

МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Физические методы контроля»

КОНСТРУИРОВАНИЕ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

*Методические рекомендации к курсовому проектированию
для студентов направления подготовки
12.03.01 «Приборостроение»
дневной формы обучения*



Могилев 2023

УДК 621.396.6
ББК 323.844-02
К65

Рекомендовано к изданию
учебно-методическим отделом
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Физические методы контроля» «26» января 2023 г.,
протокол № 5

Составитель канд. техн. наук, доц. В. Ф. Поздняков

Рецензент канд. техн. наук, доц. С. В. Болотов

В методических рекомендациях кратко изложены основные теоретические и практические материалы для выполнения курсовой работы для студентов направления подготовки 12.03.01 «Приборостроение» дневной формы обучения. Разработаны в соответствии с рабочей программой по дисциплине «Конструирование радиоэлектронной аппаратуры».

Учебно-методическое издание

КОНСТРУИРОВАНИЕ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

Ответственный за выпуск	С. С. Сергеев
Корректор	И. В. Голубцова
Компьютерная верстка	Н. П. Полевничая

Подписано в печать . Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Печать трафаретная. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 26 экз. Заказ №

Издатель и полиграфическое исполнение:
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования
«Белорусско-Российский университет».

Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/156 от 07.03.2019.

Пр-т Мира, 43, 212022, г. Могилев.

© Белорусско-Российский
университет, 2023

Содержание

Введение.....	4
1 Правила выполнения структурных, функциональных, оптических и электрических принципиальных схем. Буквенно-цифровые обозначения элементов электрических схем. Правила выполнения конструкторской документации при проектировании электронной аппаратуры. Выбор радиоэлементов.....	5
1.1 Условные графические обозначения на структурных и функциональных схемах.....	7
1.2 Стандартные позиционные обозначения элементов.....	8
2 Курсовая работа. Объем и структура.....	12
2.1 Структура пояснительной записки.....	12
3 Расчет ошибок выходного параметра методом максимума-минимума, методом статистических испытаний.....	29
3.1 Метод максимума-минимума.....	29
3.2 Линейные размерные цепи.....	30
3.3 Нелинейные размерные цепи.....	31
3.4 Метод статистических испытаний (метод Монте-Карло).....	33
Список литературы.....	34
Приложение А. Схема электрическая принципиальная.....	35
Приложение Б. Сборочный чертеж платы	36
Приложение В. Печатная плата.....	37
Приложение Г. Перечень элементов.....	38
Приложение Д. Спецификация.....	39

Введение

Целью дисциплины «Конструирование радиоэлектронной аппаратуры» является приобретение студентами знаний и умений проектирования, ремонта блоков и узлов электронной аппаратуры и измерительных приборов, выбора методов защиты от внешних воздействий, расчета их надежности, правильного оформления конструкторской документации на разрабатываемые электронные блоки.

Рабочая программа дисциплины предусматривает выполнение курсовой работы, целью которой является приобретение навыков у обучающихся методов проектирования печатных узлов как наиболее сложных и многокомпонентных блоков радиоэлектронной аппаратуры.

В связи с этим методические рекомендации содержат необходимую информацию для выполнения курсовой работы: объем и структура курсовой работы, порядок проектирования печатного узла, основные критерия и правила, используемые при проектировании, порядок расчета надежности проектируемого электронного узла.

Настоящие методические рекомендации позволят учащимся выбрать правильный подход к выполнению курсовой работы.

1 Правила выполнения структурных, функциональных, оптических и электрических принципиальных схем. Буквенно-цифровые обозначения элементов электрических схем. Правила выполнения конструкторской документации при проектировании электронной аппаратуры. Выбор радиоэлементов

В стандарте установлены виды и типы схем и их коды. В зависимости от видов элементов и связей, входящих в состав изделия, виды схем имеют следующие наименования и буквенные коды: электрические – код Э, гидравлические – код Г, пневматические – код П, газовые (кроме пневматических) – код Х, кинематические – код К, вакуумные – код В, оптические – код Л, энергетические – код Р, деления – код Е, комбинированные – код С.

Под комбинированной схемой понимается схема, когда на одном конструкторском документе выполняют схемы двух или более видов, выпущенных на одно изделие. Например, схема электрогидравлическая.

В зависимости от основного назначения типы схем имеют следующие наименования и цифровые коды: структурные – код 1, функциональные – код 2, принципиальные – код 3, соединений (монтажные) – код 4, подключения – код 5, общие – код 6, расположения – код 7, объединенные – код 0. Под объединенной схемой понимается схема, когда на одном конструкторском документе выполняют схемы двух и более типов, выпущенных на одно изделие.

Таким образом, наименование и обозначение схемы как вида документа состоит из кода вида и типа схемы, например, схема электрическая функциональная – Э2, схема электрогидравлическая принципиальная – С3.

В практике встречаются случаи, когда на схемах одного типа помещают сведения, характерные для схемы другого типа, например, на схеме соединений изделия показывают его внешние подключения. Такие схемы называют совмещенными. Номенклатура, наименования и коды этих схем устанавливаются отраслевыми нормативно-техническими документами.

Схемы структурные и функциональные предназначены для общего ознакомления с изделием и для изучения общих принципов работы изделия.

Данные схемы разрабатывают на этапах эскизного и технического проектирования. Они определяются сложностью изделия и необходимостью обеспечить исходными данными последующий этап проектирования.

Схема принципиальная предназначена для определения полного состава изделия, изучения принципов его работы и расчета. Она служит основанием для разработки конструкции, последующих схем и используется при наладке, регулировке, контроле, эксплуатации и ремонте изделия.

Схемы соединений, подключений и общая предназначены для представления сведений о соединениях составных частей изделий и изделия в целом. Эти схемы служат для разработки других конструкторских документов и, в первую очередь, чертежей, определяющих прокладку и способы крепления проводов,

жгутов и кабелей в изделии, а также для осуществления присоединений при наладке, контроле, эксплуатации и ремонте изделия.

Схема расположения определяет относительное расположение составных частей изделия и, при необходимости, их соединений. Эта схема используется при разработке других документов, а также при изготовлении и эксплуатации изделий.

Данные схемы разрабатывают на этапе рабочего проектирования, и их номенклатура определяется необходимостью обеспечить изготовление, контроль и эксплуатацию изделия.

На структурной схеме в виде прямоугольников должны быть изображены все основные функциональные части изделия.

Допускается изображать элементы, устройства, функциональные части в виде условно-графических объектов (УГО), установленных для функциональных и принципиальных схем.

На схеме должны быть показаны взаимосвязи электрические и, при необходимости, механические, существующие между функциональными частями. На линиях взаимосвязи можно стрелками показывать направление хода процессов, происходящих в изделии.

Графическое построение структурной схемы должно наглядно показывать взаимодействие функциональных частей в изделии.

Для каждой функциональной части изделия должно быть указано наименование, но можно также указать тип элемента и (или) обозначение документа, на основании которого этот элемент применен. Все эти сведения, как правило, вписывают внутрь УГО. При большом количестве функциональных частей вышеуказанные сведения допустимо помещать в таблицы, при этом функциональные части следует обозначить порядковыми номерами, чтобы была однозначная связь с таблицей.

На схемах допускается помещать информацию о конструктивном расположении функциональных частей, устройств, элементов в изделии, а также указывать другую информацию, например величины токов, математические зависимости и др. Эти пояснения не должны мешать наглядности схемы.

Функциональные схемы предназначены для разъяснения процессов, происходящих в изделии в целом, а также в отдельных функциональных частях. Поэтому для одного изделия может быть выпущено несколько функциональных схем.

На функциональных схемах должны быть изображены все функциональные части, функциональные группы, устройства, элементы, необходимые для разъяснения происходящих в изделии процессов, и показаны связи между ними.

Функциональные части, устройства, элементы изображают в виде УГО, установленных в стандартах ЕСКД, или прямоугольников.

Функциональный процесс, как правило, представляют слева направо и (или) сверху вниз. Допускается изображать пункты измерения и (или) контроля.

В схеме допускается приводить необходимые пояснения, места установки, диаграммы, таблицы и параметры физических величин в характерных точках.

Принципиальная схема определяет полный состав элементов, устройств в изделии, все электрические связи между ними, необходимые для осуществления электрических процессов и их контроля. Принципиальная схема дает детальное представление о принципах работы изделия. На схеме изображают соединители, зажимы и т. п., которыми заканчиваются входные и выходные цепи, а также можно показывать соединительные и монтажные элементы в изделии, устанавливаемые по конструктивным соображениям (приложение А).

Элементы, устройства, цепи на схеме размещают, как правило, на параллельных горизонтальных и вертикальных, прямых линиях без учета их действительного расположения. Обычно размещение выполняют сверху вниз, слева направо.

Все изображенные на схеме элементы должны быть обозначены буквенно-цифровым позиционным обозначением. Буквы и цифры позиционного обозначения должны выполняться одним размером шрифта.

Позиционное обозначение элемента проставляют рядом с УГО сверху или справа. Рядом с УГО элементов на схеме допускается указывать номинальные величины их основных параметров (емкость и т. п.) или сокращенное наименование элемента.

На схеме допускается помещать поясняющие надписи и указывать в характерных точках величины токов, напряжений, уровни сигналов и т. п.

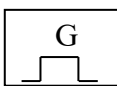
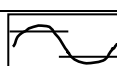
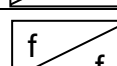
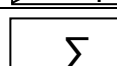
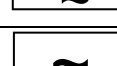
Для сложных изделий принципиальную электрическую схему допускается выполнять в виде нескольких схем, выделяя в отдельные схемы цепи питания, цепи управления и контроля, цепи блокировки и сигнализации и т. п., при этом:

- отдельные элементы могут быть повторно изображены на нескольких схемах;
- присвоение позиционных обозначений должно быть сквозным по всему изделию;
- каждая такая схема должна содержать перечень элементов, в который вписывают элементы, позиционные обозначения которым присвоены на данной схеме (приложение Г). Эти позиционные обозначения сохраняют при повторе этих элементов на других схемах;
- около повторенных УГО элементов в дополнение к позиционным обозначениям или вместо них допускается указывать сокращения наименования элемента или значения его параметров.

1.1 Условные графические обозначения на структурных и функциональных схемах

Функциональные группы и устройства изображают на структурных схемах в виде прямоугольников или квадратов, элементы – в виде условных графических обозначений, принятых для принципиальных схем (таблица 1.1).

Таблица 1.1 – Условные графические обозначения функциональных схем

Символика	Назначение
	Генератор
	Частотный фильтр
	Генератор прямоугольных импульсов
	Фильтр низких частот
	Полосовой фильтр
	Аттенюатор
	Ограничитель
	Преобразователь
	Преобразователь частот
	Суммирующий усилитель
	Усилитель
	Генератор синусоидальных сигналов
	Фильтр высоких частот
	Режекторный фильтр
	Первичный преобразователь

1.2 Стандартные позиционные обозначения элементов

Для пользования схемой, для чтения и изучения ее одних графических обозначений мало, поэтому каждому элементу на схеме присваивают условное буквенно-цифровое позиционное обозначение, состоящее из одной или двух букв латинского алфавита и цифр, которые обозначают порядковый номер элемента данного вида на схеме (таблица 1.2).

При реализации той или иной электрической принципиальной схемы необходимо сделать выбор соответствующих радиоэлементов. Однако это нужно делать с учетом функциональных особенностей разрабатываемого электронного блока. Следует учитывать климатические условия работы, напряжение питания, мощность потребления, массогабаритные показатели, стоимость. Кроме

того, необходимо как можно больше использовать элементы с большой интеграцией, а также наиболее современные разработки в области микроэлектроники. При использовании и реализации старых разработок и схем следует проводить замену старых радиоэлементов на новые, руководствуясь электрическими характеристиками данных элементов.

Таблица 1.2 – Условные буквенные обозначения радиоэлементов

Наименование	Обозначение
Громкоговоритель	BA
Микрофон	BM
Пьезоэлемент	BQ
Звукосниматель	BS
Конденсатор	C
Микросхема аналоговая интегральная	DD
Микросхема интегральная цифровая	DA
Устройство задержки (общее обозначение)	DT
Элементы разные (общее обозначение)	E
Лампа осветительная	EL
Разрядники, предохранители, устройства защиты (общее обозначение)	F
Предохранитель плавкий	FU
Генераторы, источники питания, кварцевые генераторы (общее обозначение)	G
Батарея гальванических элементов, аккумуляторов	GB
Прибор звуковой сигнализации	HA
Индикатор символьный	HG
Прибор световой сигнализации	HL
Реле, контакторы, пускатели (общее обозначение)	K
Реле времени	KT
Катушка индуктивности, дроссель	L
Двигатель (общее обозначение)	M
Прибор измерительный (общее обозначение)	P
Амперметр (миллиамперметр, микроамперметр)	PA
Счетчик импульсов	PC
Частотомер	PF
Омметр	PR
Измеритель времени действия, часы	PT
Вольтметр	PV
Ваттметр	PW
Резисторы постоянные и переменные (общее обозначение)	R
Терморезистор	RK
Шунт измерительный	RS

Продолжение таблицы 1.2

Наименование	Обозначение
Варистор	RU
Выключатели, разъединители, короткозамыкатели в силовых цепях (в цепях питания оборудования)	Q
Выключатель или переключатель	SA
Выключатель кнопочный	SB
Выключатель автоматический	SF
Трансформатор, автотрансформатор	T
Преобразователи электрических величин в электрические устройства связи (общее обозначение)	U
Приборы полупроводниковые и электровакуумные (общее обозначение)	V
Диод, стабилитрон	VD
Транзистор	VT
Тиристор	VS
Прибор электровакуумный	VL
Антенна	WA
Соединение контактное (общее обозначение)	X
Штырь (вилка)	XP
Гнездо (розетка)	XS
Соединение разборное	XT
Соединитель высокочастотный	XW
Устройства механические с электромагнитным приводом (общее обозначение)	Y
Электромагнит	YA
Устройства оконечные, фильтры (общее обозначение)	Z
Фильтр кварцевый	ZQ
Вычислитель	CPS
Вычислительное устройство (центральный процессор)	CPU
Процессор	P
Секция процессора	PS
Память	M
Оперативное запоминающее устройство (ОЗУ): с произвольным доступом с последовательным доступом	RAM SAM
Постоянное запоминающее устройство (ПЗУ)	ROM
ПЗУ с возможностью программирования: однократного многократного	PROM RPROМ
Управление	CO
Перенос	CR
Прерывание	INR
Передача	TF
Прием	RC

Окончание таблицы 1.2

Наименование	Обозначение
Ввод-вывод: последовательный параллельный	IOS IOP
Арифметика	A
Суммирование	SM или Σ
Вычитание	SUB
Умножение	MPL
Деление	DIV
Логическое И	ξ или И
Логическое ИЛИ	1 или 1
Исключающее ИЛИ	=1
Повторитель	1
Регистр: общее обозначение со сдвигом слева направо сверху вниз со сдвигом справа налево снизу вверх с реверсивным сдвигом	RG $\rightarrow$ RG $\downarrow$ RG $\leftarrow$ RG $\uparrow$ RG $\updownarrow$ RG
Счетчик двоичный	CT2
Счетчик десятичный	CT10
Дешифратор	DC
Шифратор	CD
Преобразователь	X/Y
Сравнение	= =
Мультиплексор	MUX
Демультимплексор	DMX
Генератор (общее обозначение)	G
Триггер: общее обозначение двухступенчатый Шмидта (пороговый элемент)	T TT TH
Формирователь (общее обозначение)	F
Ключ	SW
Модулятор	MD
Демодулятор	DM
Нелогические элементы: стабилизатор напряжения набор резисторов набор диодов набор транзисторов набор индикаторов	* ST *R *D *T *H
Интерфейс	BPIC
Стабилизатор U	STU

2 Курсовая работа. Объем и структура

Задания по курсовой работе студентам выдаются в виде электрической принципиальной схемы радиоэлектронного устройства. На основании выданной схемы студентам необходимо: провести анализ схемы; заменить устаревшие радиоэлементы на современную элементную базу; разработать сборочный чертеж печатного узла и чертеж печатной платы; произвести расчет надежности разработанного печатного узла.

Курсовая работа состоит из трех листов графической части формата А3 и пояснительной записки 15–20 листов. Графическая часть содержит электрическую принципиальную схему устройства, чертеж печатной платы, сборочный чертеж платы.

2.1 Структура пояснительной записки

2.1.1 Описание электрической принципиальной схемы. По предложенной электрической принципиальной схеме должно быть сделано описание ее работы. В описание входят: характеристики устройства, реализуемого данной схемой; описание и анализ элементной базы с выводами о необходимости замены устаревшей элементной базы на современные элементы; анализ и описание работы электрической принципиальной схемы.

2.1.2 Выбор радиоэлементов. В данном разделе необходимо из соответствующих справочников выбрать указанные в схеме радиоэлементы или заменить при необходимости устаревшие радиоэлементы на более современные. Все указанные в схеме радиоэлементы надо начертить в пояснительной записке в виде эскизов с нанесением габаритных размеров и диаметров выводов радиоэлементов, поскольку они понадобятся для определения площадей посадочных мест радиоэлементов и размеров печатной платы в целом.

Также при описании каждого радиоэлемента необходимо привести его предельные электрические параметры, которые впоследствии понадобятся для расчета надежности. Примеры выполнения эскизов некоторых радиоэлементов приведены на рисунках 2.1–2.7.

Резисторы. Внешний вид резистора МЛТ-0,125 приведен на рисунке 2.1.

Резисторы МЛТ-0,25, МЛТ-0,5, МЛТ-1,0 имеют аналогичный внешний вид, но другие габаритные размеры (таблица 2.1) и диаметр выводов.

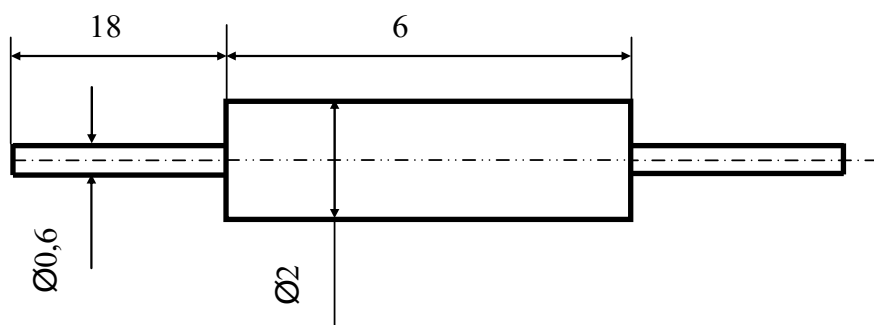


Рисунок 2.1 – Внешний вид резистора МЛТ-0,125

Таблица 2.1 – Габаритные размеры резисторов МЛТ разной мощности

Тип резистора	Длина, мм	Диаметр, мм	Длина выводов, мм	Диаметр выводов, мм
МЛТ-0,125	6,0	2,2	20	0,6
МЛТ-0,25	7,0	3,0	20	0,6
МЛТ-0,5	10,2	4,2	25	0,8
МЛТ-1,0	13,0	6,7	25	0,8

Подстроечный резистор.

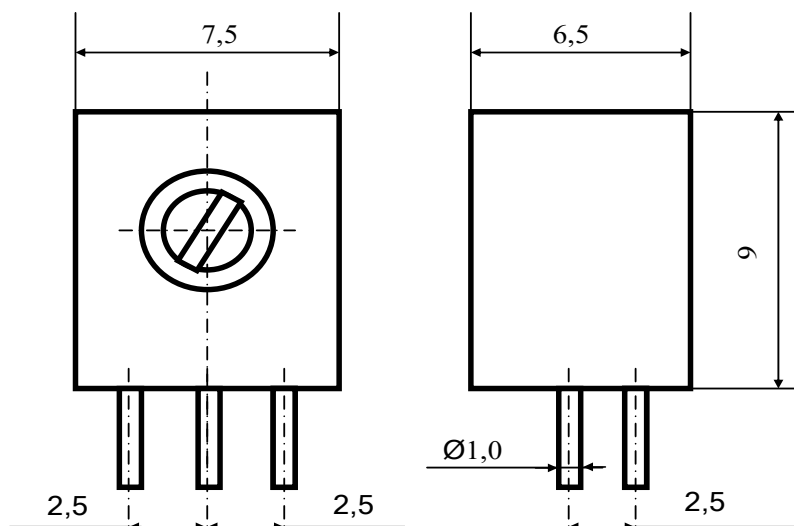


Рисунок 2.2 – Внешний вид резистора СПЗ-196

Другие типы постоянных резисторов и подстроечных резисторов, а также их габаритные размеры приведены в справочниках по резисторам [4].

Конденсаторы. Типоразмер конденсаторов серии КМ-4 зависит от типа исполнения и номинальной емкости. Внешний вид конденсатора типа КМ представлен на рисунке 2.3.

Внешний вид электролитического конденсатора представлен на рисунке 2.4.

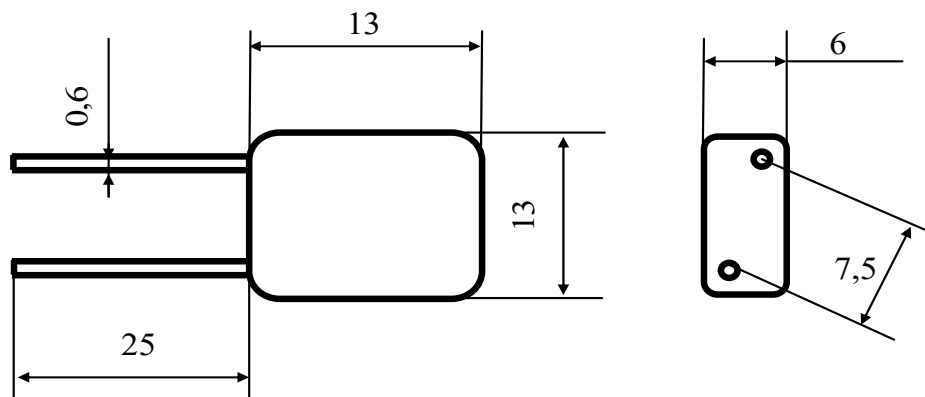


Рисунок 2.3 – Внешний вид конденсатора КМ-4 (типоразмер 4)

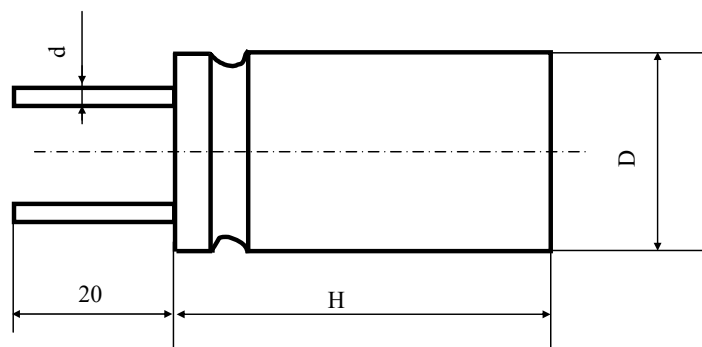


Рисунок 2.4 – Внешний вид и габаритные размеры электролитического конденсатора К50-16

Размеры H , d , D , указанные на рисунке 2.4, зависят от емкости конденсатора и предельного рабочего напряжения. Другие типы конденсаторов, а также их габаритные размеры приведены в справочниках по электрическим конденсаторам [5, 6].

Транзисторы. Корпуса транзисторов имеют разнообразные формы. Однако все типы корпусов можно условно разделить на два вида: металлические и полимерные. Некоторые виды корпусов представлены на рисунках 2.5 и 2.6. Другие типы транзисторов, а также их габаритные размеры приведены в справочниках по транзисторам [8].

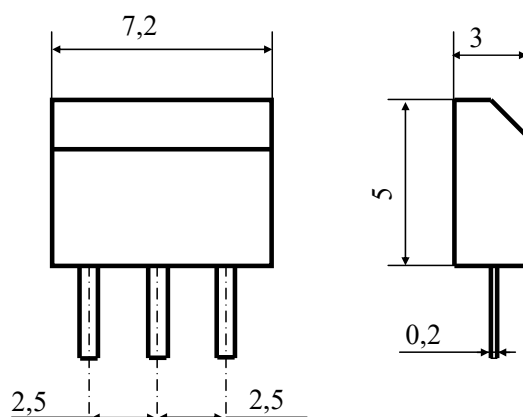


Рисунок 2.5 – Внешний вид и габаритные размеры транзисторов КТ 315, КТ 361

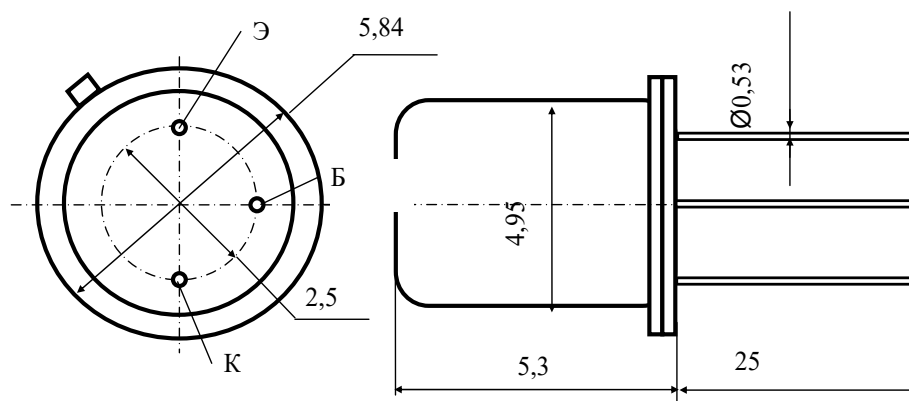


Рисунок 2.6 – Внешний вид и габаритные размеры транзистора КТ3102 (КТ 3107, КТ 343, КТ 208, КТ 203, КТ 317, КТ 313, КТ 3108, КТ 347, КТ 349, КТ 3127)

Микросхемы. В предложенных схемах могут быть использованы как аналоговые микросхемы, так и цифровые. В настоящее время используется большое количество различных типов микросхем, но практически все они выпускаются в одинаковых унифицированных корпусах. Аналоговые микросхемы – в металлических или пластмассовых корпусах, а цифровые – практически все в полимерных (рисунки 2.7 и 2.8).

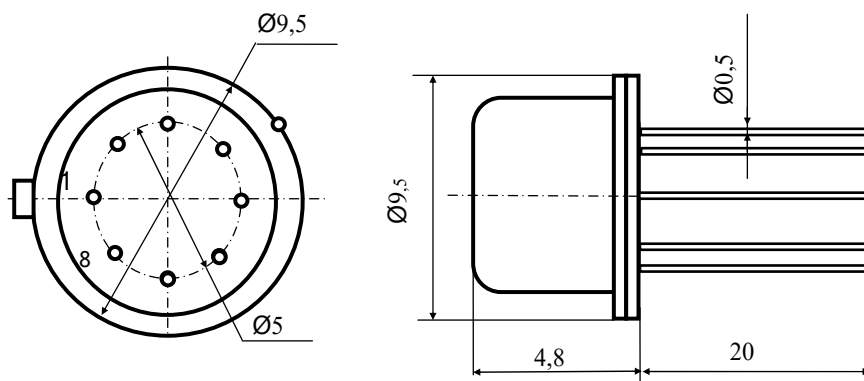


Рисунок 2.7 – Внешний вид и габаритные размеры аналоговой микросхемы в корпусе 301.8-2

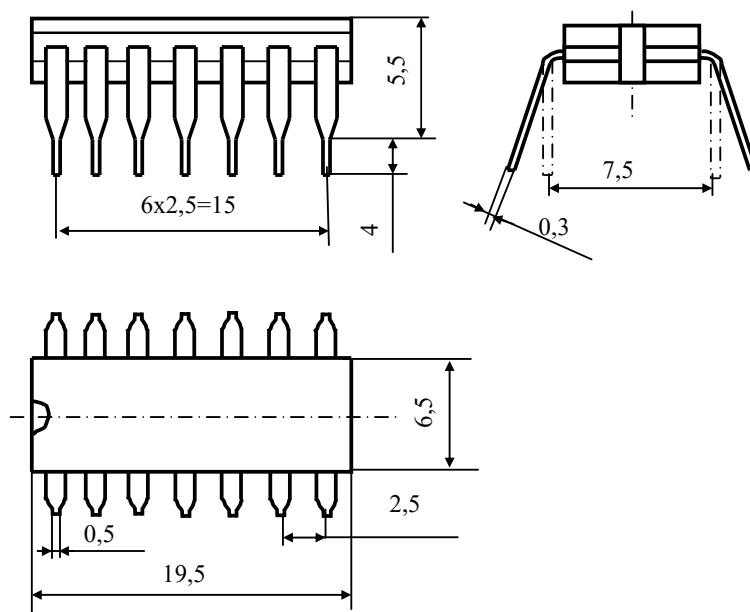


Рисунок 2.8 – Внешний вид и габаритные размеры цифровой микросхемы в корпусе 201.14-1, 201.14-6

Другие типы микросхем, а также их габаритные размеры приведены в справочниках по интегральным микросхемам.

2.1.3 Расчет посадочных мест радиоэлементов. Выбор размеров отверстий и контактных площадок под радиоэлементы. При этом рассматривают три вопроса: правило двух минимумов, нормы при размещении и расчет числа посадочных мест, нормы при трассировке и библиотека контактных площадок.

Процесс топологического конструирования состоит из размещения и трассировки. При размещении расставляют навесные элементы на плате, распреде-

ляют контакты соединителей по электрической схеме и размещают контрольные гнезда.

Критерием наилучшего решения служит правило двух минимумов: при топологическом конструировании печатной платы (ПП) должен быть достигнут минимум пересечений и минимум длины связей. Минимум пересечений означает и минимум переходных отверстий. Это требование обычно имеет приоритет, т. к. обеспечивает технологичность по минимуму числа слоев и создает важные предпосылки для безотказности.

Минимум длины связей означает максимум связей между соседними элементами и имеет значение для электрических схем в зависимости от быстродействия и частотного диапазона. Правилем двух минимумов следует руководствоваться при топологическом конструировании ПП.

Нормы при размещении и расчет числа посадочных мест.

Несмотря на тесную взаимосвязь и взаимозависимость процедур размещения и трассировки, топологическое конструирование ПП начинается с предварительного размещения как самостоятельной процедуры. Расчету предельного числа корпусов интегральных микросхем (ИС), размещаемых на ПП, предшествует установление норм компактного размещения. Эти нормы исходят из расстановки ИС и других навесных элементов рядами. Выводы навесных элементов подвергаются формовке – операции придания выводам определенной формы и длины, обеспечивающих при сборке на ПП гарантированное расстояние паянного шва от тела элемента в соответствии с техническими условиями на элемент. Как правило, отформованные выводы выступают за габариты корпуса. Контур площади, занимаемой на ПП навесным элементом, включая контактные площадки под формованные выводы, называют посадочным местом.

Выводы навесных элементов, как правило, выполнены из проволоки круглого (штыревые выводы) или прямоугольного (планарные выводы) сечения. Элементы со штыревыми выводами можно устанавливать только с одной стороны ПП, элементы с планарными выводами можно устанавливать с обеих сторон ПП, но технологичность и ремонтпригодность печатного узла при двустороннем размещении падают.

Навесные элементы имеют планарные (ленточные прямоугольного сечения) выводы или проволочные (штыревые) выводы из круглой проволоки диаметром 0,4; 0,6; 0,8 мм, под которые должны быть предусмотрены металлизированные отверстия. Диаметр отверстия выбирают из расчета получения зазора между выводом и стенкой отверстия 0,1 мм, необходимого для капиллярного проникновения припоя во время пайки, которое повышает прочность соединения. Например: при диаметре выводов радиоэлемента 1 мм диаметр металлизированного отверстия составляет 1,2 мм, при диаметре выводов 0,8 мм диаметр отверстий – 1 мм. В любом случае диаметр металлизированных отверстий на платах общего применения не делают менее 0,8 мм. Отверстия, предназначенные для пайки в них вывода, называют монтажными в отличие от крепежных отверстий, используемых только для механического крепления.

При составлении рисунка ПП необходимо пользоваться библиотекой контактных площадок стандартной формы (ГОСТ 23751–79). Стандартизированы

как одиночные контактные площадки, так и контактные группы. Контактной группой называется несколько регулярно расположенных контактных площадок, предназначенных для многовыводного элемента. Предусмотрены варианты ориентации площадок и групп.

Контур площади, занимаемый на плате навесным элементом, включая контактные площадки под выводы, называется посадочным местом. Площадь посадочных мест всех резисторов (рисунок 2.9), транзисторов, неэлектролитических конденсаторов будем вычислять по формуле

$$S = b \cdot a,$$

где a – длина посадочного места;
 b – ширина посадочного места.

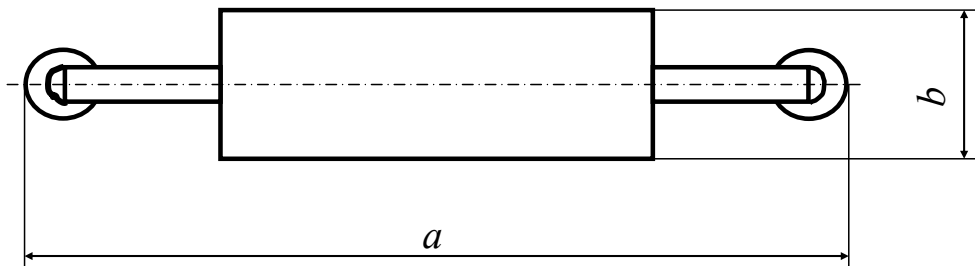


Рисунок 2.9 – К расчету посадочного места резистора

Аналогичным образом рассчитываются посадочные места других радиоэлементов похожего типоразмера.

Посадочное место конденсатора типа К50-16 (рисунок 2.10) определяется по формуле

$$S = \pi \cdot r^2,$$

где r – наибольший радиус конденсатора.

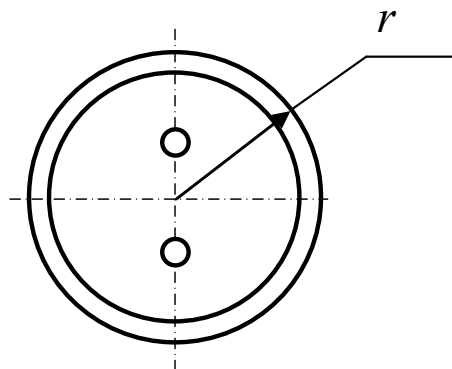


Рисунок 2.10 – Посадочное место электролитического конденсатора К50-16

Посадочное место цифровой микросхемы показано на рисунке 2.11, аналоговой микросхемы – на рисунке 2.12.

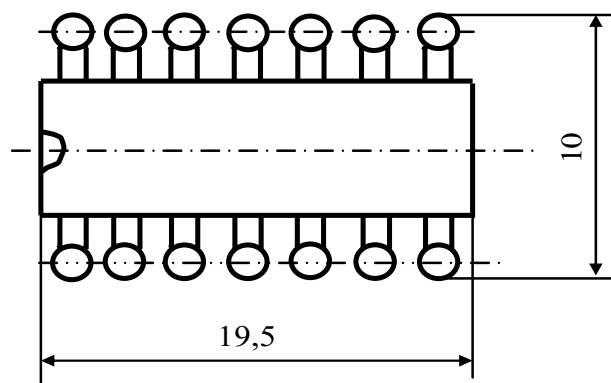


Рисунок 2.11 – Посадочное место микросхемы в корпусе 201.14-1, 201.14-6

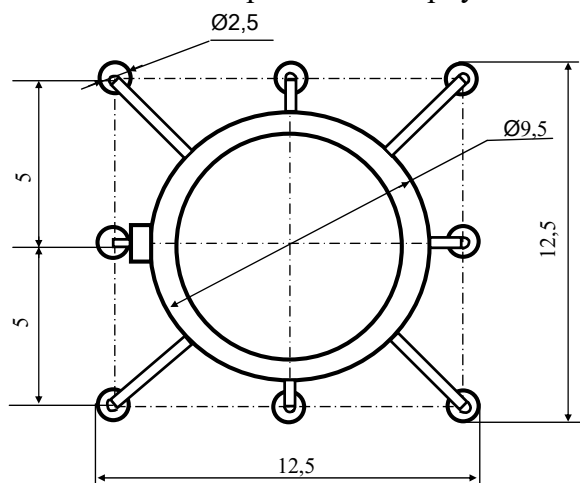


Рисунок 2.12 – Посадочное место микросхемы в корпусе 301.8-2

2.1.4 Расчет размеров печатной платы. Выбор класса плотности печатного рисунка и толщины проводящего слоя. При конструировании печатных плат используются четыре главных критерия выбора: габаритный критерий, критерий плотности рисунка и толщины проводящего слоя, критерий числа слоев, критерий материала основания.

Рабочая площадь ПП, или зона расположения посадочных мест на ПП, равна общей площади ПП за вычетом площади краевого поля – свободной полосы вдоль периметра ПП, предусматриваемой для технологических целей, не занимаемой рисунком и навесными элементами. Ширина краевого поля есть расстояние от края ПП до края первого ряда посадочных мест. Краевое поле определяется тремя координатами: x – ширина краевого поля по оси X (одинакова с левой и правой стороны ПП); y – ширина краевого поля для соединителя по оси Y (у нижней кромки ПП); y_1 – ширина краевого поля для размещения контрольных гнезд у верхней кромки ПП. Ширину краевого поля x с левого и с правого края принимают равной: для штыревых выводов $x = 5$ мм, для планарных выводов $x = 2,5$ мм. Ширину краевого поля по оси Y при отсутствии контрольных гнезд принимают $y = 2,5$ мм, а при их наличии $y = 12,5$ мм. Размер краевого поля находят в зависимости от типа выбранного соединителя.

Габаритный критерий. Выбор габаритов ПП (длина a и ширина b) связан с разделением электрической схемы блока на функционально законченные части. Длина ПП обычно регламентирована с учетом размера электрического соединителя и составляет $a = 170$ мм. Ширина b составляет 75; 120 (только для морской и самолетной РЭА); 150; 200 мм. Разрешенный к применению размер $b = 150$ мм предпочтительно заменять двумя стандартными платами размером 75 мм.

При разработке печатных плат нестандартной серии радиоэлектронных устройств размеры плат минимизируют или, иными словами, пытаются сделать с наименьшими размерами или с размерами под конкретную конструкцию корпуса, устройства.

Критерий плотности рисунка и толщины проводящего слоя. Предыдущий габаритный критерий тесно связан с той плотностью, с какой может быть выполнен рисунок. По ГОСТ 23751–76 установлены три класса плотности рисунка (таблица 2.2).

Таблица 2.2 – Геометрические размеры трех классов плотности рисунка ПП

Класс плотности	Плотность	Ширина проводника $t_{\min}$, мм	Расстояние между проводниками $S_{\min}$, мм	Разрешающая способность R , линий/мм	Предельные размеры ПП (a или b), мм
1	Малая	0,5	0,5	1,0	Без ограничений
2	Средняя	0,25	0,25	2,0	240
3	Большая	0,15	0,15	3,33	170

Для большинства разрабатываемых печатных плат используется малый класс плотности. В отдельных случаях при разработке печатного узла, состоящего из интегральных цифровых микросхем, используется средний класс плотности.

Шириной печатного проводника (сокращенно, шириной проводника) t называют поперечный размер проводника на любом участке в плоскости основания (неровности края во внимание не принимаются). Расстоянием между проводниками S называют расстояние между краями соседних проводников на одном слое печатной платы.

Разрешающей способностью рисунка R называют число полос (линий) равной ширины, укладываемое на 1 мм при шаге укладки, равном двойной ширине полосы. В рисунке ПП за линию принимают проводник. Разрешающая способность рисунка ПП

$$R = 1/(t + S),$$

где t – минимальная ширина проводника, допускаемая в узких местах рисунка, мм;

S – минимальное расстояние между проводниками, допускаемое в узких местах рисунка, мм.

Выбранный конструктором класс плотности рисунка должен быть проверен по норме допустимых рабочих напряжений для проводников, лежащих в

одной плоскости, а также по плотности тока (из расчета предельной допустимой плотности тока в печатном проводнике 20 А/мм) и по допустимым потерям на постоянном токе.

Плотность тока и потери зависят от толщины проводящего слоя, которая регламентирована тремя значениями: 10, 20 и 35 мкм. Если потери не существенны для работы электрической схемы (но не для сигнальных цепей, когда падение напряжения сигнала может уменьшить отношение сигнал – шум), то конструктор должен предпочитать толщину 10 мкм для повышения точности и для экономии меди. Плотность тока, если она окажется недостаточной из расчета принятого выше значения 20 А/мм, может быть увеличена на порядок при переходе на металлическое основание.

Критерий числа слоев. По числу слоев различают односторонние, двусторонние и многослойные платы. Чаще всего используются односторонние и двусторонние печатные платы. По возможности необходимо использовать односторонние платы, когда навесные элементы располагаются с одной стороны, а печатные проводники – с другой. Если невозможно развести рисунок с одной стороны, то используют для этой цели и сторону со стороны навесных элементов. В данном случае проводящие слои печатной платы с разных сторон соединяются между собой через отверстия, в которые впаиваются ножки элементов, или через переходные металлизированные отверстия.

Критерий материала основания. Выбор толщины и материала основания оказывает основное влияние на свойства ПП: жесткость, собственную емкость, теплопроводность. Установлен размерный ряд значений толщины оснований ПП как гибких, так и жестких (мм):

- гибкие 0,1–0,2–0,4;
- жесткие 0,8–1,0–1,5–2,0–3,0.

Наибольшее распространение в отечественной практике нашла толщина 1,0 и 1,5 мм, которая допускает получение металлизированных отверстий в основании соответственно 0,32 и 0,48 мм (минимальный допустимый диаметр). Если толщину основания выбирают с точки зрения жесткости печатного узла, то надо учитывать, что жесткость пропорциональна толщине в кубе. Для оснований применяют изоляционные материалы типа стеклопластиков.

2.1.5 Компоновка радиоэлементов на плате. Разработка печатной платы. Трассировка соединений, это разработка рисунка электрических связей между выводами радиоэлементов, а также электрических связей данной печатной платы с другими частями приборов. Рисунок соединений состоит из графических элементов-проводников и контактных площадок. Его выполняют на поле чертежа, где показаны границы рабочей площади ПП и нанесена декартова координатная сетка с основным шагом 2,5 мм и дополнительным шагом 0,5 мм. Координатной сеткой называют совокупность тонких сплошных линий на чертеже, соответствующих определенным значениям координат в прямоугольной (или, очень редко, в полярной) системе. Шагом координатной сетки называется расстояние между соседними линиями сетки, а узлом – точка пересечения линий (приложение В).

Большую сторону печатной платы ориентируют по оси Х. Сторону установки навесных элементов обозначают на чертеже буквами СУ, обратную сторону – СО. Начало координат при отсчете делений координатной сетки на стороне установки расположено в левом нижнем углу, а на обратной стороне – в правом нижнем.

Величина свободного поля слева и справа – не менее 5 мм, сверху – не менее 2,5 мм, снизу оставляется место для контактных площадок, для закрепления разъема, свободное поле должно быть не менее 12,5 мм (конкретный размер зависит от типа применяемого разъема). Зная размеры печатной платы, размеры посадочных мест радиоэлементов, можно определить их число и возможность размещения на данной печатной плате.

Нормы при выборе элементов рисунка основаны на требовании максимальной компактности с сохранением технологичности. Графические элементы представляют собой полосы проводникового материала различной ширины, длины, формы, ориентации и контактные площадки с отверстиями или без них. Полоски выполняют роль соединительных проводников, шин питания, земли, экранов. Проводник условно изображают одной линией, совмещаемой с линией координатной сетки (основной или вспомогательной). Предполагается, что проводник размещается на линии координатной сетки по своей оси симметрии. Рядом с линией на поле чертежа указывают ширину. Если проводники имеют изломы, то их следует выполнять в узлах координатной сетки с целью упрощения технологических операций.

Следует иметь в виду, что между проводниками на печатной плате возникают паразитные емкости. Сами проводники обладают паразитными индуктивностями, что ухудшает электрические параметры разрабатываемого электрического блока. Поэтому при трассировке соединений необходимо по возможности уменьшать длину проводников, увеличивать расстояние между ними. Индуктивность проводников снижается за счет увеличения их ширины.

ИС повышенной степени интеграции (ИС3 и ИС4) следует размещать непосредственно у контактов соединителей. Неиспользованные контакты следует соединять с шиной заземления и располагать между сигнальными выводами. Индуктивность шин питания снижают путем увеличения их ширины.

Навесные радиоэлементы чаще всего устанавливаются на печатной плате в определенном порядке, например рядами, либо в особых случаях, произвольно. Часто выводы радиоэлементов перед установкой на печатную плату подвергаются формовке.

Наряду с навесными элементами допускается применять навесные перемычки в количестве до 5 % общего числа соединений на ПП. Перемычка представляет собой отрезок изолированного провода, обеспечивающий электрическое соединение между двумя контактными площадками на одной стороне ПП.

На печатной плате можно размещать и экран. Он должен занимать максимально возможную площадь. Экран – это проводящий слой печатной платы, электрически связанный с общей шиной питания. Он служит для защиты радиоэлементов от влияния полей и т. п.

При составлении рисунка ПП необходимо пользоваться библиотекой контактных площадок стандартной формы. Стандартизированы как одиночные контактные площадки, так и контактные группы. Контактной группой называется несколько регулярно расположенных контактных площадок, предназначенных для многовыводного элемента. Предусмотрены варианты ориентации площадок и групп.

Рисунок соединений состоит из графических элементов: проводников и контактных площадок. Его выполняют на поле чертежа, границах рабочей области печатной платы. Рисунок, как правило, выполняют с применением прямоугольной координатной сетки с шагом 2,5 мм.

Отверстия на чертеже печатной платы, как правило, обозначают окружностями одинакового диаметра (2,5 мм).

Установлена система условных изображений и кодирования диаметров отверстий, что позволяет не проставлять их диаметры на чертеже (таблицы 2.3 и 2.4).

Таблица 2.3 – Таблица условных обозначений отверстий на печатной плате

Диаметр отверстия, мм	0,6	0,8	1,0	1,3	1,5	1,8	2,0	5,0
Условное обозначение								

Таблица 2.4 – Простановка обозначений отверстий и записи на поле чертежа печатной платы

Обозначение	Диаметр, мм	Диаметр контактной площадки, мм	Наличие металлизации	Число отверстий
	0,8 ^{+0,1}	2,0 ^{-0,1}	Есть	45
	1,3 ^{+0,12}	3,0 ^{-0,1}	Есть	34
	1,5 ^{+0,12}	3,0 ^{-0,1}	Есть	4
	2,0 ^{+0,12}	3,5 ^{-0,2}	Есть	12
	3,2 A ₅	—	Нет	4

Сборочный чертеж печатной платы выполняется на отдельном чертеже в приемлемом масштабе. Все элементы вычерчиваются на плате по размерам, приведенным в соответствующих справочниках. Центры отверстий обозначаются перекрестиями. На элементах или рядом наносятся их условные обозначения согласно электрической принципиальной схеме. Элементы, имеющие полярность (микросхемы, транзисторы, диоды, электролитические конденсаторы), обозначаются на сборочном чертеже с соответствующими обозначениями номеров точек или обозначениями наименований выводов.

Эти сведения необходимы для правильного монтажа в процессе изготовления платы. На сборочный чертеж печатной платы оформляется спецификация по существующим нормативным документам (приложения Б и Д).

Для разводки рисунка печатной платы могут быть использованы программные средства проектирования печатных плат: P-CAD, Proteus, NI Ultiboard.

2.1.6 Расчет показателей надежности печатного узла. Расчет надежности заключается в определении показателей надежности изделия по известным характеристикам составляющих компонентов в отдельности и условиям эксплуатации. Для расчета надежности необходимо иметь логическую модель безотказной работы системы. При ее составлении предполагается, что отказы элементов независимы, элементы считаются последовательно соединенными на логической схеме надежности. Элементы и система могут находиться в одном из двух состояний: работоспособном или неработоспособном. Элемент, при отказе которого отказывает вся система, считается последовательно соединенным на логической схеме надежности. Элемент, отказ которого не приводит к отказу системы, считается включенным параллельно.

Расчет надежности РЭА по внезапным отказам. Из анализа логической схемы надежности определяется способ резервирования, используемый в изделии. Если схема состоит только из последовательно включенных элементов, то система является резервированной.

Определяются интенсивности отказов элементов с учетом условий эксплуатации изделия:

$$\lambda_i = \lambda_{0i} \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot a_i(T, K_n), \quad (2.1)$$

где λ_{0i} – номинальная интенсивность отказов;

K_1, K_2 – поправочные коэффициенты в зависимости от воздействия механических факторов;

K_3 – поправочный коэффициент в зависимости от воздействия влажности и температуры;

K_4 – поправочный коэффициент в зависимости от давления воздуха;

$a_i(T, K_n)$ – поправочный коэффициент в зависимости от температуры поверхности элемента T и коэффициента нагрузки K_n .

Значения номинальных интенсивностей отказов элементов даны в таблице 2.5. В таблицах 2.6–2.8 приведены поправочные коэффициенты K_1 – K_4 .

Рассчитывается вероятность безотказной работы в течение заданной наработки (t_p принимается равным 10000 ч). Для нерезервированных систем

$$P(t_p) = \exp\left(-\sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot t_p\right), \quad (2.2)$$

где n – число радиоэлементов.

При этом интенсивность отказов системы $\lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i$, а среднее время наработки до отказа $T = 1/\lambda$.

Таблица 2.5 – Номинальные интенсивности отказов ЭРЭ

Наименование элемента	$\lambda_0 \cdot 10^6, 1/\text{ч}$
1	2
Микросхемы со средней степенью интеграции	0,013
Большие интегральные схемы	0,01
Транзисторы германиевые:	
до 2 мВт	0,4
до 20 мВт	0,6
до 200 мВт	0,7
св. 200 мВт	1,91
Транзисторы кремниевые:	
до 150 мВт	0,84
до 1 Вт	0,5
до 4 Вт	0,74
Диоды германиевые	0,157
Диоды кремниевые	0,2
Конденсаторы:	
бумажные	0,05
керамические	0,15
слюдяные	0,075
электролитические	0,035
воздушные переменные	0,034
Резисторы:	0,043
композиционные	0,03
пленочные	0,087
проволочные	0,045
Трансформаторы:	
выходные	0,09
звуковой частоты	0,02
высокочастотные	0,045
Трансформаторы силовые	0,025
Дроссели	0,34
Катушки индуктивности	0,02
Реле	$0,25 \cdot n$
Соединители	$0,06 \cdot n$
Переключатель кнопочный	$0,07 \cdot n$
Гнезда	0,01
Клеммы, зажимы	0,0005
Провода соединительные	0,01513
Кабели	0,475
Аккумуляторы	7,2
Батареи заряжаемые	1,4
Электродвигатели:	8,6
асинхронные	0,359
синхронные	0,36
Антенны	1,1
Волноводы жесткие	2,6
Волноводы гибкие	0,5
Предохранители	2,63
Выводы высокочастотные	0,7
Плата печатной схемы	0,01

Окончание таблицы 2.5

1	2
Пайка печатного монтажа	0,03
Пайка навесного монтажа	4
Громкоговорители динамические	4,7
Датчики оптические	2,5
<i>Примечание – n – число контактов</i>	

Таблица 2.6 – Коэффициенты влияния механических воздействий

Условия эксплуатации аппаратуры	Вибрация K_1	Ударная нагрузка K_2	Суммарное воздействие $K\Sigma$
Лабораторные	1,0	1,0	1,0
Стационарные (полевые)	1,04	1,03	1,07
Корабельные	1,3	1,05	1,37
Автофургонные	1,35	1,08	1,46
Железнодорожные	1,4	1,1	1,54
Самолетные	1,46	1,13	1,65

Таблица 2.7 – Коэффициенты влияния влажности

Влажность, %	Температура, °C	Поправочный коэффициент K_3
60...0	20...40	1,0
90...98	20...25	2,0
90...98	30...40	2,5

Таблица 2.8 – Коэффициенты влияния атмосферного давления

Давление, кПа	Поправочный коэффициент K_4	Давление, кПа	Поправочный коэффициент K_4
0,1...1,3	1,45	32,0...42,0	1,2
1,3...2,4	1,4	42,0...50,0	1,16
2,4...4,4	1,36	50,0...65,0	1,14
4,4...12,0	1,35	65,0...80,0	1,1
12,0...24,0	1,3	80,0...100,0	1,0
24,0...32,0	1,25	—	—

Рабочую температуру окружающей среды, в которой работает устройство, необходимо брать предельную для наших климатических условий, а именно – 30 °C.

Расчет коэффициентов нагрузки радиоэлементов, нагрузки печатных проводников по току. Одним из наиболее важных показателей при расчете надежности приборов и узлов является коэффициент нагрузки радиоэлементов, от которого в значительной степени зависит поправочный коэффициент a_t .

В таблице 2.9 приведены коэффициенты нагрузки отдельных элементов.

В основном они рассчитываются по допустимым значениям токов, напряжений или мощности. Одно из значений этих величин известно и его можно

взять из справочных данных на заданный радиоэлемент, а второе значение рассчитывается исходя из расчета цепей принципиальной схемы.

Таблица 2.9 – Коэффициенты нагрузки ЭРЭ

Наименование	Контролируемый параметр	Коэффициент нагрузки	Рекомендованное значение, импульсное	Рекомендованное значение, статическое
Микросхемы	Максимальный выходной ток $I_{вых.мах.}$. Входной ток микросхем, включенных на выход, $I_{ex.i}$	$\frac{\sum_{i=1}^n I_{ex}}{I_{Bmax}}$	—	—
Транзисторы	Мощность, рассеиваемая на коллекторе, P_k	$P_k/P_{k.don}$	0,5	0,2
Диоды	Обратное напряжение $U_{об}$	$U_0/U_{0.don}$	0,5	0,2
Конденсаторы	Напряжение на обкладках U	U/U_{don}	0,7	0,5
Резисторы	Рассеиваемая мощность P	P/P_{don}	0,6	0,5
Трансформаторы	Ток нагрузки I_n	$I_n/I_{n.don}$	0,9	0,7

После расчета коэффициентов нагрузок отдельных радиоэлементов по соответствующим графическим зависимостям (полиграммам) находят коэффициент $a_i(T, K_n)$ (рисунки 2.13–2.16).

Выбранный конструктором класс плотности рисунка должен быть проверен по норме допустимых рабочих напряжений для проводников, лежащих в одной плоскости, а также по плотности тока и по допустимым потерям на постоянном токе.

Предельная допустимая плотность тока в печатном проводнике, выполненном из меди, составляет 20 А/мм². Сначала находят (из схемы и разработанного рисунка печатной платы) наиболее нагруженные проводники, рассчитывая ток, проходящий через него, а затем находят плотность тока, исходя из толщины и ширины проводника.

В данных графиках температура поверхности радиоэлементов выбирается с учетом их нагруженности. Практически все цифровые микросхемы имеют температуру корпуса 35 °С...40 °С. Температура корпуса аналоговых микросхем, конденсаторов, не нагруженных диодов, транзисторов, резисторов принимается равной температуре окружающей среды. Температура теплонагруженных элементов определяется по рабочим параметрам в конкретной схеме.

Интенсивности отказа рассчитываются для каждого радиоэлемента в отдельности, а затем суммируются.

Все данные по каждому радиоэлементу вносятся в сводную таблицу 2.10.

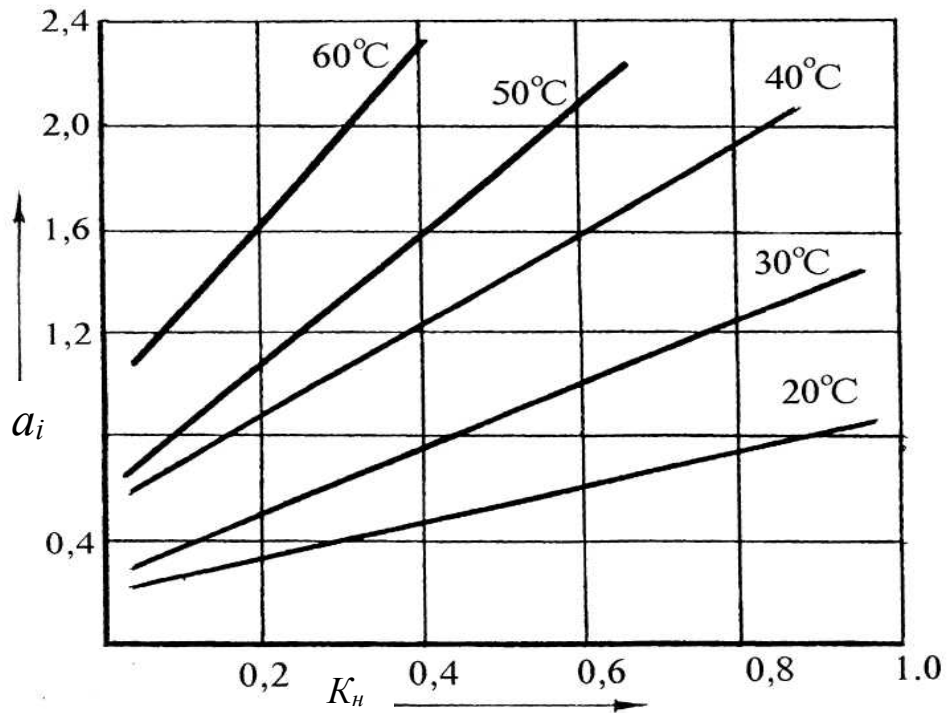


Рисунок 2.13 – Зависимость $a_i(T, K_n)$ для транзисторов

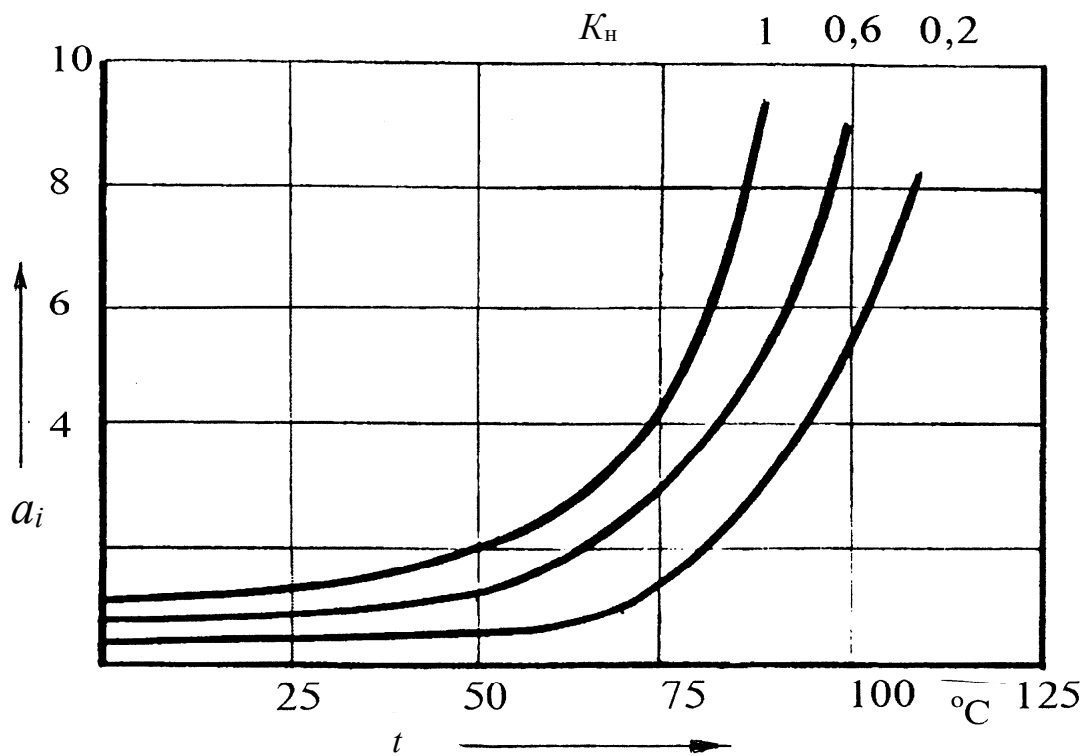


Рисунок 2.14 – Зависимость $a_i(T, K_n)$ для диодов

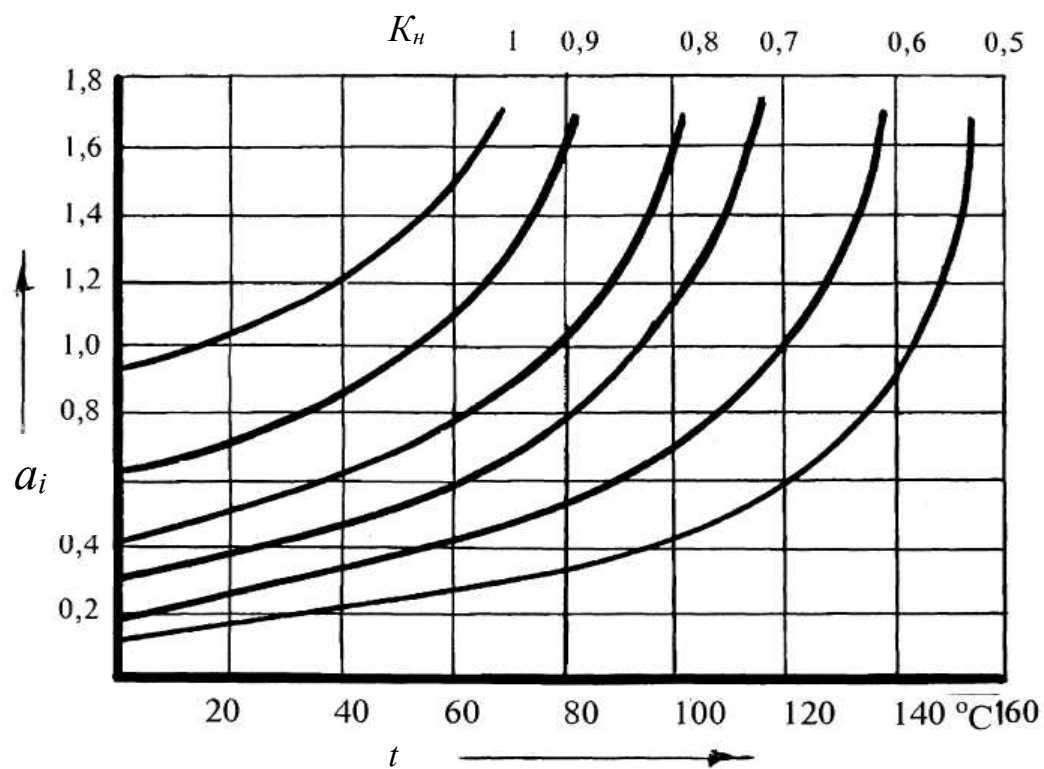
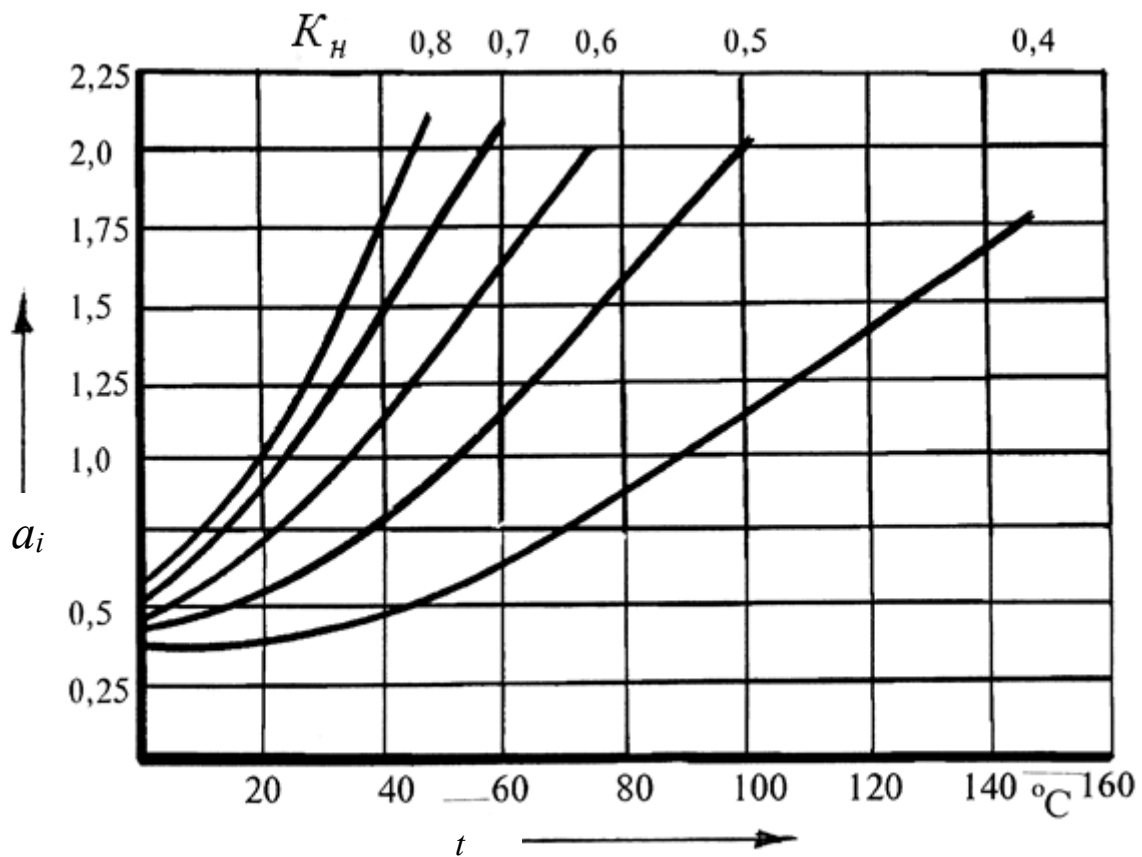
Рисунок 2.15 – Зависимость $a_i(T, K_H)$ для конденсаторовРисунок 2.16 – Зависимость $a_i(T, K_H)$ для резисторов

Таблица 2.10 – Интенсивность отказов элементов схемы

Наименование элемента	Номинальная интенсивность отказов $\lambda_{oi}, 10^{-6} 1/\text{ч}$	Коэффициент нагрузки K_n	Температура поверхности элемента $T, ^\circ\text{C}$	Поправочный коэффициент $a_i(T, K_n)$	Интенсивность отказов с учетом внешних условий $\lambda_{oi} \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot 10^{-6} 1/\text{ч}$	Интенсивность отказов элемента $\lambda_i, 10^{-6} 1/\text{ч}$
C1	0,15	0,36	20	0,18	0,16	0,029
...	...	...	...	...	...	...
C5	0,15	0,36	20	0,18	0,16	0,029
R1	0,03	0,0001	20	0,35	0,032	0,0112

3 Расчет ошибок выходного параметра методом максимума-минимума, методом статистических испытаний

3.1 Метод максимума-минимума

При использовании этого метода допуски составляющих размеров назначаются так, чтобы допуск замыкающего размера при любой комбинации составляющих размеров был выдержан в любом случае. Обеспечиваемая при этом полная (абсолютная) взаимозаменяемость дает ряд значительных преимуществ. В частности, сборка при этом не требует дополнительных мероприятий, таких как выбор и подгонка деталей; требования к квалификации рабочей силы могут быть невысокие. Кроме того, относительно просто определяется длительность сборки, расширяются возможности разделения труда, облегчается взаимозаменяемость деталей, так как их доработка не требуется.

Поэтому всегда следует стремиться к полной взаимозаменяемости. Правда, она требует обеспечения экономичности в случае цепей с малым числом звеньев или больших допусков замыкающих звеньев в случае цепей с большим числом размеров, чтобы допуски составляющих размеров были реально реализуемыми. Решение исходного уравнения размерной цепи, общая форма которого имеет вид $M = f(M)$, при использовании метода максимума-минимума в соответствии с линейным законом увеличения допусков имеет вид

$$T_0 = \sum_{i=1}^m \left| \frac{df}{dM_i} \right| \cdot T_i. \quad (3.1)$$

В зависимости от того, линейны или нелинейны функциональные размерные цепи, расчет значений размеров и допусков должен производиться соответствующим методом.

3.2 Линейные размерные цепи

Для линейной размерной цепи исходное уравнение

$$M_0 = M_1 \pm M_2 \pm M_3 \pm \dots \pm M_i \pm \dots \pm M_m. \quad (3.2)$$

Вследствие независимости размеров цепи частные производные могут принимать значения только +1 или -1. Они называются показателями направления (вращения по знаку).

Таким образом, для допуска T замыкающего размера M цепи получаем простое выражение

$$T_0 = T_1 + T_2 + T_3 + \dots + T_m = \sum_{i=1}^m T_i. \quad (3.3)$$

Отсюда может быть рассчитан допуск T любого составляющего размера цепи:

$$T_n = T_0 - \sum_{i=1}^{n-1} T_i - \sum_{i=n+1}^m T_i. \quad (3.4)$$

Допуск, рассчитанный для размера M , симметричен относительно координаты C :

$$M = C \pm \frac{T}{2} = N + E_{co} \pm \frac{T}{2}. \quad (3.5)$$

Значения номинального размера N и координаты середины поля допуска C искомого размера M могут быть рассчитаны по характеристикам размерной цепи. Предельное отклонение координаты середины допуска E_{co} замыкающего размера M_0

$$E_{co} = \sum_{i=1}^m k_i \cdot E_{ci}. \quad (3.6)$$

Аналогично соответствующее выражение для составляющего размера M_i

$$E_{ci} = \frac{1}{k_i \cdot E_{co}} - \sum_{i=1}^{n-1} k_i \cdot E_{ci} - \sum_{i=n+1}^m k_i \cdot E_{ci}. \quad (3.7)$$

Эти уравнения показывают, что при заданном допуске замыкающего размера допуски T всех составляющих размеров цепи должны назначаться такими, чтобы их сумма не превышала допуск T замыкающего размера.

Следовательно, чем из большего числа размеров составляют цепь, тем меньшими должны быть допуски на эти размеры.

Пример – Пусть даны следующие уравнения: $R_5 = R_1 + R_2 - R_3 + R_4$;

$$R_1 = 20 \pm 1 \text{ Ом}; R_2 = 45 \pm 0,5 \text{ Ом}; R_3 = 50 \pm 1,5 \text{ Ом}; R_4 = 15 \pm 0,3 \text{ Ом}.$$

Необходимо найти допуск R_5 .

Занесем все данные для расчета в таблицу 3.1

Таблица 3.1 – Подготовка данных для расчета

i	$R_i, \text{Ом}$	$R_{i \text{ ном}}, \text{Ом}$	Среднее отклонение, Ом	k	Допуск, Ом
R_1	20 ± 1	20	0	+1	2
R_2	$45 + 0,5$	45	+0,5	+1	0,5
R_3	$50 - 1,5$	50	-1,5	-1	1,5
R_4	$15 \pm 0,3$	15	0	+1	0,6

Номинальное значение R_5

$$R_{5 \text{ ном}} = [(+1)(20) + (+1)(45) + (-1)(50) + (+1)(15)] = 30 \text{ Ом}.$$

Предельное отклонение δ_5 для R_5

$$\delta_5 = (+1)(0) + (+1)(0,5) + (-1)(-1,5) + (+1)(0) = 2 \text{ Ом}.$$

Допуск на R_5 (как замыкающее звено)

$$T_{R5} = 2 + 0,5 + 1,5 + 0,6 = 4,6 \text{ Ом}.$$

$$\text{Значение } R_5 = R_{\text{ном}} + \delta \pm \frac{1}{2} T_{R5} = (30 + 2) \pm 2,6 = 32 \pm 2,6 \text{ Ом}.$$

При этом наибольшее значение $R_5 = 34,6 \text{ Ом}$, наименьшее значение $R_5 = 29,4 \text{ Ом}$.

3.3 Нелинейные размерные цепи

При составлении исходного уравнения и, следовательно, при расчете номинального размера и предельного отклонения координаты середины поля допуска, а также допуска замыкающего звена необходимо учитывать функциональную взаимосвязь составляющих звеньев цепи. Предельные отклонения координаты

середины поля допуска могут быть рассчитаны по следующему уравнению (3.1) при условии, что они малы по сравнению с номинальными размерами.

Пример.

1 Имеем следующую зависимость:

$$R_2 = \frac{U_1 + U_2}{I_1} + \frac{U_3}{I_3} + R_4.$$

$$U_1 = 3 \text{ В} \pm 1 \%; \quad U_2 = 9 \text{ В} \pm 2 \%; \quad U_3 = 0,64 \text{ В} \pm 5 \%;$$

$$I_1 = 0,085 \text{ А} \pm 10 \%; \quad I_3 = 0,012 \text{ А} \pm 10 \%; \quad R_4 = 750 \text{ Ом} \pm 10 \%.$$

2 Определим допуски величин в единицах измеряемой величины:

$$\Delta U_1 = \pm 0,03 \text{ В}; \quad \Delta U_2 = \pm 0,18 \text{ В}; \quad \Delta U_3 = \pm 0,032 \text{ В};$$

$$\Delta I_1 = \pm 0,0085 \text{ А}; \quad \Delta I_3 = \pm 0,0012 \text{ А}; \quad \Delta R_4 = \pm 7,5 \text{ Ом}.$$

3 Определим степень влияния ошибки каждого первичного параметра на ошибку информативного. Коэффициенты влияния определяются частными производными функциональной зависимости.

$$\frac{dR_2}{dU_1} = \frac{1}{I_1} = \frac{1}{8,5 \cdot 10^{-2}} = 11,76;$$

$$\frac{1}{I_1} = 11,76;$$

$$\frac{dR_2}{dI_1} = \frac{U_1 + U_2}{I_1^2} = -\frac{3 + 0,64}{(8,5 \cdot 10^{-2})^2} = -503,8;$$

$$\frac{R_2}{dU_2} \cdot \frac{dR_2}{dU_3} = \frac{1}{I_3} = \frac{1}{1,2 \cdot 10^{-2}} = 83,34;$$

$$\frac{dR_2}{dI_3} = -\frac{U_3}{I_3^2} = -\frac{0,64}{1,2 \cdot 10^{-2}} = 53,34;$$

$$\frac{dR_2}{dR_4} = 1.$$

4 Определим возможную максимальную ошибку выходного параметра.

При этом полагаем, что все первичные параметры одновременно могут иметь наихудшие сочетания.

$$\Delta R_2 = \sum_{i=1}^6 \frac{dR_2}{dX_i} \cdot \Delta X_i, \quad (3.8)$$

где $\frac{dR_2}{dX_i}$ – коэффициент влияния ошибки i -го параметра;

ΔX_i – ошибка i -го параметра.

$$R_2 = 11,76 \cdot 0,03 + 11,76 \cdot 0,18 + (-503,8) \cdot 0,0085 + 83,34 \cdot 0,032 + \\ + (-53,34) \cdot 0,012 + 1 \cdot 75 = 75,2 \text{ Ом.}$$

Это максимальная ошибка выходного параметра.

5 Найдём номинальное значение R_2 :

$$R_2 = \frac{3+9}{0,085} + \frac{0,64}{0,012} + 750 = 944,05 \text{ Ом.}$$

6 Поскольку ошибки первичных параметров симметричны, то можно записать следующее:

$$R_{2\text{ном}} - \Delta R_2 < R_2 < R_{2\text{ном}} + \Delta R_2 ;$$

$$R_2 = (944,5 \pm 75,2) \text{ Ом.}$$

3.4 Метод статистических испытаний (метод Монте-Карло)

Основная идея этого метода состоит в моделировании случайного процесса путем выбора по жребию отдельных ситуаций в системе. Для осуществления метода необходимо иметь аналитические зависимости выходных параметров от первичных типа $y = f(x_i)$. Кроме этого, необходимо иметь совокупность случайных величин, распределенных по такому же закону, как и параметры x_i . Из данной совокупности случайных величин задают случайные значения первичным параметрам и подставляют их в уравнение $E = f(X_i)$. Находят по одному значению Y_i . Затем выбирают другие случайные значения первичных параметров из той же совокупности случайных величин и опять находят выходные параметры Y_i .

Этот процесс повторяется многократно, в результате чего можно построить функцию распределения $f(Y)$.

Необходимый объем испытаний определяется заданной точностью и надежностью оценки.

Список литературы

1 **Медведев, В. А.** Конструирование и технология производства электронных устройств: учебное пособие / В. А. Медведев. – Тольятти: ТГУ, 2013. – 70 с.

2 **Зеленский, А. В.** Основы конструирования электронных средств: учебник для студентов вузов / А. В. Зеленский, Г. Ф. Краснощекова. – Самара: Самар. гос. аэрокосм. ун-т, 2014. – 228 с.

3 **Муромцев, Д. Ю.** Конструирование узлов и устройств электронных средств / Д. Ю. Муромцев, И. В. Тюрин, О. А. Белоусов. – Ростов-на-Дону: Феникс, 2013. – 540 с.

4 **Конюшков, Г. В.** Основы конструирования механизмов электронной техники: учебное пособие / Г. В. Конюшков, В. И. Воронин, С. М. Лисовский. – Москва: Ай Пи Эр Медиа; Саратов: Дашков и К, 2017. – 184 с.

Схема электрическая принципиальная



Печатная плата



Печатная плата

[illegible]

Приложение Д **(обязательное)** **Спецификация**

Формат	Зона	Поз.	Обозначение	Наименование	Кол.	Примечание
				Документация		
A			СТ-01 00.00.000 СБ	Сборочный чертеж		
A3			СН-01 00.00.000 ЭЗ	Схема электрическая		
				принципиальная		
				Детали		
		1	СТ-01 00.00.001	Плата	1	
		2	СТ-01 00.00.002	Подкладка	3	
				Прочие изделия		
				Диоды		
				Д 818Г	2	VD1, VD2
				КД213 А	1	VD3
				Дроссели		
				L=20мм, Ø=10мм, n=10 вит-	3	L1-L3
				Конденсаторы		
				К50-16 100x50	1	C1
				Км-4 1200 пФ	1	C2
				Км-4 100 пФ	1	C3
				К50-16 100x50В	1	C4
				К50-16 100x50В	1	C5
			СТ-01 00.00.000			
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Стабилизатор напряжения	
Разраб.						
Провер.		Поздняков В. Ф				
Реценз.						
Н. контр.						
Утверд.					Лит. Лист Листов	
					1	