мастера.

Для запуска мастера выполним команду *Tools > Component Wizard*. На экране появится диалоговое окно мастера создания посадочных мест, и после нажатия кнопки *Next* будет предложено выбрать тип корпуса и единицы измерения (см. рисунок 6.24).

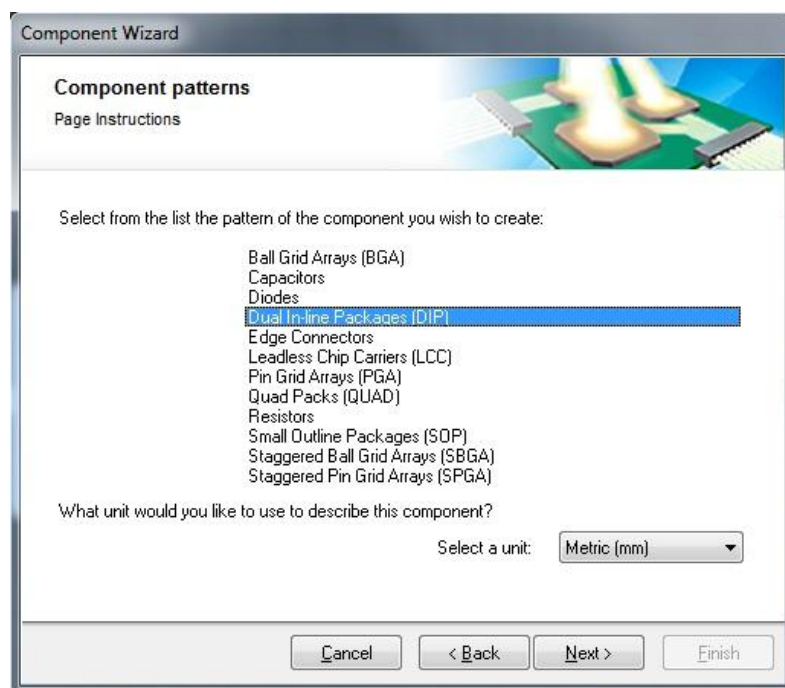


Рисунок 6.24 - Мастер создания посадочных мест

Далее, в пошаговом режиме будет предложено задать набор параметров, которые описывают создаваемую модель, – например, параметры контактной площадки, число выводов, толщину линии корпуса и т.д. В нашем случае создаём корпус с 14 выводами.

На последнем шаге будет предложено указать название посадочного места. После завершения работы мастера сохраним библиотеку нажатием пиктограммы с изображением дискеты.

Теперь мы имеем в своём распоряжении две библиотеки: в одной хранится символ микросхемы, а в другой – посадочные места резистора и микросхемы. Последним этапом нашей работы, по результатам которого можно будет использовать полнофункциональный компонент на схеме и плате, является установка ссылки для компонента на модель посадочного места. Данная процедура может быть выполнена различными способами, и существуют несколько вариантов реализации библиотек. В рассматриваемом примере будет показан метод, который предполагает хранение всех компонентов и моделей в виде интегрированных библиотек.

Для создания интегрированной библиотеки выполним команду *File> New>Project>Integrated Library*, после чего в структуре панели *Project* добавится новый документ, который необходимо сохранить, нажав на нём правой кнопкой мыши и выполнив команду *Save Project*. Теперь необходимо добавить в структуру созданного проекта ранее созданные библиотеки путём их перемещения в дереве панели *Project* (рисунок 6.25).

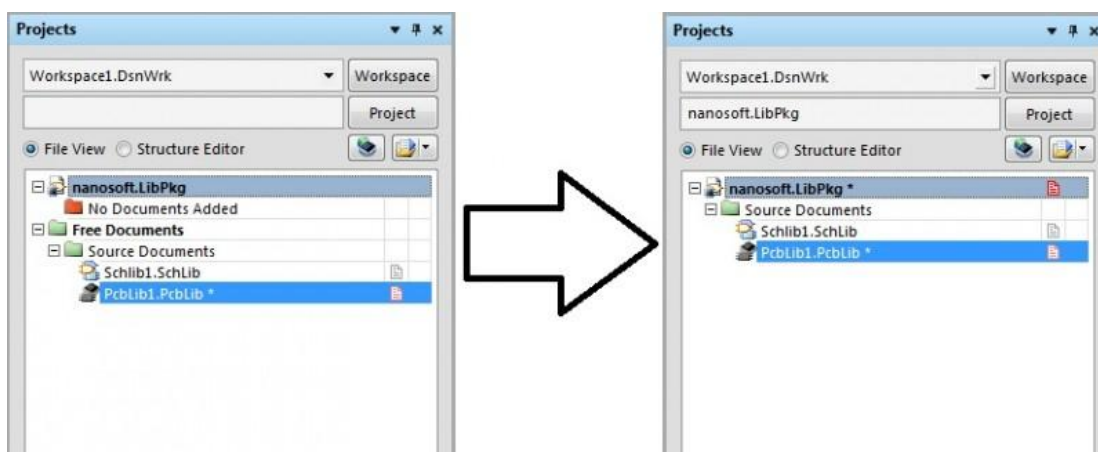


Рисунок 6.25 - Создание интегрированной библиотеки

Когда все необходимые библиотеки находятся в структуре интегрированной библиотеки, можно выполнять подключение моделей к соответствующим компонентам. В нашем случае необходимо открыть библиотеку символов и нажать кнопку *Add Footprint* в окне подключения моделей. В результате на экране появится окно *PCB Model* (рисунок 6.26), где после нажатия кнопки *Browse* необходимо указать требуемое посадочное место. Причём посадочные места, доступные по кнопке *Browse*, сразу имеют ссылку на библиотеку посадочных мест, которая находится в интегрированной библиотеке.

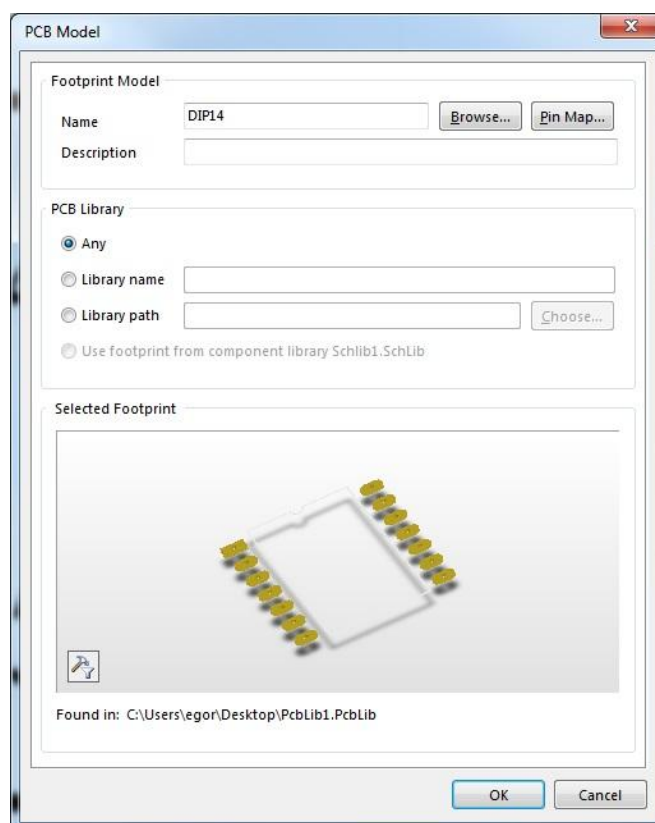


Рисунок 6.26 - Подключение посадочного места

Теперь мы имеем готовый компонент K1554ЛА3, но прежде чем его использовать, необходимо сделать проверку. Она может быть выполнена по отдельности на каждом этапе разработки (символ, посадочное место и т.д.), или можно выполнить полную проверку библиотеки компонентов.

Проверки первого типа выполняются командой *Reports > Component Rule Check*, как в редакторе символов, так и в редакторе посадочных мест, и фиксируют простейшие ошибки: наличие дублирующихся выводов, атрибутов и т.д.

Общая проверка библиотеки компонентов выполняется компиляцией, по результатам которой будет сгенерирован файл *.IntLib, который можно в дальнейшем использовать для работы при создании схем. Итак, выполним компиляцию проекта *Project> Compile Integrated Library...*, по результатам которой интегрированная библиотека будет автоматически подключена к программе и готова к использованию. В нашем случае мы не стали задавать настройки компиляции, т.е. сделали проверку библиотеки по правилам, заданным «по умолчанию» и, соответственно, избежали каких-либо ошибок в проекте.

В заключение следует отметить, что процесс разработки библиотек в программе Altium Designer значительно упрощён (по сравнению с PCAD) за счёт исключения этапа заполнения таблицы соответствия выводов, но при этом немного усложнён этап разработки символа, поскольку теперь необходимо рисовать по отдельности каждую ячейку сложной микросхемы.

Задание

Создать компонент в соответствии с вариантом задания (Приложение А, схема 2). Для этого в программе Altium Designer:

1. Создать новую библиотеку.
2. Настроить рабочую область.
3. Добавить новый компонент в список библиотеки.
4. Установить выводы компонента.
5. Нарисовать графику символа.
6. Установить параметры (атрибуты).
7. Установить контактные площадки посадочного места.
8. Разработать графическое изображение корпуса компонента.
9. Создать интегрированную библиотеку.
10. Подключить модели к соответствующим компонентам.

11. Сделать проверку компонентов и общую проверку библиотеки компонентов.

Литература

1. Сабунин А.Е. Altium Designer. Новые решения в проектировании электронных устройств.— М.: Солон-Пресс, 2009.— С.432.— ISBN 978-5-91359-064-0.
2. Суходольский В.Ю. Altium Designer. Проектирование функциональных узлов РЭС на печатных платах.— СПб.: БХВ-Петербург, 2010.— С. 480.— ISBN 978-5-9775-0542-0.
3. Горячев Н.В. Типовой маршрут проектирования печатной платы и структура проекта в САПР электроники ALTIUM DESIGN // Надежность и качество — 2011: труды Международного симпозиума: в 2 т. / Под ред. Н. К. Юркова.. — Пенза: Изд-во ПГУ, 2011. — С. 120—122.

ВАРИАНТ 4

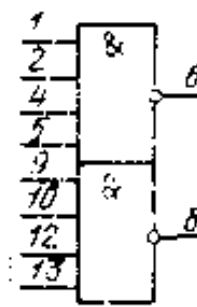
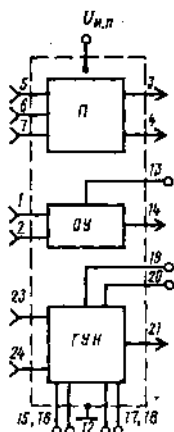


Схема 1- Микросхема КР1005ХА8

Схема 2- К155ЛА1

ВАРИАНТ 5

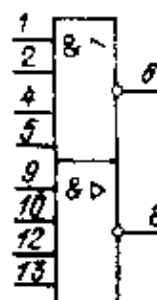
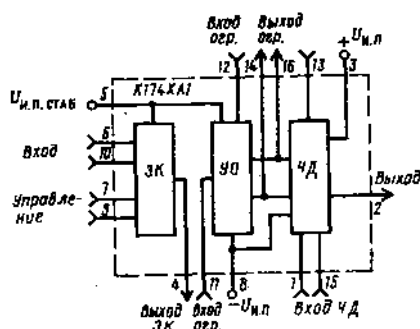


Схема 1- Микросхема ИС К174ХА1

Схема 2- К555ЛА6

ВАРИАНТ 6

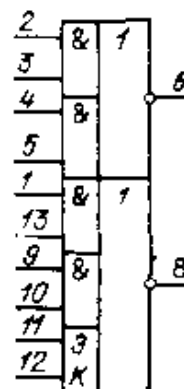
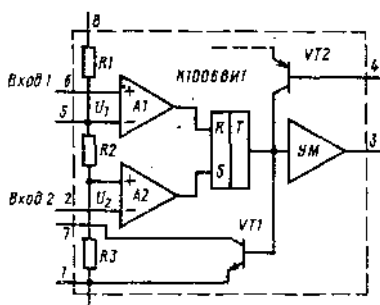


Схема 1- Микросхема таймера К1006ВН1

Схема 2- К155ЛР1

ВАРИАНТ 7

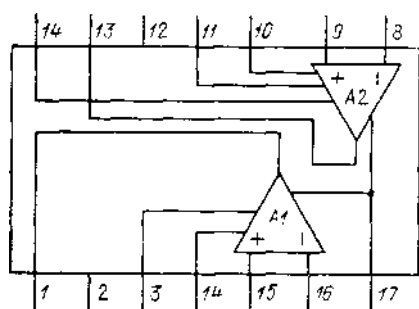


Схема 1- Операционный усилитель КМ551УД2.

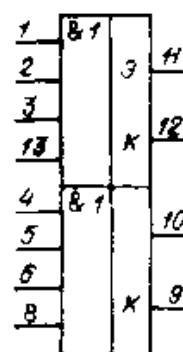


Схема 2- К155ЛД1

|||||

ВАРИАНТ 8

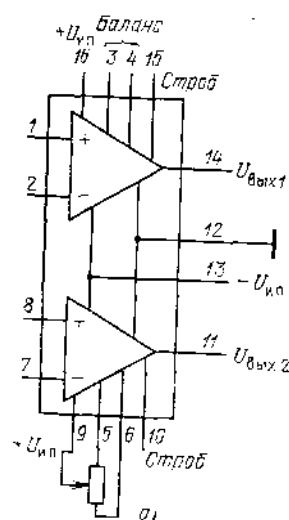


Схема 1- Компаратор КМ597СА3

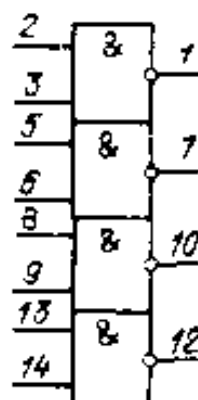


Схема 2- К155ЛД1

|||||

ВАРИАНТ 9

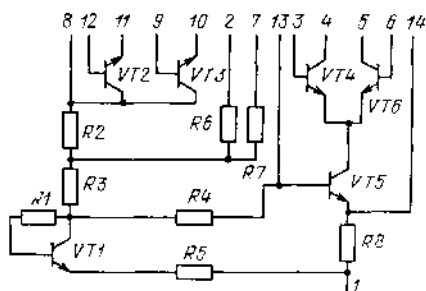


Схема 1- Микросхема К175УВ4

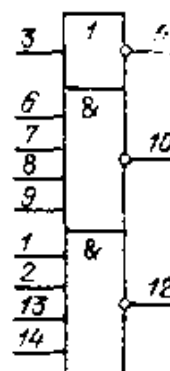
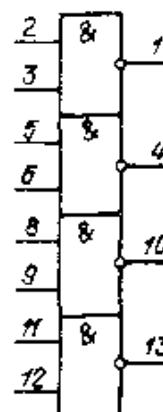
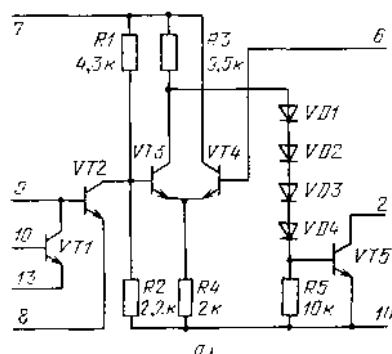
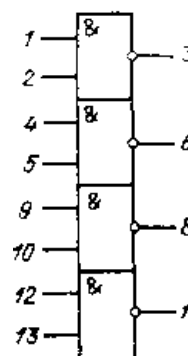
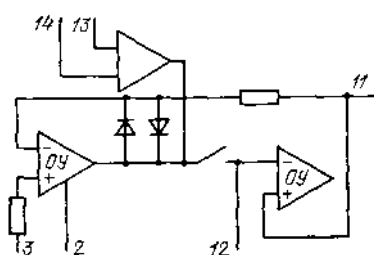


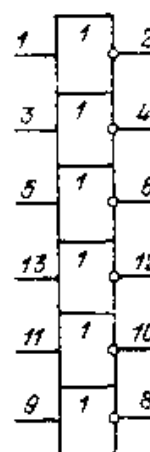
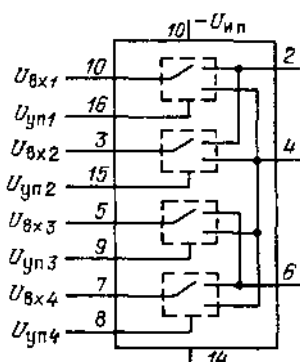
Схема 2- К155ЛБ1

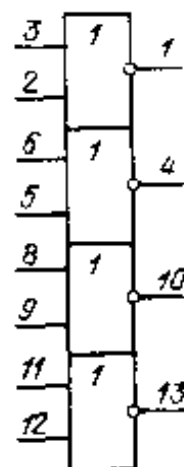
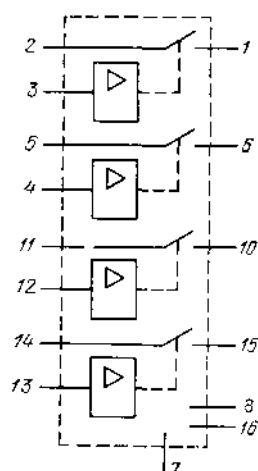
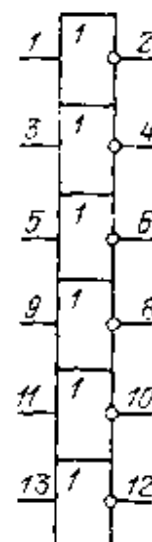
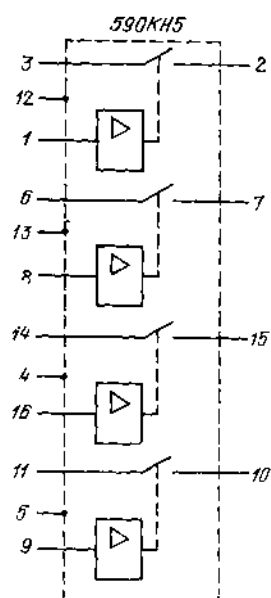
ВАРИАНТ 10**Схема 1- Предварительный усилитель К174УНЗ****Схема 2- К155ЛА8**

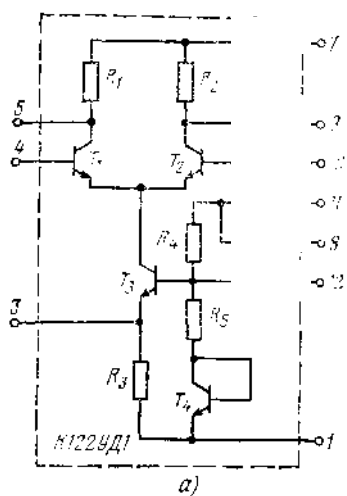
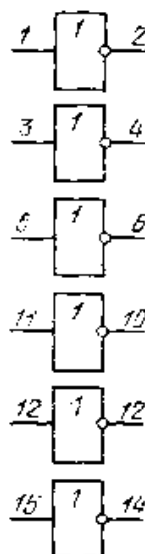
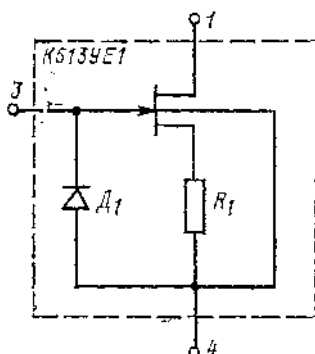
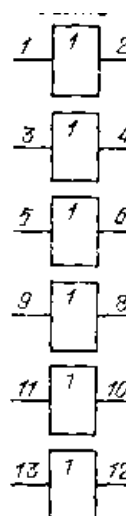
|||||

ВАРИАНТ 11**Схема 1- Устройство выборки-хранения КР1100СК2****Схема 2- К530ЛА9**

|||||

ВАРИАНТ 12**Схема 1- Микросхема коммутатора КР590КТ1****Схема 2- К555ЛН1**

ВАРИАНТ 13**Схема 1-** Четырехканальный ключ КР590КН2**Схема 2-** К555ЛЕ1**ВАРИАНТ 14****Схема 1-** Четырехканальный ключ КР590КН5**Схема 2-** К530ЛН2

ВАРИАНТ 15**Схема 1-** Микросхема К122УД1**Схема 2-** К155ЛНЗ**ВАРИАНТ 16****Схема 1-** Истоковый повторитель К513УЕ1**Схема 2-** К155ЛП9

ВАРИАНТ 20

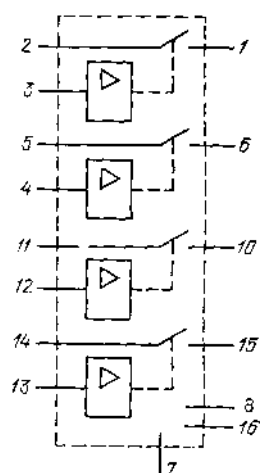


Схема 1- Четырех - канальный ключ КР590КН2

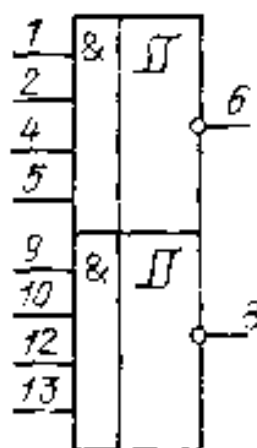


Схема 2- К155ТЛ1

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №7

КОНСТРУКТИВНЫЙ РАСЧЕТ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

Цель работы: изучение методики расчета параметров печатных плат радиоэлектронных устройств.

Краткие сведения

7.1. Определение габаритов печатных плат (ПП)

С учетом размеров ИС заданной серии (размеры по справочнику) и габаритов других элементов (транзисторов, резисторов и пр.), с учетом расстояния между корпусами и шага координатной сетки (2.5 или 0.5 мм) (не менее 5 мм) определяем размеры платы. Учесть место для установки разъема, крепления арматуры. Выбрать ближайший из нормализованных размеров.

Размер одной из сторон выбирается из ряда: 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70, 80, 90, 100, 120, 140, 160, 180, 200, 220, 240. Вторая сторона выбирается с учетом следующих соотношений: 1:1, 1:3, 2:3, 2:5 (1:4).

7.2. Выбор материала ПП

Одностороннее и двусторонние ПП –

ГФ-1-35	СФ-1-35
ГФ-2-35	СФ-1-35
ГФ-1-50	СФ-1-50
ГФ-2-50	СФ-2-50

Здесь:

(ГФ) - гетинакс фольгированный,

(СФ) - стеклотекстолит фольгированный.

Многослойные и гибкие ПП

ФТС-1-20А

ФТС-2-20А

ФТС-1-35А

ФТС-2-35А

Стеклотекстолит фольгированный травящийся (ФТС)

*Теплостойкие двусторонние
и многослойные гибкие ПП*

СТФ-1-35

СТФ-2-35

*Двусторонние платы, изготавливаемые полуаддитивным
методом*

СТЭФ-1-2ЛК

Здесь: (СТЭФ) - стеклотекстолит без фольги.

Многослойные ПП

СПТ-3

Здесь: (СПТ) - стеклотекстолит прокладочный

7.3. Определение толщины ПП

Для многослойных ПП толщина определяется числом слоев и толщиной клеевой прослойки. Толщина плат с печатным разъемом определяется величиной розеточной части разъема. Для одно- и двусторонних плат толщина чаще всего определяется диаметром отверстий. Проверяется на резонансную частоту.

$$H_{расч} \geq \frac{d_{min}}{\gamma},$$

где d_{min} – минимальный диаметр металлизированного отверстия; γ – отношения $\frac{d_{min}}{H}$ и выбирается из таблицы 7.1:

Таблица 7.1

Наименование элемента	Усл. обозн.	Классы плотности печатного монтажа		
		1	2	3
Отношение $\frac{d_{min}}{H}$	γ	0.5	0.4	0.3
Расстояния между проводником и конт. площадкой, проводником и КП, проводником и металл. отв.	S (мм)	0.5	0.25	0.15
Расстояния от края металл. отв. до края контактной площадки	$b_{ин}$ (мм)	0.05	0.035	0.025
Макс. отклонение расст. между центрами монт. отв.	Δ (мм)	± 0.2	± 0.1	± 0.1
Ширина проводника	t_n (мм)	0.5	0.25	0.15

$$d_{min} = d_{м.отв} = d_{св} - (0.1 \div 0.15).$$

Из таблицы 7.2 выбирается ближайшее значение H (мм):

Таблица 7.2

ГФ-35	ГФ-50	СФ-35	СФ-50	ФТС-20(35)		СТФ	СТЭФ	СПТ
1.5	1	0.8	0.5	0.08	0.1	0.13	1.5	0.025
2	1.5	1	1	0.15	0.12	0.15		0.06
2.5	2	1.5	1.5	0.18	0.19	0.2		
3	2.5	2	2	0.27	0.14	0.25		
	3	2.5	2.5	0.5	0.23	0.35		
		3	3		0.5	0.5		
						0.8		
						1		
						1.5		
						2		
						2.5		
3								

7.4. Определение минимального диаметра контактной площадки

$$D_{\min} = D_{1\min} + 1.5h_{nm} + h_p \quad (\text{таблица 7.3})$$

$$D_{1\min} = 2(b_m + d_{\max} / 2 + \delta_{отв} + \delta_{кп}) \quad (\text{таблица 7.2, 7.3})$$

$$d_{\max} = d_{св} + \Delta d$$

$h_p=0$ (для металлического резиста, который может быть оплавлен).

7.5. Определение максимального диаметра контактной площадки

$$D_{\max} = D_{u\max} + h_p + \Delta \mathcal{E}$$

$$D_{u\max} = D_{u\min} + \Delta D_u$$

$$D_{u\min} = D_{\min} - h_p$$

Таблица 7.3

Толщина предварительно осажденной меди, мм	$h_{\text{пм}}$	0,005÷0,008
Толщина металлического резиста	h_p	0,02
Погрешность диаметра отверстий после сверления, мм	Δd	0,01÷0,03
Погрешность расположения отверстий и базирования плат на сверлильном станке, мм	$\delta_{\text{отв}}$	0,08
Погрешность экспонирования фотошаблона и расположения отверстий на заготовке и фотошаблоне, мм	$\delta_{\text{кп}}$	0,095
Погрешность изготовления окна фотошаблона, мм	$\Delta D_{\text{ш}}$	0,01÷0,03

Погрешность диаметра контактной площадки фотокопии при экспонировании рисунка	$\Delta\Xi$	0,01÷0,03
Минимальная эффективная ширина проводника	$t_{\pi 1 \min}$	0,18 0,15 для плат, выполненных электрохимическим способом (полуаддитивным)
Погрешность расположения относительно координат сетки на фотошаблоне проводника	$\delta_{шт}$	0,03÷0,06
Толщина наращенной гальванической меди	H_{Γ}	0,05÷0,06
Погрешность изготовления линий фотошаблона, мм	$\Delta t_{ш}$	0,03÷0,06

7.6. Определение минимальной и максимальной ширины печатного проводника (на плате и фотошаблоне).

Из условия достаточного сцепления (без отслаивания) проводника с диэлектриком; зависит от адгезионных свойств материала основания и гальваностойкости фольги.

$$\left. \begin{aligned} t_{\pi \min} &= t_{\pi 1 \min} + 1,5h_{\pi\pi} + h_p \\ t_{\pi \max} &= t_{ш \max} + h_p + \Delta\Xi \\ t_{ш \max} &= t_{ш \min} + \Delta t_{ш} \\ t_{ш \min} &= t_{\pi \min} - h_p \end{aligned} \right\} \text{ фотошаблон}$$

7.7. Определение числа проводников, которые можно провести между двумя соседними отверстиями

$$n_n = \frac{l_{\min} - D_{\max} - 2\delta_{\kappa\pi} - S_{\min}}{t_{n\max} + 2\delta_{шт} + S_{\min}} \quad (\text{табл. 3, табл. 1.})$$

Здесь $l_{\min}$ — минимальное расстояние между двумя соседними отверстиями (из условия). Если n_n получается отрицательным, это значит что нельзя провести ни одного проводника, тогда определяется минимальное расстояние между двумя соседними отверстиями, позволяющее провести хотя бы один проводник.

$$l_{\min} = (D_{\max} + 2\delta_{\kappa\pi}) + (t_{\pi \max} + 2\delta_{шт})n_n + S_{\min}(n_n + 1).$$

Проверочный расчет двусторонней печатной платы

7.8. Максимально допустимая ширина печатного проводника (исходя из допустимой плотности тока).

$$t_{\pi} \geq \frac{I_{\max}}{h_{\pi}J},$$

$h_{\pi} = h_{\phi} + h_{\pi\pi} + h_{\Gamma}$ — толщина печатных проводников при комбинированном позитивном методе изготовления (таблица 3).

h_{ϕ} — толщина фольги (из характеристик материала). Обычно для ПП принимается $J=30\text{А/мм}^2$.

Если получается $t_{\pi} > t_{\pi \min}$ из предварительного расчета (п. 6), то принимается t_{π} .

7.9. Падение напряжения в печатном проводнике

$$\Delta U = I_{\max} \frac{\rho \cdot l}{h_{\pi} t_{\pi}}; \rho = 0,02 \text{ Ом мм}^2/\text{м}$$

l — длина максимального проводника.

7.10. Мощность потерь:

$$P_{\pi} = 2\pi f C U^2 \operatorname{tg} \delta$$

Для постоянного тока $f=1$

$$\operatorname{tg} \delta = 0,002$$

$\epsilon = 6$ (для стеклотекстолита)

$$C = 9 \cdot 10^{-3} \frac{\epsilon \cdot F}{H}$$

F — суммарная площадь печатных проводников.

H — толщина платы (табл. 2).

7.11. Величина паразитной поверхностной емкости между двумя проводниками

$$C_{\text{пар}} = C_{\text{пог}} \cdot l_{\pi}$$

$C_{\text{пог}}$ (пФ/см) — погонная емкость проводника

l_{π} — длина перекрытия (см)

$C_{\text{пог}}$ зависит от отношения d/b , где

d — толщина изоляции

b — ширина проводника и определяются по таблице

d/b	$C_{\text{пог}}$
0,3	1,15
0,5	1,1
1,0	0,8
2,0	0,7
3,0	0,5

7.12. Взаимоиндуктивность двух параллельных печатных проводников равной длины:

$$M = 0,02 \left(l_{\pi} \lg \frac{\sqrt{l_{\pi}^2 + L_0^2} + l_{\pi}}{L_0} - \sqrt{l_{\pi}^2 - L_0^2} + L_0 \right)$$

L_0 — расстояние между осевыми линиями двух параллельных проводников.

L_{π} — длина параллельных участков двух проводников разной длины:

$$M = 0,02 \left[4,606 \cdot l_{n1} \lg \frac{l_{n1} + l_{n2} + \sqrt{(l_{n1} + l_{n2})^2 + s^2}}{s} + 2,303(l_{n1} + l_{n2}) \lg \frac{l_{n1} + l_{n2} + \sqrt{(l_{n1} + l_{n2})^2 + s^2}}{l_{n1} - l_{n2} + \sqrt{(l_{n1} - l_{n2})^2 + s^2}} + \sqrt{(l_{n1} - l_{n2})^2 + s^2} - \sqrt{(l_{n1} + l_{n2})^2 + s^2} \right],$$

где l_{n1} и l_{n2} — длины проводников; s — расстояние между проводниками.

7.13. Определение паразитной емкостной и паразитной индуктивной связи:

Паразитная емкостная связь характеризуется коэффициентом ПЕС. (ПН — приемник наводки, ИН — источник).

$$\beta_e = \frac{U_{пн}}{E_{ин}} = \omega C_{пар} Z_{пн} \cdot 100\%,$$

Здесь ω — частота наводки.

Для усилителей и других схем β_e не должен превышать 1%.

Паразитная индуктивная связь характеризуется коэффициентом

$$\beta_m = \frac{U_{п}}{E_{ин}} = \frac{\omega M_{пар} Z_{пн}}{Z_A Z_B} \cdot 100\%,$$

где Z_A — полное сопротивление цепи А (источник наводки), Z_B — полное сопротивление цепи В (приемник наводки, частью которого является сопротивление $Z_{пн}$).

Для усилителей и других схем $\beta_m \leq 1\%$.

Задание

Рассчитать конструктивно-технологические параметры двусторонней печатной платы РЭУ, включающего схему цифрового автомата, синтезированного в результате выполнения задания практического занятия №2 и функциональный узел из таблицы вариантов, приведенной в таблице 1 практического занятия №3. При этом необходимо определить:

1. габариты, выбрать материал и толщину платы,
2. линейные размеры элементов печатного монтажа (диаметр контактных площадок, ширину проводников),
3. число проводников, которые можно провести между соседними отверстиями,
4. минимально допустимую ширину печатного проводника из условия допустимой плотности тока,
5. максимальное падение напряжения, мощность потерь, паразитную поверхностную емкость и взаимную индуктивность двух параллельных проводников.

Исходные данные:

- Метод изготовления печатной платы — электрохимический (полуаддитивный);
- Способ получения рисунка — фотохимический;
- Размеры корпуса ИС из справочника 15.5×9.8 мм;
- Шаг координатной сетки 1.25 мм;
- Заданный зазор между ИС 5мм, минимальное расстояние между монтажными отверстиями 1.25мм;
- Диаметр неметаллизированного монтажного отверстия (сверла) 0.7мм;
- Форма контактной площадки круглая, плотность печатного монтажа второй класс;
- Фоторезист сухой пленочный, металлический резист – оплаиваемый сплав олово – свинец;
- Напряжение питания (из расчета стабилизатора);
- Максимальный ток проходящий через проводники (из расчета стабилизатора);
- Данные трассировки – расстояние между осевыми линиями двух наиболее близко расположенных параллельных проводников $L_0=0.2\text{см}$, длины параллельных проводников, максимальная длина проводника, суммарная площадь печатных проводников - подсчитываются.

Литература

1. Парфенов Е.М. Проектирование конструкций РЭА. - М.,1999 г
2. Краткий справочник конструктора радиоэлектронной аппаратуры. Под ред. Варламова Р.Г. - М.: - Сов. радио, 2002 г. -856 с.
3. Г.Д. Фумкин. Расчет и конструирование РЕА. – М.: Высшая школа, 1989.
4. ГОСТ 23 751-86 Платы печатные. Основные параметры конструкций.
5. ГОСТ 10 317-79 Платы печатные. Основные размеры.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №8

ВЫБОР МЕТОДА КОНСТРУИРОВАНИЯ И РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ КОРПУСА ФУНКЦИОНАЛЬНОГО УЗЛА

Цель работы: изучение принципов работы схем стабилизации постоянного тока, выбор и расчет конкретной схемы стабилизатора.

Краткие теоретические сведения

8.1 Методы конструирования систем автоматики и РЭА

Существующие методы подразделяются на три взаимосвязанные группы.

По видам связи:

1. Геометрический;
2. Машиностроительный;
3. Топологический.

По способу выявления структуры связей:

1. Метод моноконструкций;
2. Модульный метод.

По степени автоматизации:

1. Эвристический;
2. Автоматизированный.

В основу *геометрического метода* положена структура геометрических и кинематических связей между деталями, представляющая собой систему опорных точек. Число и размещение этих точек зависит от заданных степеней свободы и геометрических свойств твердого тела.

Этим методом конструируют подвижные соединения, фиксаторы, элементы кинематической схемы.

В основу *машиностроительного метода* положена структура механических связей между элементами. Здесь применяются опорные поверхности вместо опорных точек.

Этот метод используют для проектирования несущих конструкций блоков, ячеек, печатных плат.

В основу *топологического метода* положена структура физических связей между ЭРЭ. Метод может быть использован в случае, когда связности элементов может быть сопоставлен граф. Здесь используются свойства графов для размещения элементов и ориентации их в пространстве для трассировки линий связи и средств их соединения с элементами (т.е. для компоновки и трассировки).

Метод проектирования моноконструкций основан на минимизации числа связей в конструкции и применяется для создания функциональных узлов, блоков РЭА на основе несущей конструкции в виде моноблока.

Базовый (модульный) метод конструирования предполагает создание конструкции в виде набора отдельных модельных модулей. Это резко упрощает конструирование и макетирование, сборку и монтаж, позволяет легко автоматизировать производство.

При конструировании узлов автоматики и РЭА используют топологический, модульный, автоматизированный и эвристический методы.

В настоящее время разработаны и находят применение несколько принципов конструирования:

1. *Ячеечный (мелкоблочный) принцип.* При этом в качестве типового элемента замены используется ячейка. Для таких конструкций характерно большое количество разъёмных соединений между узлами. А потому этот принцип находит применение для сравнительно простых устройств, содержащих десятки ячеек.
2. *Функционально-блочный принцип.* Применяется для конструирования сложных устройств. При таком принципе уменьшается число разъёмных соединений, что повышает надёжность. Недостаток в том, что наименьшая заменяемая единица – блок. Кроме того, этот принцип является индивидуальным, т.е. не обладает универсальностью. Каждый блок требует «технологии раздельного изготовления» со всеми присущими ей недостатками.
3. *Функционально-узловой метод.* При этом методе используются функциональные узлы в качестве стандартных унифицированных деталей-модулей (на которых можно собрать до 90% всех типовых схем электронной аппаратуры). Модули соединяются в более крупные узлы с помощью простейших разъёмных соединений, которые потом запаиваются. Конструкция такого блока-узла в виде набора соединительных модулей облегчает его сборку, контроль и ремонт.
4. *Микромодульный принцип.* Основа его — единство размеров компонентов схем. Все компоненты изготавливаются на типовых микроплатах. Главное достоинство — возможность автоматизации процессов сборки. Это наиболее прогрессивный принцип.

8.2 Этапы конструирования

1. Выбор типовых элементов конструкции различных уровней.
2. Компоновка. Цель данного этапа – разбить схему на узлы (блоки), выполняемые на выбранных типовых элементах конструкции.
3. Размещение – это определение установочных мест для узлов (блоков). Цель, к которой следует стремиться на данном этапе, – обеспечить минимальную суммарную длину соединений внутри данного блока.
4. Трассировка соединений. Критерием оптимальности выполнения данного этапа является минимальная длина соединительных проводни-

ков, минимальное число пак. При использовании печатного монтажа основной критерий – реализуемость.

8.3 Соподчиненность составных частей конструкции

Отдельные части конструкции обычно унифицируются. Унификация проводится по нескольким уровням.

0-й (наиболее низкий) уровень включает элементный базис, узлы и модули – конструктивно законченную схему, в которой невозможно выделить компоненты, не нарушив целостности конструкции. (Это, например, микросхема, микросборка ИС, которые могут быть корпусированными или бескорпусными).

1-й уровень – функциональная ячейка ФЯ (субблок) – законченная, сравнительно простая схема, которая может быть выполнена на нескольких модулях, возможно на плате. Если несколько плат соединены с помощью объединительной платы – это субблок.

ФЯ обычно типовой элемент замены, подлежащий замене при неисправности. (Это, например, регистр, счетчик, распределитель и пр.)

2-й уровень – блок. Компоновка его осуществляется путем сборки ФЯ в пакеты с последующим их корпусированием. Имеют три конструктивные разновидности – книжную (1), которая имеет ось раскрытия, разъемную (2), и кассетную (веерную) (3), показанные на рисунке 8.1.

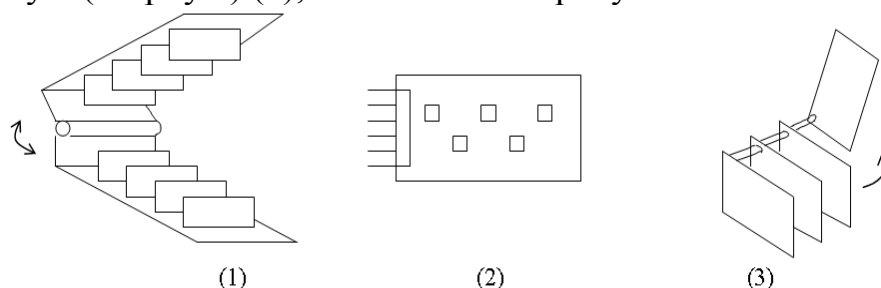


Рисунок 8.1 - Конструктивные разновидности блоков

(Пример – управляющее устройство, запоминающее устройство, устройство сигнализации).

3-й уровень – многоблочные конструкции (полиблоки, моноблоки), в которых блоки komponуются в общем несущем основании (в стойке, раме, шкафу, пульте).

(Пример – функциональный комплекс ЭВМ, ЦВМ).

Модулем *уровня 0,5* является микросборка, состоящая из подложки с размещенными на ней бескорпусными микросхемами. Межмодульная коммутация обеспечивается введением по периферии подложки контактных площадок. Модуль вводится для увеличения плотности компоновки аппаратуры.

Модуль *уровня 2,5* представляет собой раму, в которой размещаются 6—8 блоков. Рама применяется в стоечной аппаратуре, использующей небольшие по размерам модули первого уровня.

Модульный принцип конструирования предусматривает несколько уровней коммутации:

1-й уровень — коммутация печатным и (или) проводным монтажом электронных компонентов на плате;

2-й уровень — коммутация печатным или объемным монтажом ответных соединителей модулей первого уровня в блоке;

3-й уровень — электрическое объединение блоков или рам в стойке и стоек между собой жгутами и кабелями;

уровень 0,5 — электрическое соединение выводов бескорпусных микросхем пленочными проводниками;

уровень 2,5 — коммутация блоков в раме проводами, жгутами или кабелями.

При разработке несложной аппаратуры высшие уровни модульности отсутствуют. Полная модульность, приведенная на рисунке 8.2, используется только в сложной аппаратуре, например в супер-ЭВМ.

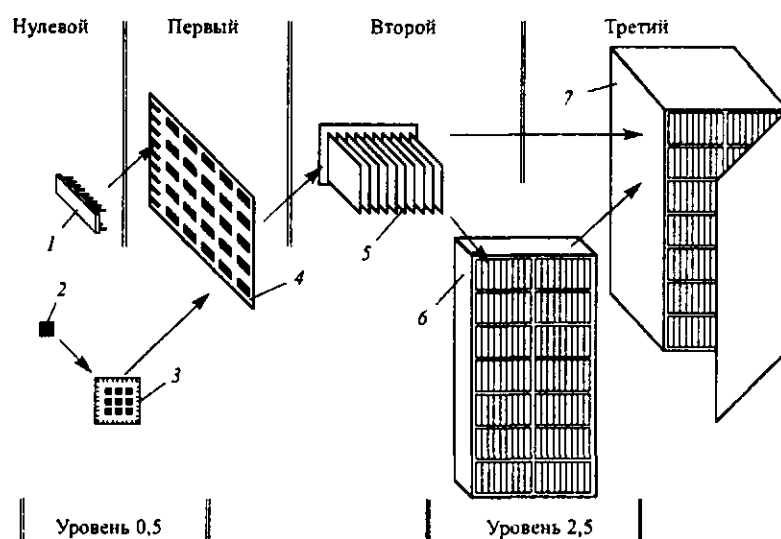


Рисунок 8.2 - Конструктивная иерархия и входимость модулей:

1 — микросхема; 2 — бескорпусная микросхема; 3 — микросборка; 4 — типовой элемент замены (ТЭЗ), ячейка; 5 — блок; 6 — рама; 7 — стойка

8.4 Методы выполнения компоновочных работ

Компоновка изделия это часть процесса конструирования, при котором определяются конфигурация и габаритные размеры изделия в целом, а также взаимное расположение отдельных деталей, узлов и блоков.

При компоновке основная задача — выбор форм, геометрических размеров, определение массы деталей и их расположения в пространстве. Кроме того, правильная компоновка должна обеспечивать технологичность сборки

и монтажа, доступ при контроле и ремонте, рациональное расположение органов управления и контроля, отсчетных устройств на лицевых панелях, минимальные размеры и массу, красивый внешний вид.

При компоновке необходимо учитывать такие факторы, как паразитные параметры элементов и связи между ними, конструкцию монтажных соединений, геометрию элементов, тепловые режимы, механические. Технологические и другие факторы.

8.4.1 Компоновочные схемы аппаратуры, устройств и СУ

Существуют следующие компоновочные схемы сочленения блоков аппаратуры: децентрализованная, централизованная с автономными постами управления и полностью централизованная.

1. *Децентрализованная схема* – отличается простотой размещения частей устройства на объекте. Такая компоновка не требует экранирования отдельных блоков, она надежна. Недостаток – наличие большого количества соединительных кабелей, необходимость автономных устройств охлаждения, виброзащиты, влагозащиты и т.д.
2. *Централизованная схема* – все части аппаратуры размещаются в одном корпусе в стойках (шкафах). Длина междублочных соединений здесь минимальна, устройства охлаждения, виброзащиты более эффективны. Но такая схема требует более тщательной междублочной экранировки.
3. *Централизованная с автономными постами управления и датчиками* является промежуточной между первыми двумя схемами и находит преимущественное применение.

8.4.2 Способы компоновки аппаратуры

На практике находят применение следующие способы компоновки аппаратуры: аналитический, аппликационный, модельный, графический и натурный.

1. *Аналитический метод* требует большого числа вычислений даже при ограниченном количестве типоразмеров элементов и применяется в основном на стадиях эскизного проекта (ЭП) и технического проекта (ТП).
2. *Графическая компоновка* используется на стадиях ЭП и ТП при разработке эскизов и монтажной конструкторской документации. Графическая компоновка основана на применении упрощенных способов начертания элементов, применяются трафареты из целлулоида, штампы с условными обозначениями элементов на клейкой ленте и т.д. Очень удобна графическая компоновка для компоновки печатных плат, других размещений элементов на плоскости.
3. *Аппликационный метод* выполняется по спецификациям принципиальных схем. На тонком картоне, плотной бумаге или миллиметровке вычерчиваются в одном масштабе (лучше 1:1) все необходимые про-

екции элементов устройства, которые затем вырезаются по контуру (можно упрощать контуры до прямоугольников). Аппликации раскладывают на специальном столе в соответствии с требованиями электрической схемы, с учетом тепловых режимов, возможностей возникновения паразитных связей и т.д. Расположение элементов закрепляют кнопками, клеем. А к оргстеклу бумажки прилипают сами из-за электризации – удобно!

Этот метод очень удобен для печатных плат, но не для объемных конструкций. Магнитное основание со стальными шаблонами – еще одна разновидность.

4. *Модельная компоновка* основана на использовании моделей элементов из пенопласта, дерева, пластилина и т.д. Модель фотографируют – эскиз компоновки.
5. *Натурная компоновка* рассчитана на применение реальных элементов. Удобно элементы залить прозрачной пластмассой с магнитными держателями. Используется совместно с модельным методом.

8.4.3 Компоновка и конструирование блоков ЭА

Под этим понимается взаимная ориентация ячеек или других конструктивных зон в заданном объеме блока (рисунок 8.3).

Уже говорилось, что в радиоэлектронной аппаратуре наиболее часто используется два варианта конструкций – разъемный и книжный. И в той и в другой конструкции полезный объем блока V_b можно условно представить в виде двух объемов:

V_1 – объем, занимаемый функциональными ячейками;

V_2 – объем, занимаемый под элементы электрического соединения и их электрического монтажа.

Рассмотрим шесть вариантов компоновки этих объемов.

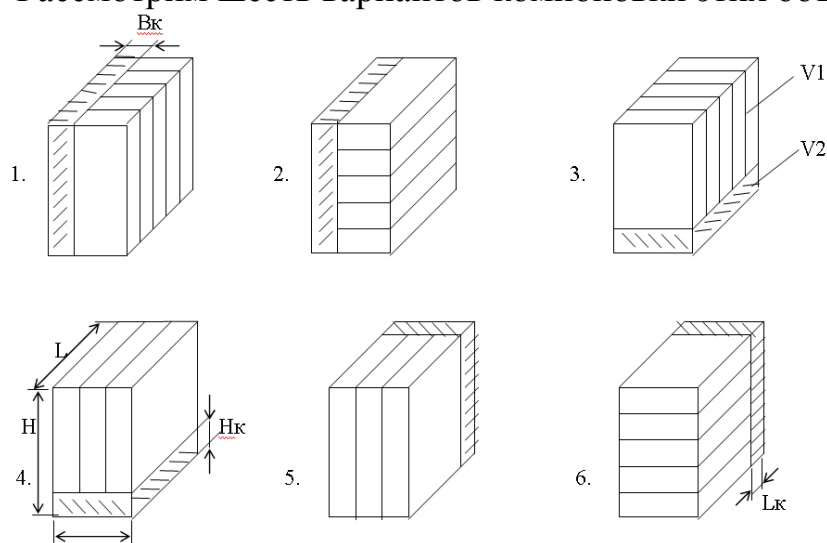


Рисунок 8.3 - Варианты компоновки блоков

Тогда для рассматриваемых вариантов компоновки эти объемы можно выразить следующим образом:

$$1-2 \quad V_1 = LH(B - B_k) \quad V_2 = LHB_k$$

$$3-4 \quad V_1 = L(H - H_k)B \quad V_2 = LH_kB$$

$$5-6 \quad V_1 = (L - L_k)HB \quad V_2 = L_kHB$$

Ввиду того, что в блоках, как правило, $L > H$, $L > B$, $H \geq B$, а L_k , B_k и H_k – приблизительно равны, то:

$$V_1^{5,6} > V_1^{3,4} > V_1^{1,2}$$

$$V_2^{1,2} > V_2^{3,4} > V_2^{5,6}.$$

Т.е. из формул видно, что наиболее рационально использовать варианты 5 и 6.

Однако, практика конструирования блоков РЭА показала, что варианты 2 и 6 не применяются из-за плохих условий охлаждения.

Варианты 1 и 3 позволяют установить значительно большее число ячеек по сравнению с вариантами 4 и 5. Это следует из неравенства $L/h_y > B/h_y$, где h_y – шаг установки ячейки.

Для книжных конструкций предпочтительнее варианты 4 и 5, т.к. данные конструкции должны иметь относительно небольшое число печатных плат по сравнению с разъемными (чтобы лучше раскрывать).

При естественном охлаждении (конвекции) для блоков разъемной конструкции применяют вариант компоновки 3. При принудительном охлаждении в разъемных конструкциях применяют вариант компоновки 1.

При естественной конвекции в книжных конструкциях используются варианты компоновки 4 и 5.

На выбор варианта компоновки оказывает влияние и необходимое число выходных контактов с печатной платы ячейки. С этой точки зрения для разъемной конструкции с большим числом контактов предпочтительны 2,4 варианты, с малым – 3,6.

8.4.4 Компоновка и конструирование узлов на микромодулях ММ и интегральных микросхемах ИМС

Специфика конструирования на ММ и ИМС предполагает выполнение следующих требований:

1. Обеспечение возможности замены модулей на этапе их производства.
2. Наименьшая заменяемая единица при эксплуатации должен быть блок.
3. Входные и выходные цепи должны быть разнесены, основные цепи продублированы.
4. Тщательность экранировки.
5. Особое внимание следует уделять маркировке т.к. ММ и ИМС имеют стандартные корпуса.
6. Обеспечение нормального теплового обмена.

Схема конструирования прибора на ММ или ИМС

ММ ли ИМС соединяются в схему с помощью печатного монтажа, образуя *микроузлы*. Микроузлы собираются в *субблоки*. Из них составляются *блоки* (конструктивно законченные, но не имеющие самостоятельного значения). Совокупность блоков – это *прибор*.

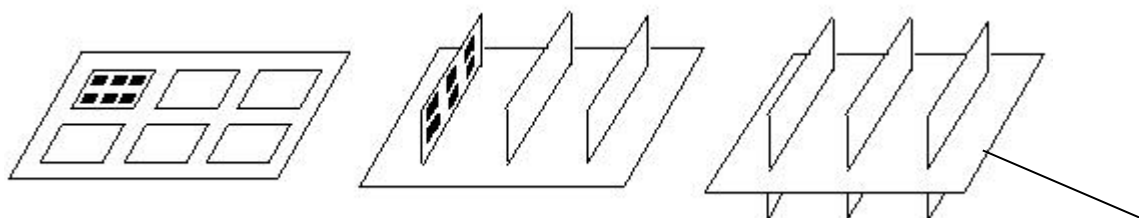
Платы изготавливаются из фольгированного гетинакса или стеклотекстолита 0,8 – 2 мм. Различные варианты установки ММ и ИМС на печатных платах приведены в таблице 8.1:

Таблица 8.1- Варианты установки ММ и ИМС на печатных платах

Вид компоновки	Схема	Рекомендуемый шаг (мм)		Рекомендации по применению
		Между модулями	Между рядами	
Однорядная		12,5	-	В высокочастотных узлах при $n < 10$
Двухрядная		12,5	13,5	$n = 4 \div 12$
Многорядная		12,5	25	$n = 12 \div 34$ и при необходимости увеличения площади печатного монтажа
Шахматная		25	12,5	

Для лучшего использования искусственного обдува
 n – число модулей в узле.

Компоновка плат в субблоки (Рисунок 8.4)



Плоская

Объемная

Объединительная плата

Рисунок 8.4 - Варианты компоновки плат в субблоки

Электрические соединения здесь ведутся объемным или печатным монтажом с применением пайки. Рекомендуется использовать цветные провода, причем:

Красный цвет – положительный потенциал

Синий цвет – отрицательный потенциал

Желтый цвет – переменный ток

Черный цвет – нулевой потенциал относительно корпуса

Белый цвет – остальные провода

Все провода должны иметь запас по длине (для снятия при проверке, настройке). Сечение их $\geq 0,1 \text{ мм}^2$.

Среди возможных методов объединения субблоков в блоки наилучшими являются книжный, кассетный и разъемный методы.

1. Книжная конструкция имеет ось раскрытия. Соединяется с помощью гибкого кабеля.
2. При кассетной компоновке субблоки объединяются в кассеты, которые соединяют в пакет. Кассеты соединяются с помощью шарниров.
3. При разъемном методе набор субблоков устанавливается параллельно или перпендикулярно панели. Соединяется через разъемы.

Правила установки ИМС и МСБ на печатные платы

Компоновка ИМС и МСБ в рабочей зоне S печатной платы может осуществляться как с одной стороны ПП, так и с двух. Способ установки ИС должен обеспечивать:

- Надежное механическое крепление и электрическое соединение выводов с контактными площадками;
- Возможность автоматизации и механизации сборки ячейки;
- Возможность обеспечения демонтажа микросхемы и МСБ в процессе изготовления и настройки.

В зависимости от конструктивного исполнения корпуса ИС и МСБ могут устанавливаться на ПП с формовкой или без формовки выводов.

Формовка выводов производится:

- для увеличения расстояния между выводами.
- для фиксации расстояния от корпуса до печатной платы.
- для прилегания плоских выводов к контактным площадкам при их электрическом соединении.
- для совмещения выводов с узлами координатной сетки ПП.

При однотипных корпусах ИМС и МСБ на печатных платах, как правило, располагаются рядами. При наличии нескольких типов корпусов их желательно компоновать группами с одинаковыми корпусами. Это позволяет применять механизированные и автоматизированные методы сборки ячеек.

Установка и крепление ИМС и МСБ должны обеспечивать свободный доступ к любой из них и возможность замены. Шаг установки кратен основному шагу координатной сетки печатных плат.

8.5 Выбор элементов электрических соединений ФЯ

Электрические соединения ячеек в блоках выполняются с помощью

- разъемных электрических соединителей (разъемов);
- соединительных плат;
- переходных контактов;
- гибких шлейфов;
- плоских кабелей;
- монтажных проводов.

Выбор того или иного соединителя находится в зависимости от эксплуатационных требований выбранного варианта конструкции ячейки (разъемная, книжная), габаритов и определяется необходимым числом контактов в электрическом соединителе. При этом необходимо резервировать не менее 10% необходимого числа контактов.

1. *Разъемы* – наиболее широко применяются в блоках разъемной конструкции. Рекомендуемые для установки в ячейки малогабаритные разъемы приведены в ОСТ 450.010.009. Аппаратура электронная. Блоки и ячейки на МСБ и ИМС. Конструирование.

Разъем состоит из 2-х деталей: вилки и розетки. В некоторых конструкциях предусматриваются ловители (например, штыри в вилке или розетка). Имеются ключи (выступы и пазы в корпусе разъема).

Контакты могут иметь 1,2,3,4-рядное расположение. Шаг контактов равен или кратен шагу координатной сетки, т.е. 1.25 мм. Выводы разъемов соединены пайкой.

В ЭА 3-го поколения широко используются разъемы с гиперболоидными контактами типа ГРПМ, ГРППМ и разъемные соединители типа СНП.

Например: ГРПМ 9- 30 ГС → Здесь первые 4 символа - Гиперболоидный разъем, Прямоугольный, Малогабаритный. Далее № разъема 9, Кол-во контактов 30, Г- розетка, У- угловые выводы, Ш-вилка, С- для струнного монтажа.

ГРППМ- для печатного монтажа.

Число контактов в конструкции разъемов типа ГРММ от 16 до 122, рядов от 2 до 4.

Разъемы типа СНП34 имеют от 20 до 135 контактов. В обозначении указывается после дефиса – число контактов, буквой вид части разъема В – вилка, Р – розетка. Например, СНП34 -135В.

У разъемов РППМ17 в качестве вилки используется печатная плата толщиной $1,5 \pm 0,2$ мм (от 12 до 56 контактов).

2. *Соединительные контакты* и переходные контакты (гребенки) используются как промежуточные переходные элементы для электрического соединения ячеек с монтажными проводами и жгутами. Платы соединительные могут быть со штырьковыми и лепестковыми выводами (рисунок 8.5).

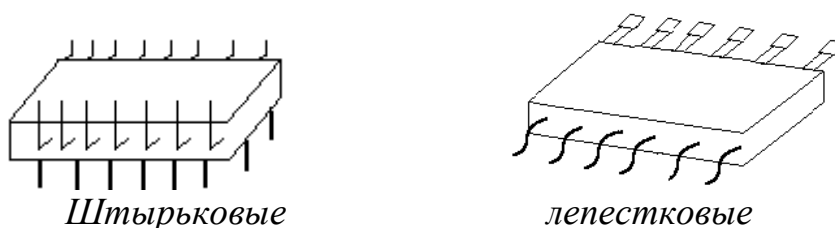


Рисунок 8.5 - Варианты соединительных контактов

Выводы соединительных плат (переходников) и гребенок запаиваются в металлизированные отверстия или к контактным площадкам. Монтажные провода подсоединяются пайкой или накруткой.

Переходники и гребенки устанавливаются по краям печатных плат. Шаг контактов переходников и гребенок кратен 1,25 мм.

3. *Гибкие шлейфы и плоские кабели* применяют для внутри-блочного монтажа в блоках книжной конструкции, для связи между субблоками.

Применение кабелей облегчает сборочные операции, повышает надежность монтажных соединений, устойчивость к климатическим воздействиям. В настоящее время существуют гибкие печатные, тканые и опрессованные кабели.

Гибкие печатные кабели ГПК, изготавливаемые на основе тонкого фольгированного диэлектрика, могут оканчиваться металлизированными контактными площадками с отверстиями и без них или контактными лепестками.

Крепление ГПК осуществляют с помощью прижимной планки или скобы. Длина ГПК (рекомендована) до 35 см. Ширина до 15.

Гибкий опрессованный кабель изготавливают запрессовкой проводов в гибкий диэлектрик.

Тканые кабели получают переплетением проводов капроновой нитью. Крепятся к печатным платам они с помощью колодок.

4. *Проводной монтаж.* Объемный монтаж применяют в виде мягкого жгутового монтажа, осуществляемого с помощью соединительных плат, гребенок, а также непосредственно в металлизированные отверстия печатной платы. С лепестковыми выводами соединение проводится пайкой, со штырьковыми – методом накрутки или бандажированием. Накручивают провод с натягом, что обеспечивает хороший контакт (часто и запаивается). Накрутка легко автоматизируется. Бандажирование осуществляется проволокой (не менее 8 витков) или пружинными захватами.

Такие типы соединений характеризуются высокой ремонтопригодностью.

Сечение проводов выбирают исходя из величины рабочего тока и допустимого падения напряжения вдоль провода (плотность тока принимают $\sim 10 \text{ А/мм}^2$).

Допустимую плотность тока необходимо понижать, если провода проходят вблизи источников тепла или когда в жгуте много проводов.

Расцветка:

красный цвет – провода с высоким положительным потенциалом ($> 200\text{В}$)

синий цвет – провода с высоким отрицательным потенциалом
провода цепей накала – зеленые.

нулевые провода – черные.

остальные – цвет произвольный.

8.6 Особенности конструирования функциональных ячеек и блоков 4-го поколения

Отличительной чертой конструирования МЭА 4-ого поколения является применение в них БИС, СБИС, микросборок. Часто используются бескорпусные МСБ при вакуумно-платной герметизации и заполнении внутреннего объема инертным газом.

Повышение плотности упаковки приводит к росту удельной мощности рассеяния, что ухудшает тепловые режимы.

Таким образом, особенностями конструирования ФЯ и блоков 4-го поколения являются.

1. Необходимость в дополнительных конструктивных мерах по улучшению теплопередачи. Для этого вводятся теплоотводящие шины. Они выполняются в виде фольги на ПП, тонких металлических пластин, металлических рамок с планками и т.д.

2. Второй чертой является требование повышенной герметичности для защиты бескорпусных МСБ от действия внешней среды. Для этого ФЯ выполняются в герметических коробках.

3. Для аналоговой МЭА четвертого поколения характерным является требование электромагнитной совместимости, в частности устранение взаимных наводок которое обеспечивается *экранированием*.

Блоки также конструируются с учетом этих требований.

8.7 Внутренняя компоновка аппаратуры АТ

Различают несколько методов компоновки:

1. *Компоновка в объемные функциональные блоки.*

Находит применение при использовании крупногабаритных деталей и электровакуумных приборов. Эти блоки обычно имеют форму куба или параллелепипеда. Все детали устанавливаются и закрепляются на общем шасси. Электрические соединения внутри блока выполнены с помощью пайки (рисунок 8.6).

Но такая компоновка затрудняет нахождение и замену неисправных элементов, т.е. большие затраты на ремонт. Технология сборки сложна.

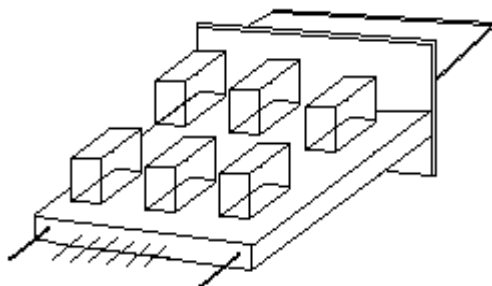


Рисунок 8.6 - Вариант компоновки в объемные функциональные блоки

2. *Компоновка в функциональные блоки*, разбитые на отдельные подблоки по функциональным признакам.

Каждый из подблоков размещен на отдельном шасси – элементы на нем соединяются пайкой.

Все подблоки закрепляются на общем основании (например, винтами).

Достоинства – значительно облегчен ремонт аппаратуры (неисправные подблоки легко заменяются исправными). Для этого не требуется высококвалифицированный обслуживающий персонал. Сборка простая и быстрая.

3. *Модульный метод* компоновки является дальнейшим развитием предыдущего метода, но здесь блок делится большее число легкоъемных подблоков (модулей, плат с микросхемами), имеющих одинаковые или кратные размеры. Модули объединяются в блок с помощью разъемов врубного типа. Модульный метод наиболее перспективен, нашел самое широкое применение.

8.8 Расположение органов управления на лицевых панелях аппаратуры

Здесь следует руководствоваться общей целью и порядком использования органов управления.

Для этого необходимо найти типичную последовательность операций, выполняемых при работе с данным прибором, выявить наиболее часто используемые переключатели, определить какие переключатели или измерительные приборы используются совместно.

На основании этого разрабатывается схема расположения индикаторов и органов управления.

1. Часто используемые органы располагают в зонах наиболее близких к правой (левой) руке оператора.
2. Органы управления, требующие усилий оператора, располагают так, чтобы рука оператора при работе с ними была полусогнутой.
3. Контрольные приборы располагают на уровне глаз.
4. Тумблеры включения – снизу, справа.
5. Шкалы и цифры должны иметь простую форму для легкой читаемости.

6. Должна быть предусмотрена индикация питания, режимов работы, сигнальная индикация (красный – аварийный цвет, зеленый – нормальное состояние, белый цвет – индицирует включение и готовность).

Цвет окраски определяет характер устройства и его назначение. Можно рекомендовать для устройств специального назначения узкую цветовую гамму – это создает спокойное зрительное восприятие.

Приборы лабораторных и производственных помещений – более широкий цветовой диапазон (чтобы выделить отдельные узлы устройства). Например, панели и щиты – светло-сиреневый, каркасы и боковые стенки – вишневым, фундамент – черный, внутренние полости – цвет слоновой кости.

В зависимости от назначения:

- Медицинская аппаратура – белый цвет
- Морская аппаратура – светло-серый
- Полевая аппаратура – зеленый или серый

Задание

1. Выбрать метод конструирования (на основании сравнительной оценки известных методик) и обосновать его.
2. Провести объемно-пространственную (предварительную) компоновку ФБ РЭА, включающего элементы, разработанные и спроектированные в результате выполнения предыдущих заданий практических работ.
3. Разработать конструкцию корпуса ФБ РЭА.
4. Провести внутреннюю компоновку аппаратуры.
5. Выбрать расположение органов управления на лицевой панели аппаратуры.
6. Выбрать элементы электрических соединений ФЯ.

Литература

1. Компоновка и конструирование микроэлектронной аппаратуры : справ. пособие / под ред. Б. Ф. Высоцкого, В. Б. Пестрякова. – М.: Радио и связь, 1982. – 208 с.
2. Савельев А. Я., Конструирование ЭВМ и систем : учеб. Для техн. вузов/А. Я. Савельев, В. А. Овчинников. – М.: Высш. школа, 1984. – 303с.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №9

РАСЧЕТ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ АППАРАТУРЫ, ВЫБОР СПОСОБА ОХЛАЖДЕНИЯ

Цель работы: получение навыков расчета тепловых режимов радиоэлектронной аппаратуры и выбора способа охлаждения

Краткие теоретические сведения

9.1 Общие вопросы

Микросхемы и ЭРЭ функционируют в строго ограниченных температурных диапазонах. Отклонение температуры от указанных диапазонов может привести к необратимым структурным изменениям компонентов. Повышенная температура снижает диэлектрические свойства материалов, ускоряет коррозию конструкционных и проводниковых материалов. При пониженной температуре затвердевают и растрескиваются резиновые детали, повышается хрупкость материалов. Различия в коэффициентах линейного расширения материалов могут привести к разрушению залитых компаундами конструкций и, как следствие, нарушению электрических соединений, изменению характера посадок, ослаблению креплений и т. п.

Нормальным температурным режимом называется режим, который при изменении в определенных пределах внешних температурных воздействий обеспечивает изменение параметров и характеристик конструкции, компонентов, материалов в пределах, указанных в технических условиях на них. Высокая надежность и длительный срок службы изделия будут гарантированы, если температура среды внутри ЭА является нормальной и равной 20...25 °С. При этом следует помнить, что изменение температуры относительно нормальной внутри ЭА на каждые 10 °С в любую сторону уменьшает срок службы аппаратуры приблизительно в 2 раза. Обеспечение нормального теплового режима приводит к усложнению конструкции, увеличению габаритов и массы, введению дополнительного оборудования, затратам электрической энергии.

Задача обеспечения работоспособности при низких температурах решается нагревом в продолжении некоторого времени помещения с одновременным включением аппаратуры для подогрева. При достижении внутри изделия нормальной температуры приступают к его эксплуатации. Далее из-за саморазогрева температура внутри изделия будет повышаться и может возникнуть необходимость в его охлаждении.

Чаще всего конструктор решает задачу удаления избытка теплоты в результате саморазогрева аппаратуры. Как известно, передача теплоты от нагретой аппаратуры в окружающую среду осуществляется кондукцией, конвекцией и излучением.

9.2 Теплоотвод кондукцией

Теплоотвод кондукцией использует тепловые разъемы, теплоотводящие шины, печатные платы на металлической основе и т. д. Количество теплоты Q_k (кал/с), передаваемое в статическом режиме кондукцией, определяется по выражению

$$Q_k = \alpha_m(S/l)\Delta t,$$

где α_m — коэффициент теплопроводности, кал/(с • см • °С); S — площадь, через которую проходит тепловой поток, см²; l — длина пути передачи теплоты, см; Δt — разность температур между охлаждаемой конструкцией и окружающей средой, °С.

9.3 Теплоотвод конвекцией

При конвективном отводе теплоты используют воздушное естественное, принудительное и водо-воздушное охлаждение. При высоких требованиях к стабильности параметров схем применяют термостатирование узлов и блоков.

Естественное охлаждение используется в бытовой аппаратуре с плотностью тепловых потоков от охлаждаемых поверхностей не более 0,05 Вт/см². Метод охлаждения естественной конвекцией, являясь самым простым, требует повышенного внимания конструктора к вопросам рациональной компоновки по критерию обеспечения нормального теплового режима. При компоновке необходимо стремиться к равномерному распределению выделяемой мощности по всему объему изделия. Компоненты и узлы с большими тепловыделениями необходимо располагать в верхней части корпуса или вблизи стенок, критичные к перегреву компоненты — в нижней части, защищать тепловыми экранами.

Блестящий экран, разделяющий теплонагруженные и чувствительные к перегреву модули, снижает лучистый тепловой поток приблизительно вдвое. В целях выравнивания температуры поверхности внутри аппаратуры теплонагруженные модули должны иметь высокую степень черноты. Для этого внутренние поверхности кожухов и каркасов окрашиваются масляными черными красками или лаками.

Необходимо защищать аппаратуру от прямого попадания солнечных лучей. Перегрев аппаратуры с темной окраской кожуха, освещаемой солн-

цем при незначительной циркуляции воздуха, может достигать 25...30 °С. Например, имеет место превышение температуры металлических поверхностей (в градусах Цельсия) в умеренном климате при отвесном падении солнечных лучей: без покрытия — 24; окрашенных в белый цвет — 13; серый — 21; черный — 27.

Различают конструкции с перфорированным и герметичным кожухом. В перфорированном кожухе предусматриваются вентиляционные отверстия круглой, квадратной, прямоугольной формы, жалюзи (рис. 4.19). Например, круглые отверстия имеют диаметр 4, 6, 8 или 10 мм, квадратные могут иметь размеры 4х4 мм, прямоугольные 3 х 25,4 х 50 мм.

Суммарная площадь вентиляционных отверстий в дне (крышке) прибора должна составлять 20...30 % от живого сечения, под которым подразумевается свободная для прохода конвективных потоков воздуха площадь сечения прибора.

Количество теплоты, удаляемой от поверхности S естественной конвекцией, Вт,

$$Q = 4,187 \cdot 10^{-4} h_c S \Delta t,$$

где S — площадь поверхности, см²; Δt — перегрев, °С; h_c — коэффициент конвективной теплопередачи, определяемый из $h_c = 0,52 C (55 \Delta t / l)^{0,25}$, где C — постоянная, зависящая от ориентации поверхности (для вертикальной плоскости $C = 0,56$; для верхней горизонтальной плоскости $C = 0,52$; для нижней горизонтальной плоскости $C = 0,26$); l — длина пути теплового потока.

Принудительное воздушное охлаждение автономными вентиляторами широко используется в аппаратуре с тепловыделением не более 0,5 Вт/см² и выполняется по схемам подачи охлажденного воздуха снизу вверх и сверху вниз. По первой схеме воздух забирается у пола, по второй — у потолка. Забор воздуха у пола, где имеет место наибольшее количество пыли, приводит к повышенной запыленности аппаратуры, охлаждение по схеме сверху вниз — к меньшей запыленности, но требует большего расхода воздуха, поскольку его температура с увеличением высоты забора растет.

9.4 Теплоотвод лучеиспусканием

Для расчета мощности, отдаваемой лучеиспусканием РП, от нагретой поверхности, с температурой T_i на поверхность с температурой T_j или в окружающую среду, воспользуемся выражениями

$$P_n = \alpha_n S_i (T_i - T_j),$$

$$\alpha_n = 5,67 \cdot 10^{-8} \varepsilon \varphi_{ij} \frac{(T_i + 273)^4 - (T_j + 273)^4}{T_i - T_j},$$

где α_n — коэффициент теплообмена лучеиспусканием, Вт/(м² • К); ε — приведенная степень черноты; φ_{ij} — коэффициент, показывающий, какая часть энергии тела i попадает на тело j .

Пример. Вычислить теплосъем лучеиспусканием с покрытой лаком плоской прямоугольной пластины размерами 10х20 см, имеющей перегрев в 20 °С относительно температуры окружающей среды в 20 °С. Теплосъем осуществляется с двух поверхностей пластины. Теплосъемом с торцевых поверхностей пластины пренебречь. Согласно таблице 9.1 приведенная степень черноты пластины $\varepsilon = 0,92$, $\varphi = 1,0$.

Таблица 9.1 -Степень черноты материалов

Материал	Степень черноты
Сталь	0,8
Никель	0,4
Алюминий	0,3
Дюралюминий	0,37
Титан	0,63
Краски эмалевые, лаки	0,92
Краски матовые	0,92
Краска алюминиевая	0,28
Краска бронзовая	0,51

Решение. Съем теплоты осуществляется с двух поверхностей пластины общей площадью $2 \times 0,1 \times 0,2 \text{ м}^2$

$$\alpha_n = 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 0,92 \cdot 1,0 \frac{(313)^4 - (293)^4}{20} = 5,8 \text{ Вт / (м}^2 \cdot \text{К)};$$

$$P_n = 5,8 \cdot 2 \cdot 0,1 \cdot 0,2 \cdot 20 = 4,64 \text{ Вт.}$$

Таким образом, удаление теплоты лучеиспусканием сравнимо с теплотой, удаляемой естественной конвекцией. Однако при высокой плотности компоновки аппаратуры, размещаемой внутри приборных корпусов, эффект удаления теплоты лучеиспусканием будет отсутствовать, так как модули - будут нагревать друг друга. Подобные расчеты имеет смысл выполнять для внешних поверхностей приборных корпусов и элементов.

9.5 Выбор способа охлаждения

При выборе способа охлаждения ЭА учитываются ее режим работы, конструктивное исполнение, величина рассеиваемой мощности, объект установки, окружающая среда.

Режим работы аппаратуры бывает длительным, кратковременным, кратковременно-повторным и характеризуется длительностями включенного и выключенного состояний. Длительный режим свойственен стационарной аппаратуре, которая находится во включенном состоянии в продолжении многих часов, кратковременный — бортовой, время работы которой мало и исчисляется несколькими минутами или часами. С большой вероятностью можно утверждать, что при проектировании сложной аппаратуры с длительным временем включенного состояния возникнет необходимость в разработке принудительной системы охлаждения (СО). Для аппаратуры разового использования с кратковременным режимом работы возможно обойтись без принудительной СО. Решение о разработке СО для аппаратуры кратковременно-повторного режима работы принимается лишь после анализа длительностей включенного-выключенного состояний и характера ее перегрева и охлаждения.

Переносная ЭА в силу малых рассеиваемых мощностей принудительной СО не снабжается. В сложной аппаратуре необходимо использовать принудительную воздушную или водо-воздушную СО. Водо-воздушной СО снабжаются, например, ЭВМ в герметичном исполнении.

Тепловой анализ ЭА позволяет получить предварительные данные о разрабатываемой СО. Для этого по каждому модулю первого уровня составляется перечень тепловыделяющих компонентов, устанавливаются рассеиваемые мощности и максимально допустимые температуры. На основе этих данных выделяются критичные к перегреву компоненты, а также компоненты, устанавливаемые на теплоотводы. Далее рассчитываются удельные поверхностные или/и объемные тепловые потоки модулей высших уровней. Для этого нужно вычислить мощности, рассеиваемые в модулях компонентами, внешнюю поверхность или объем модулей. По значениям плотности теплового потока q_s и q_v в первом приближении выбирают систему охлаждения (табл. 9.2) по допустимому перегреву в 40 °С.

Таблица 9.2 - Плотность тепловых потоков аппаратуры

Способ охлаждения	Негерметичная q_s , Вт/см ² , не более	Герметичная q_v , Вт/см ³ , не более
Естественная конвекция	0,05	0,02
Принудительная конвекция	0,50	0,45
Водо-воздушный	0,65	0,60

Затем для всех модулей, начиная с модулей первого уровня, составляется перечень компонентов или модулей низших уровней, осуществляется размещение их по критерию минимального перегрева, по уравнению теплового баланса определяется расход хладагента. Если в качестве хладагента предполагается использовать воздух, то необходимо установить его количество, максимально возможную температуру на входе СО, проверить запыленность и наличие в нем агрессивных примесей. Присутствие пыли в воздухе требует установки противопылевых фильтров.

9.6 Расчет теплового режима при естественном охлаждении

Тепловая модель функционального блока радиоэлектронной аппаратуры представлена на рисунке 9.1 .

Для тепловой модели процессы описываются системой неоднородных нелинейных алгебраических уравнений, составленных на основании закона сохранения энергии.

Число уравнений определяется количеством нагретых зон:

- Пакет субблоков
- Воздух внутри корпуса
- корпус

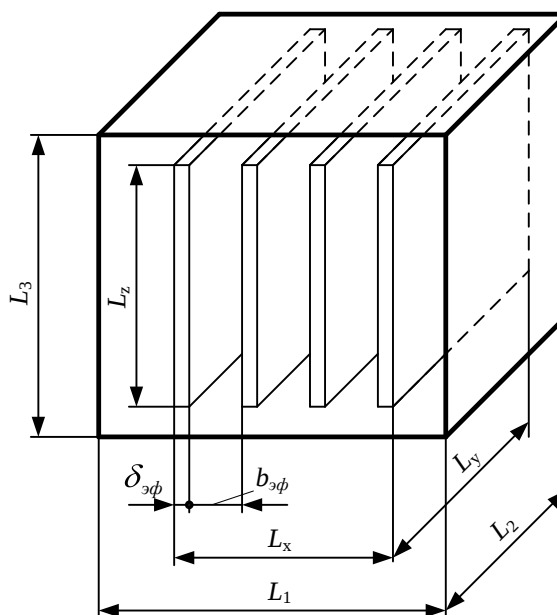


Рисунок 9.1 - Тепловая модель ФБ РЭА

Если пренебречь передачей тепловой энергии кондукцией (через болты креплений), тепловая схема ФБ РЭА.

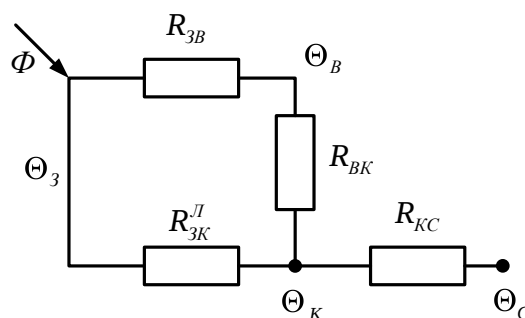
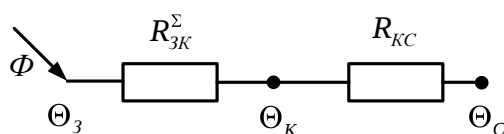


Рисунок 9.2 - Тепловая модель ФБ РЭА

Её можно преобразовать до вида:



Где:

θ_3 – температура зоны нагрева;

θ_6 – температура воздуха;

θ_3 – температура корпуса;

θ_c – температура окружающей среды;

R_{3B} – сопротивление зоны нагрева – воздух;

R_{BK} – сопротивление воздух – корпус;

R_{3K}^l – сопротивление зоны нагрева – корпуса лучистое;

R_{KC} – сопротивление корпус – среда;

- Л – лучеиспускание;
 Ф – тепловой поток зоны нагрева

Уравнения теплового баланса:

$$\begin{cases} \Phi = Q_k - \theta_c \cdot \sigma_{kc} \\ \Phi = Q_z - \theta_k \cdot \sigma_{kz}^\Sigma \\ \sigma_{zk} = \frac{\sigma_{zv} \cdot \sigma_{vk}}{\sigma_{zv} + \sigma_{vk}} \\ \sigma_{zk}^\Sigma = \sigma_{zk} + \sigma_{zk}^l \end{cases}$$

$\sigma = 1/R$ – проводимость.

Тепловой расчет сводится к последовательному решению этих уравнений, начиная с первого, методом итераций.

Цель расчета – определение среднеповерхностной температуры пакета плат субблоков и корпуса при заведомых геометрических размерах, выделяемой пакетом плат мощности Φ и температуры окружающей среды.

Примеры расчета

Исходные данные: $L_1 = 0,2$ м, $L_2 = 0,13$ м, $L_3 = 0,09$ м, $L_x = 0,096$ м, $L_y = 0,105$ м, $L_z = 0,07$ м;

$N = 4$ – количество печатных плат (субблоков);

$\delta_{эф} = 1,5 \cdot 10^{-3}$ м – толщина печатной платы;

$b_{эф} = 30 \cdot 10^{-3}$ м – расстояние между печатными платами;

$\Phi = 20$ Вт – тепловая энергия, выделяемая пакетом плат;

$\varepsilon = 1$ К – точность приближения перегревов;

$\theta_c = 293$ К.

В корпусе может содержаться 4 печатные платы. На одной из которых располагаются элементы функционального узла и элементы цифрового автомата. Корпус унифицированный.

Решение производится методом итераций.

9.7 Пример определения средне-поверхностной температуры пакета плат субблока и корпуса при заданных геометрических размерах

1. Задаём перегрев корпуса относительно окружающей среды:

$$\Delta\theta_{к0} = 16 \text{ К};$$

2. Определяется конвективная составляющая тепловой проводимости

$$\sigma_{\text{КС}}^{\text{К}}$$

3. Проверяем условие $\Delta\theta_{\text{КС}0} \leq (0,84/L_3)^3$

$$(0,84/0,090)^3 = 813 \text{ K} > 16 \text{ K}$$

4. Так как условие выполняется, то коэффициент A_2 будем определять по закону $1/4$ степени. Коэффициент выберем из таблицы 9.3 в соответствии с рассчитанным значением θ_m . $\theta_m = 0,5(\theta_c + \theta_k)$;

$$\theta_k = \theta_c + \Delta\theta_{\text{КС}0};$$

$$\theta_k = 293 + 16 = 309 \text{ K};$$

$$\theta_m = 0,5(293+309) = 301 \text{ K}.$$

Таблица 9.3 – Значения коэффициента A_2

θ_m	283	293	303	313	333	353	373	393	413	423
A_2	1,4	1,38	1,36	1,34	1,31	1,29	1,27	1,26	1,25	1,245

Для значения $\theta_m = 301 \text{ K}$ коэффициент A_2 будет равен 1,364.

$$\sigma_{\text{КС}}^{\text{К}} = 2A_2 (\theta_k - \theta_c)^{1/4} \left[\frac{L_1 L_3 + L_2 L_3}{L_3^{1/4}} + \frac{L_1 L_2}{\min(L_1, L_2)^{1/4}} \right] \cdot K_H$$

где $K_H = 1$ – коэффициент, учитывающий разность давлений внутри корпуса и окружающей среды;

$$\sigma_{\text{КС}}^{\text{К}} = 2 \cdot 1,364 \cdot 16^{1/4} \left[\frac{0,2 \cdot 0,09 + 0,13 \cdot 0,09}{0,09^{1/4}} + \frac{0,2 \cdot 0,13}{\min(0,2, 0,130)^{1/4}} \right] \cdot 1 = 0,532 \text{ Вт/К}$$

5. Лучевая составляющая $\sigma_{\text{КС}}^{\text{Л}}$

$$\sigma_{\text{КС}}^{\text{Л}} = \varepsilon_k \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \left[\frac{\theta_k^4 - \theta_c^4}{\theta_k - \theta_c} \right] \cdot S_k,$$

где $\varepsilon_k = 0,98$ – степень черноты, зависящая от материала и покрытия;

S_k – площадь поверхности корпуса;

$$S_k = 2(L_1 L_2 + L_1 L_3 + L_2 L_3);$$

$$S_k = 0,111 \text{ м}^2;$$

$$\sigma_{\text{КС}}^{\text{Л}} = 0,98 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \left[\frac{309^4 - 293^4}{16} \right] \cdot 0,111 = 0,676 \text{ Вт/К}$$

6. Суммарная тепловая проводимость корпус-среда

$$\sigma_{\text{КС}} = \sigma_{\text{КС}}^{\text{К}} + \sigma_{\text{КС}}^{\text{Л}}$$

$$\sigma_{\text{КС}} = 0,532 + 0,676 = 1,208.$$

7. Перегрев корпуса в первом приближении относительно окружающей среды

$$\Delta\theta_{\text{КС}1} = \theta_{\text{К}1} - \theta_c = \Phi / \sigma_{\text{КС}}$$

$$\Delta\theta_{\text{КС}} = 16/1,208 = 16,556 \text{ K}$$

8. Проверка условия

$$|\Delta\theta_{\kappa 0} - \Delta\theta_{\kappa 1}| \leq \varepsilon (\approx 1 \text{ K})$$

$$|16 - 16,556| = 0,556 \leq \varepsilon (\approx 1 \text{ K})$$

Так как условие выполняется, то переходим к выполнению следующего этапа расчёта.

9.8 Расчёт перегрева зоны относительно корпуса

На втором этапе расчета найдем перегрев зоны относительно корпуса исходя из уравнения:

$$\Phi = \theta_z - \theta_{\kappa} \cdot \sigma_{\kappa \Sigma}^{\Sigma}$$

1. Задаём перегревом зоны относительно корпуса

$$\Delta\theta_{\Sigma \kappa 0} = (\theta_z - \theta_{\kappa}) = 80 \text{ K}.$$

2. Лучевая составляющая тепловой проводимости равна:

$$\sigma_{\Sigma \kappa}^{\Sigma} = \varepsilon_{np1,2} \cdot \varphi_{\Sigma \kappa} \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \left[\frac{\theta_z^4 - \theta_{\kappa}^4}{\theta_z - \theta_{\kappa}} \right] \cdot S_{\Sigma},$$

где $\varepsilon_{np1,2} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}$ – приведённая степень черноты;

$\varepsilon_1 = 0,93$ – степень черноты пакета плат;

$\varepsilon_2 = 0,98$ – степень черноты корпуса

$S_{\Sigma} = 2L_y L_z + 2\delta_{эф} \cdot S_y + L_z$ – площадь излучающей поверхности нагретой зоны;

ны;

$\varphi_{\Sigma \kappa} = 1$ – коэффициент облучения;

$$\varepsilon_{np1,2} = 0,913;$$

$$S_{\Sigma} = 0,015 \text{ м}^2$$

$$\sigma_{\Sigma \kappa}^{\Sigma} = 0,913 \cdot 1 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \left[\frac{389^4 - 309^4}{389 - 309} \right] \cdot 0,015 = 0,136 \text{ Вт/К}$$

3. Тепловая проводимость

$$\sigma_{\Sigma \theta} = \sum_{i=1}^{N+1} \sigma_{i\theta} = \frac{4,12 \lambda_{\theta}}{b_{эф}} L_y L_z$$

λ_{θ} – теплопроводность сухого воздуха, выбирается из таблицы 9.4 для θ_{θ} .

Таблица 9.4 – Теплопроводность сухого воздуха

$\theta_{\theta}, \text{ K}$	223	253	273	283	293	303	313	323	333	343	353	363	373	393
$\lambda_{\theta} \cdot 10^2, \text{ Вт/(м} \cdot \text{K)}$	2,04	2,28	2,44	2,51	2,60	2,68	2,76	2,83	2,90	2,97	3,05	3,13	3,21	3,34

Для определения λ_θ найдем θ_θ :

$$\theta_\theta = \theta_\kappa + \Delta\theta_{\theta\kappa}$$

$$\Delta\theta_{\theta\kappa} = 0,2 \cdot \Delta\theta_{3\kappa}$$

$$\Delta\theta_{3\theta} = 0,8 \cdot \Delta\theta_{3\kappa}$$

$$\text{Получаем, } \Delta\theta_{\theta\kappa} = 0,2 \cdot 81 = 16 \text{ К; } \Delta\theta_{3\theta} = 0,8 \cdot 81 = 64 \text{ К.}$$

$$\theta_\theta = 309 + 16 = 325 \text{ К.}$$

$\lambda_\theta = 2,84 \cdot 10^2 \text{ Вт/(м·К)}$ (для $\theta_\theta = 325 \text{ К}$) – теплопроводность воздуха;

$$\sigma_{3\theta} = 1 + \frac{4,12 \cdot 0,0284}{30 \cdot 10^{-3}} 0,105 \cdot 0,07 = 0,143 \text{ Вт/К}$$

4. Проверяется условие:

$$\Delta\theta_{\theta\kappa} \leq (0,84/L_z)^3;$$

$$(0,84/0,07)^3 = 1728 \text{ К} > 16 \text{ К};$$

Для $\theta_m = 0,5(\theta_\theta + \theta_\kappa) = 0,5(325 + 309) = 317 \text{ К}$ определяем значение A_2 по таблице 1.1.

$$A_2 = 1,338;$$

Определим $\sigma_{\theta\kappa}$:

$$\sigma_{\theta\kappa} = 2A_2 \left(\theta_\theta - \theta_\kappa \right)^{1/4} \left[\frac{L_1 L_3 + L_2 L_3}{L_3^{1/4}} + \frac{L_1 L_2}{\min(L_1, L_2)^{1/4}} \right] \cdot K_H$$

$$\sigma_{\theta\kappa} = 2 \cdot 1,338 \cdot 16^{1/4} \left[\frac{0,2 \cdot 0,09 + 0,13 \cdot 0,09}{0,09^{1/4}} + \frac{0,2 \cdot 0,13}{\min(0,2, 0,130)^{1/4}} \right] \cdot 1 = 0,522 \text{ Вт/К}$$

5. Определяем $\sigma_{3\kappa}$

$$\sigma_{3\kappa} = \frac{\sigma_{3\theta} \cdot \sigma_{\theta\kappa}}{\sigma_{3\theta} + \sigma_{\theta\kappa}}$$

$$\sigma_{3\kappa} = \frac{0,143 \cdot 0,522}{0,143 + 0,522} = 0,112 \text{ Вт/К}$$

6. Находим $\sigma_{3\kappa}^\Sigma$

$$\sigma_{3\kappa}^\Sigma = \sigma_{3\kappa} + \sigma_{3\kappa}^\lambda$$

$$\sigma_{3\kappa}^\Sigma = 0,112 + 0,136 = 0,248 \text{ Вт/К}$$

7. В первом приближении определяем

$$\Delta\theta_{3\kappa1} = \Phi / \sigma_{3\kappa}^\Sigma$$

$$\Delta\theta_{3\kappa1} = 80,587 \text{ К}$$

8. Проверка условия

Проверка условия

$$|\Delta\theta_{3\kappa0} - \Delta\theta_{3\kappa1}| \leq \varepsilon (\approx 1 \text{ К})$$

$$|80 - 80,587| = 0,587 \leq \varepsilon (\approx 1 \text{ К})$$

Так как все условия выполняются, то можно сделать вывод о том, что все параметры выбраны правильно.

Задание

7. Выбрать способ охлаждения разработанной в соответствии с заданием предыдущего практического занятия одноблочной конструкции ФБРЭА и обосновать его.

8. Определить исходные данные для теплового расчета.

9. Определить средне-поверхностную температуру пакета плат субблока и корпуса при заданных геометрических размерах.

10. Произвести расчёт перегрева зоны относительно корпуса.

11. Проверить все условия обеспечения заданных тепловых режимов.

Литература

1. Дульнев Г. Н. Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре: Учебник для вузов по специальности «Конструирование и производство радиоаппаратуры». Москва, издательство Высшая школа, 1984. — 247 с.

2. Верба В.С., Удалов А.И. Тепловое проектирование радиоэлектронных средств. Учебное пособие / Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики (технический университет) - М., 2005. - 183 с.

3. Удалов А.И. Основы теплообмена в радиоэлектронных системах: Учебное пособие / Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики (технический университет) - М., 2002. - 60 с.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №10

РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ БЛОКОВ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

Цель работы: получение навыков расчета надежности элементов радиоэлектронной аппаратуры.

Краткие сведения

10.1 Общие вопросы надежности

Возникновение проблемы надежности в электронике относят к началу пятидесятых годов, когда развитие техники привело к созданию сложной радиоэлектронной аппаратуры и передачи ей основных функций управления. В этот период специалисты столкнулись с очень частыми отказами аппаратуры и, в первую очередь, за счет ее схемотехнического несовершенства и некачественных элементов. Для преодоления создавшихся трудностей необходим был научно обоснованный подход к обеспечению высокой работоспособности различной аппаратуры и приборов в нее входящих. Этот подход и вылился в создание нового научно направления – науки о надежности.

Основные положения общей теории надежности являются фундаментом для разработки прикладных вопросов надежности в различных областях техники, в том числе и в полупроводниковой электронике.

Большой объем работ, направленных на повышение надежности полупроводниковых приборов и интегральных микросхем, у нас в стране и за рубежом, и достигнутые успехи в этой области обеспечивают в большинстве случаев функционирование приборов в эксплуатации с надежностью, характеризующейся интенсивностью отказов. Однако постоянный рост сложности радиоэлектронной аппаратуры, расширение выполняемых ею управляющих функций выдвигают все более жесткие требования к комплектующим изделиям. Это в свою очередь стимулирует расширение фронта работ в области надежности и вызывает необходимость периодического обобщения получаемых результатов.

Материальной основой всей системы является подсистема сбора данных о надежности и анализ отказов приборов на всех этапах их жизненного цикла. Согласованность всех составляющих системы обеспечения надежности, постоянное совершенствование организационных основ системы должно идти в ногу с прогрессом в области полупроводниковой электроники.

10.2 Основные определения теории надежности

Вся промышленная продукция, в том числе полупроводниковые приборы и интегральные микросхемы характеризуются таким параметром как качество, представляющий собой совокупность свойств продукции, обуславливающих ее пригодность удовлетворять определенные потребности в соответствии с назначением.

Свойства продукции делятся на простые и сложные. Надежность определяется одним из фундаментальных сложных свойств продукции и определяется как свойство объекта сохранять во времени, в установленных пределах, характеризующее способность выполнять требуемые функции в данных режимах и условиях применения технического обслуживания, ремонта, хранения и транспортирования.

Для описания конкретного прибора пользуются понятиями исправного и работоспособного состояния. Под исправными подразумевается состояние прибора, при котором он соответствует всем требованиям нормативной или конструктивной документации.

Работоспособность такое состояние, при котором все параметры, которые характеризует способность прибора выполнять заданные функции соответствуют нормативно-технической или конструкторской документации, способным выполнять основные функции в данном состоянии, либо повреждения, не влияющие на электрические параметры (нарушение маркировки, сколы, царапины, вмятины на корпусе).

Фундаментальным понятием теории надежности является определение отказа, как события, заключающегося в нарушении работоспособного состояния. При этом под нарушением работоспособного состояния понимается либо внезапное прекращение функционирования прибора, либо значительные изменения электрических параметров. Характеристикой прибора, связанной с его эксплуатацией является наработка, представляющая собой продолжительность объема работы прибора. Нарботка измеряется в часах. Нарботка прибора в часах от начала эксплуатации до наступления предельного состояния называют техническим ресурсом. Календарная продолжительность от начала эксплуатации до наступления предельного состояния называют сроком службы. Под безотказностью понимают свойство прибора непрерывно сохранять работоспособное состояние в течении некоторого времени или некоторой наработки.

Из этого следует, что данное свойство отражает основное содержание надежности, так как главное назначение любого прибора, используемого по

прямому назначению исправно выполнять предназначенные ему функции в течении определенного промежутка времени.

Применительно к полупроводниковым приборам и микросхемам под безотказностью понимается способность непрерывно сохранять исходные параметры при использовании в выпрямительном, усилительном, переключательном и других режимах, обусловленных схемами и условиями эксплуатации.

10.3 Количественные характеристики теории надежности

Для оценки аппаратуры используются критерии надежности.

Критерий надежности – признак, по которому оценивается надежность различных изделий, а характеристика – количественное значение критерия надежности конкретного изделия.

К критериям надежности изделий, для невосстанавливаемой аппаратуры относятся: интенсивность отказов $\lambda(t)$; вероятность безотказной работы в течение определенного времени $P(t)$; вероятность отказа в течение определенного времени $Q(t)$; средняя наработка до первого отказа T_{cp} .

При расчете интенсивности отказов изделия необходимо знать номенклатуру и количество входящих в схему элементов. При этом:

$$\Lambda = \lambda_1 n_1 + \lambda_2 n_2 + \lambda_3 n_3 + \dots + \lambda_n n_n$$

где λ – интенсивность отказов элементов схемы;

$n_1, n_2, n_3, \dots, n_n$ – количество элементов каждого типа в схеме.

Вероятностью безотказной работы называется вероятность того, что при определенных условиях эксплуатации в заданном интервале времени не произойдет ни одного отказа. Вероятность безотказной работы рассчитывается по следующей формуле:

$$P(t) = e^{-\Lambda \cdot t}$$

где e – основание натурального логарифма;

t – время нормальной работы изделия.

Отказ и безотказная работа являются событиями несовместимыми и противоположными, поэтому:

$$Q(t) = 1 - P(t)$$

Средняя наработка до первого отказа связана с интенсивностью отказов следующим соотношением:

$$T_{cp} = \frac{1}{\Lambda}$$

10.4 Расчеты надежности при проектировании РЭА

Требования к надежности разрабатываемого изделия задаются в техническом задании на разработку. На ранних стадиях разработки изделия составляется план обеспечения надежности, который на последующих стадиях разработки детализируется и уточняется. Одним из элементов этого плана является расчет надежности проектируемого изделия. Первые расчеты делают на ранних стадиях разработки, а с уточнением сведений об изделии уточняются и расчеты надежности. Существующие методы расчета надежности позволяют получить расчетным путем количественные характеристики надежности разрабатываемого изделия и сопоставить эти характеристики с заданными в техническом задании. Все расчеты надежности в основном сводятся к определению вероятности безотказной работы $P(t)$ и средней наработки до первого отказа $T_{ср}$ по известным интенсивностям отказов элементов схемы. В зависимости от полноты учета факторов, влияющих на работу изделия и его надежность, последовательно проводят три расчета надежности: прикидочный, ориентировочный и окончательный.

Прикидочный расчет позволяет судить о принципиальной возможности обеспечения требуемой надежности изделия. Этот расчет используется при проверке требований по надежности, выдвинутых заказчиком в техническом задании, при сравнительной оценке надежности отдельных вариантов выполнения изделия на ранних стадиях разработки. При прикидочном расчете делается допущение, что все элементы схемы равнонадежны, так как принципиальные электрические схемы на изделие и его составные части окончательно не разработаны. Соединения элементов с точки зрения надежности таково, что выход из строя любого элемента приводит к отказу всего изделия. Интенсивность отказов элементов берутся для периода нормальной работы, т.е. $\lambda_i(t) = \text{const}$. Тогда:

$$\Lambda = \lambda_i \cdot N,$$

где λ_i - средняя интенсивность отказов равнонадежных элементов схемы;

N – общее количество элементов.

Ориентировочный расчет проводится тогда, когда на изделие и все его составные части разработаны электрические принципиальные схемы. При ориентировочном расчете учитываются влияния на надежность изделия количества и типов применяемых в схемах элементов. При расчете делаются следующие допущения: все элементы схемы работают в нормальном режиме, предусмотренном техническими условиями на эти элементы; все элемен-

ты изделия работают одновременно; интенсивности отказов элементов берутся для периода нормальной работы, т.е. $\lambda_i(t)=\text{const}$. Интенсивности отказов элементов каждого типа берутся по соответствующим таблицам из справочников по надежности. Таким образом, ориентировочный расчет надежности позволяет определить рациональный состав элементов в изделии и наметить пути повышения надежности.

Окончательный расчет проводится на этапе технического проектирования и учитывает влияние на характеристики надежности режимов работы элементов в схеме и конкретные условия эксплуатации изделия. В общем случае интенсивности отказов элементов зависят от электрического режима работы элемента в схеме, температуры окружающей среды, механических воздействий в виде вибраций и ударов, влажности воздуха, давления, радиации и ряда других возможных факторов.

Пример расчета надежности

Исходные данные

Рассчитываемый блок РЭА содержит:

Интегральных микросхем -40 ед.

Конденсаторов постоянной емкости – 40 ед.

Плат печатных - 1 ед.

Разъемов - 720 ед.

Способ автоматизированной пайки – волновой

Нормированные коэффициенты применительно к данному расчету сведены в таблицу 10.1.

Таблица 10.1

Наименование	Тип элемента	Интенсивность отказов $\lambda_0, 10^{-6}, 1/ч$	Средняя наработка $T_0 = 1/\lambda_0, 10^6, ч$
Интегральные микросхемы	Полупроводниковые	0.01 – 2.5	100
Конденсаторы постоянной емкости	Керамические	0.04 – 0.7	25
Элементы монтажа	Плата печатная	0.1	10
	Разъемы	0.03 – 0.6	33
Пайка	Волной	0.01	

Расчет интенсивности отказов.

Микросхемы.

$$\lambda_{\min} = \lambda_{\min} \cdot n = 40 \cdot 0.01 = 0.4 \text{ 1/ч.}$$

$$\lambda_{\max} = \lambda_{\max} \cdot n = 40 \cdot 2.5 = 100 \text{ 1/ч.}$$

Конденсаторы.

$$\lambda_{\min} = 40 \cdot 0.04 = 1.6 \text{ 1/ч.}$$

$$\lambda_{\max} = 40 \cdot 0.7 = 28 \text{ 1/ч.}$$

Разъемы.

$$\lambda_{\min} = 51 \cdot 0.03 = 1.53 \text{ 1/ч.}$$

$$\lambda_{\max} = 51 \cdot 0.6 = 30.6 \text{ 1/ч.}$$

Плата печатная.

$$\lambda = 0.1 \cdot 1 = 0.1 \text{ 1/ч. Пайка.}$$

$$\lambda = 720 \cdot 0.01 = 7.2 \text{ 1/ч.}$$

Интенсивность отказов всего устройства.

$$\lambda_{\text{устр-ва}}^{\min} = 0.4 + 1.6 + 0.1 + 7.2 + 1.53 = 10.83 \text{ 1/ч.}$$

$$\lambda_{\text{устр-ва}}^{\max} = 100 + 28 + 0.1 + 7.2 + 30.6 = 165.9 \text{ 1/ч.}$$

$$\lambda_{cp} = \frac{\lambda_{\min} + \lambda_{\max}}{2} = \frac{10.83 + 165.9}{2} = 88.3 \text{ 1/ч.}$$

Расчет вероятности безотказной работы.

$$P(t)_{cp} = e^{-\lambda \cdot 10^{-6} \cdot t} = \frac{1}{2.72^{88.3 \cdot 10^{-6} \cdot 6760}} = \frac{1}{2.72^{0.59}} = 0.55,$$

$$\text{где } t = (8_{\text{ч}} \cdot 5_{\text{д}} \cdot 52_{\text{н}} \cdot 5_{\text{л}}) \cdot 0.65 = 6760 \text{ часов}$$

Вероятность отказа.

$$Q(t)_{cp} = 1 - P(t)_{cp} = 1$$

$$\text{Средняя наработка } T_{cp} = \frac{1 \cdot 10^6}{\lambda_{cp}} = \frac{10^6}{88.3} = 11325 \text{ ка. часов или } \approx 5.5 \text{ лет.}$$

Результаты расчета сведены в сводную таблицу 10.2

Таблица 10.2

Наименование	Обозначение	Результат
Средняя интенсивность отказов	λ_{cp}	88.3 1/час
Средняя вероятность безотказной работы	$P(t)_{cp}$	0.55 1/час
Средняя вероятность отказа	$Q(t)_{cp}$	0.45 1/час
Средняя наработка	T_{cp}	5.5 лет

Задание

1. Определить исходные данные для расчета надежности элементов разработанной в соответствии с заданиями предыдущих практических занятий одноблочной конструкции ФБРЭА.
2. Выбрать методику определения надежности и обосновать ее.
3. Определить средние значения интенсивности отказов, вероятности безотказной работы, наработки и вероятности отказов.

Литература

1. Барлоу Р., Прошан Ф. Статистическая теория надежности и испытания на безотказность. –М.: Наука, 1984.-328с.
2. Козлов Б.В., Ушаков И.А. Справочник по расчету надежности аппаратуры радиоэлектроники и автоматики. –М.: Советское радио», 1975.
3. Можяев А. С. Общий логико-вероятностный метод анализа надежности сложных систем. Уч. пос. Л.: ВМА, 1988. - 68с.
4. Рябинин И. А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем. СПб.: Издательство Санкт-Петербургского университета, 2007 г., 278 с.

Печатается по решению редакционно-издательского совета
Владимирского государственного университета имени Александра
Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»

Галас Валерий Петрович. Проектирование, конструирование и технология систем управления. Практикум для бакалавров направления 220400 – управление в технических системах профиль подготовки: управление и информатика в технических системах квалификация (степень) выпускника: бакалавр/
Галас В.П. – Владимир.: Издательство ВлГУ, 2015. - с. 140