

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»

Особенности проектирования электронных средств специального назначения

Научно-образовательный модуль

Самара

2012

УДК 621.396.6
О-754

Автор-составитель: **Краснощекова Галина Федоровна**

Особенности проектирования электронных средств специального назначения [Электронный ресурс] : научно-образоват. модуль / Минобрнауки России, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т); авт.-сост. Г. Ф. Краснощекова. - Электрон. текстовые и граф. дан. (3,87 Мбайт) - Самара, 2012. – 1 эл. опт. диск (CD-ROM).

В состав научно-образовательного модуля входят:

1. Лекционный материал.
2. Методические указания к курсовой работе.
3. Аттестационные педагогические измерительные материалы (Тесты).

Научно-образовательный модуль рекомендуется студентам-магистрам по направлению 211000.68 «Конструирование и технология электронных средств», изучающих дисциплину «Особенности проектирования ЭС специального назначения» в А семестре.

Научно-образовательный модуль разработан на кафедре «Конструирование и производство РЭС» радиотехнического факультета Самарского государственного аэрокосмического университета.

© Самарский государственный
аэрокосмический университет, 2012

СОДЕРЖАНИЕ

I. ЛЕКЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ	Стр..
1. Характеристика излучений, воздействующих на ЭС.	5
1.1. Основные понятия, определения, терминология.	5
1.2. Виды излучений и их основные свойства.	5
1.3. Физическая величина излучений.	8
1.4. Источники излучения.	11
1.5. Характеристика поражающих факторов ядерного взрыва.	12
1.6. Характеристика импульса гамма-излучения.	14
1.7. Характеристика импульса потока нейтронов.	16
1.8. Характеристика космического излучения.	17
Литература	18
2. Типовые конструкции электронных средств.	18
3. Дестабилизирующие факторы и их влияние на работоспособность ЭС.	21
3.1. Влияние температуры на работоспособность ЭС.	22
3.2. Влияние атмосферного давления на работоспособность ЭС.	25
3.3. Влияние влаги на работу ЭС.	26
3.4. Влияние механических воздействий на работоспособность ЭС.	27
4. Анализ конструкций ЭС.	30
5. Основы моделирования ЭС.	37
5.1. Понятие моделирования и типы моделей.	37
5.2. Моделирование самоуправляемых систем.	38
5.3. Топологические схемы ЭС.	40
5.4. Моделирование топологии ЭС в процессе проектирования.	43
5.5. Моделирование проектных задач.	46
5.6. Цифровое моделирование температурных полей в электронных системах.	49
5.7. Расчет осредненных теплофизических параметров при цифровом моделировании тепловых полей.	52
5.8. Особенности программы.	55
6. Характеристика механических воздействий на ЭС.	55
6.1. Основные характеристики и типы амортизаторов.	56
6.2. Выбор схемы размещения амортизаторов.	58
6.3. Статический расчет амортизатора.	59
6.4. Динамический расчет амортизатора.	60
7. Исследование типов интегральных микросхем и их конструктивно-технологических параметров.	61
7.1. Краткие теоретические сведения.	61
7.2. Классификация и система условных обозначений ИМС.	62
Литература	66
8. Расчет параметров вибрации для навесных элементов ЭС.	66
9. Коэффициенты упругости и напряжения распространенных схем крепления микросхем и транзисторов.	69
10. Вероятностные характеристики стохастических колебаний элементов ЭС.	69
11. Исследование ударных нагрузок.	72
12. Температурные напряжения.	73
Литература	76
13. Эффективность теплоотвода.	78

13.1. Описание тепловой модели устройства.	78
13.2. Порядок расчета.	85
Литература	87
II. Методические указания к курсовой работе.	87
1. Цель и задачи выполнения курсовой работы.	88
2. Тематика курсовой работы.	88
3. Исходные данные к курсовой работе.	88
4. Задание на курсовую работу.	88
5. Объем курсовой работы.	89
6. Порядок выполнения курсовой работы.	89
7. Защита курсовой работы.	89
8. Методические указания по оформлению курсовой работы .	90
Литература	90
III. Аттестационные педагогические измерительные материалы.	91
1. Проверка остаточных знаний по курсу (тесты).	91

1. ХАРАКТЕРИСТИКА ИЗЛУЧЕНИЙ, ВОЗДЕЙСТВУЮЩИХ НА ЭС.

1. 1 Основные понятия, определения, терминология.

Ионизирующее излучение- излучение, способное при взаимодействии с веществом прямо или косвенно создавать в нем заряженные атомы и молекулы- ионы. Термин «излучение» является краткой формой рекомендуемого термина «ионизирующее излучение». При определении конкретных видов ионизирующих излучений слово «ионизирующее» опускается, например: «квантовое излучение». «гамма-излучение», «нейтронное излучение» и т.д.

Проникающая способность излучений- способность излучений проходить через вещества определенной толщины.

Рассеяние излучения- изменение направления первоначального распространения излучения при взаимодействии с веществом.

Поглощение энергии излучения- преобразование энергии в поглощаемой среде в другие виды энергии, а также в энергии других видов излучения.

Облучение- воздействие излучения на вещества, материалы, изделия или другие объекты.

Внешнее облучение- облучение от источников излучения, находящихся вне рассматриваемого объекта.

Внутреннее облучение- облучение от источника излучения, находящегося внутри рассматриваемого объекта.

Зона облучения- область пространства, находясь в которой объект(материал, изделие, устройство, конструкция) подвергаются действию излучения.

Статические радиационные испытания- испытания, проводимые после облучения объекта.

Динамические радиационные испытания- испытания, проводимые в момент действия излучения.

Радиационная стойкость материалов- способность материалов выполнять определенные функции и сохранять заданные характеристики и параметры в пределах установленных техническими требованиями норм во время и после воздействия излучения.

Критерий радиационной стойкости- заранее установленная и заданная техническими требованиями или техническими условиями на материал или изделие абсолютная или относительная величина допустимых измерений, наиболее важных для конкретных областей применения характеристик материалов в процессе или после их облучения.

Критериальные параметры- свойства или характеристики материалов, наиболее подверженные изменениям при облучении и значит определяющие их радиационную стойкость.

Предел радиационной стойкости- доза или поток излучений, при которых изменения основных , наиболее важных для конкретного технического применения характеристик материалов не превышает допустимых значений.

1.2. Виды излучений и их основные свойства.

Чтобы оценить процесс взаимодействий излучений с материалами, элементами и схемами ЭС, необходимо, прежде всего, знать виды излучений и их основные свойства.

Излучение – результат естественных и искусственных радиоактивных распадов веществ, ядерных взрывов, а также некоторых физических процессов в космосе.

Излучение состоит из непосредственно или косвенно ионизирующих частиц или смеси тех и других. К непосредственно ионизирующим частицам относят частицы-электроны, альфа частицы, протоны и т.д., обладающие достаточной кинетической энергией, чтобы осуществить ионизацию атомов путем непосредственного столкновения. К косвенно ионизирующим частицам относятся незаряженные частицы – нейтроны, кванты(фотоны) и др., которые вызывают ионизацию через вторичные эффекты.

Излучения подразделяются на корпускулярные и квантовые. Корпускулярные излучения представляют собой потоки быстро движущихся элементарных частиц-нейтронов, протонов и др., а также ядер атомов химических элементов. К квантовому излучению относятся электромагнитные излучения(гамма-лучи с длиной волны короче 0,05А и рентгеновское излучение, физически идентичное гамма-излучению, но с большей длиной волны от 0,06 до 20А). Нейтронное и гамма-излучения, образующиеся при ядерных взрывах, принято называть проникающей радиацией или проникающим излучением.

Излучения по своему энергетическому составу делятся на моноэнергетические (однородные) и немонаэнергетические(неоднородные). Моноэнергетическое излучение-это излучение , состоящее из частиц одного вида с одинаковой кинетической энергией или квантов одинаковой энергии. Немонаэнергетическое излучение- это излучение, состоящее из частиц одного вида с разной кинетической энергией или из различной энергии.

Излучение, состоящее из частиц различного вида или частиц и квантов, называют смешанным излучением.

Физическими параметрами, характеризующими основные свойства излучений, с точки зрения их воздействия на материалы и элементы ЭС, являются заряд, масса покоя, скорость движения, кинетическая энергия частиц или квантов (фотонов).

На практике, как правило, имеют дело с потоками частиц различной кинетической энергии. В связи с этим при характеристике излучений должен указываться энергетический спектр их потока.

К числу излучений, вызывающих значительные изменения свойств радиотехнических материалов, относятся следующие виды излучений: нейтронное, протонное, электронное, альфа-частицы, гамма- квантов и рентгеновское излучение.

Нейтрон- элементарная частица, не имеющая электрического заряда, является составной частью атомных ядер. Характер взаимодействия нейтронов с ядрами атомов вещества зависит от энергии нейтронов. В соответствии с этим, нейтроны принято классифицировать по диапазонам их кинетических энергий. При оценке радиационной стойкости радиотехнических материалов ,элементов ЭС и аппаратуры в целом, нейтроны с энергией до $(14 - 15)10^6$ эВ по диапазонам энергий делятся на две группы:

-медленные нейтроны с энергией до 100000эВ,

- быстрые нейтроны с энергией больше 100000эВ.

Медленные нейтроны при столкновении с атомами вещества вступают с ними в ядерные реакции, в результате чего возникает ионизирующее излучение.

В результате столкновения быстрых нейтронов с ядрами различных элементов они передают этим ядрам некоторую часть своей энергии. Образующиеся при этом ядра отдачи называют ионизацией. В результате происходит испускание гамма-лучей, а также альфа или бета-частиц. Нейтронное излучение обладает высокой проникающей способностью, что обусловлено отсутствием у частиц электрического заряда.

Протон – устойчивая элементарная частица с положительным элементарным электрическим зарядом, равным по абсолютной величине заряду электрона. Протоны вместе с нейтронами входят в состав всех атомных ядер и относятся к стабильным

элементарным частицам. Длина пробега протонов высоких энергий в веществе зависит, в основном, от ионизационных потерь.

Альфа-частица является ядром гелия с положительным электрическим зарядом, в два раза большим (по абсолютной величине) заряда электрона.

В отличие от других элементарных частиц альфа-частица имеет наименьшую длину пробега в материалах, поэтому они практически не воздействуют на элементы аппаратуры, которые защищены экранами или покрытиями. Однако одним из важнейших свойств альфа - излучения является высокая плотность ионизации, возрастающая к концу пробега частиц.

Зависимость пробега альфа – частиц в воздухе от их кинетической энергии может быть вычислена по формуле:

$$\chi_0 = 0,32 E_{\alpha}^{3/2};$$

где E_{α} - кинетическая энергия альфа – частиц, кэВ.

По известному значению пробега альфа – частиц в воздухе можно рассчитать их пробег в другом веществе по следующему соотношению:

$$X = 3,2 \cdot 10^{-4} \chi_0 \sqrt{\frac{A}{g}};$$

где g - плотность вещества;

A - массовое число;

χ_0 - длина пробега альфа – частицы в воздухе.

Электрон – устойчивая элементарная частица, имеет отрицательный электрический заряд.

Позитрон является античастицей электрона и в отличие от электрона имеет положительный заряд.

Проникающая способность электронов и позитронов (бета- излучения) во много раз больше, чем альфа – частиц и протонов той же энергии. На Рис.1. показано относительное уменьшение количества электронов различной энергии по мере прохождения их через слой вещества. При этом пробеги электронов в различных веществах (представленные в кгм²) приняты с достаточной для практических целей точностью одинаковыми.

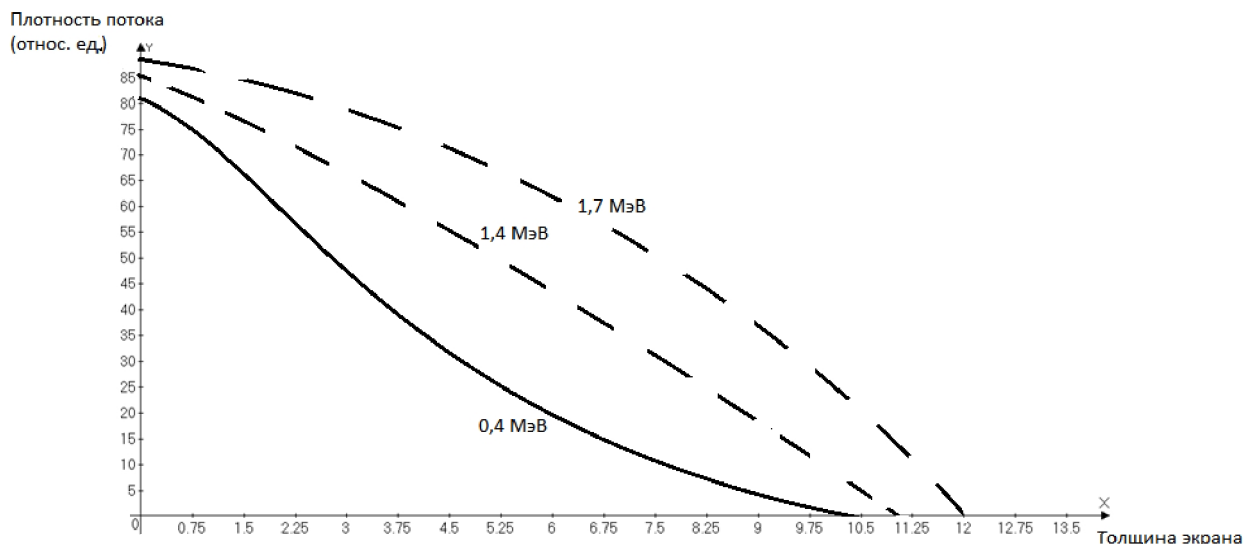


Рис.1. Зависимость изменения количества электронов различной энергии

При оценке проникающей способности бета – излучения определяют практическую длину их пробега в веществе, равную значению толщины экрана , полученной при пересечении продолжения прямого участка кривой ослабления пучка электронов (штриховая линия рисунка 1) с осью абсцисс. Практическая длина пробега бета – частиц в веществе с энергией от 15000000 до 100000000 эВ может быть подсчитана по приближенной формуле:

$$\ell = xg = 4,9 \cdot 10^{-6} E^{1,72};$$

где x - толщина экрана, см;

g - плотность вещества, г см³;

E - кинетическая энергия излучения, кэВ.

Квантовое излучение является одной из форм проявления электромагнитного излучения и представляет собой потоки квантов различной энергии.

Представляющие опасность для ЭС виды электромагнитного излучения находятся в области высоких частот или малых длин волн. Это объясняется тем, что энергия квантов электромагнитного излучения в этой области превышает 1000 эВ. С точки зрения физических эффектов , вызываемых излучением в полупроводниковых элементах, представляет интерес электромагнитное излучение в диапазоне от видимого света до гамма – лучей включительно. Рентгеновское и гамма – излучения оказывают особое сильное воздействие на материалы, элементы и схемы ЭС.

Гамма – излучение представляет собой квантовое излучение атомных ядер с длиной волны от 10^{-12} м, возникающее при переходе ядра из возбужденного состояния в основное состояние или состояние с меньшей энергией.

При ядерном взрыве основными источниками рентгеновского – и гамма – излучения являются радиоактивные осколки деления, находящиеся в зоне взрыва. Кроме того, эти излучения возникают результате торможения заряженных частиц при прохождении их через вещество (тормозное излучение).

Рентгеновское излучение представляет собой электромагнитное излучение с длиной волны от $2 \cdot 10^{-10}$ до $6 \cdot 10^{-12}$ м. Важнейшим свойством рентгеновского излучения является большая проникающая способность. Ионизирующее действие рентгеновских лучей весьма значительно и обусловлено , главным образом, вторичным действием образованных ими фотоэлектронов и электронов отдачи.

1. 3. Физические величины излучений

Поля излучений, в которых может оказаться ЭС, характеризуются физическими величинами. С помощью этих физических величин оцениваются возможные условия работы и радиационная стойкость материалов, элементов и аппаратуры в целом. Физические величины излучений количественно выражаются в единицах измерения радиоактивности и в единицах измерения излучений.

Единицы измерения радиоактивности служат для оценки количественного содержания радиоактивных веществ в материалах. Единицы измерения излучений предназначены для характеристики поля излучений и его воздействия на вещество.

К единицам измерения излучений относятся:

Φ - потоки;

ϕ - плотность потока;

E - кинетическая энергия (энергетический спектр);

F - поток энергии;

J - интенсивность.

Данные единицы измерения характеризуют поля излучений.

К единицам измерения, характеризующих взаимодействие излучений с веществом, относятся:

D - поглощенная доза;

P - мощность поглощенной дозы;

X - экспозиционная доза;

P_x - мощность экспозиционной дозы.

Поток излучений есть число частиц или квантов, проникающих сквозь данную поверхность:

$$\Phi = N/S;$$

Где: N - число частиц или квантов излучения;

S - область сечения поверхности.

Величина потока излучения измеряется как частица деленная на m или конкретно как

$$-\alpha/m; \quad \gamma/m \text{ и т.д.};$$

При характеристике потоков излучения обязательно должна указываться их кинетическая энергия. Так, например, для потока нейтронов с кинетической энергией больше $0,1 \cdot 10^6$ эВ следует указать:

$$\Phi_n \text{ или } E_n > 0,1 \cdot 10^6 \text{ эВ};$$

Плотность потока излучений – это рассчитанное на единицу площади число частиц или квантов, проникающих в единицу времени:

$$\phi = \Delta\Phi/\Delta t;$$

Единицей измерения плотности потока является частица в секунду на квадратный метр: частица/(с.м.²). Или конкретно β /(с.м.²), α /(с.м.²), γ /(с.м.²).

Единицей измерения кинетической энергии излучения в радиационной электронике служит электронвольт (эВ).

Один электронвольт равен кинетической энергии, которую приобретает или теряет частица, заряд которой равен заряду электрона, при прохождении разности потенциалов в один вольт. Производными единицы измерения от электронвольта являются:

- килоэлектронвольт 1кэВ;

- мегаэлектронвольт 1мэВ;

- гигаэлектронвольт 1гэВ.

Поток энергии излучений характеризуется энергией, переносимой частицами или квантами через единицу площади:

$$F = \Delta E/\Delta S = \sum N_i \cdot E_i/\Delta S = \sum \Phi_i E_i;$$

где ΔE - сумма энергий всех частиц в сфере площадью m^2 ,

E_i - энергия частиц соответствующего i -го потока излучения.

Интенсивность излучения (плотность потока энергии) – это энергия излучения, падающая на поверхность в единицу времени:

$$J = \Delta F/\Delta t;$$

где Δ - поток энергии за время Δt .

За единицу измерения интенсивности излучения принят электронвольт в секунду на квадратный сантиметр или их производные величины: эВ/(с.см²), или МэВ/(с.см²).

Единицами измерения, характеризующими взаимодействие излучений с веществом являются: поглощенная энергия, поглощенная доза, мощность поглощенной дозы, экспозиционная доза, мощность экспозиционной дозы.

Поглощенная энергия излучения это энергия излучения, преобразованная в среде в другие виды энергии. Единицей измерения, передаваемой веществу, является специальная единица «гамма- рад».

$$1 \text{ г - рад} = 100 \text{ эрг} = 10^{-5} \text{ Дж} ;$$

Степень ионизации вещества, а также количество поглощенной веществом энергии излучения является мерой взаимодействия излучений с веществом. В качестве основной меры для оценки действия излучений на вещество принято брать энергию излучения, переданную веществу в расчете на единицу массы. Эту величину называют поглощенной дозой, опуская слово «излучение».

Поглощенная доза излучения это энергия, сообщенная веществу определенной массы путем излучения :

$$D = \frac{\Delta E}{\Delta m} ;$$

За единицу измерения поглощенной дозы принимается единица измерения – рад

$$1 \text{ рад} = 100 \text{ эрг/г.}$$

Мощность поглощенной дозы излучения представляет поглощенную дозу излучения в единицу времени:

$$P = \frac{\Delta D}{\Delta t} ;$$

Специальной единицей мощности в радиационной радиоэлектронике принята единица « рад в секунду» и производные от нее – «рад в минуту», «рад в час».

Различные виды излучений обладают различной эффективностью по воздействию на одни и те же материалы и на изменения их энергетических, физических, химических и других параметров, то есть при одинаковых поглощенных дозах различных видов энергий излучений в одном и том же веществе наблюдаются различные физические, химические и другие эффекты. Возможен и такой случай, когда один вид излучения будет вызывать изменение определенных параметров в материалах, элементах и деталях ЭС, в то время как другой вид излучения не будет влиять на изменение этих параметров.

При прохождении излучений через вещество меняется их состав, энергетический спектр, интенсивность излучения и плотность потока. Эти изменения происходят ввиду

ослабления падающего на тело излучения, образования вторичного излучения, рассеяния излучения и др. Поэтому численные значения поглощенной дозы в разных участках вещества обычно оказываются неодинаковыми.

Таким образом, численное значение поглощенной дозы в каком-либо месте поля будет зависеть от вида излучения, плотности потока, спектрального состава излучения в рассматриваемой точке поля, от состава вещества и массы облучаемого объекта.

В силу того, что численная величина поглощенной дозы зависит от состава облучаемого объекта, она не может служить мерой количества излучения. Поэтому в качестве однозначных характеристик количества излучения приняты единицы поглощенной энергии специально выбранными стандартными или образцовыми веществами или модельными средами. Эти единицы называются экспозиционными дозами. Таким образом, экспозиционная доза представляет собой поглощенную

энергию в образцовом веществе или модельной среде, определяемую по конкретной реакции, происходящей в данном веществе при воздействии излучения.

В качестве измеряемой реакции, в основном, применяется ионизация (энергия, передаваемая электронам и позитронам). Поэтому экспозиционные дозы называют иногда ионными дозами. В настоящее время экспозиционные дозы определены для рентгеновского и гамма-, нейтронного и космического излучений. Экспозиционная доза рентгеновского и гамма-излучений служит для количественной оценки этих излучений и вычисляется как:

$$X = \frac{\Delta Q}{\Delta m};$$

где ΔQ - сумма электрических зарядов ионов, имеющих одинаковый знак в элементе объема воздуха;

Δm - масса элемента объема воздуха.

Экспозиционная доза рассматриваемых излучений измеряется в количествах электрического заряда ионов одного знака на единицу массы воздуха. Единицей изменения является кулон на килограмм (Кл/кг). Мощность экспозиционной дозы рентгеновского и гамма-излучений определяется как увеличение экспозиционной дозы за отрезок времени

$$P_x = \Delta X / (\Delta t); P_x = M_k J / g;$$

где J - интенсивность излучения;

M_k/g - средний массовый коэффициент преобразования энергии для воздуха.

Единицей измерения мощности экспозиционной дозы является ампер на килограмм или кулон в секунду на килограмм (А/кг, Кл/с.кг). Специальной единицей мощности экспозиционной дозы является рентген в единицу времени (Р/с, Р/мин и др.)

Понятие экспозиционная доза нейтронного излучения предназначено для характеристики нейтронных полей, а также характеристики выхода нейтронов от различных источников излучения. В качестве единицы экспозиционной дозы нейтронного излучения применяется единица – нед (нейтронная единица дозы), при которой на килограмм тканеэквивалентного газа (64,4% метана, 32,5% углекислого газа, 3,1% азота) образуются в этом газе ионы, несущие заряд в один кулон электричества каждого знака:

$$1 \text{ нед} = 1 \text{ Кл/кг};$$

Мощность экспозиционной дозы нейтронного излучения определяется как экспозиционная доза нейтронного излучения в единицу времени. Единицей измерения мощности нейтронного излучения является нед/в секунду или ампер/на кг.

Характеристику космического излучения принято производить по экспозиционной дозе и мощности экспозиционной дозы протонного и электронного излучений.

Единицей измерения экспозиционной дозы космического излучения является рад, равный поглощенной энергии $1 \cdot 10^{-5}$ Дж в одном грамме кристалла иодистого натрия, активированного таллием.

Мощность экспозиционной дозы космического излучения это экспозиционная доза в единицу времени. В качестве единицы мощности приняты рад/в час или рад/в сутки.

1. 4. Источники излучения

Правильная оценка возможных уровней излучения (потоков, их плотностей, доз и мощностей излучений), которые могут воздействовать на ЭС, позволяет конструкторам и разработчикам выбрать соответствующие комплектующие элементы, материалы, схемные и конструктивные решения по защите как отдельных узлов, так и аппаратуры в целом.

В связи с этим необходимо рассмотреть возможные источники излучений, которые могут оказывать влияние на работу ЭС. По характеру происхождения источники излучения могут быть естественными и искусственными. К естественным источникам относятся природные радиоактивные вещества, радиационные пояса Земли (внутренний и внешний), лучи галактического происхождения, солнечные излучения. Искусственными источниками излучений являются ядерные (атомные) и термоядерные взрывы, космические радиационные пояса Земли, образующиеся при ядерных взрывах, ядерные реакторы.

Радиоэлектронное средство может быть подвержено воздействию одного или нескольких видов излучений как искусственных, так и естественных.

В условиях воздействия излучений, наибольшую опасность для ЭС представляют радиационные пояса Земли (искусственные и естественные), солнечные вспышки, ядерные и термоядерные взрывы, ядерные установки.

На ЭС наземного назначения практически не оказывают воздействия излучения с малой плотностью потока (мощностью дозы). Создаваемый космическим излучением уровень радиации значительно ниже доз излучений, при облучении которыми наблюдаются заметные изменения электрических параметров элементов.

При определении условий работы радиоустройств в космическом пространстве не учитывают те виды излучений, которые не создают существенных уровней радиации внутри космического объекта или за имеющимся защитным покрытием. К этим видам излучений относятся и постоянное солнечное излучение протонов и электронов с энергией меньше 10эВ. Также не учитывают испускаемые Солнцем рентгеновские лучи, нейтроны, рождаемые космическими лучами, плотности потоков которых невелики по сравнению с потоками протонов и электронов.

В качестве единиц измерений, характеризующих уровни радиации от рассмотренных источников излучений, при оценке условий работы ЭС и их комплектующих элементов рекомендуется применять:

- для нейтронного излучения – поток и плотность потока нейтронов с энергией юлее 0,1 МэВ;
- для квантового излучения – экспозиционную дозу и мощность экспозиционной дозы рентгеновского и гамма – излучений;
- для космических излучений – экспозиционную дозу и мощность экспозиционной дозы космического излучения.

1. 5. Характеристика поражающих факторов ядерного взрыва

Основными поражающими факторами воздушного взрыва ядерного и термоядерного оружия, воздействующими на ЭС, являются ударная волна, световое излучение и проникающая радиация. Главным поражающим фактором при воздушном и наземном взрывах является ударная волна, на которую приходится 50% всей энергии ядерного взрыва. Разрушительное действие ее определяется избыточным давлением, эффективность которого с ростом высоты места взрыва падает и в условиях космоса практически будет отсутствовать. Электронное средство может выходить из строя при избыточных давлениях во фронте ударной волны от 0,155 до 1 кг/см² ($1 \cdot 10^3 + 1 \cdot 10^4$)/кг м.

В среднем принято считать избыточное давление 0,35/кг см опасным для незащищенной аппаратуры.

Световое излучение взрыва, представляющее собой поток ультрафиолетовых, видимых и инфракрасных лучей, при взаимодействии с материалами элементов аппаратуры может существенно изменить их физические свойства. Такие материалы, как оргстекло, полиэтилен, тефлон, бакелит, изоляционные покрытия и изделия из органических веществ при действии светового потока порядка 60-70 кал/см² будут

оплавляться и темнеть, а некоторые могут воспламеняться. Следует отметить, что большинство материалов и элементов ЭС, как правило, укрыты от непосредственного воздействия светового излучения взрыва различными экранами. Поэтому считают, что при воздействии светового импульса в 100 кал/см^2 и выше могут происходить отказы в работе устройств.

Ионизирующее излучение ядерного взрыва представляет собой поток гамма – квантов, нейтронов, бета – частиц и небольшого количества альфа – частиц. Обычно ввиду малой длины свободного пробега альфа – и бета – частиц их действием на элементы и материалы аппаратуры пренебрегают и считают, что основными поражающими факторами ионизирующего излучения ядерного взрыва являются гамма – и нейтронное излучение или так называемая проникающая радиация.

Плотности потоков проникающей радиации ядерного взрыва на тех расстояниях, где ударная волна выводит из строя незащищенную электронную аппаратуру в основном являются безопасными. Но с увеличением высоты взрыва все большее значение в поражении аппаратуры приобретает проникающая радиация. При взрывах на больших высотах и в космосе основным поражающим фактором становится импульс проникающей радиации. Из данных радиационной стойкости элементов и устройств ЭС в условиях воздействия гамма – и нейтронного излучения следует, что аппаратура может давать отказы при потоках нейтронов $10^{16} - 10^{17} \text{ н/м}^2$, мощности экспозиционной дозы гамма – излучения 10^7 рад/с экспозиционной дозе 10^5 рад и более. Изменение параметров элементов и аппаратуры может происходить и при меньших значениях потоков проникающей радиации. Для определения радиусов зон поражения ЭС в качестве критериальных значений потоков радиации приняты следующие:

- 10^{17} н/м^2 – по нейтронному потоку;
- 10^6 рад – по экспозиционной дозе гамма – излучения;
- 10^7 рад/с – по мощности экспозиционной дозы излучения;
- 10^2 кал/см – по световому потоку.

Ожидаемые значения мощности экспозиционной дозы, потока нейтронов, теплового потока и экспозиционной дозы на различных расстояниях от центра взрыва мегатонного ядерного заряда приведены на Рис.2. Горизонтальная штриховая линия указывает, при каких значениях параметров поражающих факторов аппаратура выйдет из строя. Из приведенных на рисунке данных видно, что наибольшую опасность для ЭС представляют мощность излучения гамма – квантов и поток нейтронов.

Кванты гамма – излучения распространяются со скоростью света. Нейтроны, выделяющиеся одновременно с гамма – квантами, имеют меньшую скорость, поэтому в первую очередь рассматриваемую точку пространства достигнут гамма – кванты, а потом нейтроны.

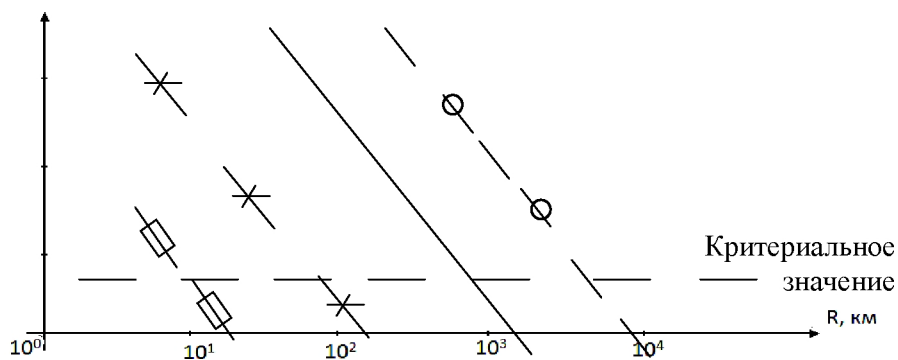


Рис. 2. Характеристика импульса гамма – излучения

	мощность экспозиционной дозы гамма – излучения;
	поток нейтронов;
	тепловой поток;
	экспозиционная доза гамма – излучения.

Учитывая разделение гамма – и нейтронного излучения во времени, а также различный характер взаимодействия гамма – квантов и нейтронов с материалами, при определении радиационной стойкости ЭС рекомендуется рассматривать отдельно взаимодействие на аппаратуру гамма – и нейтронного импульсов.

1.6. Характеристика импульса гамма – излучения

При ядерном взрыве образуется три вида гамма – излучения: мгновенное, захватное и осколочное. В течение десятых долей микросекунды происходит испускание мгновенных гамма – квантов. Средняя энергия гамма – квантов равна приблизительно 1,1 МэВ.

Мгновенное гамма – излучение является главным источником высокой мощности дозы гамма – излучения, но роль его в образовании общей дозы невелика.

Захватное гамма – излучение возникает за счет реакций захвата нейтронов деления ядрами окружающей среды. Средняя энергия захватного гамма – излучения равна 6 МэВ, а время его действия определяется временем существования нейтронов, которое в воздухе составляет доли секунды. Интенсивность и плотность потока захватного гамма – излучения в основном зависит от плотности воздуха и количества нейтронов, освобождающихся при взрыве.

Средняя энергия квантов осколочного гамма – излучения в первые секунды после взрыва равна примерно 2 МэВ. Мощности доз значительно ниже мощности доз, создаваемых захватным и тем более мгновенным гамма – излучением ядерного взрыва.

Общий поток гамма – излучения в космическом пространстве зависит от энергии (мощности) ядерного заряда и может быть подсчитан по формуле:

$$\Phi_{\gamma} = \frac{N}{4\pi \cdot R^2};$$

где N - общее число гамма – квантов, образующихся при взрыве;

R - расстояние до места взрыва.

По приведенной выше формуле можно вычислить возможную мощность экспозиционной дозы мгновенного гамма – излучения.

Пусть на расстоянии 10 км производится взрыв заряда, равного одной килотонне (кт). При ядерном взрыве такого заряда происходит деление $1,45 \cdot 10^{23}$ ядер.

На одно деление ядра испускается в среднем семь квантов мгновенного гамма – излучения с энергией каждого 1,1 МэВ. Следовательно, всего при взрыве одной килотонны заряда выделится примерно $1 \cdot 10^{24}$ квантов, и общая энергия мгновенного гамма – излучения будет около $1 \cdot 10^{24}$ МэВ.

Если принять, что только 1% мгновенных гамма – квантов выходит за пределы оболочки ядерного боезапаса, то для принятого заряда поток энергии излучения на расстоянии R от центра взрыва составит:

$$F = 1,1 \cdot 10^{22} / 4\pi R^2;$$

Зависимость экспозиционной дозы от потока энергии квантов определится выражением:

$$X = 1,46 \cdot 10^{-5} \cdot \mu \cdot F;$$

где $\mu = 8 \cdot 10^{-5}$ см – линейный коэффициент поглощения гамма – квантов в воздухе. Подставляя значения, получим

$$X = 1 \cdot 10^8 / R^2;$$

Мощность экспозиционной дозы при длительности импульса 10^{-7} с и q кт заряда соответственно будет равна

$$P_x = 1 \cdot 10^5 q / R^2;$$

Производя соответствующие расчеты, можно показать, что мощности экспозиционных доз захватного и осколочного гамма – излучений будет значительно меньше мощности экспозиционной дозы мгновенного гаммы – излучения, т. Е.

$$P_{зах}, P_{оск} \ll P_{мгн};$$

При ядерном взрыве в воздухе мощность экспозиционной дозы и экспозиционная доза будут меньше, благодаря эффектам поглощения и рассеяния.

Общая формула для расчета экспозиционной дозы гамма – излучения имеет вид:

$$X = K \cdot \frac{e^{\frac{-R}{\lambda_{эф}}}}{R^2};$$

где K - множитель, учитывающий энергию (мощность) взрыва и влияние ударной волны;

$\lambda_{эф}$ - эффективная длина поглощения энергии гамма – излучения, т.е. расстояние, на котором доза излучения ослабляется в $e = 2.718$ раз. Эффективная длина поглощения энергии гамма – излучения с уменьшением плотности воздуха увеличивается

$$\lambda_n = \lambda_0 \cdot g_0 / g_n = \lambda_0 \cdot g;$$

Где λ_0 ; λ_n - эффективные длины поглощения энергии излучения в воздухе с плотностью g_0 и g_n на высоте соответственно.

Для осколочного гамма – излучения $\lambda_{эф} = 300$ м, а значение

$$K = 1,4 \cdot 10^9 \cdot q(1 + 0,2 \cdot q^{0,65});$$

Следовательно, экспозиционная доза осколочного гамма – излучения может быть подсчитана по формуле:

$$X_{оск} = 1,4 \cdot 10^9 \cdot q(1 + 0,2 \cdot q^{0,65}) \cdot \frac{e^{\frac{-R}{\lambda_{эф}}}}{R^2};$$

Для захватного гамма – излучения, которое действует в течение (0,2 – 0,3) с. $\lambda_{эф} = 410$ м, а значение $K = 5 \cdot 10^8$.

Расчет экспозиционной дозы для захватного излучения может быть выполнен по формуле:

$$X_{зах} = 5 \cdot 10^8 \cdot q \cdot \frac{e^{\frac{-R}{\lambda_{эф}}}}{R^2};$$

Для мгновенного гамма – излучения $\lambda_{эф} < 300$ м. Число гамма – квантов мгновенного излучения при ядерном взрыве значительно меньше общего числа захватного и осколочного излучения, а плотность же потока мгновенных гамма – квантов в связи с малым временем их излучения (10^{-7} с) будет на несколько порядков выше.

Таким образом, с точки зрения воздействия на ЭС при взрыве заряда, мощность дозы гамма – излучения будет определяться мгновенным, а общая доза - захватным и осколочными гамма – квантами.

На основании данных воздействия поражающих факторов ядерных взрывов на уровне моря и в космосе ЭС могут подвергаться воздействию следующих уровней проникающей радиации: экспозиционная доза гамма – излучения $10^{-1} - 10^6$ рад при длительности импульса $10^{-3} - 10^{-8}$ с мощностью экспозиционной дозы гамма – излучения $10^2 - 10^{13}$ рад /с.

1.7. Характеристика импульса потока нейтронов

Образующиеся при ядерном взрыве нейтроны, подразделяются на мгновенные и запаздывающие. На долю мгновенных нейтронов приходится 99% всего числа запаздывающих при взрыве нейтронов, а время, необходимое для протекания реакции деления, составляет десятые доли микросекунды. Среднее значение мгновенных нейтронов равно примерно 2МэВ.

Помимо мгновенных нейтронов образуются запаздывающие нейтроны с периодом полураспада от 0,4 до 55 с. Средняя энергия запаздывающих нейтронов в общем потоке ядерного взрыва равна примерно 0,4 – 0,6 МэВ. На их долю приходится не более 1% всего числа образующихся при взрыве нейтронов, а следовательно,

воздействие на работу ЭС будет определяться характеристиками параметров мгновенных нейтронов.

Расчет потока нейтронов в зависимости от энергии взрыва, расстояния и плотности атмосферы может быть произведен из следующего соотношения:

$$\Phi_H = k \cdot e^{-R/\lambda_H} / R^2;$$

где k - коэффициент, зависящий от мощности взрыва и влияния волны;
 λ_H - эффективная длина ослабления потока нейтронов (расстояние, на котором поток нейтронов ослабляется в $e = 2,718$ раз).

Для воздуха с плотностью, составляющей 0,9 его плотности, на уровне моря $\lambda_H = 190\text{м}$.

Если принять, что поток нейтронов прямо пропорционален энергии взрыва и не зависит от влияния ударной волны, то его можно рассчитывать для атмосферы по формуле:

$$\Phi_H \approx 7,5 \cdot 10^{22} \cdot q \cdot e^{-R/190} / R^2;$$

На других высотах

$$\Phi_H \approx 7,5 \cdot 10^{22} \cdot q \cdot e^{-Rg/170} / R^2;$$

Таким образом, уровни проникающей радиации ядерного взрыва, которые могут воздействовать на ЭС, будут зависеть от энергии взрыва, высоты взрыва (плотности окружающей среды), расстояния от места взрыва и степени защищенности изделия. При длительности импульса потока нейтронов $10^{-1} - 10^{-6}$ с ЭС может подвергаться воздействию следующих уровней импульса проникающей радиации: поток нейтронов $10^{15} - 10^{20}$ н/м², плотность потока нейтронов $10^{12} - 10^{22}$ н/(см)

1. 8. Характеристика космического излучения

Наибольшую опасность для бортовых ЭС представляют:

- первичное (галактическое) космическое излучение;
- солнечное космическое излучение, возникающее при вспышках на Солнце;
- протонное и электронное излучение внутреннего пояса Земли;
- электронное излучение внешнего радиационного пояса Земли;
- электронное излучение искусственных радиационных поясов Земли.

Первичное космическое излучение состоит в основном из потоков протонов и альфа – частиц. Средняя энергия первичного космического излучения составляет единицы и десятки гигаэлектронвольт (ГэВ), но может иметь энергию и до 10^{18} эВ. Частицы с энергией меньше 100 МэВ практически отсутствуют.

Плотность потока галактических космических лучей изменяется со временем. Для периодов, соответствующих максимальной активности Солнца, плотность потока равна примерно $1 \cdot 10^4$ част/м² с. В годы минимальной солнечной активности плотность потока увеличивается до $(2,3 - 2,5) \cdot 10^4$ част/м² с, причем создаваемая ионизация увеличивается в 1,5 - 2 раза. Вследствие высокой энергии космических лучей экранировка от них ЭС практически мало эффективна.

Солнечное космическое излучение возникает в результате вспышки на Солнце и состоит в основном из протонов, а также их альфа – частиц и ядер элементов с зарядами от 6 до 18 элементарных зарядов. Ядра элементов составляют менее 0,5%, альфа – частицы от 3 до 15 процентов. По сравнению с первичными космическими излучениями, солнечные космические лучи имеют меньше энергии излучаемых

частиц, но плотности потока их во много раз (до 10^6) превышают плотности потока галактических частиц.

Максимальная энергия протонов солнечных космических лучей около 10^{10} эВ. Плотности потоков протонов при солнечных вспышках в космическом пространстве могут изменяться в пределах до семи порядков. Для больших вспышек они достигают 10^4 протонов /м² с. За время солнечной вспышки поток с энергией больше 30 МэВ достигает значений 10^4 протон/м, с энергией более 5МэВ- значений 10^{15} протон/м². Электроны и тормозное излучение солнечных вспышек имеют незначительные плотности и их воздействие на ЭС космических аппаратов можно не учитывать.

Естественные радиационные пояса Земли представляют собой обширные области околоземного космического пространства, в котором существуют интенсивные потоки электронов и протонов. Существует две зоны радиационных поясов вокруг Земли – внутренний и внешний.

Пространственное распределение радиационных поясов по отношению к Земле представляется в виде торов.

Внутренний радиационный пояс Земли состоит, главным образом, из протонов с энергией до сотен МэВ. Он расположен симметрично относительно магнитного экватора. Нижняя граница его в зависимости от географической широты простирается от 0,6 до 1,5 тыс. км, верхняя – до высот 5 -10 тыс. км.

Внешний радиационный пояс начинается на высоте около 10 тыс. км и простирается до высот 60 – 80 тыс. км.

Состав, плотности потоков и энергетические спектры частиц в радиационных поясах зависят от временных вариаций, связанных в основном с процессами, происходящими на Солнце.

Поэтому изменения уровней радиации, происходящие во внутреннем и внешнем радиационных поясах Земли трудно поддаются учету.

При определении степени воздействия протонного и электронного излучений на ЭС и ее комплектующие изделия, расположенные за защитными экранами, необходимо учитывать, необходимо учитывать вторичные частицы, образуемые в материале защиты. Поглощенная доза от вторичных частиц (в основном нейтронов), возникающих, например, в алюминиевых сплавах, может составить 5 – 10 % от полной дозы протонного излучения. В случае применения защитных материалов с большим атомным номером доза вторичного излучения может достигать 30 – 40 %.

Электроны с энергией до 5МэВ вносят незначительный вклад в общую дозу за оболочкой космического объекта. Однако при взаимодействии электронов с атомами вещества возникает тормозное рентгеновское излучение, проникающая способность которого значительно выше проникающей способности электронов.

Искусственные радиационные пояса образуются в результате ядерных и термоядерных взрывов на больших высотах. Объем пространства, занимаемый искусственным поясом, определяется мощностью боезапаса и зависит от координат центра взрыва. Искусственный радиационный пояс в основном состоит из электронов, энергия которых достигает 10 МэВ. Плотность потока электронов зависит от мощности взрыва, размеров пояса и эффективности захвата электронов магнитным полем. Продолжительность существования искусственного пояса определяется временем жизни электронов, которое может составить до одного и более лет.

Из анализа имеющихся сведений о космических излучениях видно, что на основе этих данных можно производить только ориентировочную оценку уровней радиации, которые могут воздействовать на ЭС космических объектов.

Электронные средства, находящиеся в зоне воздействия излучений, существенно изменяют свои параметры и могут выходить из строя. Эти повреждения происходят в результате изменения физических и химических свойств полупроводниковых,

изоляционных, металлических и других материалов, параметров приборов и элементов электронной техники, изделий радиоэлектронных средств.

Литература

1. Федоров В. Контроль и испытания в проектировании и производстве радиоэлектронных средств/В Федоров,,Н. Сергеев,А Кондрашин; под ред. В.К.Федорова.-М.: Техносфера ,2005.-502с.

2.Типовые конструкции радиоэлектронных средств

В зависимости от степени сложности типовые конструкции (ТК) можно разделить на три конструктивных уровня: I - элементная база (конструктивно и технологически неделимая совокупность материалов), II - типовые компоненты (совокупность ТК I уровня и электрических и механических элементов, имеющая самостоятельное функциональное назначение), III - конструкция ЭС в целом (совокупность схемно- и конструктивно-технологически законченных изделий).

Конструкции несущих элементов ТК строят по принципу входимости корпусов (модулей) одного уровня (младшего) в корпуса (модули) другого уровня (старшего) за счет сочетания условных рам., построенных в прямоугольных координатах. Внешняя граница этих рам определяется внутренними размерами рам старшего уровня, а внутренняя - размерами рам младшего уровня. Поэтому можно строить новые корпуса, комбинируя условные рамы. Для частичного блока рамы, установленные с передней и задней сторон, соединяют одной или несколькими рамами yz . В комплектном блоке соединение осуществляют рамой xz . Для стойки характерна одна рама yz , а пульт чаще всего состоит из рам xz и xy . Некоторые стороны рам не воплощают в материале, а другие могут развиваться, превращая раму в объемную конструкцию.

Согласно принципу структурной иерархии элементы низших уровней входят в элементы верхних, в некоторых вариантах возможны переходные конструкции.

В конкретных разработках могут быть отклонения от размеров принятого модуля, так как существуют два способа назначения размеров на каркасы блоков и лицевых панелей. В первом способе номинальный размер лицевой панели выбирают, как правило, из ряда предпочтительных чисел. При установке в корпусе рядом двух блоков зазор между ними получается за счет допусков по системе вала. Во втором способе расстояние между блоками увеличивают введением нормированного зазора по широкоходовой посадке и уменьшают номинальный размер панели. Точность изготовления деталей при этом одинакова (рис. 1.).

При разработке размерной системы необходимо не только соблюсти преемственность конструкции, но и найти оптимальную композицию изделия, уточнить внешний вид, выявить главные элементы композиции. В процессе разработки композиции изделие перестает быть механическим соединением модулей и приобретает завершенный характер. Модульная координация размеров должна обеспечивать не только простую соизмеримость входящих в систему числовых значений, но и строиться с учетом антропометрии, устанавливающей основные статические и динамические характеристики рабочей позы оператора в положении «сидя» и «стоя».

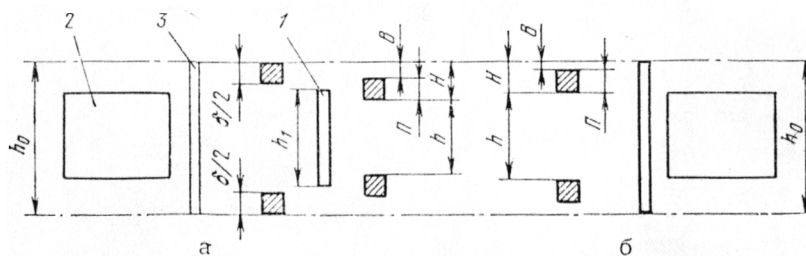


Рис.1. Схема полей

допусков при системе вала (а) и широкоходовой посадке (б):

h_0 - расчетный размер, h_1 - минимальный размер, h - номинал с полем допуска $\Pi = H - B$

Стандартизация конструкций РЭС, развитие модульной техники, ограничение рядов типоразмеров компонентов конструкций, ориентация на современные методы конструирования, достижения микроэлектроники и прогрессивные технологические процессы позволили создать единую конструктивную базу РЭС - комплекс универсальных типовых конструкций (УТК), совместимый с автоматизированными методами проектирования и изготовления РЭС.

Комплекс УТК в зависимости от условий эксплуатации и конструктивно-технологических особенностей РЭС, в которой применяются эти конструкции, можно подразделить на следующие три класса:

- УТК-I — стационарная РЭС, предназначенная для работы в отапливаемых и неотапливаемых помещениях (категории 3 и 4 по ГОСТ 15150—69),

- УТК-II — стационарная, полустационарная и подвижная РЭС, работающая на открытом воздухе, во временных помещениях и укрытиях, палатках, на колесном и гусеничном транспорте (категории I и 2 по ГОСТ 15150—69 и 4 и 6 по ГОСТ 16019-78),

- УТК-III — РЭС, устанавливаемая на подвижных объектах в труднодоступных местах и работающая на ходу в жестких условиях эксплуатации. Таким образом, каждый класс УТК предназначен для РЭС, работающей в одинаковых или сходных условиях эксплуатации.

Состав комплекса УТК. Комплекс УТК построен по иерархическому принципу и включает компоненты пяти конструктивных уровней (КУ):

- КУ - 0: бескорпусные активные и пассивные микроэлементы в виде полупроводниковых транзисторов, диодов, диодных матриц, интегральных схем различной степени интеграции, пленочных резисторов и конденсаторов (табл. 1),

- КУ-1 - корпусные резисторы, конденсаторы, полупроводниковые приборы, ИС широкого применения, реле, элементы сигнализации и индикации, гибридные ИС частного применения, МУ средней и большей степени интеграции;

Табл. 1.. Бескорпусная элементная база

Тип элемента	Размеры кристалла $l \times b \times h$	Монтажная площадь,	Выводы
Интегральные микросхемы			
Серия 129	1,7×1,2×0,8	5,3	6-П
Серия 703	1,8×1,8×0,8	3,24	14-Ш
Серия 734	1,8×1,8×0,8	13,8	14-П
Серия 756	1,6×1,6×0,8	2,56	14-Ш
Серия 775	1,5×1,5×0,8	2,25	8-Ш
Транзисторы			

2Т202	1×1×0,8	3,3	3-П
2Т317	1×1×0,8	2,8	3-П
2Т377	2×2×0,8	11,3	3-П
2Т381	1×1×0,8	2,8	3-П
Диоды и диодные матрицы			
2Д901	1,2×1,2×0,8	4,8	3-П
2Д907	1×1×0,8	7,4	4-П
2Д917	1×1×0,8	7,4	4-П
Конденсаторы			
КТП-1	2,2×2,2×0,6	9,7	2-П
КТП-2	3,5×3,5×0,6	20,2	2-П
Резисторы			
РТП	1×2×0,6	4,3	2-П

Примечание. Цифры обозначают число выводов, буквы — конструкцию:
П — проволочные, Ш — шариковые.

- КУ-2 - унифицированные печатные платы. Для РЭС, разрабатываемой на базе УТК-1 и УТК-11, ТЭК для РЭС, разрабатываемой на базе УТК-111;

- КУ-3: частичные вставные блоки, комплектные блоки, блочные каркасы для РЭС, разрабатываемой на базе УТК-1 и УТК-11, и несущие конструкции малогабаритных блоков для РЭС, разрабатываемой на базе УТК-Ш;

- КУ-4: несущие конструкции стоек, шкафов, пультов управления, распределительных щитов, приборных корпусов для РЭС, разрабатываемой на базе УТК-1 и УТК-Ш, и несущие конструкции агрегатированных систем и подсистем малогабаритной и микроминиатюрной РЭС, разрабатываемой на базе УТК-Ш.

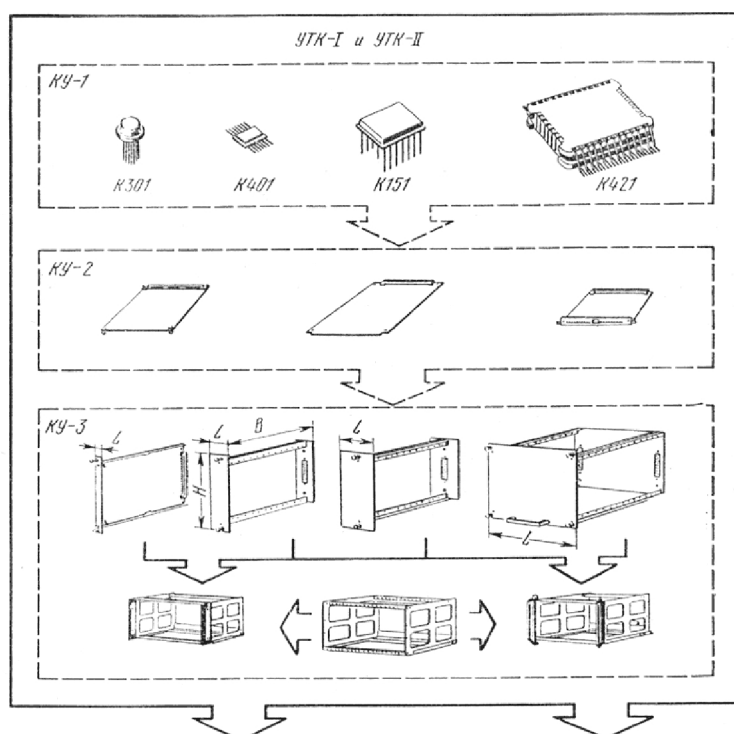


Рис. 2. Структура УТК

Каждый уровень объединяет конструкции одинаковой сложности, причем компоненты высших КУ включают в себя сочетания компонентов низших КУ.

Классы УТК-I и УТК-II имеют единую номенклатуру и общее конструктивное исполнение компонентов, что обеспечивает преемственность и взаимозаменяемость конструкций на уровне печатного узла и частичного блока (рис. 2).

Разделение комплекса УТК на пять конструктивных уровней вместо трех обусловлено необходимостью выделить ряд компонентов в самостоятельные группы, что не противоречит общепринятому в справочнике подходу, так как нулевой и первый уровни представляют первый уровень конструкций РЭС, второй и третий уровни УТК- компоненты второго общепринятого уровня, а компоненты четвертого уровня УТК являются одновременно компонентами третьего уровня конструкции РЭС.

3. Дестабилизирующие факторы и их влияние на работоспособность ЭС

Повреждения радиодеталей и радиокомпонентов могут быть обусловлены неправильным конструированием, нарушениями ТУ при производстве и условиями эксплуатации. Все многообразие дестабилизирующих факторов условно разделяют на две большие категории: субъективные и объективные факторы.

Субъективные факторы. Эта категория факторов определяется действиями отдельных людей, оказывающих существенное влияние на надежность изделий на всех этапах, начиная от конструирования и изготовления и кончая их эксплуатацией. Однако степень влияния субъективных факторов на работоспособность радиодеталей и радиокомпонентов различна для различных этапов их изготовления. Ошибки, допущенные при конструировании, исправляются, как правило, усилиями всего коллектива. Ошибки, допущенные при изготовлении, выявляются во время многочисленных испытаний. Ошибка же одного эксплуатационщика может оказать решающее влияние на работоспособность радиодеталей и радиокомпонентов, на их готовность к выполнению основной задачи. Поэтому в основе значительной доли отказов радиодеталей и радиокомпонентов лежат неправильные действия обслуживающего персонала во время контроля функционирования, регулировки, ремонта и эксплуатации РЭС.

Основные субъективные факторы могут быть сведены к следующим:

- небрежность в обращении с радиодетальями и радиокомпонентами при их производстве и эксплуатации;
- отсутствие необходимых знаний и опыта, определяющих правильные действия в условиях эксплуатации (при выборе режимов работы, контроле функционирования, регулировке и ремонте).

Несоблюдение инструкции по эксплуатации, нарушение объема и методики профилактических или ремонтных работ, связанных с предупреждением неисправностей, приводят к ускорению износа радиодеталей и радиокомпонентов, а также и РЭС в целом. Небрежно составленная инструкция по эксплуатации также может быть причиной повреждения радиодеталей и радиокомпонентов.

Установлено, что из общего количества повреждений РЭС примерно 43% происходит от ошибок при конструировании, 20% зависят от изготовления радиодеталей и радиокомпонентов и РЭС, 30% относятся к условиям эксплуатации, а остальные 7% определяются износом, старением и недоброкачественным сырьем. Причем неправильный режим эксплуатации, неправильное и неумелое обслуживание дает около 18% повреждений.

Объективные факторы. Эти факторы связаны с внешними воздействиями на радиодетали и радиокомпоненты, с особенностями их применения, с внутренними процессами в материалах, определяющими износ и старение. Известно, что изделия из одних и тех же материалов в одних условиях эксплуатации и хранения не теряют работоспособности несколько десятков или даже сотен лет, в других - разрушаются в течение нескольких дней. Следовательно, в изделиях могут происходить те или иные

процессы, с различной скоростью изменяющие их свойства. Знание этих процессов и степени влияния объективных факторов на их ход дает возможность принять меры для замедления или полного устранения их. Это позволяет на многие годы сохранить работоспособность радиодеталей и радиокомпонентов. К объективным факторам относят климатические, механические и температурные воздействия.

3.1. Влияние температуры на работоспособность ЭС

Температурные воздействия являются одним из наиболее активных дестабилизирующих факторов. Повышение или понижение температуры почти всегда вызывает ухудшение работы РЭС, так как изменение температуры даже в формально допустимых пределах вызывает изменение параметров радиодеталей и радиокомпонентов. Это связано с изменением физических и химических свойств материалов, из которых изготовлены радиодетали и радиокомпоненты. Изменение температуры вызывает появление деформаций, изменение твердости и упругости, электрических и магнитных свойств материалов. При этом могут произойти недопустимые изменения параметров радиодеталей и радиокомпонентов или их разрушение.

Температурная деформация материалов и конструкций. Все материалы при изменении температуры в некоторой степени претерпевают деформацию, величина которой зависит от их физических свойств и характера воздействия температуры.

Изменение линейных размеров однородного тела Δl определяется известной зависимостью

$$\Delta l = \alpha l (t_2 - t_1), \quad (2.1)$$

где α - температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР); t_2 и t_1 - конечная и начальная температуры соответственно; l - линейный размер тела, например, его длина.

Из уравнения (2.1) видно, что на деформацию тела в одинаковой степени оказывает влияние как температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР), так и разность температур. Если конструкция однородна и у всех ее частей температура изменилась на одну и ту же величину, то внутренних напряжений в ней не возникает - форма конструкции не искажается. Если же температура отдельных частей однородной конструкции не одинаковая, то она деформируется. В конструкции, состоящей из двух или более элементов, при изменении температуры геометрические размеры элементов изменяются не в одинаковой степени. Это приводит к деформации конструкции. Причем деформация конструкции тем больше, чем больше разница температур в отдельных ее частях и чем больше различаются ТКЛР ее элементов.

На величину деформации конструкции сильное влияние оказывает теплопроводность материалов. При нагреве части конструкции, обладающие лучшей теплопроводностью, будут нагреваться быстрее и их температура будет выше температуры других частей. При охлаждении же эти части будут охлаждаться быстрее и их температура будет ниже, чем у других частей, обладающих худшей теплопроводностью. Таким образом, материалы с плохой теплопроводностью способствуют получению больших деформаций, обусловленных большой разностью температур отдельных частей конструкции.

Деформация неоднородной конструкции, состоящей из нескольких связанных между собой элементов с различными ТКЛР, может значительно отличаться от подсчитанной по формуле (2.1) и достигать больших или очень малых значений. Это говорит о том, что путем продуманного подбора материала элементов конструкции (с учетом их ТКЛР и теплопроводности) можно создавать радио-детали и радиокомпоненты, не подвергающиеся разрушительным деформациям.

У большинства материалов, используемых в радиодеталях и радиокомпонентах, величина α находится в пределах $(1...300) \cdot 10^{-6}$. У металлов α находится в пределах $(1...40) \cdot 10^{-6}$, у неорганических диэлектриков (керамика, стекло, кварц, слюда и др.) α , как правило, не превышает $10 \cdot 10^{-6}$. Наибольшее значение α , достигающее до $300 \cdot 10^{-6}$, имеют различные органические диэлектрики.

Различие ТКЛР например у металлов и пластмасс, приводит к образованию каналов между этими материалами. Эти каналы создают пути для проникновения влаги. При низкой температуре вода замерзает и, расширяясь примерно на 10% в объеме, вызывает дальнейшее увеличение каналов, трещин, зазоров. При действии тепла и холода на припой, скрепляющий одну деталь с другой, в нем могут возникнуть такие усилия, которые нарушат связь припоя с материалом. В результате может нарушиться герметизация радиодетали или радиокомпонента, а также и электрический контакт. Разница в ТКЛР различных материалов может вызвать деформацию узлов в сборе, разрыв уплотняющих элементов и заедание движущихся частей.

Влияние температуры на свойства материалов. Температурные воздействия оказывают заметное влияние на свойства материалов. Так, например, при повышении температуры увеличивается электрическое сопротивление металлов и сплавов. При температуре от 200 до 500°C заметным становится уменьшение модуля упругости и предела прочности материалов. При понижении температуры у всех материалов понижается пластичность, а при достаточно низких температурах пластичность практически исчезает и материалы становятся хрупкими.

От температуры в значительной степени зависят электрические свойства диэлектриков. При повышении температуры сопротивление изоляции резко падает, растут диэлектрические потери, изменяется диэлектрическая проницаемость, некоторые диэлектрики размягчаются. Электрическая прочность большинства диэлектриков при действии тепла вначале увеличивается, а механическая прочность уменьшается вследствие удаления влаги. Затем начинается уменьшение электрической прочности. Конечным результатом является физическое разрушение диэлектрика. Изоляционные материалы под действием тепла и холода растрескиваются, что способствует усиленному проникновению влаги и потере диэлектрических свойств.

Под старением понимают явления, связанные с изменением электрических и физических свойств материалов при длительном воздействии окружающей среды. Больше всего подвержены старению органические изоляционные материалы: повышение рабочей температуры на каждые $(8...10)^\circ\text{C}$ вдвое сокращает их срок службы. Воздействие времени и температуры уменьшает механическую прочность органических материалов. Они становятся более хрупкими и в конечном счете могут быть разрушены под действием даже небольшого удара или вибрации.

В металлических конструкциях старение проявляется в постепенном исчезновении внутренних напряжений, образовавшихся при изготовлении. В итоге заданная форма конструкции может в значительной степени изменяться (деформироваться).

Температура нагрева трансформаторов при эксплуатации повышается вследствие потерь в обмотках и железе и меняется в широких пределах. Из-за различия ТКЛР примененных материалов изменяются геометрические размеры всего трансформатора и, в частности, его обмоток. Витки обмоток смещаются один относительно другого, а это приводит к появлению короткозамкнутых витков. Трансформаторы нагреваются во время работы или при повышении температуры окружающей среды, а при выключении аппаратуры охлаждаются. При нагреве заливочный материал трансформаторов расширяется, при охлаждении сжимается. Это приводит к образованию внутри заливочной массы вакуумных или воздушных включений, которые постепенно перемещаются вверх. В том случае, когда на верхней

части кожуха трансформатора расположена клеммная плата и кожух негерметичен, влага, проникшая в кожух, приводит к электрическому пробое платы.

При колебаниях температуры в катушках индуктивности возникают деформации, приводящие к изменению их индуктивности. Повышение температуры катушек реле вызывает увеличение их сопротивления. Это в некоторых случаях приводит к уменьшению тока в обмотках до величины, недостаточной для четкого срабатывания реле. При нагревании катушек реле летучие продукты лаков и компаундов, осаждаясь на поверхности контактов, нарушают контакты, что ведет к нечеткому срабатыванию реле.

Наиболее чувствительны к изменению температуры полупроводниковые приборы. Например, для германиевых транзисторов обратный ток через коллекторный переход I_{co} с увеличением температуры увеличивается примерно в 2 раза на каждые 10°C . Температурная зависимость параметров полупроводниковых приборов является одним из наиболее важных факторов, ограничивающих возможность их использования. В прямой зависимости от температуры находится и их срок службы.

Микромодули широкого применения могут работать в интервале температур от -60 до $+70^{\circ}\text{C}$. Длительное воздействие высоких температур, близких к предельным, в некоторых случаях приводит к необратимым изменениям электрических параметров микромодулей. Отрицательные температуры оказывают меньшее влияние на старение большинства материалов, но сильнее влияют на изменение параметров микромодулей, чем положительные. Кроме изменения электрических параметров, при переменном воздействии отрицательных и положительных температур в ряде случаев могут наблюдаться разрушения отдельных элементов конструкции микромодулей.

Основными параметрами, от которых зависит работоспособность печатных плат, являются сопротивление изоляции, тангенс угла диэлектрических потерь и диэлектрическая проницаемость. С увеличением температуры уменьшается сопротивление изоляции печатных плат, возрастают тангенс угла диэлектрических потерь и паразитная емкость. Это приводит к увеличению уровня потерь и ухудшению стабильности работы. Воздействие температур приводит к старению материалов, используемых для изготовления печатных плат и, следовательно, к необратимому изменению их основных параметров.

3.2. Влияние атмосферного давления на работоспособность электронных средств

Радиодеталям и радиокомпонентам авиационных и космических РЭС часто приходится работать при очень высоких или очень низких атмосферных давлениях. Низкое атмосферное давление характерно для условий работы на большой высоте. С понижением атмосферного давления уменьшается электрическая прочность воздуха.

С уменьшением атмосферного давления увеличивается опасность возникновения газовых пробоев (разрядов), образующихся благодаря ионизации воздуха. Пробой начинается с коронного разряда. Коронный разряд в атмосфере, содержащей кислород, сопровождается выделением высокореактивного окисляющего газа - озона и некоторых агрессивных азотных соединений. В присутствии влаги из этих соединений образуются азотистая и азотная кислоты, вызывающие коррозию металлов и повреждение изоляции. Корона вызывает повреждение изоляции и коррозию металлов: высокие температуры, возникающие вследствие действия короны, ускоряют процесс старения изоляции.

Пробивное напряжение U_{np} газового промежутка является функцией давления газа p и расстояния d между электродами:

$$U_{np} = f(p, d).$$

На рис.3 приведена зависимость напряжения пробоя газового изоляционного промежутка между плоскими электродами от произведения длины промежутка d на величину атмосферного давления p .

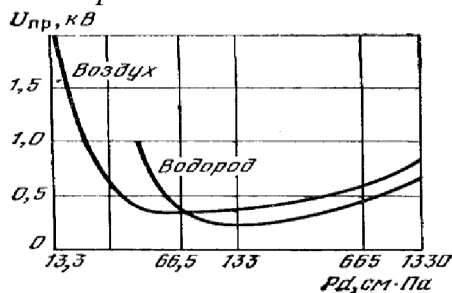


Рис. 3. Зависимость напряжения пробоя $U_{пр}$ от произведения pd

Из графиков видно, что при уменьшении давления электрическая прочность газовых изоляционных промежутков вначале снижается, а затем, достигнув минимума при некотором давлении, снова растет.

Появление коронного разряда наиболее вероятно между электродами, имеющими острые углы. Поэтому при конструировании следует помнить, что острые углы у радиодеталей и радиокомпонентов нежелательны. Увеличение электрической прочности воздушных промежутков между токоведущими частями путем увеличения расстояния между ними с уменьшением давления становится все менее и менее эффективным.

При пониженном атмосферном давлении теплопроводность воздуха уменьшается, следовательно отвод тепла от радиодеталей и радиокомпонентов ухудшается. С изменением атмосферного давления изменяется и диэлектрическая проницаемость воздуха, что вызывает, например, изменение емкости воздушных конденсаторов. Снижение атмосферного давления, кроме того, может вызвать дополнительные механические нагрузки, в особенности на кожухи герметичных элементов и уплотненных (элементов не герметичных, но с использованием уплотнительных прокладок или опрессовки). При понижении давления окружающей атмосферы стенки корпуса герметичных элементов испытывают воздействие перепада давления. Усилия, возникающие при этом, достигают больших значений. Если в конструкции элемента не приняты специальные меры (например, установка клапана, создание «слабого места»), снижение атмосферного давления ведет к деформации или даже разрушению корпуса.

Если элементы не герметизированы, то при резком понижении давления возможно «вскипание» имеющихся в них жидкостей. Это происходит из-за быстрого выделения при атмосферном давлении растворенных в жидкостях газов.

3.3. Влияние влаги на работу ЭС

Изменение свойств материалов обычно возрастает, если одновременно действуют два или более возмущающих факторов. Например холод, периодически чередующийся с положительной температурой (зона пустынь, где дневная жара сменяется заморозками), вызывает конденсацию влаги на поверхности радиодеталей и радиокомпонентов.

При низкой температуре вода в порах и трещинах замерзает и, расширяясь, вызывает их увеличение, при высоких температурах влага, испаряясь, также вызывает их увеличение. В итоге может произойти разрушение поверхности тела или его покрытия.

Влага ускоряет коррозию металлов, изменяет электрические характеристики диэлектриков, способствует тепловому распаду материалов и росту плесени. Все тела, даже при нормальной относительной влажности атмосферы (65%), покрыты тончайшей (0,001... 0,01 мкм) пленкой воды. Эта пленка ионизируется окисью углерода атмосферы, солнечным светом и солями. Ионизация увеличивает ее проводимость. Если поместить образец материала с очень малым объемным поглощением воды в атмосферу, имеющую 100%-ную относительную влажность при нормальной температуре, на нем в течение нескольких секунд образуется ионизированная проводящая пленка. Образование пленок на поверхностях изоляционных материалов уменьшает их поверхностное сопротивление, а проникновение влаги внутрь материала уменьшает объемное сопротивление. Причем степень изменения сопротивления изоляции зависит от влажности и температуры, от способности материала диэлектрика впитывать влагу и загрязненности его поверхности.

Влага в атмосфере содержит не только пары воды, но и растворы солей и кислот. Осаждаясь на поверхности металла, влага образует пленку электролита. Возникающая при этом химическая реакция приводит к быстрому разрушению поверхности металла - коррозии. Коррозия уменьшает механическую прочность металла, вызывает нарушение контактов или обрыв тонких проводов. В керамических негерметизированных конденсаторах в условиях тропического климата наблюдается заметное уменьшение сопротивления изоляции и емкости, а тангенс угла диэлектрических потерь при этом увеличивается в 2...3 раза. Чрезмерное проникновение влаги в электролитические конденсаторы с плохим уплотнением приводит к изменению емкости, тока утечки и снижению удельного сопротивления электролита и тангенса угла диэлектрических потерь. При этом с течением времени возрастает проводимость, что приводит к нарушению теплового равновесия конденсатора и он выходит из строя.

При поглощении диэлектриком более чем 0,1% воды от его массы параметры большинства типов конденсаторов выходят за пределы допустимого. В негерметизированных конденсаторах, спрессованных в пластмассу или залитых компаундом, снижается сопротивление изоляции и увеличивается тангенс угла диэлектрических потерь. Возрастает также вероятность пробоя конденсаторов. Сопротивление изоляции конденсатора с диэлектриком из слюды, включающим небольшое количество влаги, резко уменьшается при нагреве конденсатора до 80°C, при этом значительно возрастает тангенс угла диэлектрических потерь.

Для предотвращения проникновения влаги в область проводящего слоя непроволочные резисторы покрывают несколькими слоями (3... 4) лака или эмали с последующей сушкой каждого слоя. Для сильно нагруженных резисторов используют кремнийорганическую эмаль. На поверхности резисторов недопустимы дефекты, нарушающие целостность эмалевого или лакового покрытия. Незаметные на первый взгляд раковины, пузырьки воздуха или точечные наколы защитного слоя являются причиной возникновения каналов, по которым к токопроводящему слою проникает влага. Повреждения защитного слоя нередко возникают в результате небрежного обращения с резисторами.

Из наиболее часто встречающихся повреждений постоянных и переменных проволочных резисторов, вызванных действием влаги, являются обрывы проволоки, нарушение контакта проволоки с выводом, нарушение контакта между движком и контактной дорожкой.

У трансформаторов, дросселей и катушек индуктивности влага, попавшая внутрь обмоток, снижает сопротивление изоляции между витками до такой величины, при которой появляются значительные утечки, облегчающие пробой изоляции и

образование короткозамкнутых витков. В катушках индуктивности под действием высокой влажности наблюдается снижение добротности на 10 ... 40%.

В печатных платах между токоведущими частями схемы с разными потенциалами возникают токи утечки, шунтирующие электрические цепи. С повышением влажности воздуха вероятность возникновения шунтов и поверхностного перекрытия сильно возрастает. Продолжительное нахождение печатных плат в условиях повышенной влажности приводит к возникновению необратимых явлений, вызывающих резкое уменьшение сопротивления изоляции. Покрытие печатных схем влагозащитными лаками, герметизация, заливка компаундами повышают их долговечность и стабильность работы.

3.4. Влияние механических воздействий на работоспособность ЭС

При эксплуатации РЭС могут возникнуть воздействия механического характера в виде ударов, линейных ускорений, вибраций, а также опасные механические воздействия, связанные с отгрузкой и транспортированием радиодеталей и радиокомпонентов к месту назначения в упаковке или в составе РЭС. Вибрации, линейные ускорения и удары могут вызвать как механические повреждения, так и изменение электрических параметров радиодеталей и радиокомпонентов.

На основе анализа воздействий механических нагрузок и напряжений можно выделить шесть основных причин, вызывающих механические повреждения радиодеталей и радиокомпонентов или изменение их электрических параметров: статический отказ, хрупкий излом, нестабильность конструкции, ползучесть и усталость материала, коррозия.

Статический отказ - это поломка или полное разрушение радиодетали и радиокомпонента, или их деформация сверх допустимых пределов во время единичного приложения постепенно нарастающей нагрузки. *Хрупкий излом* также возникает в условиях статической нагрузки, но в отличие от статического отказа характерен внезапностью наступления. Хрупкий излом в пластичном материале может возникнуть при наличии дефектов в сильно напряженных участках. Механические повреждения и изменения электрических параметров радиодеталей и радиокомпонентов за счет *ползучести* и *усталости* материалов относятся к явлениям, зависящим от времени, так как деформации этого типа увеличиваются со временем.

Механические повреждения, связанные с *нестабильностью конструкции*, вызываются скачкообразным увеличением деформации элемента конструкции при достижении нагрузкой критического значения. Причиной механических повреждений и изменений электрических параметров радиодеталей и радиокомпонентов часто является *коррозия*. Коррозия уменьшает прочность конструкции, причем она протекает быстрее у материалов, которые находятся под механическим напряжением.

Перечисленные причины механических повреждений радиодеталей и радиокомпонентов и изменений их электрических параметров редко возникают отдельно одна от другой (в чистом виде). Обычно они действуют в сочетании.

Механические воздействия, особенно ударные, могут вызвать различные поломки, которые приводят к отказу РЭС. У крупных радиодеталей и радиокомпонентов, например трансформаторов, дросселей низкой частоты, больших конденсаторов и т. д., под влиянием ударов создается опасность поломки креплений, а для керамических и других хрупких деталей - опасность их растрескивания. В результате механических воздействий возможно нарушение плохих паяк, появление трещин и сколов на поверхности остеклованных резисторов, растрескивание и

отслаивание лакокрасочных покрытий, нарушение контактов реле и переключателей, обрыв тонких проводов и т. п.

Вибрации могут привести к самоотвинчиванию винтов и гаек креплений, облому выводов радиодеталей и радиокомпонентов, замыканию проводов с поврежденной изоляцией. Вибрации и конструктивные особенности элемента будут ослаблять высокочастотное возбуждение до того момента как оно дойдет до деталей элемента. Акустический же шум возбуждает корпус радиодетали или радиокомпонента и их каждую деталь с помощью распределенного усилия, являющегося функцией уровня звукового давления и площади каждой детали элемента.

Для уменьшения влияния акустического шума опорные элементы конструкций и кожухи элементов и РЭС изготавливают из материалов, имеющих высокие демпфирующие свойства. Все малогабаритные радиодетали должны иметь жесткое крепление. Уменьшение числа объемных проводников достигается использованием многослойного печатного монтажа. Хорошие результаты по уменьшению интенсивности воздействия акустического шума дает заливка компаундами отдельных групп элементов.

В процессе эксплуатации на объектах-носителях и при транспортировании конструкции РЭС подвергаются воздействию внутренних и внешних механических сил. Внутренние силы возникают вследствие работы механизмов внутри самих РЭС, чаще всего за счет эксцентриситета вращающихся узлов, например якоря электродвигателя, вызывая «силовое» механическое возбуждение конструкции РЭС. Воздействие внешних сил передается от объекта-носителя на РЭС через точки их крепления, вызывая «кинематическое» возбуждение.

К внешним воздействиям относят гармонические, полигармонические и случайные вибрации, однократные и многократные удары, линейное ускорение и акустический шум. Каждый вид воздействия характеризуется совокупностью кинематических параметров и их типовыми значениями для реальных объектов-носителей РЭС. Последствия воздействий характеризуются динамическим параметром — силой F , действующей на элемент РЭС массой m , и моментом этой силы M_F или механическим напряжением σ , возникающим при деформации конструкции.

Так, воздействие гармонической вибрации задается законом колебаний

$$z = A_B \sin(2\pi f t)$$

с параметрами A_B (амплитуда колебания) и f (частота), а воздействие случайной вибрации — функцией автокорреляции возмущающего случайного процесса

$$R_z(\tau) = \sigma_z^2 r_z(\tau)$$

с параметром σ_z . Ударное воздействие задается формой ударного импульса, т. е. законом изменения ускорения $a(t)$ (прямоугольной, треугольной, полусинусоидальной и другой формы), его амплитудой A_H и длительностью τ_H . Влияние линейного ускорения a_n , действующего в поле силы тяжести, задается собственно его значением; этот вид воздействия практически ослаблению не поддается.

Акустическое воздействие задается уровнем интенсивности звука $I = 10 \lg(E/E_0)$,

где E — интенсивность звука, создаваемого источником (например реактивными двигателями самолетов и ракет); $E_0 = 10^{-12}$ Вт/м². Создаваемые источником акустического шума перепады давлений $\Delta p = \sqrt{E \rho c}$ (где ρ — плотность воздуха; c — скорость звука в воздухе), достигающие 20 % от нормального атмосферного давления, представляют опасность для герметичных блоков.

Применительно к конкретным условиям эксплуатации и выполняемым функциям различают:

вибро- и ударопрочные РЭС, способные сохранять свои параметры в пределах установленных норм до подачи и после снятия механических воздействий;

вибро- и удароустойчивые РЭС, способные сохранять свои параметры в пределах установленных норм, в том числе и во время механических воздействий.

Примером вибро- и ударопрочных РЭС является аппаратура, устанавливаемая на космических летательных аппаратах, функционирование которой начинается только после выведения их на расчетную орбиту. При этом требования по вибро- и ударопрочности распространяются лишь на кратковременный период активного участка полета.

Примером вибро- и удароустойчивых РЭС является аппаратура, устанавливаемая на подвижных объектах длительного действия, — автомобилях, самолетах, вертолетах. Для этих РЭС требования вибро- и удароустойчивости распространяются на весь период их эксплуатации.

В результате механических воздействий в конструкциях РЭС происходят обратимые и необратимые изменения.

Обратимые изменения связаны с временным нарушением устойчивости функционирования и проявляются в виде «виброшумов», возникающих в ЭРК, конструкциях РЭС и их монтажных соединениях. Изменение геометрических размеров элементов приводит к возникновению паразитной модуляции их параметров (емкости, индуктивности, проводимости). Нарушение электрического контакта в разъемных и неразъемных соединениях и реле вызывает явление «дребезга» электрических сигналов, появление наводок и изменение параметров электрических и магнитных полей.

Необратимые изменения связаны с нарушением целостности конструкций РЭС из-за превышения пределов прочности их материалов для различных видов деформаций и возникновения явления усталости материалов, связанного с накоплением микрповреждений под воздействием многократных знакопеременных механических напряжений σ . В наибольшей степени явлению усталости подвержены цветные металлы, которые в отличие от стали не имеют вырожденного предела усталости $\sigma_{выр}$ (кривые Веллера) и их прочность снижается по мере увеличения числа циклов N знакопеременных деформаций.

4. Анализ конструкций электронных средств

Прогресс в развитии конструкций РЭС характеризуется в настоящее время тремя важными особенностями:

- широкое использование фундаментальных достижений физики твердого тела;
- применение вычислительной техники для решения сложных конструкторских задач;
- создание научных основ проектирования как творческого процесса, которому можно и нужно обучить начинающих и малоопытных.

Усложнение задач, решаемых средствами радиоэлектроники, проникновение ее во все новые области человеческой деятельности и связанное с этим усложнение самого РЭС находится в явном противоречии с повышением требований к массе, габаритам, надежности, стоимости и срокам проектирования РЭС. Разрешение этого противоречия возможно следующими путями:

- упрощение схем РЭС;
- стандартизация и унификация;
- ослабление требований по габаритам, надежности;
- применение вычислительной техники;
- дальнейшее развитие и совершенствование конструирования РЭС и процесса их проектирования в связи с изменениями в технологии, сменой элементной базы и организации производства.

В то же время возможно и наилучшее разрешение указанного выше противоречия за счет поиска лучшего варианта конструкций (по массе, габаритам и т.д.), не ухудшающего других характеристик РЭС в рамках ограничения на сроки и затраты при создании РЭС. Это может быть осуществлено за счет применения различного рода компоновочных процедур в процессе проектирования РЭС, т.е. за счет оптимального проектирования /4, 5/.

Резкое сокращение сроков разработки новых видов РЭС, сроков их промышленного освоения и внедрения в серийное производство возможно следующими путями:

- унификация схемотехнических и конструкторско-технологических решений, обеспечивающих автоматизацию проектирования, изготовления и контроля модулей различной сложности в условиях гибкого автоматизированного производства (ГАП);

- унификация и стандартизация коммутационных и установочных деталей, электрорадиоэлементов (ЭРЭ), интегральных схем (ИС), корпусных и бескорпусных функциональных ИС, микропроцессорных наборов, типоразмеров печатных плат, модулей блоков и шкафов и их присоединительных размеров;

- типизация технологических процессов изготовления и контроля деталей, ЭРЭ, ИС, печатных плат, модулей и блоков, обеспечивающих механизацию и автоматизацию их производства;

- унификация и стандартизация технологического оборудования;

- использование методов проектирования конструкций РЭС, предназначенных для автоматизированного производства и сборки применительно к ГАП;

- разработка организационной научно-технической документации (НТД), регламентирующей взаимоотношения НИИ и КБ заводов-разработчиков РЭС, технологических НИИ и производственных предприятий-изготовителей на всех этапах создания и оценки ее технологичности, эффективности и качества.

Системный подход к конструированию РЭС позволяет избегать узких односторонних ошибочных представлений, решений, заключений. Применительно к сложным РЭС сущность системного подхода можно сформулировать в виде ряда основных принципов.

1. Принцип цели. Он состоит в выделении цели из множества целей, достижение которых является результатом функционирования исследуемой системы.

2. Принцип соответствия системы цели. Это принцип состоит в выделении комплекса технических средств, которые рассматриваются как система, в результате функционирования которой должно обеспечиваться достижение цели.

3. Принцип иерархии систем. Наделенная система рассматривается, с одной стороны, как подсистема некоторой суперсистемы, а с другой стороны – как система, состоящая из ряда подсистем.

4. Принцип субоптимальности. Данный принцип состоит в том, что оптимальное поведение системы не требует оптимального (в локальном смысле) поведения подсистем.

5. Принцип иерархии целей. Он состоит в подчинении функционирования системы целям системы более высокого уровня.

Рассматривая процесс конструирования РЭС как системный, необходимо подчеркнуть следующие его особенности:

- сложность и взаимосвязь всего комплекса вопросов конструирования РЭС, приводящие к появлению обратных связей между отдельными этапами конструирования и итерационными процедурами принятия решений;

- многообразие и большой объем конструкторских задач, высокие требования к точности результатов;

- значительная трудоемкость, а, следовательно, и длительность выполнения как отдельных решений, так и всей совокупности конструкторских работ;

- трудности многокритериальных задач оптимизации;

- многообразие конструкций РЭС, что дополнительно усложняет модели;

- сложность математического описания взаимосвязанных физических процессов, определяющих функциональные свойства конструкций РЭС.

Следует дополнительно принять во внимание, что РЭС является объектом конструирования, который характеризуется быстрым моральным старением принимаемых решений; РЭС, как правило, является объектом конструирования устойчивой номенклатуры с достаточной частотой поступления технических заданий; синтез конструкции РЭС в САПР-К

получает дополнительные, принципиально новые возможности, реализация которых позволяет повысить качество конструирования.

Конструкция РЭС – совокупность деталей с разными физическими свойствами и формами, находящихся в определенной пространственной, механической, тепловой, магнитной и энергетической взаимосвязи, обеспечивающих выполнение заданных функций с необходимой точностью и надежностью в условиях как внешних воздействий, так и внутренних помех, создаваемых элементами РЭС. Конструкция предусматривает возможность ее повторения в условиях производства. Существующие связи в РЭС представлены на рис. 4



Рис. 4 Связи в РЭС

Основное требование к проектированию РЭС состоит в том, чтобы создаваемое устройство было эффективнее своего аналога, т.е. превосходило его по качеству функционирования, степени миниатюризации и технико-экономической целесообразности, а методы конструирования обеспечивали электромагнитную совместимость элементов РЭС. Схема разработки эффективных РЭС представлена на рис. 5

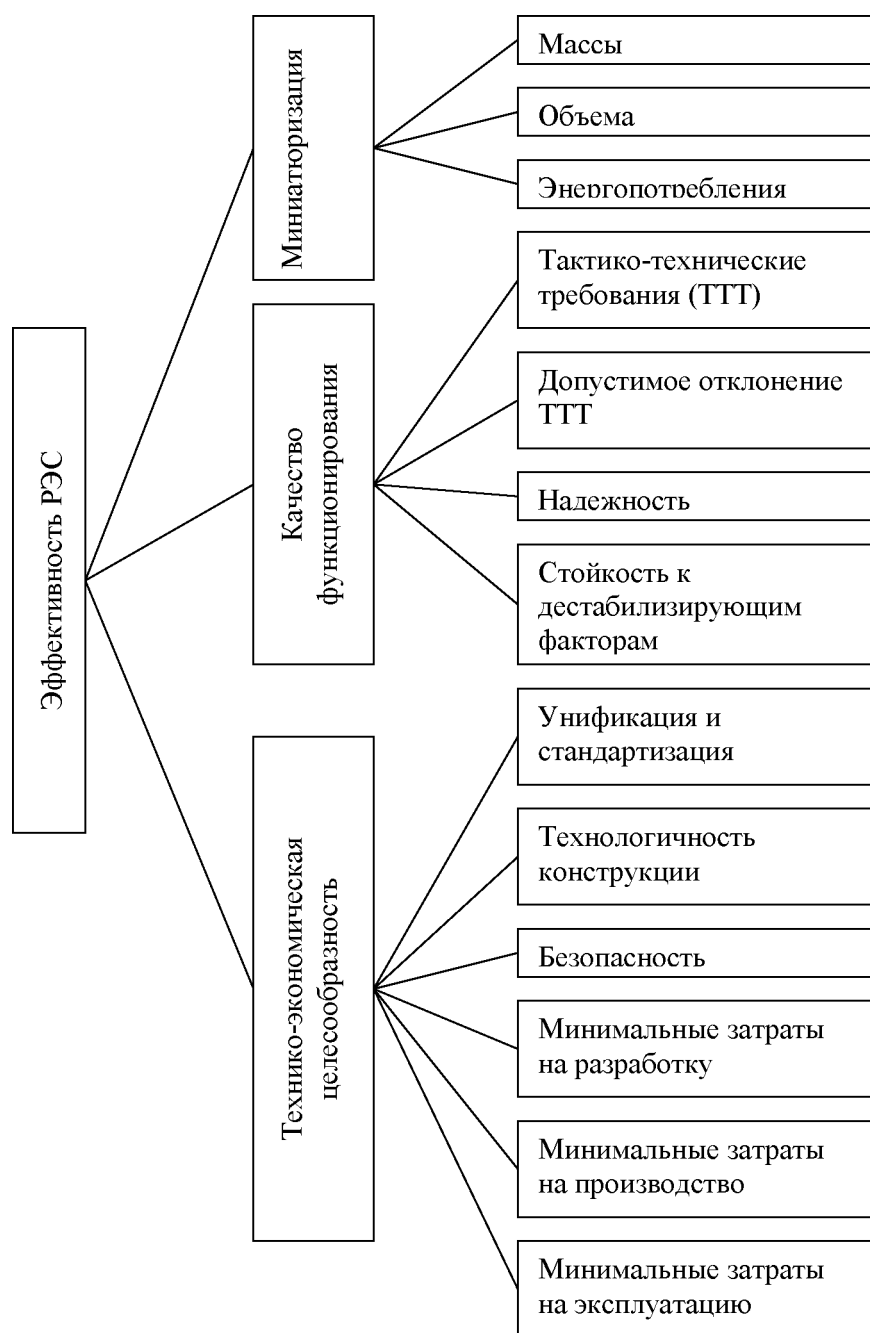


Рис.5. Схема разработки эффективных РЭС

Конструктивное исполнение РЭС определяется условиями эксплуатации и объектом размещения, схемотехнической и конструктивной базами.

По схемотехнической базе РЭС оцениваются номером поколения. Поколение РЭС – совокупность функциональных, конструктивных и технологических показателей определенного вида изделий, разработанных с использованием новых научно-технических достижений в течение одного временного интервала. Конструктивно-технологические показатели РЭС II – V поколений приведены в таблице.

Показатель	Поколение РЭС			
	II	III	IV	V
Элементная база	Полупроводниковые приборы, миниатюрные ЭРЭ	Интегральные схемы (ИС)	Большие интегральные схемы (БИС) и сверхбольшие интегральные	Большие гибридные микросборки, БИС, СБИС и изделия

			схемы (СБИС)	функциональной электроники (ИФЭ)
Степень интеграции изделий, эл/крист.	Дискретные элементы	$10^2 \dots 10^3$	10^4	$10^5 \dots 10^6$
Метод конструирования	Функционально-узловой		Функционально-модульный	
Монтаж	Одно- и двухсторонний	Многослойный печатный	Шлейфовый и многослойный печатный	Многослойный
Конструкция блоков	С горизонтальным и вертикальным шасси	С ячейками разъемной или книжной конструкции	С ячейками разъемной или книжной конструкции, в том числе герметичные	

По конструктивной базе, под которой понимается совокупность механических элементов конструкции РЭС, обеспечивающих механическую прочность и защиту от дестабилизирующих воздействий, а также механическое управление аппаратурой, устройства РЭС можно разделить на механические детали и узлы управления; несущие конструкции. Механические детали и узлы управления служат для плавного или скачкообразного, вращательного или поступательного перемещения исполнительных устройств (потенциометры, переключатели и др.). К ним относятся кнопки, ручки управления, фиксатор, а также отсчетные устройства, с помощью которых определяются значения измеряемой величины визуальным наблюдением.

Несущей конструкцией называется элемент (или совокупность элементов) конструкции, предназначенный для измерения составных частей аппаратуры и обеспечения их устойчивости к воздействиям в заданных условиях эксплуатации. Несущая конструкция обеспечивает необходимое положение ЭРЭ в пространстве, наличие определенных электрических и магнитных связей между ними, защиту от дестабилизирующих факторов условий эксплуатации, а также придает изделию товарный вид. К несущим конструкциям обычно относят: печатные и монтажные платы, рамки, каркасы, шасси и кожуха блоков, рамы, стеллажи, стойки, шкафы и другие детали аналогичного назначения.

Базовая несущая конструкция (БНК) – несущая конструкция, предназначенная для размещения составных частей аппаратуры, габариты которой стандартизированы. Наиболее распространенные БНК, используемые для компоновки РЭС, рассмотрены в работах /2, 6/. Большой технико-экономический эффект БНК заключается в следующем:

при разработке новых устройств используется проверенная БНК, исключающая поиски возможных решений и возможные ошибки;

обеспечивается большая преемственность в производстве устройств, созданных на одной базе;

значительно ускоряется подготовка производства и снижаются расходы на ее выполнение;

намного облегчаются условия эксплуатации и ремонта устройств, имеющих много общих конструктивных элементов;

вокруг базовых (типовых) изделий легко могут создаваться различные модификации (типовые ряды) путем некоторых изменений типового изделия.

Показатели качества РЭС. Одной из основных проблем конструкторского проектирования РЭС является выбор показателей качества для оценки оптимальности конструкции модулей. Правильный выбор показателей качества эквивалентен формулировке задачи конструкторского проектирования. Укрупненно связь конструкции РЭС с показателями качества показана на рис. 6.

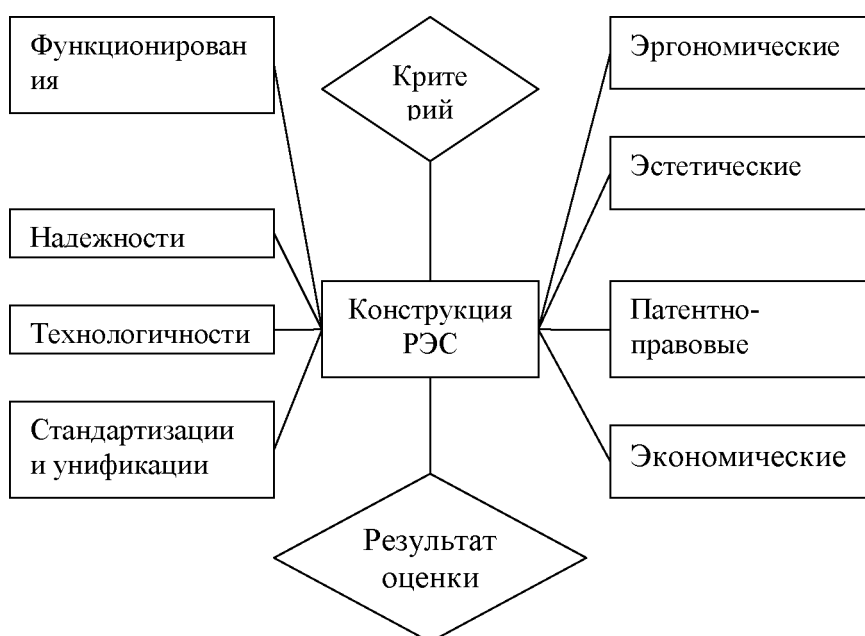


Рис.6. Связь конструкции РЭС с показателями качества

В настоящее время использует следующие показатели качества РЭС:

функционирование, характеризующее полезный эффект от использования РЭС по назначению и область их применения;

надежность, определяющая свойство РЭС сохранять свою работоспособность во времени;

технологичность, характеризующая эффективность конструкторско-технических решений для обеспечения высокой производительности труда при изготовлении и ремонте РЭС;

эргономические, характеризующие систему “человек – изделие – среда” и учитывающие комплекс гигиенических, антропологических, физиологических, психофизиологических и психических свойств человека, проявляющихся в производственных и бытовых условиях;

эстетические, характеризующие внешние свойства РЭС: выразительность, оригинальность, гармоничность, целостность, соответствующие среде и стилю и т.д.;

стандартизация и унификация, характеризующие степень использования в РЭС стандартизованных изделий и уровень унификации их составных частей;

патентно-правовые, отражают степень патентной защиты конструкторских решений РЭС в СССР и за рубежом, а также ее патентную чистоту;

экономические, характеризующие затраты на разработку, изготовление и эксплуатацию РЭС, а также экономическую эффективность эксплуатации.

Следует подчеркнуть, что только учет всего многообразия факторов, их тщательный анализ дают основание конструктору выбрать из большого числа возможных вариантов решение, близкое к оптимальному.

Показатели качества служат комплексом критериев, используемым для оценки принимаемых решений на различных этапах создания РЭС. Из-за специфики условий эксплуатации и производства критерии могут быть различными, что приводит к многовариантности проектных решений.

Увеличение надежности. Проблема надежности для конструктора складывается из решения задач обеспечения нормального теплового режима, защиты аппаратуры от внешних климатических и механических воздействий, воздействий электрических, магнитных и электромагнитных полей. Надежность является сложным свойством, которое в зависимости от назначения конструкции и условий применения состоит из сочетания свойств безотказности, долговечности, сохраняемости, ремонтпригодности (ГОСТ 27.002-83). Первые три свойства основаны на противодействии разрушительным физико-химическим и механическим воздействиям, четвертое – на создании благоприятных условий для предупреждения и обнаружения причин повреждений и их устранения.

Для обеспечения конструктором надежности при разработке необходимо выделить три главных исходных условия /4/:

выбор ЭРЭ и материалов по техническим условиям (ТУ);

исключение конструкционных отказов;

правильность и полнота технологических указаний.

Удовлетворение этих условий начинается с выбора элементов и материалов в точном соответствии с данными, записанными в НТД, основным документом которого является ТУ. При выборе комплектующих ЭРЭ и материалов следует избегать назначения предельных значений параметров, реализуемых поставщиком с наибольшим трудом и потенциально наиболее опасных с точки зрения возникновения отказов при эксплуатации.

Вторым условием является исключение конструкционных отказов. Конструкционным называют отказ, возникший в результате нарушения установленных правил и норм конструирования. Такими нарушениями являются ошибки всех видов: от ошибок в расчетах, в выборе режимов и материалов до ошибок в чертежах и текстовых документах.

Третьим условием является правильное назначение конструктором технологии изготовления. Все ограничения на технологию и допуски на размеры, которые конструктор может предвидеть как влияющие на будущую надежность изделия, должны быть внесены в КД. Конструктор должен мысленно прослеживать весь технологический процесс изготовления разработанной им конструкции и обращать внимание на те операции, где может быть нанесен ущерб надежности.

Улучшение технологичности конструкции. Технологичность конструкции изделия (ГОСТ 18.831-73) есть приспособленность к ограниченному расходованию трудовых, материальных и энергетических ресурсов при подготовке производства и промышленном выпуске изделий в заданном количестве по высшей категории качества (производственная технологичность), а также при техническом обслуживании и ремонте (эксплуатационная технологичность).

Проектируя аппаратуру, конструктор должен в максимальной степени обеспечить технологичность деталей, сборочных единиц и РЭС в целом. Обеспечение технологичности конструкции выполняется на всех стадиях разработки РЭА: проектирование принципиальных электрических схем, разукрупнение схем на узлы, блоки, стойки, разработки компоновочных схем и рабочих чертежей, разработки методики сборки, контроля. Для каждого типа и масштаба производства существуют свои требования и пути обеспечения технологичности конструкции. Показатели и методика комплексной оценки технологичности конструкции РЭС изложены в методических указаниях /3/.

Стандартизация и унификация. Стандартизация – установление и применение правил с целью упорядочения деятельности в определенной области на пользу и при участии всех заинтересованных сторон, в частности, для достижения всеобщей оптимальной экономии при соблюдении условий эксплуатации (использования) и требований безопасности (ГОСТ 1.0-85). Разновидностям стандартизации являются: ограничения (симплификация), типизация, агрегатирование, унификация. Унификация – основной метод стандартизации, заключающийся в приведении изделий к единообразию на основе установления рационального числа их разновидностей. При этом под изделиями можно понимать как образцы РЭС, так и их составные части. Унифицированные изделия имеют наиболее высокое качество. Под уровнем унификации конструкции понимается насыщенность ее стандартными и заимствованными составными частями: деталь, сборочная единица и т.д. Уровень унификации конструкции РЭС рекомендуется оценивать по методике, изложенной в методических указаниях /1/.

Применение этих методов позволяет:

значительно сократить сроки и стоимость проектирования и изготовления изделий;

повысить конструктивную преемственность разработок;

резко сократить номенклатуру применяемых деталей и сборочных единиц, за счет чего увеличить их применяемость;

организовать специализированное производство стандартных и унифицированных деталей, сборочных единиц и модулей для централизованного обеспечения всех заинтересованных предприятий;

упростить обслуживание и ремонт РЭС, так как вышедшие из строя детали и модули могут быть заменены запасными без ухудшения эксплуатационных качеств аппаратуры.

Электромагнитная совместимость (ЭМС) – это способность РЭС одновременно функционировать в реальных условиях эксплуатации с требуемым качеством при воздействии

на нее непреднамеренных радиопомех другим радиоэлектронным аппаратом (ГОСТ 23611-79). Широкое внедрение радиоэлектроники в различные сферы производства и потребления вызывает рост количества различных РЭС по экспоненциальному закону, что ставит проблему ЭМС на более высокий уровень. Однако разработчики и конструкторы не всегда принимают необходимые меры по обеспечению ЭМС аппаратуры и систем. Наиболее эффективные меры по обеспечению ЭМС должны приниматься на самых ранних стадиях конструирования новых РЭС и отдельных его элементах.

Для обеспечения ЭМС при конструировании любых РЭС необходимо обращать внимание на выбор и расположение отдельных блоков, узлов и устройств, а также на элементы самой конструкции. При компоновке узлов, блоков и устройств, необходимо знать методы заземления, обоснование применения фильтров и их характеристики, взаимное расположение и разнос блоков с учетом ориентации электромагнитных полей, критичность с точки зрения ЭМС, взаимное экранирование и изоляцию. При разработке РЭС необходимо правильно выбирать металл, вид покрытия, методы установки и размещения узлов, а также правильно конструировать несущие конструкции и устройства; элементы установки кнопок, переключателей, тумблеров, индикаторных ламп и других элементов, выходящих на переднюю панель; способы установки и заземления кабелей, разъемов и др.

Эргономика и техническая эстетика. Эргономика – это прикладная наука, которая изучает человека и его деятельность в условиях современного производства с целью оптимизации орудий, условий и процесса труда. Основным объектом исследования эргономики является система “человек – машина – производственная среда”. Соблюдение эргономических законов с самого начала разработки любого технического изделия гарантирует повышение культуры производства, удобство и эффективность труда, повышение потребительской ценности промышленной продукции.

Техническая эстетика – наука, изучающая социально-культурные, технические и эстетические проблемы формирования гармоничной предметной среды, создаваемой средствами промышленного производства. Требования технической эстетики реализуются методами художественного конструирования /4, 8/, которые позволяют достигнуть единства эстетического и функционально-технического решения оборудования, композиционного единства и гармонических форм всех элементов рабочего места; декоративности и гармоничности цветофактурного и цветотекстурного решения поверхностей в условиях определенного освещения; выразительности и декоративности объемных и накладных элементов (шильдиков, знаков и графических обозначений). Форма прибора должна быть технически рациональной, простой, выразительной и экономически оправданной. Для зрительного восприятия наиболее благоприятной является форма, у которой выдержаны определенные соотношения размеров. Наиболее благоприятными считаются соотношения так называемого “золотого сечения”, при котором большая часть отрезка является пропорциональной разнице между всем отрезком и его меньшей частью, т.е. $A/B = B/(A - B)$ или $B = 0,618 A$. С практическими вопросами художественного конструирования можно ознакомиться в методических указаниях /8/.

Техническое описание изучаемой (проектируемой) конструкции должно быть достаточно подробным, отражающим все основные свойства конструкции с выделением особенностей, требующих улучшения. Описание изучаемых конструкций должно включать следующие пункты;

- назначение прибора, изделия;
- условие эксплуатации;
- элементная база;
- общее конструктивное решение;
- тип несущих конструкций, наличие БНК;
- механическая прочность конструкции;
- защита от внешних воздействий;
- электромагнитная совместимость;
- эргономика и техническая эстетика;
- конструкция лицевой панели и кожуха;
- материалы, из которых изготовлены основные элементы конструкции;
- технологичность конструкции;
- уровень унификации конструкции;
- масса и габариты.

Порядок и содержание пунктов описания могут меняться для более полного и объективного отражения особенностей изучаемых конструкций.

5. Основы моделирования электронных средств

5.1 Понятие моделирования и типы моделей

Под моделью мы будем понимать некую абстрактную систему, имитирующую реальный объект и позволяющую с определенной точностью и вероятностью предсказать поведение этого объекта. Модель обладает набором определенных свойств (параметров) и взаимодействует с внешней средой. Непосредственное изучение многих предметов, явлений или процессов в реальном режиме времени затруднено, а некоторых - просто невозможно. Основная задача создания модели – прогнозирование поведения моделируемого объекта под влиянием внутренних и внешних воздействий.

Рассмотрим некоторые виды моделей .

Физическая модель

Физическая модель представляет то, что исследуется, с помощью увеличенного или уменьшенного описания объекта или системы. Как указывает Шеннон: «Отличительная характеристика физической (называемой иногда портретной) модели состоит в том, что в некотором смысле она выглядит как моделируемая целостность».

Примеры физической Модели - копия чертежа авиационного двигателя, его уменьшенная фактическая модель, уменьшенный в определенном масштабе чертеж проектировщика. Такая физическая модель упрощает визуальное восприятие и помогает установить, сможет ли конкретное оборудование физически разместиться в пределах отведенного для него места, а также разрешить сопряженные проблемы, например, размещение дверей, ускоряющее движение людей и материалов. Автомобильные и авиационные предприятия всегда изготавливают физические уменьшенные копии новых средств передвижения, чтобы проверить определенные характеристики, например аэродинамическое сопротивление. Будучи точной копией, модель должна вести себя аналогично разрабатываемому новому автомобилю или самолету, Но при этом стоит она много меньше настоящего. Подобным образом строительная компания всегда строит миниатюрную модель, прежде чем начать строительство производственного или административного корпуса или склада.

Аналоговая модель

Аналоговая модель представляет исследуемый объект аналогом, который ведет себя как реальный объект, но не выглядит как таковой. Пример аналоговой модели — организационная схема. Выстраивая ее, руководство в состоянии легко представить себе цепи прохождения команд и формальную зависимость между индивидами и деятельностью. Такая аналоговая модель явно более простой и эффективный способ восприятия и проявления сложных взаимосвязей структуры крупной организации, чем скажем составления перечня взаимосвязей всех работников.

Математическая модель

В математической модели, называемой также символической, используются символы для описания свойств или характеристик объекта или события. Пример математической модели и аналитической ее силы как средства, помогающего нам

понимать исключительно сложные проблемы, — известная формула Эйнштейна $E = mc^2$. Если бы Эйнштейн не смог построить эту математическую модель, в которой символы заменяют реальность, маловероятно, чтобы у физиков появилась даже отдаленная идея о взаимосвязи материи и энергии. Вероятно, математические модели относятся к типу моделей, чаще всего используемых при моделировании экономических систем. Мы будем рассматривать именно математические модели.

5.2. Моделирование самоуправляемых систем

Классификацию самоуправляемых систем мы проведем по двум критериям: степень сложности системы и ее детерминированность.

По степени сложности системы бывают:

1. Простые.
2. Сложные.
3. Сверхсложные.

К простым относятся системы, имеющие простую структуру и легко поддающиеся математическому описанию, они могут быть реализованы без использования ЭВМ.

Сложными являются системы, имеющие много внутренних связей и сложное математическое описание, реализуемое на ЭВМ.

Сверхсложные системы не поддаются математическому описанию.

Границы между указанными классами размыты и могут со временем смещаться, например, совершенствование математического аппарата и вычислительной техники позволяет дать описание систем, для которых это раньше было невозможно, или сложное описание сделать простым.

По второму критерию системы делятся на детерминированные и вероятностные.

Все возможные случаи получаются комбинированием указанных классов:

1. Простые детерминированные системы:
 - электрический чайник с автоматическим отключением;
 - кондиционер;
 - расписание занятий факультета;
2. Сложные детерминированные системы:
 - микропроцессор;
 - видеомагнитофон;
 - сборочный конвейер;
3. Сверхсложные детерминированные системы:
 - шахматы.
4. Простые вероятностные системы:
 - лотерея;
5. Сложные вероятностные системы:
 - система материально-технического снабжения на предприятии;
 - система диспетчирования движения самолетов вблизи крупного аэропорта;
 - система диспетчирования энергетической системы России;
6. Сверхсложные вероятностные системы:
 - предприятие в целом, включая все его технические, экономические, административные, социальные характеристики;
 - общество;
 - человеческий мозг.

В нашем курсе мы будем интересоваться, главным образом, простыми и сложными системами, вероятностными и детерминированными.

5.3. Топологические схемы электронных средств

При организации параллельных вычислений в МВС для организации взаимодействия, синхронизации и взаимоисключения параллельно выполняемых процессов используется передача данных между процессорами вычислительной среды. Временные задержки при передаче данных по линиям связи могут оказаться существенными (по сравнению с быстродействием процессоров) и, как результат, *коммуникационная трудоемкость* алгоритма оказывает существенное влияние на выбор параллельных способов решения задач.

Структура линий коммутации между процессорами вычислительной системы (*топология сети передачи данных*) определяется, как правило, с учетом возможностей эффективной технической реализации; немаловажную роль при выборе структуры сети играет и анализ интенсивности информационных потоков при параллельном решении наиболее распространенных вычислительных задач. К числу типовых топологий обычно относят следующие схемы коммуникации процессоров (см. рис. 7):

- **полный граф** (*completely-connected graph or clique*)- система, в которой между любой парой процессоров существует прямая линия связи; как результат, данная топология обеспечивает минимальные затраты при передаче данных, однако является сложно реализуемой при большом количестве процессоров;
- **линейка** (*linear array or farm*) - система, в которой каждый процессор имеет линии связи только с двумя соседними (с предыдущим и последующим) процессорами; такая схема является, с одной стороны, просто реализуемой, а с другой стороны, соответствует структуре передачи данных при решении многих вычислительных задач (например, при организации конвейерных вычислений);
- **кольцо** (*ring*) - данная топология получается из линейки процессоров соединением первого и последнего процессоров линейки;
- **звезда** (*star*) - система, в которой все процессоры имеют линии связи с некоторым управляющим процессором; данная топология является эффективной, например, при организации централизованных схем параллельных вычислений;
- **решетка** (*mesh*) - система, в которой граф линий связи образует прямоугольную сетку (обычно двух- или трех- мерную); подобная топология может быть достаточно просто реализована и, кроме того, может быть эффективно используется при параллельном выполнении многих численных алгоритмов (например, при реализации методов анализа математических моделей, описываемых дифференциальными уравнениями в частных производных);
- **гиперкуб** (*hypercube*) - данная топология представляет частный случай структуры решетки, когда по каждой размерности сетки имеется только два процессора (т.е. гиперкуб содержит 2^N процессоров при размерности N); данный вариант организации сети передачи данных достаточно широко распространен в практике и характеризуется следующим рядом отличительных признаков:

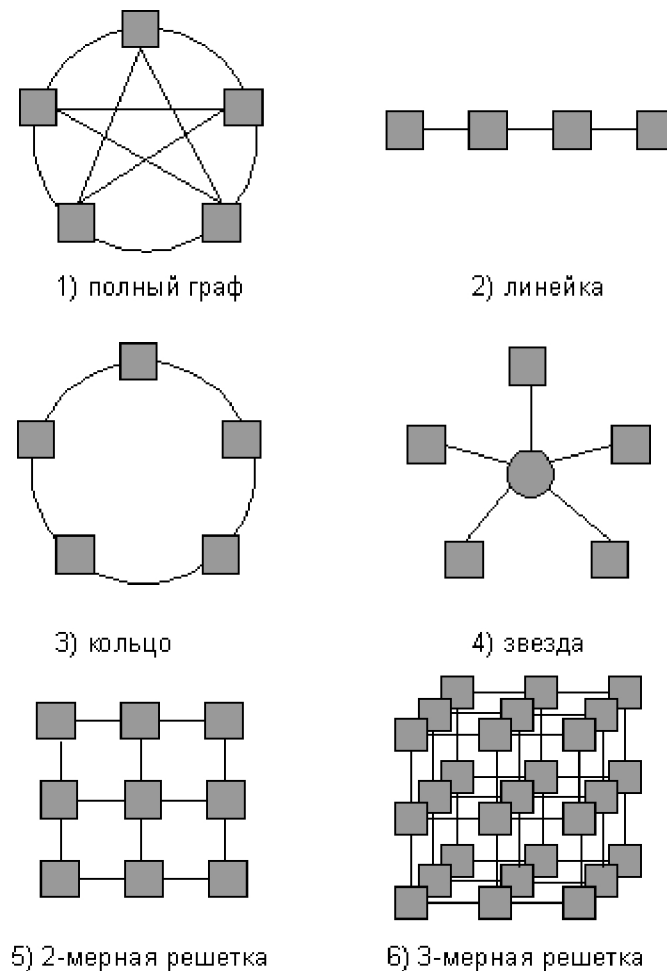


Рис. 7 Примеры топологий многопроцессорных вычислительных систем

- два процессора имеют соединение, если двоичное представление их номеров имеет только одну различающуюся позицию;
- в N -мерном гиперкубе каждый процессор связан ровно с N соседями;
- N -мерный гиперкуб может быть разделен на два $(N - 1)$ -мерных гиперкуба (всего возможно N различных таких разбиений);
- кратчайший путь между двумя любыми процессорами имеет длину, совпадающую с количеством различающихся битовых значений в номерах процессоров (данная величина известна как *расстояние Хэмминга*).

Дополнительная информация по топологиям МВС может быть получена, например, в [9, 22 - 23, 29, 31]; при рассмотрении вопроса следует учесть, что схема линий передачи данных может реализовываться на аппаратном уровне, а может быть обеспечена на основе имеющейся физической топологии при помощи соответствующего программного обеспечения. Введение *виртуальных* (программно-реализуемых) топологий способствует мобильности разрабатываемых параллельных программ и снижает затраты на программирование.

Понятие графа

Графом G называется пара $(V(G), E(G))$, где $V(G)$ — непустое конечное множество элементов, называемых *вершинами*, а $E(G)$ — конечное семейство неупорядоченных пар элементов из $V(G)$ (необязательно различных), называемых *ребрами*. Употребление слова "семейство" говорит о том, что допускаются кратные ребра. Будем называть $V(G)$ "*множеством вершин*", а $E(G)$ — *семейством ребер* графа G . О каждом ребре вида $\{v, w\}$ говорят, что оно соединяет вершины v и w . Каждая петля $\{v, v\}$ соединяет вершину v саму с собой.

При изображении графов на рисунках или схемах отрезки могут быть прямолинейными или криволинейными; длины отрезков и расположение точек произвольны.

Граф называется *полным*, если каждые две различные вершины его соединены одним и только одним ребром. В полном графе каждая его вершина принадлежит одному и тому же числу ребер. Для задания полного графа достаточно знать число его вершин. Полный граф с n вершинами обычно обозначается через K_n .

Граф, не являющийся полным, можно преобразовать в полный с теми же вершинами, добавив недостающие ребра. Вершины графа G и ребра, которые добавлены, тоже образуют граф. Такой граф называют *дополнением* графа G и обозначают его $\bar{G}$.

Дополнением графа G называется граф $\bar{G}$ с теми же вершинами, что и граф G , и с теми и только теми ребрами, которые необходимо добавить к графу G , чтобы получился полный граф.

Является ли граф полным или нет, это его характеристика в целом.

Виды графов

Полным ориентированным графом называется граф, каждая пара вершин которого соединена в точности одним ориентированным ребром. Если с каждого ребра полного ориентированного графа снять направление, то образуется полный граф с неориентированными ребрами.

Рассмотрим соревнование, в котором каждая из команд играет с каждой из остальных команд по одному разу. Такое соревнование называют *круговым турниром* или *турниром в один круг*.

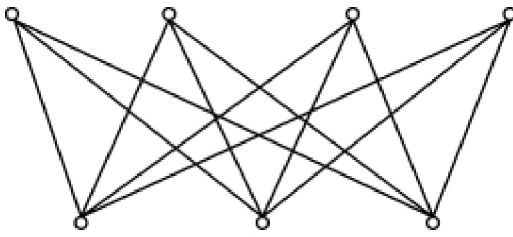
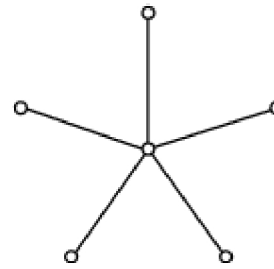
Если каждая встреча непременно должна оканчиваться выигрышем одной из команд, то круговой турнир называют *бескомпромиссным*. Круговой бескомпромиссный турнир проводится, например, в волейболе и баскетболе.

$\{v, w\}$

Каждому турниру соответствует полный ориентированный граф, в котором вершины представляют команды, а каждое ориентированное ребро $\{v, w\}$ выражает отношение " v победила w ".

Допустим, что множество вершин графа можно разбить на два непересекающихся подмножества V_1 и V_2 , так, что каждое ребро в G соединяет какую-нибудь вершину из V_1 с какой-либо вершиной из V_2 , тогда G называем *двудольным графом*. Такие графы иногда обозначают $G(V_1, V_2)$, если хотят выделить два указанных подмножества. Двудольный граф можно определить и по-другому: в терминах раскраски его вершин двумя цветами, скажем, красным и синим. При этом граф называется *двудольным*, если каждую его вершину можно окрасить красным или синим цветом так, чтобы любое ребро имело один конец красный, а другой — синий. Следует подчеркнуть, что в двудольном графе совсем не обязательно каждая вершина из V_1 соединена с каждой вершиной из V_2 ; если же это так и если при этом граф G простой, то он называется *полным двудольным графом* и обычно обозначается $K_{m,n}$, где m, n — число вершин соответственно в V_1 и V_2 .

Пример.

$K_{4,3}$  $K_{1,5}$ — звездный граф

Заметим, что граф $K_{m,n}$ имеет ровно $m+n$ вершин и nm ребер.

Вершины в графе могут отличаться друг от друга тем, скольким ребрам они принадлежат.

Степенью вершины называется число ребер графа, которым принадлежит эта вершина. Вершина называется *четной*, если ее степень — число четное. Вершина называется *нечетной*, если ее степень — число нечетное. Две вершины графа называются *смежными*, если существует соединяющее их ребро,

то есть ребро вида $\{v, w\}$; при этом вершины v и w называются *инцидентными* этому ребру, а ребро — *инцидентным* этим вершинам. Аналогично, два **различных ребра графа называются смежными**, если они имеют, по крайней мере, одну общую вершину. Иначе можно определить степень вершины. **Степенью или валентностью вершины v графа G** называется число ребер, инцидентных v ; степень вершины будем обозначать через $\rho(v)$. При вычислении степени вершины v будем учитывать петлю в v два раза, а не один. Вершина степени 0 называется *изолированной вершиной*, вершина степени 1 называется *висячей*, или *концевой*, вершиной. Граф, у которого все вершины имеют одну и ту же степень, называется *регулярным графом*.

Два графа, G_1 и G_2 , называются *изоморфными*, если существует взаимно однозначное соответствие между множествами их вершин, обладающее тем свойством, что число ребер, соединяющих любые две вершины в G_1 равно числу ребер, соединяющих соответствующие вершины в G_2 .

Имея даже общие представления о графе, иногда можно судить о степенях его вершин. Так, степень каждой вершины полного графа на единицу меньше числа его вершин. При этом некоторые закономерности, связанные со степенями вершин, присущи не только полным графам.

1. В графе G сумма степеней всех его вершин — число четное, равное удвоенному числу ребер графа, так как каждое ребро участвует в этой сумме ровно два раза. Этот результат, известный еще двести лет назад Эйлеру, часто называют *леммой о рукопожатиях*. Из нее следует, что если несколько человек обменялись рукопожатиями, то общее число пожатых рук обязательно четно, ибо в каждом рукопожатии участвуют две руки (при этом каждая рука считается столько раз, сколько она участвовала в рукопожатиях).

2. Число нечетных вершин любого графа четно.

3. Во всяком графе с n вершинами, где $n \geq 2$, всегда найдутся по меньшей мере две вершины с одинаковыми степенями.

4. Если в графе с вершинами $n > 2$ в точности две вершины имеют одинаковую степень, то в этом графе всегда найдется либо в точности одна вершина степени 0 , либо в точности одна вершина степени $n-1$.

Связность графа

Назовем *граф связным*, если его нельзя представить в виде объединения двух графов, и *несвязным* — в противном случае.

Маршрутом в данном графе G называется конечная последовательность ребер вида

$$\{v_0, v_1\}, \{v_1, v_2\}, \dots, \{v_{m-1}, v_m\}$$

(обозначаемая также через $v_0 \rightarrow v_1 \rightarrow v_2 \rightarrow \dots \rightarrow v_m$). Очевидно следующее свойство маршрута: любые два последовательных ребра либо смежны, либо одинаковы. Но не всякая последовательность ребер, обладающая этим свойством, является маршрутом (в качестве примера рассмотрим звездный граф и возьмем его ребра в произвольном порядке). Каждому маршруту соответствует последовательность вершин $v_0, v_1, \dots, v_m$. v_0 называется *начальной вершиной*, а v_m *конечной вершиной* маршрута. Таким образом, мы будем говорить о маршруте из v_0 в v_m . Заметим, что для любой вершины v_0 тривиальным маршрутом, вообще не содержащим ребер, является маршрут из v_0 в v_0 . *Длиной маршрута* называется число ребер в нем. Маршрут называется *цепью*, если все его

ребра различны, и *простой цепью*, если все вершины $v_0, \dots, v_m$ различны, кроме, может быть, $v_0 = v_m$. Замкнутая простая цепь, содержащая по крайней мере одно ребро, называется *циклом*. В частности, любая петля или любая пара кратных ребер образует цикл. *Путь* (последовательность ребер, ведущая от e_1 к e_2 , в которой каждые два соседних ребра имеют общую вершину и никакое ребро не встречается более одного раза) от вершины e_1 до вершины e_2 называется *простым*, если он не проходит ни через одну из вершин графа более одного раза.

Граф G называется *связным*, если для любых двух его вершин v и w существует простая цепь из v в w . Любой граф можно разбить на непересекающиеся связные графы, называемые *компонентами* (*связности*) графа G . Таким образом, несвязный граф имеет, по крайней мере, две компоненты. Две вершины *эквивалентны* (или *связаны*, если существует простая цепь из одной в другую). Связный граф состоит из одной компоненты. Граф называется *несвязным*, если число его компонент больше единицы.

Связный граф представляет собой *простой цикл* тогда и только тогда, когда каждая его вершина имеет степень 2.

Если $G(V, E)$ — связный граф и степень каждой его вершины 2, тогда $G(V, E)$ — простой цикл.

Из каждой вершины данного графа в любую другую ведет путь. Начнем путь из какой-нибудь вершины e и пройдем по одному из двух ребер, которым принадлежит эта вершина. Попад в вторую вершину, выйдем из нее по второму ребру и так далее. С необходимостью все ребра графа будут пройдены, и мы вернемся в исходную вершину.

Если граф $G(V, E)$ — простой цикл, тогда степень каждой вершины равна двум.

Так как граф $G(V, E)$ — замкнутый простой путь, то из каждой его вершины можно попасть в любую другую, не проходя ни через одну вершину более одного раза. Степень каждой вершины такого графа равна двум.

Покажем, что в простом цикле не может быть вершины, степень которой не равна двум.

Если какая-то вершина в графе имеет степень меньше двух, то она не принадлежит никакому простому циклу.

Если какая-то вершина имеет степень больше двух, то никакой простой цикл (по определению) не может содержать все ребра, которым принадлежит эта вершина.

5.4. Моделирование топологии ЭС в процессе проектирования

Моделирование топологии электрической схемы начинают с построения физической модели протекающих в ней электрических процессов. Для построения физической модели используют хорошо разработанный в теории электрических цепей метод построения эквивалентных схем, содержащих резисторы, конденсаторы, индуктивности, источники тока и напряжения.

В соответствии с ним электрические модели РЭС могут быть получены путем замены каждого радиоэлемента принципиальной схемы его моделью (эквивалентной схемой) и добавлением в полученную таким образом модель РЭС паразитных проводимостей, емкостей, индуктивностей, источников наводимых потенциалов и токов и других параметров, обусловленных конкретным выполнением принципиальной схемы в конструкции РЭС.

Для одного и того же радиоэлемента применяют, как правило, ряд моделей, различающихся степенью учета тех или иных особенностей электрических процессов которые в нем протекают. Это обусловлено противоречивостью требований, предъявляемых к моделям, например, универсальностью с одной стороны и экономичностью с другой.

Универсальность модели определяется ее применимостью к расчету более или менее широкого класса схем, однако попытка учесть в модели все, что известно о моделируемом объекте, как правило, обречена на провал, поскольку приводит к уравнениям сложного вида и большому количеству параметров и переменных.

Экономичность модели характеризует затраты ЭВМ на проведение расчета с использованием данной модели.

Для упрощения восприятия описаний, их систематизации они разделяются на иерархические уровни. Каждый уровень описания отличается степенью детализации.

На всех уровнях описания следует стремиться представить РЭС в виде совокупности связанных блоков, которые являются замкнутыми составными частями. Каждый блок такого иерархического уровня описания представляет собой описание следующего, более низкого иерархического уровня, который в свою очередь представляется в виде совокупности блоков. По функциональному описанию РЭС уровни включают систему, комплекс, устройство и функциональный узел.

При проектировании широко используются промежуточные описания РЭС и его составных частей. Важнейшее место среди них занимают модели различных классов. Например, представления о свойствах РЭС могут быть получены с помощью натурной модели (макета, стенда и т.д.), представляющие собой некий «образ» РЭС. Свойства РЭС на таких моделях изучаются путем эксперимента. Однако, такой путь исследования не всегда применим ввиду высоких материальных и временных затрат. Поскольку современный процесс проектирования немыслим без широкого использования ЭВМ и соответствующего программного обеспечения, доминирующую роль среди промежуточных описаний играют математические модели. Дадим ее определение. Математическая модель РЭС — совокупность математических объектов (чисел, переменных и т.п.), отражающая свойства радиоэлектронного средства и отношения между ними.

Рассмотрим процесс проектирования РЭС с позиций системотехники. Этапы проектирования состоят из отдельных проектных процедур, каждая из которых заканчивается частным проектным решением. Типичными для проектирования РЭС процедурами являются анализ и синтез описаний различных уровней.

При грамотном проектировании процесс начинается с синтеза алгоритма функционирования системы. При синтезе мы имеем несколько совокупностей исходных данных, условий и ограничений. Процедура синтеза заключается в создании проектного решения по заданным требованиям, свойствам и ограничениям - примером может служить синтез электронных схем по заданным характеристикам в частотной или отклику во временной области, синтез оптимальных по какому-либо критерию фильтров (Винера, Калмана), синтез алгоритмов обнаружения и распознавания. В процессе синтеза создается структура схемы. Процедура анализа состоит в определении свойств заданного описания, например расчет частотных или переходных характеристик схем, определение реакции схемы на заданное воздействие и др. Анализ позволяет оценить степень удовлетворения проектного решения заданным требованиям.

Типичной проектной процедурой является оптимизация, которая приводит к оптимальному (по заранее определенному критерию) проектному решению. Например, широко используется оптимизация параметров электронных схем с целью наилучшего приближения частотных характеристик к заданным. Процедура оптимизации состоит в многократном анализе при целевом изменении параметров схемы до удовлетворительного приближения к заданным характеристикам.

В процессе проектирования необходимо не просто создать аппаратуру, которая будет обеспечивать заданное функционирование, но и оптимизировать ее по широкому спектру функциональных, конструкторско-технологических, эксплуатационных и экономических показателей. На отдельных этапах для отдельных частных задач оптимизацию еще можно осуществить на основе разработанных формальных математических методов. Однако применительно к комплексным РЭС задача оптимизации не всегда поддается формализации. В этом случае рассматриваются несколько вариантов решения поставленной задачи, подсказанных, как правило, предшествующим опытом, интуицией, и выбирают лучший из них. Такой подход называется эвристическим многовариантным анализом или дискретным выбором варианта построения системы. Однако, в связи с все возрастающей сложностью РЭС, с повышением требований к ним необходимые расчеты оказываются все более

трудоемкими, а количество вариантов, целесообразных для рассмотрения, катастрофически возрастает, кроме того, эта процедура практически неформализуема. Часто на этапе проектирования трудно предвидеть некоторые требования, определяемые особенностями эксплуатации изделия. В результате всего этого создание нового РЭС затягивалось на долгие годы. Представляемые к испытаниям опытные образцы часто оказывались не удовлетворяющими заданным требованиям, а доводка аппаратуры происходила в процессе испытаний, что удорожало проектирование во много раз.

Подобное положение не было виной разработчиков. Это результат возникшего принципиального несоответствия традиционного подхода к проектированию и сложности современных радиоэлектронных средств.

Указанное противоречие и вызвало интенсивное развитие новой технологии проектирования РЭС, базирующейся на системном подходе и совершенствовании процессов проектирования с применением математических методов и средств вычислительной техники. А замена макетирования и натурного моделирования математическим моделированием, использованием эффективных методов многовариантного проектирования и оптимизации повышало качества управления проектированием. В настоящее время эти тенденции к автоматизации всего процесса проектирования РЭС привели к появлению несколько систем автоматического проектирования (САПР) решающих задачи функционального моделирования, моделирования работы отдельных схем и т.д. Эти САПР позволяют моделировать работу аппаратуры и обладают средствами анализа процессов, происходящих в модели. К числу таких САПР относятся система SystemView фирмы Elanix, MatLab - Simulink, LabView и другие /5,6,7/.

Трансформация макетирования и натурного моделирования в математическое моделирование, с возможностью представления объекта его экспериментальными характеристиками привело к появлению на рабочих местах проектировщиков специализированных САПР «виртуальных инструментов». Эти САПР обладают средствами для создания виртуальных устройств различного назначения – осциллографов, анализаторов спектра и обработки данных, полученных как в режиме реального времени от физического объекта, так и данных в виде файлов данных. тема LabView является именно таким САПР.

5.5. Моделирование проектных задач

Рассмотрим классификацию проектных задач решаемых в процессе проектирования РЭС (рис. 8).

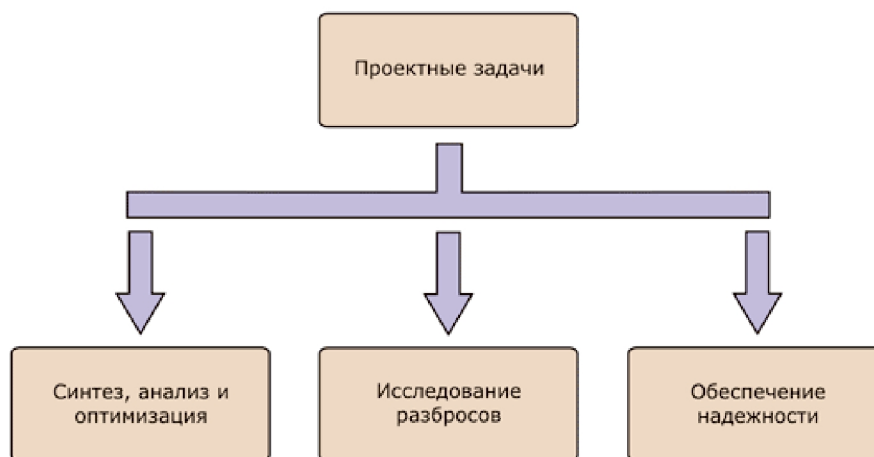


Рис. 8. Классификация проектных задач

Задачи синтеза технических объектов направлены на создание новых вариантов проектных решений. Создаваемые в процессе синтеза проектные решения должны быть оформлены на языке оформления проектной документации, например в виде чертежей, схем и пояснительного текста. В этом языке действуют правила, установленные единой системой конструкторской документации (ЕСКД).

Различают задачи структурного и параметрического синтеза. В первом случае синтезируется структура проектируемого объекта, а во втором его параметры.

Задачи анализа технических объектов направлены на изучение их свойств. В процессе анализа не создаются новые объекты, а лишь исследуются заданные.

Решение задачи анализа позволяет получить информацию о выходных характеристиках объекта, режимах работы его элементов, тепловых и механических режимах конструкции и т.д.

Необходимо отметить, что часто задачи синтеза решаются путем многократного решения задач анализа.

Решение задачи оптимизации направлены на поиск не любого, а наилучшего, в некотором смысле, проектного решения. Если в процессе оптимизации ищется наилучшая структура, то такую задачу называют структурной оптимизацией, а если при заданной структуре отыскиваются параметры объекта, удовлетворяющие заданному критерию, то такую задачу называют параметрической оптимизацией.

Параметры элементов любого технического объекта не могут иметь точно заданные значения. Это является следствием неизбежных погрешностей технологического оборудования, влияния внешних факторов, разбросов параметров материалов и т.д. Поэтому параметры элементов являются случайными величинами. А это значит, что при серийном производстве каждый экземпляр проектируемой аппаратуры будет иметь случайные значения выходных характеристик. Другими словами выходные характеристики партии объектов будут лежать в некотором диапазоне. Хорошо если этот диапазон не выходит за рамки регламентируемого в техническом задании. В противном случае, те объекты значения выходных характеристик, выходят за пределы диапазона, регламентируемого техническим заданием, считаются не работоспособными. Учесть влияние разбросов параметров элементов на выходные характеристики и уменьшить это влияние позволяет решение задачи исследования разбросов.

Алгоритм автоматизированного проектирования топологии РЭС

Исходным документом для начала проектирования является техническое задание (ТЗ). В нем перечислены все технические требования, предъявляемые к создаваемой аппаратуре. В состав основных требований входят:

- значения выходных характеристик и их допустимые разбросы;
- показатели надежности: вероятность безотказной работы, время эксплуатации, срок службы и др.;
- условия эксплуатации: влажность, давление, температура и др.;
- специальные воздействия: вибрация, удары, акустический шум, радиация и др.;
- условия хранения и транспортировки.

На основе технического задания создается проект (Рис. 9).

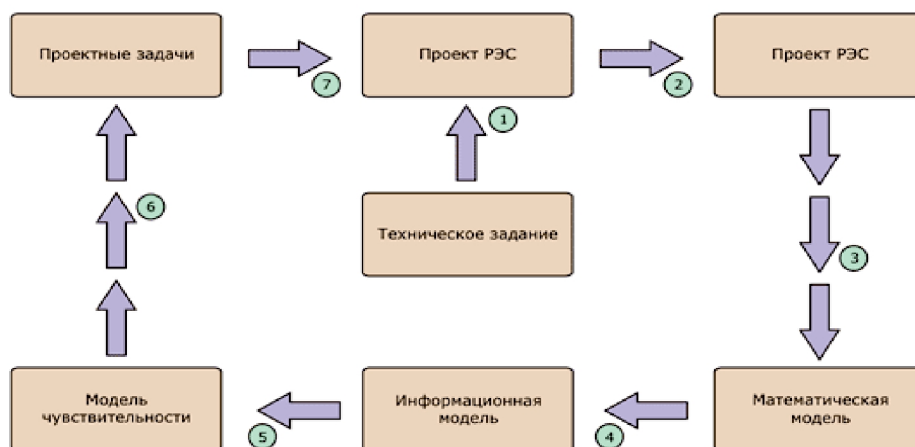


Рис.9.. Схема процесса автоматизированного проектирования РЭС

Это эвристический набросок схемы и конструкции. На этом этапе разрабатываются эскизы структурной и функциональной схем устройства, производится предварительная компоновка и размещение.

Далее разработанный проект исследуется и многократно уточняется (Рис. 9, стрелки 2 - 7), при этом происходит постепенный переход от эскизного проекта к техническому.

На основе эскизов схем и конструкций производится формализация проекта, результатом которой являются физические модели схемы и конструкции, составленные в терминах соответствующего научного направления, например, электрические - в терминах электротехники, механические - в терминах механики, тепловые - в терминах теории теплообмена. Формализация проекта производится с позиции системного подхода и заключается в учете тех или иных факторов, влияющих на функционирование аппаратуры при построении физических моделей.

На основе физических моделей получают математические модели, полученные с использованием математических методов и законов соответствующих наук. Они являются основой для расчета выходных характеристик, проектируемой аппаратуры, а также параметров и факторов по которым оценивается фактическое состояние схемы или конструкции.

В результате расчета с использованием математических моделей получается информационная модель устройства, которая включает в себя расчетные значения выходных характеристик, требования технического задания, информацию из технических условий на элементы схемы и конструкции, расчетные значения электрических, тепловых и механических режимов работы элементов, показатели, определяющие надежность и качество изделия, а также множество внутренних параметров схемы и конструкции, которые могут быть управляемыми. Под множеством управляемых параметров понимается перечень внутренних параметров аппаратуры, которые можно изменять в процессе проектирования, для улучшения выходных характеристик аппаратуры и режимов работы ее элементов.

Путем сопоставления требований ТЗ с расчетными характеристиками, режимов работы элементов с допустимыми режимами, приведенными в технических условиях выявляются те характеристики и режимы работы элементов которые необходимо изменить и на этой основе строится модель чувствительности.

В результате расчета модели чувствительности определяются функции чувствительности, показывающие степень влияния управляемых параметров на выходные характеристики и позволяющие окончательно сформулировать проектные задачи, которые необходимо решить для доработки проекта. Существует три группы проектных задач:

1. Задачи синтеза, расчета и оптимизации структуры и параметров схемы и конструкции.
2. Задачи исследования разбросов параметров вокруг номинальных значений.
3. Задачи обеспечения показателей надежности и качества.

Решение сформулированных проектных задач позволяет внести соответствующие изменения в схему и конструкцию проектируемой аппаратуры и уточнить проект.

Таким образом из приведенного описания схемы автоматизированного проектирования следует:

1. Процесс проектирования носит итерационный характер т.к. решения в этом процессе принимаются в условиях отсутствия полной информации, поэтому возникают ситуации когда были приняты не реализуемые, по тем или иным причинам, решения. Их исправление происходит путем повторного выполнения проектных процедур.
2. Процесс проектирования реализуется путем моделирования различных физических процессов, протекающих в аппаратуре при ее функционировании.

Моделирование топологии в процессе автоматизированного проектирования РЭС

Как было показано ранее, процесс проектирования реализуется путем моделирования различных физических процессов, протекающих в аппаратуре при ее функционировании.

Под моделью аппаратуры, понимается представленное в той или иной форме математическое описание, которое адекватно отражает сущность и характерные свойства рассматриваемого физического процесса, протекающего в схеме и конструкции аппаратуры.

Построение моделей аппаратуры предполагает формализацию схемы и конструкции с точки зрения рассматриваемого процесса а она, в свою очередь, предполагает принятие определенных допущений. Поэтому модели не полно отражают детали рассматриваемого процесса. Степень соответствия модели

реальным процессам определяет точность, получаемых при моделировании результатов, и зависит от полноты учета существенных сторон моделируемых процессов.

Практика инженерного проектирования РЭС показывает, что наиболее существенное влияние на выходные характеристики, их разбросы и надежность аппаратуры оказывают взаимосвязанные между собой электрические, тепловые и механические процессы.

Сформулируем принципы исходя из которых строятся модели этих процессов.

Модель электрических процессов:

- отражает электрические процессы, протекающие в схеме аппаратуры, что должно обеспечить получение с заданной точностью функциональных и режимных электрических характеристик;
- включает в себя эквивалентные схемы радиоэлементов (резисторов, конденсаторов, катушек индуктивности, диодов, транзисторов, микросхем и пр.);
- учитывает паразитные проводимости, емкости, индуктивности, взаимные индуктивности и другие параметры, отражающие влияние конструкции на протекающие электрические процессы.

Модель тепловых процессов:

- отражает тепловые процессы в конструкции, связанные с теплообменом под влиянием окружающей среды, тепловыделениями в радиоэлементах, действием систем охлаждения и термостатирования, что должно обеспечить получение с заданной точностью тепловых характеристик;
- учитывает кондуктивные, конвективные и лучистые составляющие теплообмена в аппаратуре;
- учитывает распределенность массы элементов конструкции и анизотропность тепловых свойств электрорадиоэлементов.

Модель механических процессов:

- отражает механические процессы в конструкции, связанные с появлением механических деформаций и напряжений при механических воздействиях, что должно обеспечить получение с заданной точностью статических, частотных и временных механических характеристик;
- учитывает распределенность массы несущих конструкций и анизотропность механических свойств ЭРЭ;
- учитывает эффект внутреннего трения в материалах конструкции при деформациях;
- учитывает жесткость крепления ЭРЭ к печатным платам, шасси и другим несущим конструкциям, а также крепления элементов конструкции друг с другом.

Модель надежности и качества:

- отражает, с заданной точностью, характеристики надежности и качества аппаратуры, связанные с технологическими факторами, тепловыми и механическими воздействиями, процессами старения;
- учитывает электрические, механические и тепловые режимы ЭРЭ;
- учитывает электрические, механические и тепловые режимы элементов конструкции;
- учитывает разбросы параметров ЭРЭ и элементов конструкции.

С учетом изложенного представим схему взаимодействия моделей в процессе автоматизированного проектирования. Блоками выделим исходную информацию для построения моделей физических процессов в виде электрической схемы, эскиза конструкции и сами модели.

Стрелками покажем взаимодействие между моделями. Надписи на стрелках показывают информацию, которая получается в результате расчета по одной модели и требуется для построения другой (рис. 10).

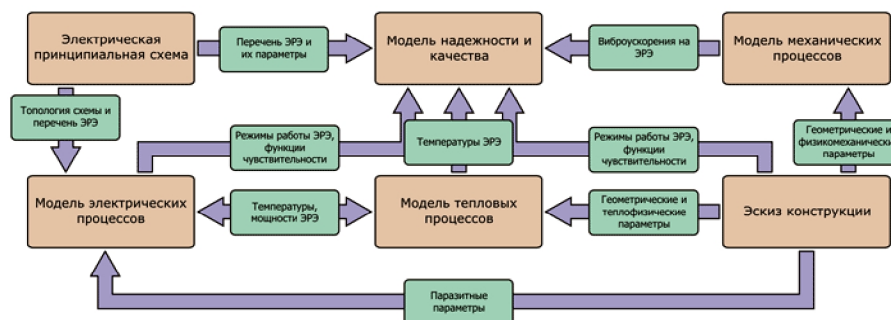


Рис. 10. Схема взаимодействия моделей

Например, модель электрических процессов строится на основе топологии схемы, перечня элементов, паразитных параметров, вносимых конструкцией, температур элементов РЭС. В результате моделирования электрических процессов, помимо функциональных характеристик схемы, получаются мощности тепловыделений элементов, необходимые для построения модели тепловых процессов, режимы работы элементов РЭС и функции чувствительности, необходимые для построения модели надежности и качества.

5.6. Цифровое моделирование температурных полей в электронных системах

Одной из важнейших задач, поставленных перед разработчиками и конструкторами радиоэлектронных средств (ЭС), является интенсификация процесса создания устройств на основе применения систем автоматического проектирования (САПР). В этом случае анализ температурного поля устройства составляет подсистему тепловые режимы. Эта подсистема теплового проектирования включает в себя следующие разделы:

- способы моделирования температурных полей сложных устройств и их математическое описание;
- методы автоматизированного теплового проектирования и расчета ЭС в различных условиях его эксплуатации;
- полную систему теплового проектирования.

Среди конструкторов РЭС все большее распространение для расчета температурного поля получает метод конечных разностей, или цифровое моделирование температурных полей. Его можно было бы назвать и методом кубиков, поскольку в основе его лежит построение моделей сложных физических процессов, происходящих в больших объемах пространства, состоящих из простых элементарных процессов, происходящих в малом объеме кубической формы.

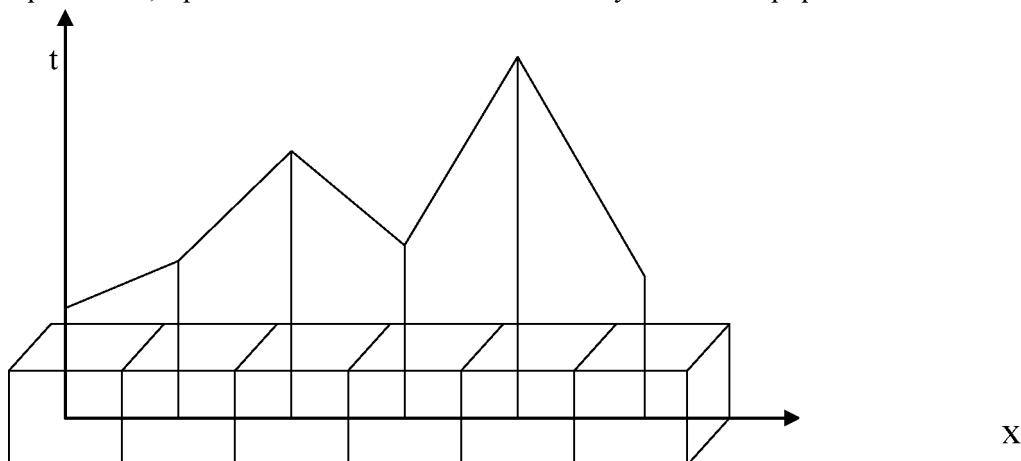


Рисунок 11. Кусочно-линейная аппроксимация температуры.

Суть этого метода в следующем: Конструкция разбивается на части прямоугольной формы, которые назовем элементами. Для повышения точности расчета и облегчения составления программы все элементы следует делать одинаковых размеров. В центре элемента выделяется точка – узел сетки, в котором и вычисляется температура. В интервале между узлами температура считается изменяющейся по линейному закону, т.е. температура в такой модели будет кусочно-линейной функцией координат, что показано на рисунке 11.

Далее дифференциальные уравнения, описывающие тепловые явления заменяются на уравнения в конечных разностях, т.е. дифференциалы заменяются на приращения в соответствующих точках.

Например, уравнение теплопроводности изотропного тела в дифференциальной форме:

$$\lambda \cdot \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) + q_v = C_p \cdot \rho \cdot \frac{\partial t}{\partial \tau},$$

где λ – коэффициент теплопроводности материала; t – температура; q_v – удельная мощность выделения внутренних источников; C_p – теплоемкость тела при постоянном давлении; ρ – плотность; τ – время.

В конечных разностях это уравнение имеет вид:

$$\lambda \cdot \left(\frac{\Delta \left(\frac{\Delta x}{l_x} \right)}{l_x} + \frac{\Delta \left(\frac{\Delta y}{l_y} \right)}{l_y} + \frac{\Delta \left(\frac{\Delta z}{l_z} \right)}{l_z} \right) + q_v = C_p \cdot \rho \cdot \frac{\Delta t}{\tau}$$

где l_x, l_y, l_z – приращения по координатам, равные размерам элемента по этим координатам;

$$\Delta t_x^+ = t_{i-1,j,k} - t_{i,j,k} \quad \text{или} \quad \Delta t_x^- = t_{i,j,k} - t_{i+1,j,k},$$

($t_{i,j,k}$ – температура в элементе с индексами i, j, k);

аналогично для других координат

$$\Delta t_y^+ = t_{i,j-1,k} - t_{i,j,k}, \quad \Delta t_y^- = t_{i,j,k} - t_{i,j+1,k},$$

$$\Delta t_z^+ = t_{i,j,k-1} - t_{i,j,k}, \quad \Delta t_z^- = t_{i,j,k} - t_{i,j,k+1}.$$

Величины с “+” относятся к входящим, а с “-” – к выходящим потокам тепла.

На рисунке 2 $J_x^+, J_x^-, J_y^+, J_y^-, J_z^+, J_z^-$ – плотности потоков по координатам x, y, z соответственно, а $\Delta t / \tau$ – изменение температуры в элементе с индексами i, j, k за момент времени Δt .

Данное уравнение легко решается от начального момента времени до интересующего времени работы устройства через равные кванты времени τ . Обычно за начальный момент времени берется момент включения аппаратуры, в этот момент времени ($\tau = 0$) температура в элементах равна температуре окружающей среды t_c . Через момент времени τ определяется температура в узлах, где происходит выделение тепла, в остальных же она пока равна t . Так обходя все узлы по порядку, можно определить температуру в них в любой момент времени.

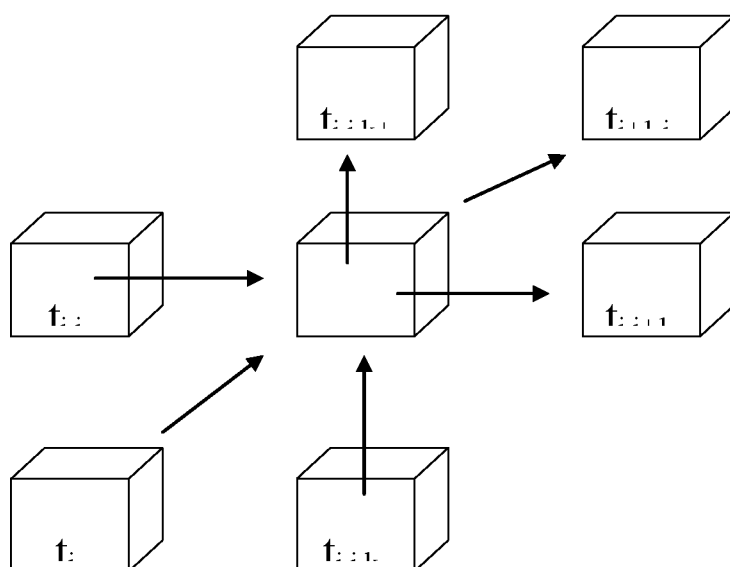


Рисунок 1 2. Распределение тепла в нескольких элементах.

Радиоаппаратуру можно рассматривать как систему многих тел с сосредоточенными источниками тепловой энергии. Анализ температурных полей таких систем является сложной задачей, решение которой выполняется приближенными методами. Исследователь устанавливает количественную зависимость между температурами ограниченного числа наиболее ответственных мест конструкции и существенными факторами, влияющими на процесс теплообмена. При экспериментальном решении задачи эта работа может проводиться на самом объекте исследования; аналитическое решение исключает такой подход, так как тепловые процессы в реальной конструкции, как правило, не поддаются точному математическому описанию из-за наличия большого числа основных и дополнительных факторов, влияющих на протекание процесса. Поэтому необходим переход к модели конструкции. В настоящее время получили распространение две группы тепловых моделей РЭС. На рисунке 1 3 схематично показаны тепловые модели первой и второй группы.

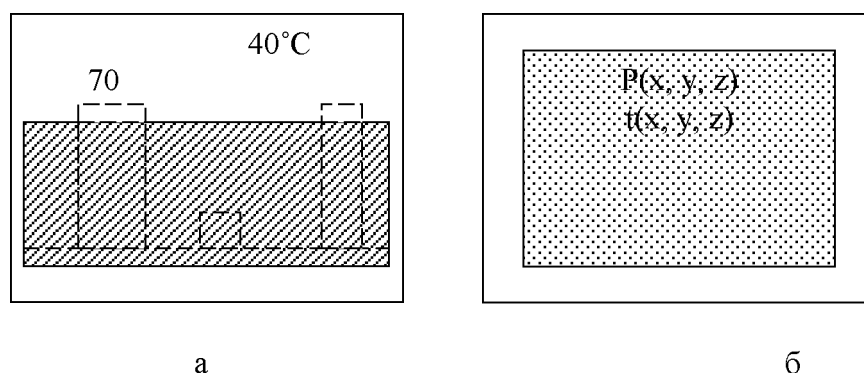


Рисунок 1 3. Виды тепловых моделей РЭС: а – тепловая модель I группы; б – тепловая модель II группы.

Характерной особенностью моделей первой группы является разделение поверхностей модели РЭС на отдельные условно изотермические участки. Процесс

переноса тепла в таких моделях рассматривается так, как если бы он протекал между изотермическими поверхностями.

В тепловых моделях второй группы нагретая зона РЭС, представляющая собой неоднородную систему многих тел, идеализируется в виде однородного тела. Свойства этого тела характеризуются эффективными значениями теплофизических параметров – коэффициента теплопроводности $\lambda_{\text{экв}}$ и коэффициента теплоемкости $C_{\text{экв}}$. Здесь нагретая зона – однородное анизотропное тело с распределенными по объему источниками энергии. Информационные возможности такой модели весьма велики, так как ее исследование позволяет получить аналитическое выражение для поля температур. В настоящей работе для расчета температурного поля объекта исследования используется модель второй группы, но для увеличения точности расчета осредненных теплофизических параметров конструкция делится не на одно анизотропное тело, а на несколько анизотропных зон.

5.7. Расчет осредненных теплофизических параметров при цифровом моделировании температурных полей

РЭС – многокомпонентная структура с различными теплофизическими параметрами; чтобы рассчитать температурный режим такой конструкции, необходимо перейти к модели второй группы. Выполняется этот переход следующим образом.

Разобьем объект исследования на n элементов или n элементарных объемов. В каждом таком элементе может находиться какой-либо однородный материал, либо несколько различных материалов, из которых состоит объект исследования (радиоэлемент, компаунд, плата, корпус, кронштейн и т. д.), т.е. материалы с различными теплофизическими параметрами λ_i, C_i .

Рассмотрим такой элементарный объем отдельно, так как для каждого такого объема необходимо найти осредненные теплофизические параметры. Разобьем этот элемент на области так, чтобы в каждую область вошел какой-либо один однородный материал.

Структура разбиения следующая:

V_1 – однородная структура с λ_1, C_1 ; V_2 – однородная структура с λ_2, C_2 и т.д.

Значит $V_0 = \sum V_i$. Линейные размеры $h_1; h_2; h_3; \dots; h_i$ определяются:

$$h_1 = \sqrt[3]{V_1}; \quad h_2 = \sqrt[3]{V_2 + V_1} - \sqrt[3]{V_1};$$

$$h_i = \sqrt[3]{V_i + V_{i-1} + \dots + V_1} - \sqrt[3]{V_{i-1} + V_{i-2} + \dots + V_1}.$$

Основной параметр при расчете температурного поля – тепловое сопротивление – может быть определено:

$$R_{TCT} = \sum_{i=1}^n R_{CЛ} = \frac{1}{S_{iCЛ}} \cdot \left(\frac{h_1}{\lambda_1} + \frac{h_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{h_n}{\lambda_n} \right) = \frac{A}{S_i};$$

$$S_{CЛ1} = h_1^2; \quad S_{CЛ2} = h_2(2h_1 + h_2);$$

$$\dots\dots\dots$$

$$S_{CЛn} = h_n[2(h_1 + h_2 + \dots + h_{n-1}) + h_n].$$

Для этого элемента с объемом V_0 тепловое сопротивление

$$R_{T\Sigma} = \int_0^h \frac{dh}{\lambda S} = \frac{1}{\lambda_{\text{экв}} \cdot h_{\text{куб}}}.$$

Приравнявая две величины $R_{\text{Тст}}$ и $R_{\text{Тс}}$, можно найти осредненный теплофизический параметр $\lambda_{\text{ЭКВ}}$

$$\lambda_{\text{ЭКВ}} = \frac{(h_1^2 + h_2^2 + \dots + h_n^2) \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \dots \lambda_n}{h_{\text{куб}} \cdot ((\lambda_2 \lambda_3 \dots \lambda_n) h_1 + (\lambda_1 \lambda_3 \dots \lambda_n) h_2 + \dots)},$$

или более общее выражение

$$\lambda_{\text{ЭКВ}} = \frac{\sum_{i=1}^n h_i^2 \prod_{j=1}^n \lambda_j}{h_{\text{куб}} \sum_{i=1}^n \left(h_i \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \lambda_j \right)}$$

Вторым теплофизическим параметром, влияющим на тепловой режим объекта исследования, является теплоемкость $C_{\text{ЭКВ}}$. Для указанного разбиения в каждой части элемента массы будет накапливаться тепло, равное

$$q_1 = C_1 V_1 \Delta t; \quad q_2 = C_2 V_2 \Delta t; \quad q_n = C_n V_n \Delta t.$$

А общее количество теплоты, которое может накопить рассматриваемый элемент массы,

$$q = (C_1 V_1 + C_2 V_2 + \dots + C_n V_n) \Delta t.$$

Если заменить этот неоднородный элемент однородным, но уже с осредненным значением теплоемкости $C_{\text{ЭКВ}}$, то количество теплоты в нем – q – не должно измениться, т.е.

$$q = C_{\text{ЭКВ}} V_0 \Delta t$$

Таким образом, значение эквивалентной теплоемкости определяется выражением:

$$C_{\text{ЭКВ}} = \frac{C_1 V_1 + C_2 V_2 + \dots + C_n V_n}{V_0}$$

Расчет температурного поля в модели второй группы

Вернемся к рисунку, только будем считать, что в каждом элементе уже найдены $\lambda_{\text{ЭКВ}}$ и $C_{\text{ЭКВ}}$ по выше предложенным формулам. Известно, что типовым уравнением движения энергии является *закон сохранения энергии: количество притекающей к данному элементу энергии равно количеству энергии, накапливающейся в элементе*. Этот закон, как правило, записывается через величину плотности теплового потока:

$$\frac{J_X^+ - J_X^-}{l_X} + \frac{J_Y^+ - J_Y^-}{l_Y} + \frac{J_Z^+ - J_Z^-}{l_Z} + q = C_{\text{ЭКВ}} \frac{t(\tau + \Delta \tau) - t}{\tau},$$

Здесь J_X^+ , ..., J_Z^- - удельные плотности тепловых потоков; l_X , l_Y , l_Z - линейные размеры элемента вдоль осей; $C_{\text{ЭКВ}}$ - осредненная теплоемкость элемента; τ - интервал времени; $t(\tau + \Delta \tau) - t$ - приращение температуры за интервал времени.

Для анизотропной модели

$$J_X^+ = \frac{t_X^+ - t_0}{R_{T\Sigma}},$$

где

$$R_{T\Sigma} = \frac{l_X}{2S} \left(\frac{1}{\lambda_{0\text{экв}}} + \frac{1}{\lambda_{X\text{экв}}^+} \right) = \frac{1}{2l} \left(\frac{\lambda_{0\text{экв}} + \lambda_{X\text{экв}}^+}{\lambda_{0\text{экв}} \cdot \lambda_{X\text{экв}}^+} \right).$$

Обозначим

$$K_{0X\text{экв}}^+ = \frac{\lambda_{0\text{экв}} \cdot \lambda_{X\text{экв}}^+}{\lambda_{0\text{экв}} + \lambda_{X\text{экв}}^+}.$$

т. е.

$$J_X^+ = 2l \cdot K_{0X\text{экв}}^+ \cdot (t_X^+ - t_0).$$

Аналогично для всех направлений x, y, z. За время Δt изменение температуры будет

$$\begin{aligned} \Delta t_{0X}^+ &= \frac{\Delta \tau \cdot J_X^+}{C_{0\text{экв}}} = \frac{\Delta \tau}{C_{0\text{экв}}} \cdot 2l [K_{0X\text{экв}}^+ \cdot (t_X^+ - t_0)]; \\ \Delta t_{0X}^- &= \frac{\Delta \tau \cdot J_X^-}{C_{0\text{экв}}} = \frac{\Delta \tau}{C_{0\text{экв}}} \cdot 2l [K_{0X\text{экв}}^- \cdot (t_X^- - t_0)]; \\ \Delta t_{0Y}^+ &= \frac{\Delta \tau \cdot J_Y^+}{C_{0\text{экв}}} = \frac{\Delta \tau}{C_{0\text{экв}}} \cdot 2l [K_{0Y\text{экв}}^+ \cdot (t_Y^+ - t_0)]; \\ \Delta t_{0Y}^- &= \frac{\Delta \tau \cdot J_Y^-}{C_{0\text{экв}}} = \frac{\Delta \tau}{C_{0\text{экв}}} \cdot 2l [K_{0Y\text{экв}}^- \cdot (t_Y^- - t_0)]; \\ \Delta t_{0Z}^+ &= \frac{\Delta \tau \cdot J_Z^+}{C_{0\text{экв}}} = \frac{\Delta \tau}{C_{0\text{экв}}} \cdot 2l [K_{0Z\text{экв}}^+ \cdot (t_Z^+ - t_0)]; \\ \Delta t_{0Z}^- &= \frac{\Delta \tau \cdot J_Z^-}{C_{0\text{экв}}} = \frac{\Delta \tau}{C_{0\text{экв}}} \cdot 2l [K_{0Z\text{экв}}^- \cdot (t_Z^- - t_0)]. \end{aligned}$$

При условии, что время Δt много меньше постоянной времени ячейки

$$\Delta \tau \leq C_{0\text{экв}} \cdot R_{T\Sigma} = \frac{C_{0\text{уд}} j V_0}{2l \cdot K_{0X\text{экв}}^i},$$

где j – удельный вес, вводится для получения объемной теплоемкости,
 V_0 – объем ячейки.

За время Δt изменение температуры вдоль осей будет:

$$\begin{aligned} \Delta t_{0X}^+ &= t_{0X}^+ - t_0; \\ \Delta t_{0X}^- &= t_{0X}^- - t_0; \\ \Delta t_{0Y}^+ &= t_{0Y}^+ - t_0; \\ \Delta t_{0Y}^- &= t_{0Y}^- - t_0; \\ \Delta t_{0Z}^+ &= t_{0Z}^+ - t_0; \\ \Delta t_{0Z}^- &= t_{0Z}^- - t_0. \end{aligned}$$

т. е.

$$\Delta t_0 = (\Delta t_{0X}^+ + \Delta t_{0X}^-) + (\Delta t_{0Y}^+ + \Delta t_{0Y}^-) + (\Delta t_{0Z}^+ + \Delta t_{0Z}^-) + \Delta t_{0q},$$

где Δt_{0q} - изменение температуры за счет удельного тепловыделения q .

Если в ячейке $q = 0$, то в уравнении оно отсутствует.

5.8. Особенности программы

Расчет температурного поля РЭС является трехмерной задачей, поэтому и массивы температур, мощностей тепловыделения, всех теплофизических параметров и т. д. должны быть трехмерными. Элементы нумеруются снизу вверх, слева направо, от ближнего к дальнему, как изображено на рисунке 1 4.

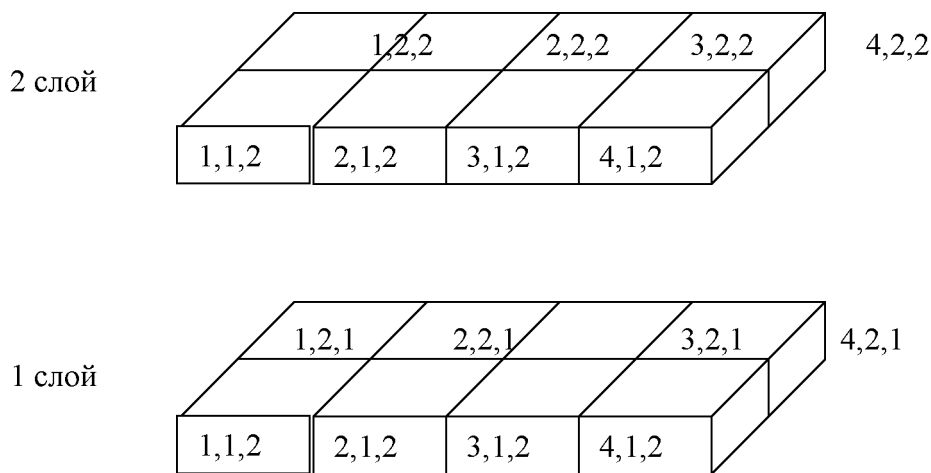


Рисунок 1 4. Нумерация элементов в разбиении

6. Характеристика механических воздействий на ЭС

Все виды радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) подвергаются воздействию внешних механических нагрузок, которые передаются к каждой детали, входящей в конструкцию. Механические воздействия имеют место в работающей РЭА, если она установлена на подвижном объекте. В стационарной РЭА механические воздействия возникают только при транспортировке, при этом РЭА обычно выключена.

К механическим воздействиям относятся линейные ускорения, удары и вибрация.

Линейные ускорения характерны для объектов, движущихся с переменной скоростью, например, при разгоне, торможении.

Ударные воздействия возникают при транспортировке, монтаже, эксплуатации, действии ударной волны.

Под вибрацией РЭА понимают механические колебания её элементов или конструкции в целом.

При эксплуатации РЭА часто имеют место случаи комплексных воздействий, включающих все рассмотренные выше виды. Например, самолетная РЭА при разбеге,

взлете, посадке самолета испытывает воздействие хаотической последовательности ударных импульсов, обусловленных неровностью взлетно-посадочной полосы. При полете наблюдается длительный установившийся режим вибраций, который является следствием динамической неуравновешенности вращающихся масс двигателя, а также воздействия сил аэродинамического происхождения.

Характеристики некоторых видов механического воздействия на РЭА, установленную на различных подвижных объектах, приведены в таблице 2:

Таблица 2

Вид транспортного средства	Вибрации		Ускорение при ударе, g	Линейное ускорение, g
	Частота, Гц	Ускорение, g		
Воздушный	3...500	2...20	5...10	6...9
Автомобильный	3...60	1...3	2...5	1
Железнодорожный	2... 100	1.5...2	2...5	1
Морской	2...50	0,4...2	2...5	-
Гусеничного типа	400...780	1.5...2	5... 10	6...9

Существует несколько конструктивных способов защиты РЭА от вибрации. Самым распространенным является применение амортизаторов, устанавливаемых между РЭА и объектом. Амортизатор уменьшает амплитуду передаваемых ударов и колебаний, снижает все действующие на РЭА механические силы, но не исключает их полностью.

Примечание: В соответствии с ГОСТ24346-80 «Вибрация. Термины и определения» термин «амортизатор» заменен на термин «виброизолятор».

Другой способ виброзащиты заключается в том, что на пути распространения сил механических воздействий ставятся экраны в виде воздушных зазоров, прокладок из материалов, отличающихся по своим упругим характеристикам от материалов конструкций. Это способ эффективен только на высоких частотах.

При низкочастотных внешних воздействиях применяется способ, заключающийся в смещении спектра собственных частот колебаний конструкции за верхнюю границу диапазона частот возмущающих вибраций. Это достигается изменением способов крепления и постановкой дополнительных опор.

Применение амортизаторов, (виброизоляторов) целесообразно в том случае, когда нижняя граница диапазона частот вибрации соответствует значениям коэффициента расстройки $k \geq \sqrt{2}$:

$$k = \frac{f}{f_o},$$

где f - частота возбуждения,

f_o - собственная резонансная частота механической системы РЭА на амортизаторах.

6.1. Основные характеристики и типы амортизаторов

Существует большое количество различных типов амортизаторов, отличающихся как по виду упругого элемента, так и по конструктивному исполнению. Широкий диапазон условий эксплуатации и допустимых уровней перегрузки РЭА делает невозможным создание универсальных защитных устройств, пригодных для всех

возможных случаев. Задачей конструктора является выбор амортизаторов, удовлетворяющих техническим требованиям задания.

Требования, предъявляемые к амортизаторам, разделяют на три группы: динамические, климатические и конструктивные.

Основными динамическими характеристиками амортизаторов являются частотный диапазон, номинальная нагрузка, прогиб при номинальной нагрузке, коэффициент жесткости. Частота собственных колебаний нагруженных номинальной нагрузкой амортизаторов вдоль основной оси составляет 3 - 4 Гц для низкочастотных, 8 - 10 Гц для среднечастотных, и 20 - 25 Гц для высокочастотных амортизаторов.

Климатические характеристики определяют работоспособность амортизаторов в широком диапазоне температур от -60 до +60° С, при относительной влажности до 98% при 35°С, при действии морского тумана, инея, росы, пыли, паров горючесмазочных материалов.

Конструктивными характеристиками амортизаторов являются масса габариты, удобство в монтаже и креплении, взаимозаменяемость, сроки изготовления, время непрерывной работы (не менее 2000 часов).

Конструкция амортизатора содержит следующие составные части:

упругий элемент обеспечивающий выполнение условия $k \geq \sqrt{2}$;

детали и узлы обеспечивающие демпфирование;

детали внешнего оформления, служащие для крепления амортизатора.

Упругий элемент выполняется обычно из эластичного материала например, резины, либо из пружинной стали или бериллиевой бронзы, упругого материала и резины может быть различной. Металлические элементы выполняются в виде пружины (цилиндрической, конической, экспоненциальной), лепестков, троса, металлической структуры типа плетем (путанки). Упругие элементы из резины работают на все виды деформаций, металлические - на изгиб (лепестковые амортизаторы), растяжение - сжатие (пружинные амортизаторы), изгиб и кручение (тросовые амортизаторы).

Рассеяние колебательной энергии (демпфирование) в амортизаторах происходит за счет «внутреннего трения» в материале при деформации упруг элемента или специальных устройств, обеспечивающих воздушное (вязкое) или фрикционное (сухое) трение.

В зависимости от типа упругого элемента и способа демпфирования амортизаторы можно разделить на четыре группы:

резинометаллические,

пружинные с воздушным демпфированием,

пружинные с фрикционным демпфированием,

цельнометаллические со структурным демпфированием.

К первой группе относятся амортизаторы типов АП, АЧ, АР, АН, АКСС, ко второй - АД, к третьей - АФД, АПН, АПНМ, к четвертой - ДК, АРМ, АЦП.

Более подробные сведения см. в литературе.

Амортизаторы АН («ножка») работают на изгиб и сжатие. Основным недостатком является их низкая вибропрочность.

Амортизатор АД имеет в качестве упругого элемента пружину экспоненциального профиля, обеспечивающую равно частотность. Для демпфирования колебаний используется резиновый баллончик, скрепленный с фланцем, имеющим калиброванное отверстие. При деформации пружины воздух проходит через это отверстие, создавая сопротивление, примерно пропорциональное скорости движения.

Амортизаторы АПН (пространственного нагружения) предназначены для работы при нагрузках, действующих как вдоль оси амортизатора, так и в поперечном направлении или под углом. Упругий элемент амортизатора состоит из двух конических пружин одинаковой жесткости. Под нижней пружиной установлена

сетчатая подушка - ограничитель ударных нагрузок. Демпфирование колебаний осуществляется с помощью фрикционного демпфера.

Амортизаторы АЦП (цельнометаллические сетчатые) в качестве упругого элемента имеют подушку, отформованную штамповкой из тонкой стальной спирали. Упругий элемент из сетки благодаря трению между проволочками при деформации обладает высокими демпфирующими свойствами, близкими к свойствам резины. Поэтому материал получил условное наименование «металлическая резина» МР. Амортизаторы из МР имеют достаточно высокую ударную прочность. Основным их недостатком является низкая стабильность характеристик вследствие усадки сетчатого элемента под нагрузкой. В связи с этим более рациональными считаются пружинно - сетчатые амортизаторы, в которых основным несущим элементом является пружина, а сетчатая подушка - демпфирующим элементом.

6.2. Выбор схемы размещения амортизаторов

Конструирование системы амортизации РЭА обычно начинается с выбора амортизаторов и схемы их размещения.

Выбор типа амортизаторов производится исходя из допустимой нагрузки и условий эксплуатации.

Выбор схемы размещения амортизаторов (количество амортизаторов, вариант установки РЭА на амортизаторы, крепление к объекту) производится исходя из конструктивных соображений. Учитывается обеспечение требуемой жесткости конструкции, достижение допустимой нагрузки на каждый узел крепления, удобство подхода к РЭА в процессе эксплуатации и т.д.

Наиболее распространенные схемы размещения амортизаторов приведены на рисунках 14, 15, 16.

При расположении амортизаторов по схеме рисунка 14 центр жесткости ЦЖ системы амортизаторов (точка приложения равнодействующей всех опорных реакций) и центр масс ЦМ блока лежат на одной вертикали. Все амортизаторы имеют одинаковую жесткость $C_1=C_2=C_3=C_4$. Смещение блока РЭА вдоль оси z будет происходить без перекосов. Такое расположение амортизаторов часто используется для сравнительно небольших по габаритам блоков и удобно при общей компоновке нескольких блоков на объекте.

Схема, показанная на рисунке 15 соответствует несимметричному расположению амортизаторов относительно центра масс блока. Жесткость амортизаторов должна быть разной. Отношение жесткостей C_1 и C_2 левой и правой пар амортизаторов должно быть равно отношению расстояний Y_2 и Y_1 :

$$\frac{C_1}{C_2} = \frac{Y_2}{Y_1};$$

Схема, показанная на рисунке 16, позволяет получить рациональную систему, в которой центр жесткости амортизаторов совпадает с центром масс блока РЭА. Однако такое размещение не всегда удобно, т.к. при таком расположении амортизаторов нерационально используется объем, отводимый для РЭА на объекте.

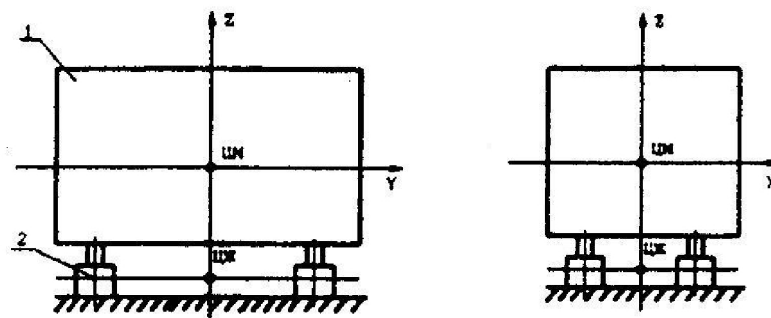


Рисунок 14 1-блок РЭА, 2 - амортизатор

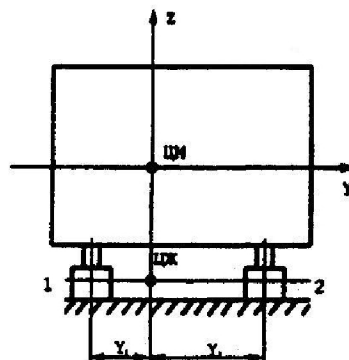


Рисунок 15

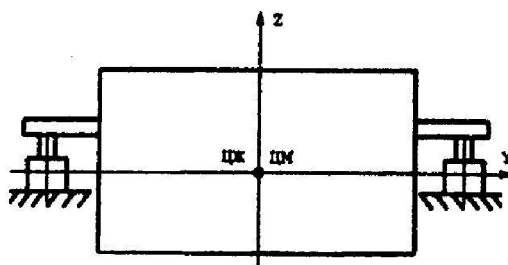


Рисунок 16

6.3. Статический расчет амортизаторов

Целью статического расчета амортизации является:

определение статических нагрузок, действующих на каждый амортизатор;

выбор типоразмера амортизатора;

определение размеров компенсирующих прокладок.

Исходными данными для статического расчета являются:

схема расположения амортизаторов

направленность действия нагрузок;

вес (масса) блока РЭА;

координаты центра масс блока.

Последовательность расчета изложена ниже для случая размещения блока РЭА на четырех амортизаторах, расположенных в горизонтальной плоскости xOy (рисунок 17)

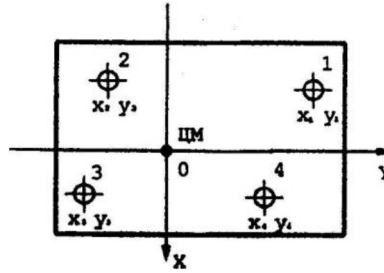


Рисунок 17

- 1) Определяются исходные данные для расчета:
 координаты каждого амортизатора x_i, y_i ;
 действующие нагрузки направлены перпендикулярно горизонтальной плоскости, т.е. вертикально;
 вес блока РЭА равен G ;
 центр масс блока расположен в начале координат.
- 2) Рассчитываются статические нагрузки P_i , действующие на каждый амортизатор (реакции амортизаторов). Они находятся из условий статики $\sum P_i = G$, $\sum P_i x_i = 0$, $\sum P_i y_i = 0$, $\sum P_i x_i y_i = 0$ по формулам:

$$P_i = \frac{D_i}{D} G, i = 1..4,$$

$$\begin{aligned} \text{где } D_1 &= y_2 y_4 x_3 (x_2 - x_4) + y_2 y_3 x_4 (x_3 - x_2) + y_3 y_4 x_2 (x_4 - x_3); \\ D_2 &= y_1 y_4 x_3 (x_4 - x_1) + y_1 y_3 x_4 (x_1 - x_3) + y_3 y_4 x_1 (x_3 - x_4); \\ D_3 &= y_1 y_4 x_2 (x_1 - x_4) + y_1 y_2 x_4 (x_2 - x_1) + y_2 y_4 x_1 (x_4 - x_2); \\ D_4 &= y_1 y_3 x_2 (x_3 - x_1) + y_1 y_2 x_3 (x_1 - x_2) + y_2 y_3 x_1 (x_2 - x_3); \\ D &= D_1 + D_2 + D_3 + D_4. \end{aligned}$$

Схемы размещения амортизаторов и расчетные формулы при количестве амортизаторов 6, 7, 8 приведены в [3].

- 3) Выбираются типоразмеры амортизаторов из приложения А по значению номинальной нагрузки. Она должна быть больше рассчитанной статической нагрузки P_i . Кроме того, амортизатор выбирается по диапазону частот f действующих нагрузок.

- 4) Рассчитывается статический прогиб δ_i , каждого амортизатора по формуле:

$$\delta_i = P_i / C_i,$$

где C_i - жесткость амортизатора выбранного типоразмера, указанная в приложении А.

- 5) Определяются размеры компенсирующих прокладок в случае, если расчет показал, что прогибы δ_i амортизаторов неодинаковы. В этом случае в состоянии статического равновесия блок будет иметь перекося. Для выравнивания блока на амортизаторах применяются компенсирующие прокладки, толщина которых $\Delta_{\text{пр}i}$ равна разности статических прогибов амортизаторов:

$$\Delta_{\text{пр}i} = \delta_{\text{imax}} - \delta_i.$$

6.4. Динамический, расчет амортизаторов

Целью динамического расчета амортизаторов является:

- определение собственной резонансной частоты системы амортизации;
- определение смещения и ускорения амортизаторов.

Исходными данными для динамического расчета являются:

- жесткость амортизаторов;
- коэффициент демпфирования амортизаторов;
- масса блока РЭА;
- диапазон частот действующих нагрузок;

ускорение (перегрузка) или амплитуда колебаний действующих нагрузок.

Ниже приведена последовательность динамического расчета для системы амортизации блока.

1) Определяются исходные данные для расчета:

жесткость амортизаторов $C_1...C_4$ (см. статический расчет);

коэффициент демпфирования амортизаторов $b=0,1...0,25$,

диапазон частот действующих нагрузок $f_{min}...f_{max}$;

ускорение n (перегрузка) колебаний действующих нагрузок. Обычно при задании условий эксплуатации указывают ускорение n (перегрузку), действующее на объекте установки РЭА (см. таблицу 1). Для определения амплитуды A смещения колебаний пользуются формулой:

$$n = \frac{f^2 * A}{250},$$

где размерность n в долях g (ускорения свободного падения), f - в Гц, A - в мм.

2) Определяется собственная частота колебаний блока на амортизаторах в направлении действующих нагрузок (вдоль вертикальной оси) по формуле:

$$f_0 = \sqrt{\frac{C}{40 * m}},$$

где m - масса блока, C - суммарная жесткость амортизаторов.

Значение C вычисляется по формуле

$$C = \sum C_i.$$

Вычисленное значение f_0 сравнивается с заданными значениями диапазона частот действующих нагрузок $f_{min}...f_{max}$. Если выполняется условие $\frac{f_{min}}{f_0} \geq \sqrt{2}$, то амортизаторы выбраны правильно.

3) Рассчитывается коэффициент передачи

$$h = \frac{\sqrt{1 + 4 * b^2 * k^2}}{\sqrt{(1 - k)^2 + 4 * b^2 * k^2}}.$$

Значения h вычисляют в зависимости от коэффициента расстройки k в 5... 10 точках заданного диапазона $f_{min}...f_{max}$ и строят график $h(k)$.

4) Рассчитывается смещение амортизаторов A_1 в тех же 5... 10 точках, что в предыдущем пункте, по формуле:

$$A_1 = h * A.$$

Величина этого смещения не должна превышать конструктивный ход амортизатора, иначе в конце движения произойдет удар штока амортизатора об ограничитель хода и виброизоляция не будет обеспечена.

5) Рассчитывается ускорение (перегрузка) амортизатора:

$$n_1 = h * n.$$

Это ускорение будет действовать на электрорадиоэлементы внутри блока РЭА. Следовательно, если ускорение будет меньше ускорения, допустимого по техническим условиям на электрорадиоэлементы, то виброизоляция обеспечивается

7. ИССЛЕДОВАНИЕ ТИПОВ ИНТЕГРАЛЬНЫЕ МИКРОСХЕМ И ИХ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

7.1. Краткие теоретические сведения

Различные виды интегральных микросхем являются основной элементной базой современной радиоэлектронной аппаратуры. По конструктивно-технологическим признакам ИМС подразделяются на тонкопленочные, толстопленочные и полупроводниковые. В зависимости от назначения производятся

ИМС широкого применения, представляющие собой различные логические элементы, переключатели, линейные схемы и т. д., обладающие определенной универсальностью, и ИМС специального назначения, представляющие собой отдельные устройства РЭА и предназначенные для конкретных видов РЭА.

Рассмотрим основные понятия микросхем, определяемые Государственными стандартами, и конструктивно-технологические ограничения при производстве ИМС.

Интегральная микросхема (ИМС) - микроэлектронное изделие, выполняющее определенную функцию преобразования и обработки сигнала и имеющее высокую плотность упаковки электрически соединенных элементов и компонентов, которое с точки зрения требований к испытаниям, приемке, поставке и эксплуатации рассматривается как единое целое.

Пленочная ИМС - интегральная микросхема, все элементы и межэлементные соединения которой выполнены в виде пленок. Пленочные ИМС подразделяются на тонкопленочные и толстопленочные.

Гибридная ИМС - интегральная микросхема, содержащая кроме элементов компоненты и кристаллы.

Полупроводниковая ИМС - интегральная микросхема, все элементы и межэлементные соединения которой выполнены в объеме и на поверхности полупроводника.

Элемент ИМС - часть интегральной микросхемы, реализующая функцию какого-либо электрорадиоэлемента, которая выполнена нераздельно от кристалла или подложки и не может быть выделена как самостоятельное изделие с точки зрения требований к испытаниям, приемке, поставке и эксплуатации.

Подложка ИМС (подложка) - заготовка, предназначенная для нанесения на нее элементов гибридных и пленочных интегральных микросхем, межэлементных и межкомпонентных соединений, а также контактных площадок.

Плата ИМС (плата) - часть подложки пленочной ИМС, на поверхности которой нанесены пленочные элементы микросхемы, межэлементные и межкомпонентные соединения и контактные площадки.

Полупроводниковая пластина (пластина) - заготовка из полупроводникового материала, используемая для изготовления полупроводниковых ИМС.

Кристалл ИМС (кристалл) - часть полупроводниковой пластины, в объеме и на поверхности которой сформированы элементы полупроводниковой микросхемы, межэлементные соединения и контактные площадки.

Плотность упаковки ИМС - отношение числа элементов и компонентов интегральной микросхемы N к площади S_M , занимаемой ИМС

$$\omega = \frac{N}{S_M}$$

Степень интеграции ИМС $K_{\text{и}}$ - показатель степени сложности микросхемы, характеризующийся числом содержащихся в ней элементов и компонентов. Степень интеграции определяется формулой

$$K_{\text{и}} = \lg N,$$

где N - число элементов и компонентов, входящих в ИМС. Коэффициент $K_{\text{и}}$, округляется до ближайшего большего целого числа.

Интегральная плотность элементов на подложке ω' - характеризуется числом элементов, приходящихся на единицу площади подложки

$$\omega' = \frac{N}{S_{\text{п}}} = \frac{10^{K_{\text{и}}}}{S_{\text{п}}}$$

где S_{Π} - площадь подложки микросхемы.

Серия ИМС - совокупность типов интегральных микросхем, которые могут выполнять различные функции, имеют единое конструктивно-технологическое исполнение и предназначены для совместного применения.

7.2. Классификация и система условных обозначений ИМС

По конструктивно-технологическому исполнению ИМС подразделяются на три группы, которым присвоены следующие обозначения:

- 1; 5; 7 - полупроводниковые;
- 2; 4; 6; 8 - гибридные;
- 3 - прочие (пленочные, вакуумные, керамические и т. д.).

По функциональному назначению ИМС подразделяются на подгруппы и виды. Например: подгруппа - логические элементы, вид - элемент “И-ИЛИ”; подгруппа - триггеры, вид - типа j-K. Наиболее характерный признак подгруппы и вида включается в условное обозначение ИМС.

Обозначение ИМС состоит из следующих элементов: первый элемент - цифра, обозначающая группу ИМС; второй элемент - две цифры, обозначающие порядковый номер разработки серии ИМС (от 0 до 99); третий элемент - две буквы, обозначающие подгруппу и вид ИМС; четвертый элемент - порядковый номер разработки ИМС по функциональному признаку в данной серии. Два первых элемента обозначают серию микросхемы.

Например: полупроводниковая логическая ИМС “И-НЕ/ИЛИ-НЕ” с порядковым номером разработки серии - 21, порядковым номером разработки данной схемы в серии по функциональному признаку - 1 имеет следующее условное обозначение: 121ЛБ1, где 1 - группа (по конструктивно-технологическому исполнению); 21 - порядковый номер разработки данной серии; 121- серия; Л - подгруппа; В-вид (по функциональному назначению); 1 - порядковый номер разработки микросхемы по функциональному признаку в данной серии.

Допускается после обозначения порядкового номера разработки серии ставить буквенные обозначения от А до Я данного поддиапазона. Конечная буква может быть заменена цветной точкой. Значения электрических параметров поддиапазона и цвет маркировочной точки указываются в технической документации на микросхему конкретного типа.

Для микросхем, используемых в устройствах широкого применения, в начале обозначения указывается буква “К”. Например: К121ЛБ1 - полупроводниковая ИМС серии 121. используемая в устройствах широкого применения.

Классификация питающих напряжений ИМС

Номинальные значения напряжений питания ИМС должны соответствовать следующему ряду: 1,2; 2,4; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0; 9,0; 12,0; 15,0; 24,0; 30,0; 48,0; 100; 150; 200 В.

ИМС должны сохранять электрические параметры и пределах заданных норм при отклонениях питающих напряжений от номинальных значений на величину, выбираемую из следующего ряда: $\pm 10\%$; $\pm 20\%$

Подложки микросхем

Подложки для пленочных микросхем должны удовлетворять следующим требованиям:

1. Высокая механическая прочность при малых толщинах.
2. Высокое объемное и поверхностное удельное электрическое сопротивление и малый тангенс угла диэлектрических потерь.
3. Температурные коэффициенты линейного расширения подложки и пленки

должны быть предельно согласованными.

4. Химическая инертность к осаждаемым веществам и травителям.
5. Физическая и химическая стойкости при нагреве до высоких температур порядка 800⁰С.
6. Незначительное газовыделение в вакууме.
7. Хорошая адгезия с осаждаемой пленкой.
8. Высокий коэффициент теплопроводности.
9. Хорошая полируемость.
10. Низкая стоимость.

В полной мере перечисленным требованиям не удовлетворяет ни одна из применяемых подложек. Некоторые требования находятся в противоречии друг к другу, например, низкая стоимость и чистота обработки поверхности подложки. Поэтому выбор подложки основан на компромиссном решении.

Рекомендуемые размеры подложек для пленочных микросхем приведены в табл. 5.

Таблица 5

Рекомендуемые размеры подложек для пленочных ИМС

ширина в мм	30	24	20	16	16	16	12	12	10	10
длина в мм	48	30	24	60	30	20	48	30	16	12

При изготовлении различных ИМС наиболее широко в качестве материалов для подложек и полупроводниковых пластин используют:

1. в тонкопленочных ГИМС - ситалл, поликор, сапфир, керамику;
2. в СВЧ ИМС - поликор;
3. в толстопленочных ГИМС - керамику;
4. в полупроводниковых ИМС - кремний, кремний на сапфире и ситалле.

Ситалл - продукт кристаллизации стекла с мелкими (0,01 ÷ 1 мм) кристаллитами. Получаемые при термообработке в результате катализированной кристаллизации стекла ситаллы занимают промежуточное положение между стеклами и керамикой.

В различные марки ситаллов входят окислы кремния (30÷90%), остальное - окислы титана, магния, бора и др.

Поликор изготавливают из корундовой керамики, содержащей около 99,8% окиси алюминия. В поликоре удачно сочетается относительно высокая диэлектрическая проницаемость с малыми диэлектрическими потерями на СВЧ. Кроме того, поликор обладает хорошей полируемостью, что также снижает потери на СВЧ.

Керамические подложки сравнительно дешевы, имеют низкие потери, относительно высокую диэлектрическую проницаемость и малые температурные изменения диэлектрических параметров. К недостаткам керамических подложек следует отнести трудности, связанные с их полировкой (поверхность керамики после спекания всегда шероховатая), а также относительно низкую механическую прочность. Наибольшее распространение получили две группы керамики, отличающиеся содержанием окиси алюминия. В первую группу, для которой содержание окиси алюминия составляет 98÷100%, входят такие керамики, как А-995, ГМ, сапфирит и др. Керамики первой группы применяются преимущественно для подложек СВЧ микросхем.

Во вторую группу, для которой содержание окиси алюминия составляет 93÷96%, входят такие керамики, как 22ХС, 22Х и др. Керамики второй группы

применяются преимущественно для подложек толстопленочных ИМС. Шероховатая поверхность керамики способствует повышению адгезии при вжигании паст толстопленочных микросхем.

Сапфир представляет собой монокристаллическую окись алюминия. Он обладает весьма малыми диэлектрическими потерями на СВЧ, высокой теплопроводностью, механической прочностью, устойчивостью к действию высокой температуры, влаги, излучений. На сапфире возможно гетероэпитаксиальное осаждение кремния, арсенида галлия и др. веществ, используемых для создания активных элементов и формирования на подложке микросхем типа “кремний на сапфире”. Широкое применение сапфировых подложек ограничивается трудностями его изготовления и высокой стоимостью.

Пластины из кремния широко применяются для создания на их основе полупроводниковых микросхем. Активные и пассивные элементы, сформированные в кремниевой пластине, изолируются друг от друга р-п переходами или диэлектриком.

Корпуса микросхем

По форме проекции тела корпуса микросхемы на плоскость основания и расположению выводов корпуса делятся на типы, указанные в табл. 6.

По габаритным и присоединительным размерам типы корпусов подразделяются на типоразмеры, каждому из которых присваивают шифр, состоящий из индекса К (корпус), обозначения типа корпуса (цифра) и двузначного числа (01÷99), обозначающего номер типоразмера. Например: К301, К102 и т. п.

Таблица 6

Типы корпусов ИМС

Тип	Форма проекции тела корпуса на плоскость на плоскость основания	Расположение проекции выводов на плоскость основания	Расположение выводов относительно плоскости основания
1	Прямоугольная	В пределах проекции тела корпуса	Перпендикулярное
2	Прямоугольная	За пределами проекции тела корпуса	Перпендикулярное
3	Круглая	В пределах проекции тела корпуса по окружности	Перпендикулярное
4	Прямоугольная	За пределами проекции тела корпуса	Параллельное

Примечание. Корпуса, имеющие гибкие внешние выводы, которые при необходимости могут отгибаться за пределы проекции, относятся к корпусам двух типов одновременно.

Условные обозначения корпусов состоят из:

- шифра типоразмера корпуса (без буквы К);
- цифрового индекса, определяющего количество выводов;
- порядкового регистрационного номера разработки.

Пример записи условного обозначения корпуса в конструкторской документации: корпус 201.14-2, где 201 - шифр типоразмера; 14 - количество выводов; 2 - порядковый регистрационный номер.

Нумерация внешних выводов корпуса начинается от ключа и идет против часовой стрелки, если смотреть на корпус со стороны крышки.

По конструктивно-технологическому исполнению (конструкции) корпуса подразделяются на:

- металлотеклянные;
- стеклянные;

- металлокерамические;
- керамические;
- пластмассовые;
- металлополимерные (см. образцы корпусов).

Металлостеклянные корпуса - корпуса, изготовленные из металлического основания с выводами, изолированными стеклом. Герметизация выводов осуществляется стеклянными бусами или стеклотаблетками. Бусой изолируется каждый вывод в отдельности, таблеткой - группа выводов.

Стеклянные - корпуса, основания которых изготовлены из стекла с впаянными в стекло выводами. Такой корпус может иметь как стеклянные, так и металлические крышки. Для монтажа микросхем используются корпуса без металлической площадки и с металлической площадкой.

Металлокерамические - корпуса, в которых керамическая подложка является основанием, герметизация выводов производится припоем. Металлическая крышка корпуса припаивается к ободку, который в свою очередь припаян по периметру керамического основания.

Керамические - корпуса, изготовленные из керамики с герметизацией выводов стекломалью или стеклоприпоем.

Керамические и металлокерамические корпуса применяют преимущественно для толстопленочных микросхем.

Пластмассовые - корпуса, изготовленные из пластмассы с выводами, впрессованными в процессе литья или герметизации. Пластмассовые корпуса широко применяются для полупроводниковых микросхем при массовом производстве.

Металлополимерные - корпуса, в которых для защиты ИМС используется металлическая крышка, выводы герметизируются заливкой компаундом.

Библиографический список

1. Основы проектирования электронных средств: учеб. пособие/ А.В.Зеленский, В.А.Зеленский, Г.Ф.Краснощекова.-Самара: Изд-во СНЦ РАН, 2007.-243с.
2. Зеленский А.В., Краснощекова Г.Ф. Электронные средства. Конструкции и расчетные модели: учеб. пособие/А.В.Зеленский, Г.Ф.Краснощекова.-Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2010.-152с.
3. Покровский Ф.Н. Материалы и компоненты радиоэлектронных средств: учеб. пособие для вузов/ Ф.Н.Покровский.-М.: Горячая линия-Телеком, 2005.-350с.
4. В.В.Жаднов, А.В. Сарафанов Управление качеством при проектировании теплонагруженных радиоэлектронных средств.- М.: СОЛОН-Пресс, 2004.-464с.: ил. (Серия «Библиотека инженера»).

8. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ВИБРАЦИИ ДЛЯ НАВЕСНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЭС

Передаточный коэффициент. Практика показывает, что наиболее опасной механической нагрузкой, приводящей к разрушению элементов крепления микросхем и транзисторов, является вибрация.

Характерное свойство вибрационного повреждения - постепенный незаметный характер. Кроме этого, упругие свойства конструктивных элементов приводят к явлению резонанса - резкому увеличению амплитуды вибрации, и, соответственно, к резкому увеличению механических напряжений, которые могут быть выше статических в 20-100 раз. Во многих случаях действие вибрации хорошо описывается схемой рис.18. Имеется источник вибрации, который действует на упругий элемент

силой F , имеются силы упругости $F_n = \frac{x}{C_n}$, силы сопротивления или демпфирующие силы $F_r = C_r \frac{dx}{dt}$, которые зависят от материала упругого элемента, величины и равномерности возникающих механических напряжений и свойств окружающей среды. Дифференциальное уравнение колебаний имеет вид:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + C_r \frac{dx}{dt} + \frac{x}{C_n} = F,$$

где x - перемещение, координата массового элемента,
 t - время,
 m - масса,
 C_r - коэффициент демпфирования,
 C_n - коэффициент упругости.

Иногда используется обратная величина $K = \frac{1}{C_n}$, которая называется коэффициентом жесткости.

Для одночастотной вибрации можно полагать $F = F_0 e^{i\omega t}$, $x = A_m e^{i\omega t}$, $x_0 = A_0 e^{i\omega t}$, $\omega = 2\pi f$

где x_0 - перемещение источника вибрации,
 A_0 - амплитуда колебаний источника вибрации,
 A_m - амплитуда колебаний массового элемента,
 F_0 - амплитудное значение силы источника вибрации,
 f - частота.

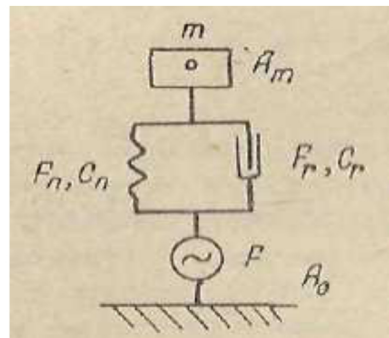


Рис. 18

Дифференцируя x и подставляя в дифференциальное уравнение, имеем:

$$(-m\omega^2 + iC_r\omega + \frac{1}{C_n})A_m = F_0$$

или в более удобной форме, полагая $\omega_0^2 = \frac{1}{C_n m}$, $\frac{C_r}{m} = \frac{\omega_0}{Q}$, где $f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi}$ - резонансная частота, Q - добротность, получим:

$$(-\frac{\omega^2}{\omega_0^2} + 1 + i \frac{\omega}{\omega_0} \frac{1}{Q})A_m = \frac{F_0}{m\omega_0^2} = \frac{F_0}{C_n} = A_0$$

Модуль комплексной функции, представляющей собой отношение амплитуды колебаний массового элемента к амплитуде источника вибрации, называется передаточным коэффициентом

$$\alpha_A = \left| \frac{A_m}{A_0} \right| = \left[\left(\left(1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^2 \right)^2 + \left(\frac{\omega}{\omega_0} \frac{1}{Q} \right)^2 \right) \right]^{\frac{1}{2}}$$

и играет важную роль во многих приложениях вибрационной техники.

Явление разрушения под действием вибрационных нагрузок достаточно сложно. Разрушение зарождается в микроструктуре материала на уровне дислокаций и вакансий, развивается на границе зерен и неоднородностей в трещины и зоны с концентрацией напряжений.

На каждом пике или в области пика нагрузки возникают микросдвиги, которые в некоторых пределах не зависят от формы пика и его длительности. Можно предполагать, что микросдвиги накапливаются, суммируются, это вызывает рост деформации с увеличением числа пиков.

При симметричной нагрузке считают не число пиков, а число периодов или циклов.

Напряжение, при котором материал выдерживает 10^7 циклов без разрушения, называется пределом усталостной прочности или пределом усталости и обозначается σ_{-1} .

Эксперимент показывает, что между амплитудным значением напряжения σ_m и числом циклов нагружения N_m имеется степенная зависимость, которая часто называется линией усталостных напряжений или линией Велера.

Число циклов до разрушения можно определить формулой

$$N_m = N_{-1} \left(\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_m} \right)^8, \quad \sigma_{-1} < \sigma_m < \sigma_T \quad \text{при} \quad 10^4 < N_m < 10^7,$$

где σ_m - амплитудное значение напряжения,

σ_T - предел текучести материала,

σ_{-1} - предел усталостной прочности,

N_{-1} - разрушающее число циклов при напряжении σ_{-1} ,

N_m - разрушающее число циклов при напряжении σ_m .

При гармонической вибрации на резонансной частоте динамические

напряжения максимальны, что определяет минимальное время до разрушения t_0 , которое называется "временем жизни" или *минимальным ресурсом работы*:

$$t_0 = \frac{N_{-1}}{f_0} \left(\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_m} \right)^8$$

Соотношение для определения ресурса работы является основным при выборе параметров режимов испытания - задании амплитуды и частоты вибрации стола и времени испытания.

Ускорение стола при испытании определяется формулой

$$a_n = A_n \omega_n^2, \quad \omega_n = 2\pi f_n,$$

где A_n - амплитуда перемещения стола,
 f_n - частота вибрации стола.

Напряжения элемента крепления при испытании $\sigma_n = \sigma_0 \alpha_A \frac{a_n}{g}$,

где σ_0 - статическое напряжение,
 σ_n - динамическое напряжение,
 g - ускорение свободного падения.

Время испытания до разрушения

$$t_n = \frac{N_{-1}}{f_n} \left(\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_n} \right)^8.$$

9. Коэффициенты упругости и напряжения распространенных схем крепления микросхем и транзисторов.

Будем рассматривать два вида виброопасного крепления с соответствующими направлениями вибрации: "консольное" (рис.19а) и "мостовое" (рис.19б). Коэффициенты упругости C_n при достаточно большом соотношении длины ножек к диаметру определяются величиной прогиба под силой веса $F_g = mg$, $C_n = \frac{y}{F_g}$.

Для "консольной" и "мостовой" схем крепления рассчитываются по формулам:

$$Y_K = \frac{F_g l^3}{3EJ}, \quad Y_m = \frac{F_g l^3}{48EJ},$$

где l - длина,
 Y_K - прогиб "консольного" крепления,
 Y_m - прогиб "мостового" крепления,
 E - модуль упругости материала,
 J - момент инерции ножек, для одной ножки круглого сечения равен $J = 0,05d^4$, d - диаметр ножки.

Статические напряжения изгиба σ_0 для схем крепления определяются формулами:

$$\sigma_{0K} = \frac{F_g l}{W}, \quad \sigma_{0M} = \frac{F_g l}{4W},$$

где W - момент сопротивления, для одной ножки круглого сечения равен $W = 0,1d^3$.

Формулы дают приближенное значение напряжений, необходимое для экспериментальной работы на вибростенде.

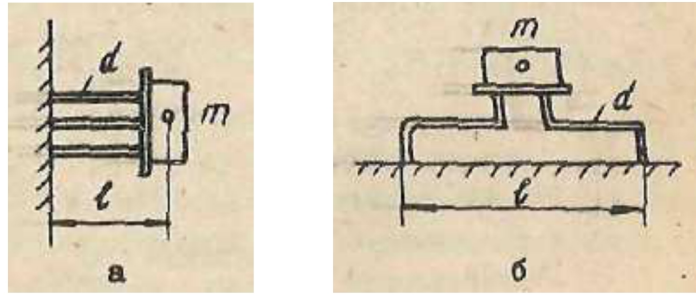


Рис. 19

10. ВЕРОЯТНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТОХАСТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ ЭС

Колебания, которые передаются на элементы крепления радиоаппаратуры, вызывают сложные вибрационные напряжения.

Энергия передается от источника колебаний многим элементам несущей конструкции и вызывает новые колебания. Поэтому вибрация конструкций всегда имеет сложный характер, представляет собой колебания переменной частоты и переменной амплитуды, кроме того, источник вибрации, как правило, имеет случайный характер. В большинстве случаев достаточно рассматривать стохастическую вибрацию при упрощающем предположении, что возбуждение колебаний в определенной полосе, происходит достаточно быстро и число колебаний в резонансной полосе достаточно велико. Такой случай называется квазистационарной стохастической вибрацией. Колебания такого процесса представлены на виброграмме. Даже в простом случае действующая величина ускорений носит достаточно индивидуальный характер, присущий данному типу конструкции.

Для расчета работоспособности элементов РЭС, испытывающих вибрации конструкции, требуется снимать экспериментально характеристики вибрации. Есть еще некоторые особенности вибраций реальной конструкции. Обычно колебания имеют нелинейный характер с переменной величиной добротности и с достаточно большим числом резонансных частот и полос, при возможности одновременного возбуждения. Есть и аналоги. Как и при волновых процессах сохраняется понятие коэффициента связи, коэффициента передачи, коэффициента затухания, коэффициента влияния.

Если известно гармоническое перемещение элемента с массой m , амплитудой A_m и частотой f , то скорость и ускорение, энергия, мощность подсчитываются соответственно по формулам:

$$V = A_m \omega; \quad e = \frac{m \omega^2 A_m^2}{2}; \quad \omega = 2\pi f.$$

$$a = A_m \omega^2; \quad p = m \omega^3 A_m^2.$$

Выделяют процессы, в которых сохраняются приблизительно постоянными эти величины, либо в полосе частот Δf , либо в полосе амплитуд ΔA_m .

Вероятность амплитуды и скорость разрушения.

Наиболее существенным фактором, вызывающим виброразрушение, являются резонансные или "пиковые" колебания, причем разрушение ряда материалов определяется только их числом. Поэтому расчет количества колебаний является одной из основных задач расчета на работоспособность, долговечность и вибропрочность.

Пусть имеются периодические колебания в некоторой полосе частот, тогда можно найти в среднем за период t общее число колебаний N ,

$$N = f_{cp} t,$$

а в резонансной полосе число колебаний за время Δt

$$n = f_0 \Delta t,$$

тогда довольно точно определим отношение числа резонансных колебаний в полосе к общему числу колебаний:

$$\frac{n}{N} = \frac{f_0 \Delta t}{f_{cp} t} = \frac{f_0}{f_{cp}} P(f_0) = C(f_0) P(f_0).$$

Величина $P(f_0)$ называется вероятностью резонансной амплитуды на частоте f_0 , а $C(f_0)$ - коэффициентом резонансной полосы.

Если к детали приложено $n(\sigma)$ циклов нагружения при напряжении σ , а выдерживает деталь при этом же нагружении до разрушения $N(\sigma)$ циклов, то для сравнения долговечности различных нагрузок служит величина разрушения $S(\sigma)$, которая вводится аналогично вероятности

$$S(\sigma) = \frac{n(\sigma)}{N(\sigma)}$$

и называется степенью повреждения или величиной разрушения.

Если цикл сложный, с несколькими напряжениями σ_K , можно аналогично определить частичные разрушения или частичные вероятности.

Величину динамической механической нагрузки, которая связана с амплитудой вибрации, можно найти по виброграмме.

Частичная величина разрушения определяется как

$$S_K = \frac{n(\sigma_K)}{N(\sigma_K)},$$

где $n(\sigma_K)$ - количество действующих циклов с напряжением σ_K ,

$N(\sigma_K)$ - разрушающее число циклов при напряжении σ_K , при нескольких значениях амплитуд напряжений частные величины разрушения складываются: $S = \sum S_K$.

Скорости разрушения вводятся равенством:

$$\text{частные } V_K = \frac{\partial S_K}{\partial t}, \quad \text{полная } V = \frac{\partial S}{\partial t}.$$

Долговечность при стохастических вибрациях.

Пусть имеются амплитуды вибрации, вызывающие напряжения: $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_K$, с вероятностями для данного источника вибрации $P_1, P_2, \dots, P_K$. Разрушающее число циклов N_K подсчитывается по формуле

$$N_K = N_{-1} \left(\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_K} \right)^8,$$

и за время t можно ожидать число действующих циклов

$$n_K = f_K P_K t,$$

f_K - среднее значение частоты в резонансной полосе, дающей напряжение σ_K .

Величина частного повреждения за данное время и величина частной скорости повреждения определяется следующим образом:

$$S_K = \frac{f_K P_K}{N_{-1}} \left(\frac{\sigma_K}{\sigma_{-1}} \right)^8 t,$$

$$V_K = \frac{f_K P_K}{N_{-1}} \left(\frac{\sigma_K}{\sigma_{-1}} \right)^8.$$

Величина повреждения в каждый момент времени определяется как

$$S = (V_1 + V_2 + \dots + V_K) t = V t.$$

При практическом использовании и анализе вводят характерную амплитуду напряжения σ_n , частоту f_n , коэффициент частоты $C(f_n)$, вероятность амплитуды P_n .

Тогда можно получить $S = V_n C_n t$,

$$V_n = \frac{f_n P_n}{N_{-1}} \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_{-1}} \right)^8,$$

$$C_n = \frac{(V_1 + V_2 + \dots + V_K)}{V_n},$$

где C_n - коэффициент скорости повреждения,

V_n - нормальная скорость повреждения.

Долговечность, или время для разрушения, или работоспособность определяется величиной повреждения равной $S=1$, тогда $t = \frac{1}{C_n V_n}$.

11. ИССЛЕДОВАНИЕ УДАРНЫХ НАГРУЗОК

Широкое применение радиоаппаратуры в различных условиях эксплуатации требует широкого диапазона прочности к разнообразному действию механических нагрузок, как случайных вибрационных, так и случайных ударных. Свойства стохастической вибрации и характер ударного действия качественно различны для возбуждения колебаний элементов. Возникающие напряжения и разрушающие причины также различны. Для одних приборов РЭС более опасными оказываются нагрузки вибрационные, для других - ударные.

При ударе ускорения, действующие на элементы РЭС, как правило, иного выше, чем при вибрации, однако время действия невелико. При стохастической эксплуатационной вибрации ускорения обычно меньше, чем при ударах, но время действия значительно больше. Для ударных нагрузок существует полоса, называемая полосой возбуждения. Удар характеризуется следующими величинами: величиной максимального ускорения, временем действия ударного импульса, формой импульса, которая и определяет распределения полос и частот возбуждения.

Различают несколько типовых форм ударных импульсов - параболический, синусоидальный, треугольный.

После действия ударного импульса колебания можно считать свободными:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + C_r \frac{dx}{dt} + Kx = 0 \text{ или}$$

в безразмерных параметрах $x = x_0 \xi$, $t = t_0 \tau$,

$$\frac{d^2 \xi}{d\tau^2} + \frac{C_r t_0}{m} \frac{d\xi}{d\tau} + \frac{K t_0^2}{m} \xi = 0, \quad \frac{K}{m} = \omega_0^2, \quad \frac{C_r}{m} = \frac{\omega_0}{Q}.$$

Полагая $\omega_0 t_0 = 2\pi$, можно получить ударную реакцию и уравнение движения в следующем виде:

$$\xi = \xi_0 e^{-\frac{\pi}{Q}} \sin 2\pi t.$$

Для последовательных максимумов амплитуды имеется приближенное выражение

$$\frac{\xi_n}{\xi_0} \approx \left(1 - \frac{\pi}{Q}\right)^n,$$

из которого можно найти добротность и число колебаний.

Длительность и форма импульса определяет полосу возбуждения.

Будем рассматривать случай замедления скорости, тогда дифференциальное уравнение движения

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} - C_r \frac{dx}{dt} + Kx = F_s$$

$$a - \frac{\omega_0}{Q} V + \omega_0^2 x = a_s,$$

где a - ускорение элемента,

V - скорость элемента,

x - перемещение упругого элемента,

a_s - действующая ударная нагрузка.

Для простоты расчета полосы возбуждения будем представлять действующее ускорение средней величиной a_{cp} и отклонением Δa без учета формы импульса. Через время импульса выразим также движение упругого элемента. Пусть a_m - среднее постоянное ускорение массового элемента, тогда $a_m t$ - скорость, $\frac{a_m t^2}{2}$ - перемещение.

Подставляя, получим приближенное уравнение удара:

$$\left(1 - \frac{\omega}{Q} t + \frac{\omega^2 t^2}{2}\right) a_m \approx a_{cp} \pm \Delta a,$$

из которого можно получить выражение, связывающее полосу возбуждения с параметрами удара:

$$\omega t = \frac{1}{Q} \pm \left[\frac{1}{Q^2} - 2 \left(1 - \frac{a_{cp} \pm \Delta a}{a_m} \right) \right]^{\frac{1}{2}}.$$

Для расчета главной полосы можно полагать $a_{cp} = a_m$, $\Delta a = 0$, получим, что для частоты возбуждения f_v требуется длительность импульса $t_v = \frac{2}{\pi Q f_v}$.

Для полосы возбуждения имеем простое соотношение

$$\Delta f_v = \frac{1}{\pi \sqrt{2} t_v} \left(\frac{\Delta a}{a_m} \right)^{\frac{1}{2}},$$

справедливое для элементов с большой добротностью.

12. ТЕМПЕРАТУРНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ

Параметры радиоэлементов в той или иной степени зависят от температуры. В ряде случаев тепловой режим определяет, работоспособность этих элементов.

Это касается не только абсолютных значений, но и значений теплового потока и характера распределения температуры, которые ведут к возникновению температурных деформаций и температурных напряжений, потому что применяемые материалы и многослойные конструкции микроэлектроники оказываются весьма чувствительными к температурным напряжениям и деформациям.

Уменьшение размеров кристаллов приводит к возрастанию плотностей тока и ведет к повышению интенсивности теплового режима, росту колебаний температуры в активной зоне. Кроме того, микроэлектронные приборы представляют собой сложные многокомпонентные статически неопределимые системы. Неудачная совокупность параметров - теплофизических свойств, градиентов температуры могут вызвать значительные механические напряжения.

Тепловое напряженное состояние обладает рядом специфических свойств, которые не свойственны обычным механическим нагрузкам. Различаются напряжения, которые возникают при стационарном процессе распространения тепла, и нестационарные напряжения, которые возникают в момент нагрева или охлаждения, особенно напряжения в двух- и трехслойных конструкциях интегральных микросхем типа электрод-кристалл-подложка.

Напряжения и деформации.

Рассматривая на плоскости элемент и обозначая перемещения вдоль осей U , V , для плоского напряженного состояния после приложения нагрузки осевую и угловую деформации можно записать:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial U}{\partial x}; \quad \varepsilon_y = \frac{\partial V}{\partial y}; \quad \gamma_{xy} = \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y}.$$

Деформации можно выразить через нормальные напряжения σ_x , σ_y , касательные τ_{xy} и коэффициенты упругости материала:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E}(\sigma_x - \mu\sigma_y); \quad \varepsilon_y = \frac{1}{E}(\sigma_y - \mu\sigma_x); \quad \gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G}.$$

И, наоборот, напряжения можно выразить через деформации:

$$\sigma_x = \frac{E}{1-\mu^2}(\varepsilon_x + \mu\varepsilon_y), \quad \sigma_y = \frac{E}{1-\mu^2}(\varepsilon_y + \mu\varepsilon_x);$$

$$\tau_{xy} = G\gamma_{xy}, \quad G = \frac{E}{1+2\mu},$$

где E - модуль упругости,

G - модуль сдвига,

μ - коэффициент Пуассона.

При изменении температуры стержня длиной l на величину ΔT происходит изменение длины стержня на величину $\Delta l = \alpha_T l \Delta T$, где α_T - температурный коэффициент, тогда температурную деформацию можно представить как

$$\varepsilon_T = \frac{\Delta l}{l} = \alpha_T \Delta T.$$

Когда температурные деформации тела затруднены, тогда возникают температурные напряжения:

$$\sigma = \varepsilon_T E, \quad \tau = \gamma_T G.$$

Температурные деформации иногда удобнее выражать через эквивалентную механическую нагрузку, которая вызывает подобные напряжения. Соответственно этому различают несколько типов температурной деформации: растяжение, сдвиг, изгиб.

Температурные напряжения определяются условиями закрепления - граничными, краевыми и характером теплового процесса.

Температурные напряжения типа изгиба.

Рассмотрим пластинку кристалла толщиной h , и длиной l , передающую тепловой поток q в стационарном режиме (рис.3).

Если T - установившаяся температура, а T_0 - начальная, то общую температурную деформацию можно представить в виде суммы деформаций от нагрузок растяжения и изгиба:

$$\varepsilon_{cp} = \alpha_T (T_{cp} - T_0),$$

$$\varepsilon_n = \alpha_T (T - T_{cp}),$$

где ε_{cp} - средняя деформация,

T_{cp} - средняя температура,

ε_n - деформация типа изгиба.

Если известен передаваемый тепловой поток

$$q = \lambda \frac{2(T - T_{cp})}{h},$$

где λ - коэффициент теплопроводности кристалла, то можно найти напряжения, соответствующие жесткой заделке пары краев кристалла:

$$\sigma_{cp} = \alpha_T E (T_{cp} - T_0),$$

$$\sigma_n = \alpha_T E \frac{qh}{2\lambda}.$$

Температурные напряжения типа сдвига.

Для пленочных микросхем или тонких кристаллов с относительно жестким электродом и подложкой опасными являются касательные напряжения, возникающие при работе в импульсном режиме (см. рис.20). Так как обычно теплопроводность пленки значительно меньше теплопроводности токовода, можно считать, что температура подложки остается равной T_0 , а температура токовода равна T_u .

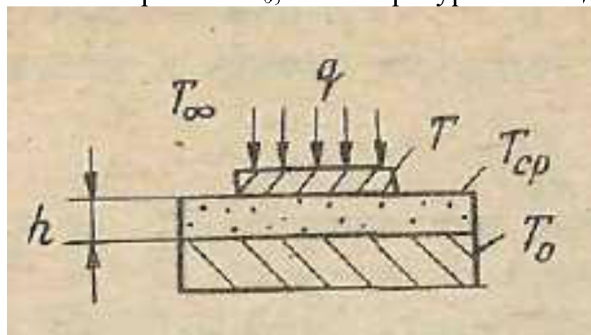


Рис.20.

Перемещение на длине l при симметричной деформации от центра равно

$$\Delta l = \frac{\alpha_T l}{2} (T_n - T_0).$$

Угловая деформация определяется как $\gamma = \frac{\Delta l}{h}$.

Тогда касательное напряжение на пленке трехслойной микросхемы

$$\tau = \alpha_T G \frac{l}{2h} (T_n - T_0).$$

Температуру кристалла можно найти следующим образом. Пусть выделяемая мощность в токовом импульсном режиме P_u , а время действия t_n . Тогда часть тепловой энергии поглощается кристаллом Q_n , часть уходит в окружающую среду Q_o :

$$Q_n = C_V V (T_n - T_\infty),$$

$$Q_o = \alpha S (T_n - T_\infty) t_n,$$

где C_V - объемная теплоемкость токовода,

V - объем токовода,

T_n - средняя температура токовода,

T_∞ - температура окружающей среды,

S - площадь токовода,

α - некоторый средний коэффициент теплопередачи.

Из условия сохранения энергии получим:

$$T_n - T_\infty = \frac{P_u t_n}{C_V V + \alpha S t_n}$$

Внутренние температурные напряжения.

В общем случае распространения тепла температурные деформации приводят к возникновению напряжений - будем называть их внутренними температурными напряжениями, - независимо от условий, закрепления. Такие напряжения встречаются на кристаллах и схемах при наличии тепловых потоков диэлектрических потерь.

Пусть в стационарном режиме удельная объемная мощность потерь P . Уравнение теплопроводности можно записать в виде

$$-\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = P.$$

Интегрируя с учетом тепловых условий, получим распределение температуры:

$$T = T_m - \frac{Px^2}{2\lambda},$$

где T_m - температура в центре пластинки. Деформация и температура связаны между собой зависимостью:

$$\varepsilon = \alpha_T (T - T_0),$$

$$\frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial x^2} = \alpha_T \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = -\frac{P}{\lambda}.$$

Тогда, интегрируя аналогично, получим

$$\varepsilon = \varepsilon_m - \frac{Px^2}{2\lambda},$$

где ε_m - деформация в центре пластины.

При свободной деформации без закрепления напряжения определяются только распределением температуры. Средняя температура определяет среднюю деформацию, что дает внутреннее температурное напряжение

$$\sigma = \alpha_T E \frac{Ph^2}{12\lambda}.$$

Литература

1. Баканов Г.Ф. Основы конструирования и технологии радиоэлектронных средств: учебное пособие для вузов/Г.Ф.Баканов, С.С.Соколов, В.Ю. Суходольский; под ред. И.Г.Мироненко.-М.:Издательский центр «Академия», 2007.-368с.

2. Ленк А., Рейнитц Ю. Механические испытания приборов и аппаратов, М.:Мир,1976.

3. Токарев М.Ф., Талицкий Е.Н., Фролов В.А. Механические воздействия и защита радиоэлектронной аппаратуры: Учебн.пособие для вузов:.-М: Радио и связь,1984.-224с.

13. ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕПЛООТВОДА

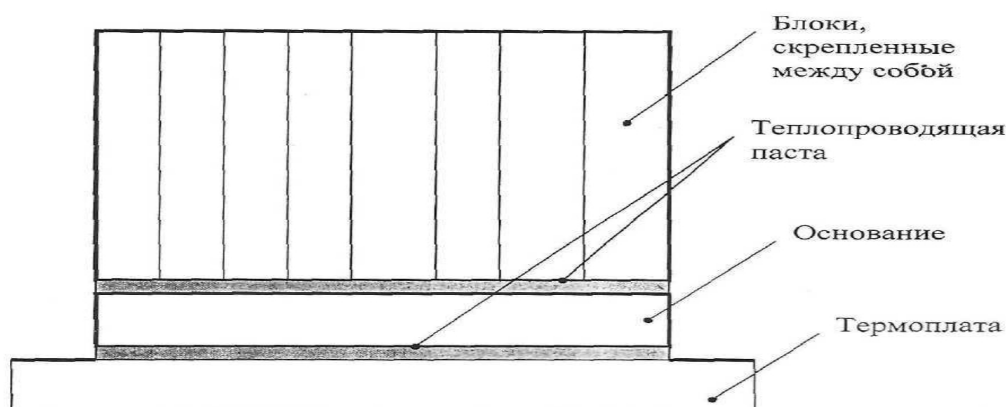


Рисунок 2 1 - Схематичное изображение конструкции устройства, установленного на термоплату

Каждый блок состоит из рамки (несущая конструкция) и двух модулей на обеих сторонах рамки. Модуль представляет собой печатную плату с установленными на ней ЭРЭ.

Также прилагаются: сборочный чертеж одного из модулей блока, сборочный чертеж устройства, чертеж рамки, лист с тепловой моделью, чертеж печатной платы одного из модулей.

13.1. ОПИСАНИЕ ТЕПЛОВОЙ МОДЕЛИ УСТРОЙСТВА

Допущения, сделанные при составлении модели, а также ее основные особенности:

- отсутствует конвекция (т.к. давление составляет 10^{-6} мм рт.ст);
- излучение не учитывается, т.к. степень черноты

- корпуса
устройства составляет 0,15, и теплоотдача излучением
будет
иметь, в сравнении с теплопроводностью, значительно
меньшее
значение. Также процесс теплоотдачи путем излучения
имеет
сложный характер, т.е. сложно сказать, будет ли
устройство
излучать в окружающую среду, или окружающие
элементы
конструкции будут излучать на устройство во всем
диапазоне
рабочих температур;
- не учтена теплопередача по элементам крепежа -
винтам,
шпилькам, и т.д. Это усложняет тепловую модель, в
первом
приближении можно пренебречь;
 - не учтена теплопередача в местах стыков блоков устройства.
Это
достаточно справедливо, т.к. поверхность специально
не
обрабатывается, не наносится теплопроводящая паста и т.п.;
 - рамки на основание, а основание, в свою очередь, на
термоплату
установлены через теплопроводящую пасту;
 - геометрия деталей упрощается: не учитываются пазы,
отверстия.

Таким образом, в первом приближении учитывается только отвод
тепла путем теплопроводности, упрощается геометрия деталей.

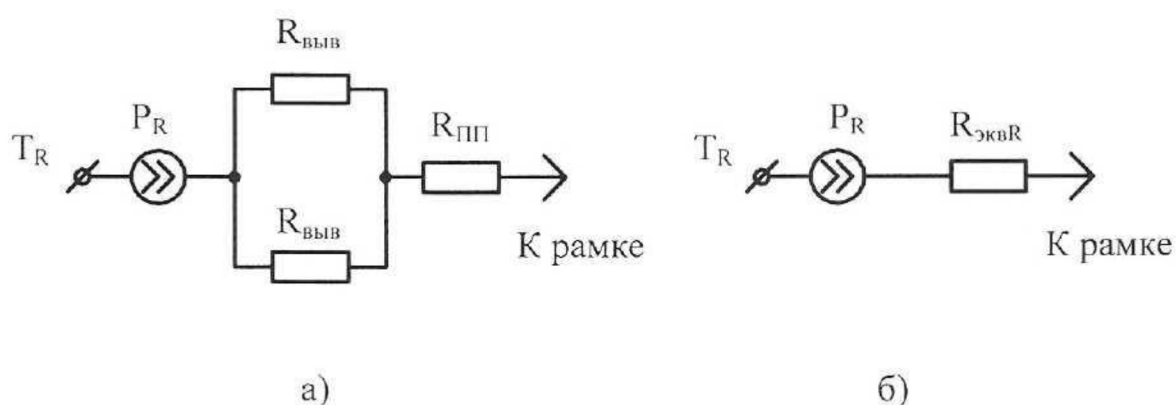
Устройство устанавливается через теплопроводящую пасту на
термоплату, которая служит для отвода тепловой энергии от всех РЭС
на борту спутника. Температура термоплаты от 0 до +40 °С.

Тепловой расчет производится методом тепловых сопротивлений.
Участки, по которым движется тепловой поток (участки тепловой
цепи),
представляют собой тепловые сопротивления, которые, в свою очередь,
эквивалентны электрическим сопротивлениям.

Аналогично,
тепловыделяющие ЭРЭ эквивалентны источникам тока, рассеиваемая
тепловая мощность - электрическому току, а температуры в
некоторых точках тепловых цепей - электрическим потенциалам.

Задачей расчета является оценка эффективности теплоотвода конструкции. Для этого нужно рассчитать температуры тепловыделяющих элементов в наиболее жестком температурном режиме - при максимальной температуре термоплаты ($+40\text{ }^{\circ}\text{C}$). При этом не были рассмотрены модели других компонентов, установленных на плате. Это допущение справедливо, так как их температура будет явно меньше температур тепловыделяющих компонентов. (Однако если рассматривать в тепловой модели все компоненты модуля, перегрев тепловыделяющих компонентов уменьшится, а температура нетепловыделяющих элементов увеличится за счет перераспределения тепловой энергии).

Тепловая модель чип-резистора и ее эквивалентная схема приведены на рисунке 22:



T_R - температура корпуса резистора, К

$R_{\text{выв}}$ - тепловое сопротивление одного вывода резистора, К/Вт

$R_{\text{ПП}}$ - тепловое сопротивление ПП под резистором, К/Вт

$R_{\text{эквR}}$ - эквивалентное тепловое сопротивление резистора, К/Вт

Рисунок 22 - Тепловая модель чип-резистора (а) и ее эквивалентная схема(б)

Тогда эквивалентное тепловое сопротивление чип-резистора рассчитывается согласно следующему выражению:

$$R_{\text{экв}} = \frac{R_{\text{выб}}}{2} + R_{\text{ПП}} = \frac{1}{2S_R} \left(\frac{h_{\text{ПОС}}}{\lambda_{\text{ПОС}}} + \frac{h_{\text{ПП}}}{\lambda_{\text{ПП}}} \right) \quad (2)$$

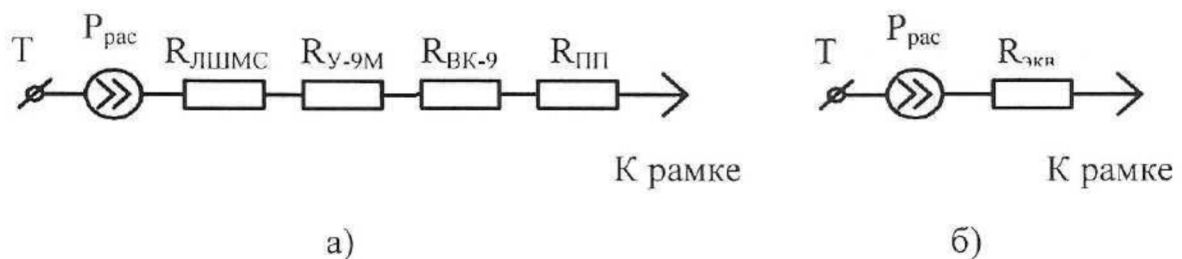
где S_R - площадь контактной площадки чип-резистора;

$h_{\text{ПОС}}$ - толщина слоя припоя;

$\lambda_{\text{ПОС}}, \lambda_{\text{ПП}}$ - соответственно теплопроводности припоя и материала ПП, Вт/(м·К).

Аналогично можно определить тепловые сопротивления чип-конденсаторов и чип-диодов.

Резисторные, транзисторные и оптронные сборки отдают тепло на ПП преимущественно через лакоткань, которая приклеена к ПП клеем ВК-9. Корпуса ЭРЭ приклеены к лакоткани клеем-мастикой У-9М. Тепловая модель этих ЭРЭ и ее эквивалентная схема приведены на рисунке 23:



T - температура корпуса ЭРЭ, К

$P_{\text{рас}}$ - мощность, рассеиваемая ЭРЭ, Вт

$R_{\text{ЛШМС}}$ - тепловое сопротивление лакоткани, К/Вт

$R_{\text{У-9М}}$ - тепловое сопротивление мастики У-9М, К/Вт

$R_{\text{ВК-9}}$ - тепловое сопротивление клея ВК-9, К/Вт

$R_{\text{ЭКВ}}$ - эквивалентное тепловое сопротивление ЭРЭ, К/Вт

Рисунок 23 - Тепловая модель резисторных, транзисторных и оптронных сборок (а) и ее эквивалентная схема (б)

Эквивалентное тепловое сопротивление резисторных, транзисторных и оптронных сборок рассчитывается согласно следующему выражению:

$$R_{\text{ЭКВ}} = R_{\text{ЛШМС}} + R_{\text{ВК-9}} + R_{\text{У-9М}} + R_{\text{ПП}} =$$

$$= \frac{1}{2S} \left(\frac{h_{\text{ЛШМС}}}{\lambda_{\text{ЛШМС}}} + \frac{h_{\text{ВК-9}}}{\lambda_{\text{ВК-9}}} + \frac{h_{\text{У-9М}}}{\lambda_{\text{У-9М}}} + \frac{h_{\text{ПП}}}{\lambda_{\text{СТ}}} \right) \quad (4)$$

где S - площадь под корпусом ЭРЭ, м^2 ;

$h_{\text{ЛШМС}}, h_{\text{ВК-9}}, h_{\text{У-9М}}$ - соответственно толщина лакоткани, слоя клея ВК-9 и слоя мастики У-9М;

$\lambda_{\text{ЛШМС}}, \lambda_{\text{ВК-9}}, \lambda_{\text{У-9М}}$ - соответственно теплопроводность лакоткани, клея ВК-9 ($\lambda_{\text{ВК-9}} = 1 \text{ Вт/(\text{м}\cdot\text{К})}$) и мастики У-9М ($\lambda_{\text{У-9М}} = 1,3 \text{ Вт/(\text{м}\cdot\text{К})}$).

Толщины слоев клея и припоя следует узнавать из справочников. Наиболее сложной является тепловая модель рамки. При этом если разбить рамку на прямоугольные параллелепипеды с основанием в виде квадрата, ее можно представить в качестве матрицы тепловых сопротивлений R_{p2} одинаковой величины, отличаться от которых будут только тепловые сопротивления боковых стенок рамки R_{p1} . В первом приближении не следует учитывать некоторые конструктивные особенности рамки (пазы, отверстия, сложная геометрия). Рамку следует разбить на изотермические объемы таким образом, чтобы в узлы тепловой схемы попадали тепловыделяющие ЭРЭ. Условное изображение разбиения рамки на изотермические объемы и ее тепловая модель представлены на рисунке 24.

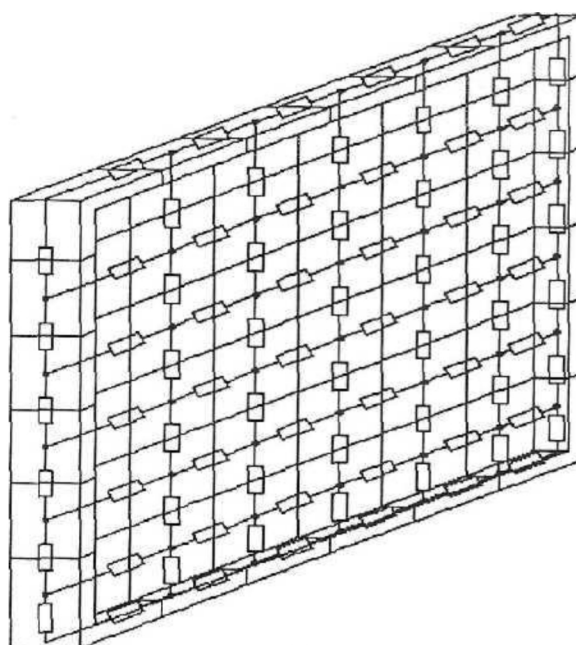
Тепловые сопротивления боковых стенок рамки R_{p1} и ее основания R_{p2} рассчитываются по формуле:

$$R_{p1} = \frac{l_p}{\lambda_p S_{p1}} \quad (5)$$

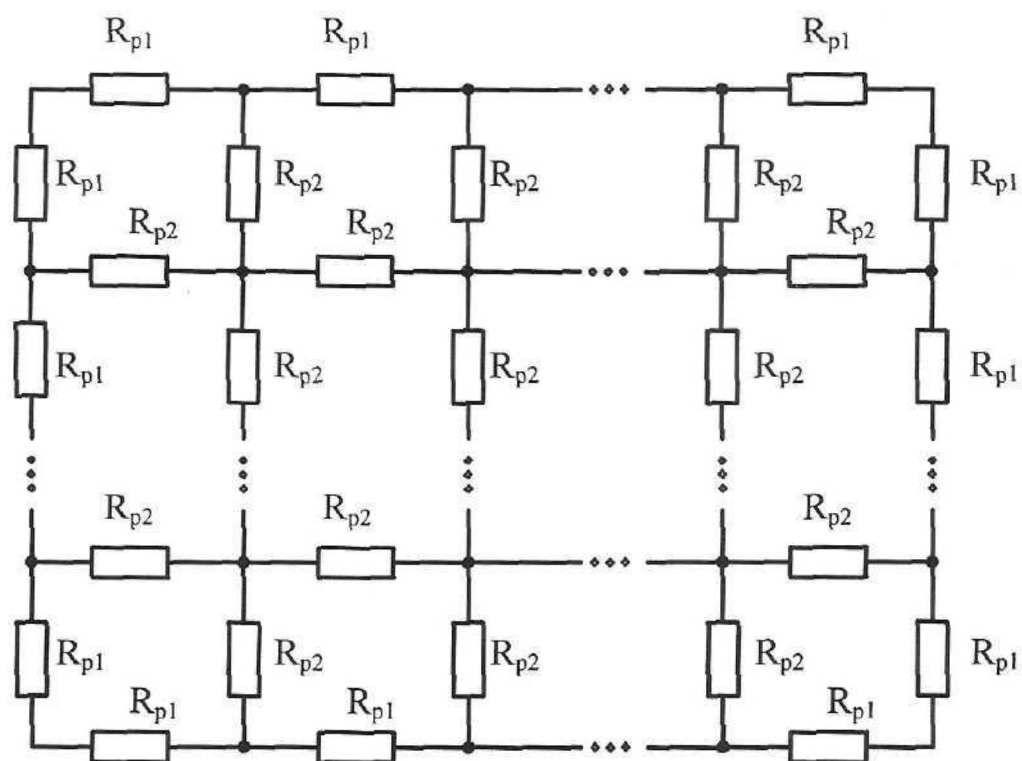
$$R_{p2} = \frac{l_p}{\lambda_p S_{p2}} \quad (6)$$

где S_{p1}, S_{p2} - площадь сечения параллелепипедов, на которые разбиты соответственно боковые стенки и основание рамки;

λ_p - теплопроводность материала рамки.



а)



б)

Рисунок 24 - Условное изображение разбиения рамки на изотермические

объемы (а) и ее тепловая модель (б)

Блоки устанавливаются на общее основание, а основание, в свою очередь, на термоплату с применением теплопроводящей пасты. С помощью термопасты производится отвод тепла от устройства терморегулирования. Максимальная температура по ТЗ, до которой разогревается термоплата, составляет +40 °С. Это наиболее жесткий тепловой режим работы устройства, поэтому тепловой расчет производится именно для этой температуры термопасты.

Основным вопросом при расчете теплового сопротивления теплопроводящей пасты является определение толщины ее слоя. Толщина слоя пасты зависит от зазора между контактируемыми деталями. Максимальный зазор будет равен сумме допусков на неплоскостность между контактируемыми деталями. Тогда тепловые сопротивления теплопроводящей пасты в зазорах между блоком и основанием $R_{п1}$, а также между основанием и термоплатой $R_{п2}$ равны:

$$R_{п1} = \frac{T_p + T_{осн}}{\lambda_{п} S_p} \quad ; \quad (5)$$

$$R_{п2} = \frac{T_{осн}}{\lambda_{п} S_{осн}} \quad , \quad (6)$$

где $S_p, S_{осн}$ - площади соответственно бокового ребра рамки и основания;
 $T_p, T_{осн}$ - допуски на неплоскостность соответственно бокового ребра

рамки и основания;

$\lambda_{п}$ - теплопроводность теплопроводящей пасты.

Так как допуски на неплоскостность не были заданы при разработке, в предельном случае можно принять допуск на неплоскостность равным допуску на габаритный размер.

Тепловое сопротивление основания:

$$R_{осн} = \frac{h_{осн}}{\lambda_{осн} S_{осн}} \quad (7)$$

где $h_{осн}$ - толщина основания;

$\lambda_{осн}$ - теплопроводность материала основания.

В идеале нужно подробно раскрывать тепловую схему каждого блока. Однако если требуется оценить температуры только ЭРЭ одного из блоков устройства, остальные блоки рассматриваются как источники тепловой энергии, подогревающие основание. Тогда тепловое сопротивление такой модели блока будет равно тепловому сопротивлению теплопроводящей пасты между блоком и основанием, то есть $R_{\text{п}}$ (формула 5).

Тепловая модель термоплаты представляет собой источник постоянного напряжения, напряжение равно температуре термоплаты в Кельвинах. Максимальная температура по ТЗ - 313 К.

13.2. ПОРЯДОК РАСЧЕТА

Задача расчета - определение температур тепловыделяющих элементов. Порядок расчета:

1. Поверочный электрический расчет схемы, определение мощностей, рассеиваемых ЭРЭ. Определение наиболее тепловыделяющих элементов, температуру которых требуется рассчитать.

2. Составление тепловой модели рамки. Разбивать рамку на изотермические объемы следует так, чтобы они были равны между собой, а в основании лежал квадрат. При этом геометрические центры мест установки тепловыделяющих ЭРЭ должны попадать в центры изотермических объемов. Тогда рамка будет представлять собой матрицу сопротивлений, как показано на рисунке 3.

3. Расчет тепловых сопротивлений.

4. Составление тепловой модели устройства. При этом рационально пользоваться САПР, такими как OrCAD, MicroCap и т.д. Тепловая модель эквивалентна расчету электрической схемы по постоянному току.

Тепловые сопротивления (единица измерения К/Вт) эквивалентны электрическим (Ом), температуры (К) - электрическим потенциалам или

источникам постоянного напряжения (В), а рассеиваемые мощности (Вт) - источникам постоянного электрического тока (А).

5. Оценка степени точности модели. Данная модель является в некоторых моментах достаточно грубой. Плюсом модели является то, что в первом приближении она дает с точки зрения теплового режима самый худший случай: температуры тепловыделяющих ЭРЭ максимальны (т.к. не учитываются модели менее тепловыделяющих ЭРЭ), толщины слоев теплопроводящей пасты максимальны (если допуски на неплоскостность равны допускам на габаритные размеры) и т.д. Поэтому, если в первом приближении температуры удовлетворяют ТУ на ЭРЭ, то уточнение модели, возможно, не требуется.

Если температуры тепловыделяющих ЭРЭ превышают допустимые по ТУ, требуется уточнение модели:

- во-первых, требуется учесть абсолютно все ЭРЭ блока. При этом
требуется вычислить необходимые тепловые сопротивления
и
дополнить тепловую модель;
- во-вторых, можно раскрыть тепловые модели остальных
блоков
устройства;
- уточнить допуски на неплоскостность элементов конструкции
и
пересчитать тепловые сопротивления теплопроводящей пасты.

Литература:

1. Моделирование инженерных задач на ЭВМ. Представление структуры конструкций РЭА при расчетах температурных полей. Учеб. пособие/ Г.Ф.Краснощекова, А.В.Зеленский; Куйбышевский авиац. Ин-т.Куйбышев, 1988. -44с.

II Методические указания к курсовой работе.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение

1. Цель и задачи выполнения курсовой работы
2. Тематика курсовой работы
3. Исходные данные к курсовой работе
4. Задание на курсовую работу

5. Объем курсовой работы
6. Порядок выполнения курсовой работы
7. Защита курсовой работы
8. Методические указания по оформлению курсовой работы

Библиографический список

Введение

Настоящие методические указания к курсовой работе по дисциплине «Особенности проектирования электронных средств специального назначения» предназначены для студентов, обучающихся по направлению подготовки «Проектирование и технология ЭС» (специальность 21.10.00.68-2011-О-П) и содержат всю необходимую информацию для выполнения курсовой работы и оформления расчетно-пояснительной записки.

Методическими указаниями к курсовой работе предусмотрено использование программного комплекса АСОНИКА-К для расчетов приборов и устройств различных классов специальной аппаратуры. При этом студенты практически осваивают методы управления при компоновке электронных средств на ранних стадиях проектирования, методики построения математических моделей анализа ЭС, идентификации их параметров и проведения расчетов.

Использование программного комплекса АСОНИКА-К, в плане решения конструкторских задач, позволяет реализовать технологию проектирования на базе системного подхода к задаче исследования, закрепить полученные теоретические знания на практике, в ходе выполнения курсовой работы.

1. Цель и задачи выполнения курсовой работы

Целью курсовой работы, выполняемой по дисциплине «Особенности проектирования электронных средств специального назначения», является практическое применение технологии ориентированного проектирования, в том числе изученных методов и методик построения математических моделей при анализе изделия, проведение необходимых расчетов показателей качества конструкции и обеспечение требуемого уровня этих расчетов с помощью программного комплекса АСОНИКА-К.

Для достижения указанной цели, в ходе выполнения курсовой работы, студент должен приобрести навыки практического решения следующих задач:

- проведения анализа математических моделей, с целью определения объема необходимой информации;

- проведение анализа электронного средства как объекта исследования, с целью определения возможности применения того или иного метода расчета для получения заданных характеристик объекта исследования;

Овладение методологическими основами и практическими навыками решения задач обеспечения требуемых значений параметров ЭС с помощью программного комплекса АСОНИКА –К;

- выявление взаимного влияния протекающих в электронном средстве разнородных физических процессов и принятие решений, направленных на обеспечение надежного функционирования ЭС с позиций системного подхода.

2. Тематика курсовой работы

Темы курсовых работ для всех студентов формулируются следующим образом:

«Применение программного комплекса АСОНИКА-К при проектировании электронного средства специального назначения (наименование изделия).»

В качестве (наименование изделия) должно быть задано конкретное название электронного средства(источник питания, блок управления, усилитель мощности) и др.

3. Исходные данные к курсовой работе

Исходными данными к курсовой работе является техническое описание электронного устройства, а именно:

- техническое задание;
- схема электрическая принципиальная;
- перечень элементов.

4. Задание на курсовую работу

Задание на курсовую работу для всех студентов формулируется следующим образом:

Применение подсистемы АСОНИКА-К при проектировании изделий специального назначения с требуемыми выходными параметрами. В качестве « изделия» должно фигурировать конкретное название устройства, например: блок питания, усилитель мощности, преобразователь и др.

Бланк задания на курсовую работу рекомендует кафедра.

5. Объем курсовой работы

Расчетно- пояснительная записка к курсовой работе должна содержать порядка 40 страниц и включать в себя следующие разделы:

- титульный лист;
- Аннотация;
- оглавление;
- задание на курсовую работу;
- описание схемы и конструкции предложенного устройства;
- постановка задачи на проведение исследования ;
- краткая характеристика математических моделей, их параметров;
- анализ результатов расчетов требуемых параметров на соответствие требованиям ТЗ;
- разработка рекомендаций , направленных на улучшение качества функционирования ЭС согласно ТЗ;
- выводы по работе
- список литературы;
- приложения.

6. Порядок выполнения курсовой работы

Рекомендуется следующий порядок выполнения курсовой работы:

1. Заполнить бланк задания на курсовую работу.
2. Изучить руководство пользователя ПК АСОНИКА-К. 3. Подготовить исходные данные для расчета.
3. Провести расчет.
4. Провести анализ результатов расчета.
- 5 Разработать рекомендации по изменению схемы, конструкции, и др. с целью удовлетворения требований ТЗ.
6. Провести повторные расчеты, проверив эффективность предложенных рекомендаций.
7. Провести анализ результатов.
8. Оформить расчетно-пояснительную записку.

7. Защита курсовой работы

На защиту курсовой работы допускаются студенты, полностью выполнившие задание на работу и оформившие расчетно-пояснительную записку в соответствии с требованиями, приведенными в настоящих методических указаниях.

На защите курсовой работы студенты должны:

- знать методы и методики построения схем расчетов заданных параметров, влияющих на качество функционирования специальных устройств;

- уметь обосновать эффективность рекомендаций, предложенных в процессе выполнения работы;
- знать входные и выходные данные ПК АСОНИКА-К;
- знать принципы системного подхода и основы его применения в процессе исследований при проектировании ЭС.

8. Методические указания по оформлению курсовой работы

Расчетно - пояснительная записка оформляется с соблюдением всех требований ЕСКД к оформлению текстовых документов.

Чертежи и рисунки располагаются в тексте записки непосредственно после ссылки на них. Распечатки протоколов работы ПК АСОНИКА-К с результатами расчетов следует поместить в конец пояснительной записки в виде приложений.

Литература

- 1.Баканов Г.Ф. Основы конструирования и технологии радиоэлектронных средств: учеб. Пособие для вузов /Г.Ф.Баканов, С.С. Соколов, В. Ю. Суходольский; под ред. И.Г. Мироненко.- М.: Издательский центр «Академия», 2007.-368с.
2. Зеленский А.В., Краснощекова Г.Ф. Конструкции и расчетные модели: учеб. пособие.-Самара : изд-во Самар. Гос. ун-та,2010.-152с.
3. Жаданов В.В., Сарафанов А.В. Управление качеством при проектировании теплонагруженных радиоэлектронных средств.- М.: СОЛОН-Пресс, 2004.- 464с.
4. РД В 319.01.05-хх Аппаратура электронная военного назначения. Принципы применения математического моделирования при проектировании: Методические указания./А.И. Андреев, Ю.Н. Кофанов, В.В.Жаднов. //науч. Рук. Андреев- М.- :ЦНИИИ22 МО РФ, 1997.-71с.
5. Программный комплекс АСОНИКА-К Краткое руководство.-м.: МИЭМ.2006.-64с.

III Аттестационные педагогические измерительные материалы.

3.1. Проверка остаточных знаний по курсу (тесты)

1. Условия эксплуатации РЭС влияют на:
 - а) выбор материалов конструктивной базы;
 - б) выбор размеров устройства;
 - в) выбор дополнительного крепежа.

2. Какие связи в РЭС не относятся к физическим:
 - а) упругие;
 - б) оптические;
 - в) разъемные;
 - г) винтовые;
 - д) магнитные;
 - е) тепловые.

3. Выбрать наилучший вариант конструкции, если в техническом задании указано:
 - а) $K_{\text{униф}} = 0,7$;
 - б) $K_{\text{униф}} = 0,2$;
 - в) $K_{\text{униф}} = 0,9$;
 - г) $K_{\text{униф}} = 0,4$.

4. Укажите самый высокий уровень преемственности при конструировании:
 - а) унификация;
 - б) нормализация;
 - в) стандартизация.

5. Чем достигается взаимозаменяемость?
 - а) одинаковыми размерами;
 - б) одинаковыми материалами;
 - в) одинаковой точностью изготовления.

6. На какой основной критерий при конструировании влияет компоновка?
 - а) на массу;
 - б) на габариты;
 - в) на качество разработки изделия;
 - г) на сроки проектирования.

7. К какому иерархическому уровню относится ячейка?

- а) 1 уровень (элемент);
- б) 2 уровень (узел);
- в) 3 уровень (субблок);
- г) 4 уровень (блок).

8. Обобщенная геометрическая модель элемента (ОГМ) это:

- а) установочный размер элемента;
- б) максимальный размер элемента;
- в) требования к монтажу;
- г) функция геометрии элемента и его режим работы.

9. Какой метод обработки деталей не относится к термическому?

- а) закалка;
- б) отпуск;
- в) отжиг;
- г) азотирование.

10. Каким видом сварки можно сваривать тугоплавкие материалы?

- а) электродуговой;
- б) термокомпрессионной;
- в) ультразвуковой;
- г) микроплазменной.

11. Какой припой имеет более низкую температуру плавления?

- а) ПОС – 40;
- б) ПОС – 61;
- в) ПОССР – 2.

12. Что является основным требованием при конструировании?

- а) минимальная масса;
- б) минимальные габариты;
- в) конструкция должна быть эффективнее своего аналога.

13. Выбор материалов при конструировании зависит от:

- а) условий эксплуатации;
- б) элементной базы;
- в) обслуживания РЭС.

14. Когда учитывается требование эргономики при проектировании РЭС?

- а) при трассировке печатной платы;

- б) при внутренней компоновке;
 в) при внешней компоновке (характеризуя систему «человек-машина»).

15. Что характеризует тепловой режим РЭС?

- а) температура самого мощного радиоэлемента;
 б) температура окружающей среды;
 в) совокупность температур всех радиоэлементов;
 г) температура воздуха внутри аппарата.

д)

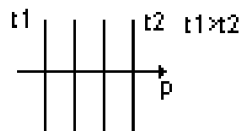
16. Что такое нормальный тепловой режим радиодетали?

- е) температура детали не выходит за допустимые пределы, указанные в ТУ;
 ж) температура детали 60 С;
 з) температура детали 20 С;
 и) температура детали 40 С.

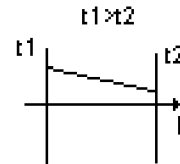
к)

17. Покажите на чертеже изотермические поверхности:

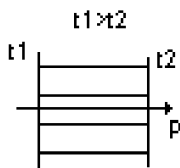
л)



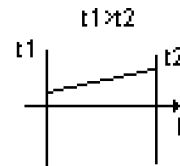
в)



м)

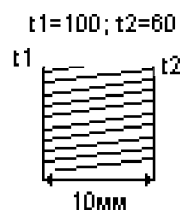


г)



18. Определите значение $\text{grad}(t)$ между двумя изотермическими поверхностями

- н) 8 град/мм;
 о) 16 град/мм;
 п) 4 град/мм;
 р) отсутствует.
 с)



19. Укажите уравнение нестационарной теплопроводности.

т) $\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} = 0;$

у) $\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} = 1;$

ф) $\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} = \frac{\partial t}{\partial \tau};$

х) $\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} = P.$

20. Укажите размерность теплового сопротивления.

- ц) Вт/град;
- ч) Вт/мм;
- ш) град/Вт;
- щ) безразмерная величина.

21. Наличие пограничного слоя у поверхности обусловлено:

- ы) действием силы трения;
- э) действием силой поверхностного натяжения;
- ю) теплопроводностью материала;
- я) ускорением свободного падения.

22. Укажите формулу, отражающую закон конвективного теплообмена

аа) $P = \alpha_k \cdot (t_T - t_C) \cdot S$;

бб) $q = -\lambda \cdot \text{grad}(t)$;

вв) $q = \alpha_k \cdot \Delta t$.

23. Укажите формулу закона теплообмена $\frac{1}{4}$

гг) $t_T - t_C \geq \left(\frac{840}{e} \right)^3$;

дд) $t_T - t_C \leq \left(\frac{840}{e} \right)^3$;

ее) $t_k - t_C = e^3$.

24. Как влияет разреженность среды на теплообмен?

- жж) не влияет;
- зз) улучшает;
- ии) ухудшает.

25. У абсолютно черного тела коэффициент поглощения A :

- кк) $A=0$;
- лл) $A=1$;
- мм) $A>0$.

26. У абсолютно белого тела коэффициент поглощения A :

- нн) $A=0$;
- оо) $A=1$;
- пп) $A>0$.

27. Укажите максимальный по значению коэффициент для абсолютно прозрачного тела:

- pp) поглощения;
- cc) отражения;
- тт) прозрачности.

уу)

28. Какой знак нужно поставить в соотношении между степенями черноты?
(ε – степень черноты ε_{np} – приведенная степень черноты)

фф) $\varepsilon = \varepsilon_{np}$;

xx) $\varepsilon > \varepsilon_{np}$;

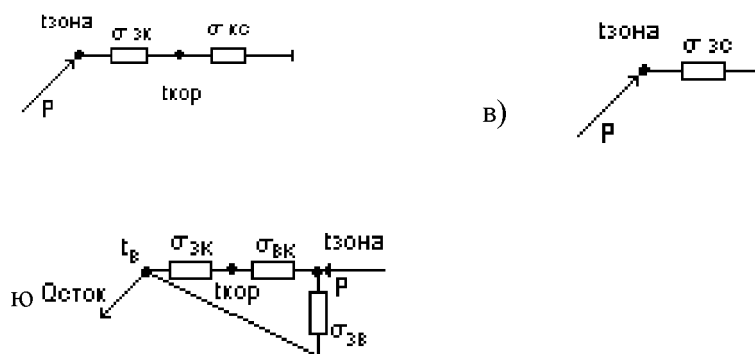
цц) $\varepsilon < \varepsilon_{np}$.

чч)

29. Укажите максимальный коэффициент теплового экрана:

- шш) коэффициент поглощения;
- щщ) коэффициент отражения;
- ыы) коэффициент прозрачности.

30. Укажите тепловую схему, которая используется при расчете теплового режима герметичного блока?



31. Какой из тепловых режимов более облегченный?
(размеры блока и компоновка те же, абсолютная влажность постоянна)

- яя) $t_{\text{зоны}} = 110^\circ \text{C}$; относительная влажность 98 %;
- aaa) $t_{\text{зоны}} = 90^\circ \text{C}$; относительная влажность 98 %;
- ббб) $t_{\text{зоны}} = 80^\circ \text{C}$; относительная влажность 98 %.

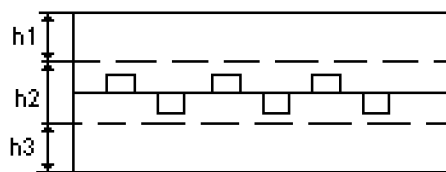
ввв)

32. Сколько существует граничных условий при анализе температурного поля блока РЭС?

- ггг) 1;
- ддд) 2;
- еее) 3;
- жжж) 4.

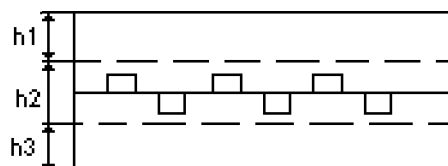
33. Какие виды теплообмена присутствуют в отсеке блока с высотой h_1 ?

- ззз) конвекция;
- иии) теплопроводность;
- ккк) излучение;
- ллл) конвекция и излучение;
- ммм) конвекция и теплопроводность;



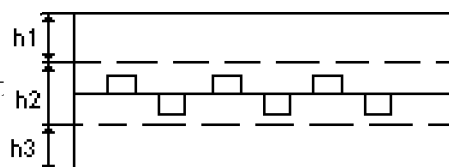
34. Какие виды теплообмена присутствуют в отсеке блока с высотой h_3 ?

- ннн) конвекция;
- ооо) теплопроводность;
- ппп) излучение;
- ррр) теплопроводность и излучение;
- ссс) конвекция, теплопроводность и излучение



35. Какие виды теплообмена присутствуют в отсеке блока с высотой h_2 ?

- ттт) конвекция;
- ууу) конвекция, теплопроводность и изл.
- ффф) конвекция и излучение;
- xxx) конвекция и теплопроводность.



36. Способы интенсификации теплообмена при контакте двух тел является

- ццц) увеличение теплового сопротивления;
- ччч) ухудшение состояние поверхности;
- шшш) уменьшение теплового сопротивления;
- щщщ) применение изоляционных материалов между деталями.

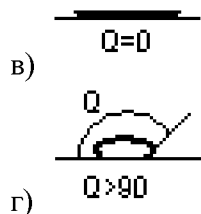
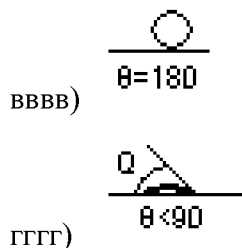
37. Какую температуру измеряют с помощью термопар?

- ыыы) температуру поверхности тела;
- эээ) температуру воздуха внутри блока;
- ююю) свою собственную температуру;
- яяя) температуру среды.

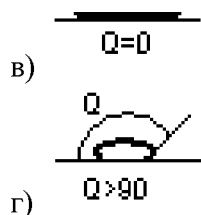
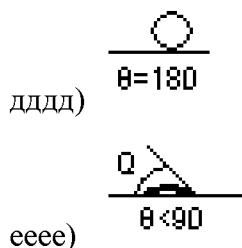
38. При каких соотношениях λ измерение температуры более точны?

$$\begin{array}{l}
 \text{аааа)} \left\{ \begin{array}{l} \lambda_1 = 100 \frac{Вт}{м \cdot град} \\ \lambda_2 = 20 \frac{Вт}{м \cdot град} \end{array} \right. \\
 \text{бббб)} \left\{ \begin{array}{l} \lambda_1 = 100 \frac{Вт}{м \cdot град} \\ \lambda_2 = 50 \frac{Вт}{м \cdot град} \end{array} \right. \\
 \text{в)} \left\{ \begin{array}{l} \lambda_1 = 100 \frac{Вт}{м \cdot град} \\ \lambda_2 = 80 \frac{Вт}{м \cdot град} \end{array} \right.
 \end{array}$$

39. Какой рисунок характерен для несмачиваемой поверхности?



40. В каком случае тепловое сопротивление имеет минимальное значение?



41. Какому закону подчиняется электрическое охлаждение?

- а) Зеебека;
 б) Пельтье;
 в) Томсона.

42. Как уменьшить контактное тепловое сопротивление?

- а) поставить между деталями стальную плату;
 б) поставить между деталями изоляционную плату;
 в) поставить между деталями медную плату.
 Толщина платы во всех случаях одинакова.

43. Имеем несколько радиаторов одинаковой площади. Какой из них имеет большую площадь отдачи тепла конвекцией?

- а) пластинчатый (ребристый);
 б) игольчатый;
 в) имеют одинаковую площадь отдачи тепла.

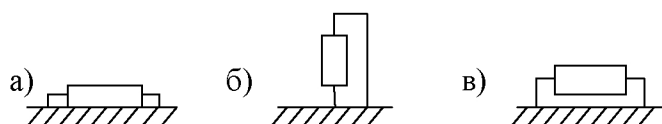
44. С какой поверхности радиатора осуществляется лучистый теплообмен?

- а) с поверхностей между ребрами;
 б) с наружной поверхности;
 в) нет отвода тепла за счет излучения.

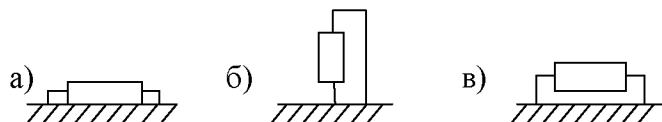
45. При каком кипении осуществляется большая отдача тепла с нагретой поверхности?

- а) пленочном;
 б) неустойчивом;
 в) пузырьковым.

46. При условиях работы с высокой влажностью как нужно установить на плате радиоэлементы?



47. При условиях работы с высокой температурой как нужно устанавливать радиоэлементы на плату?



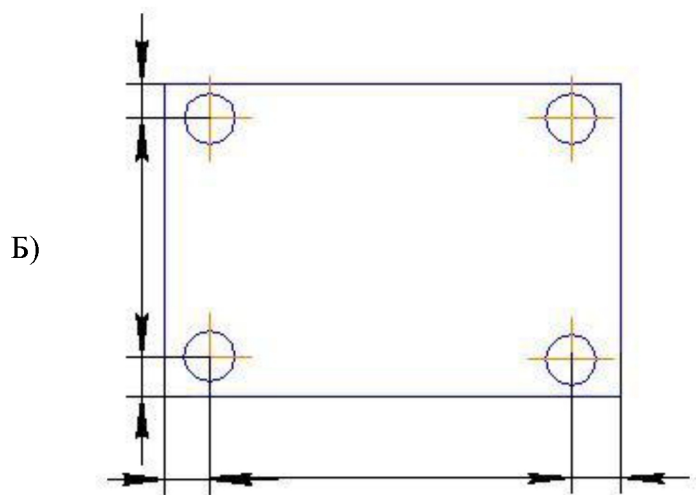
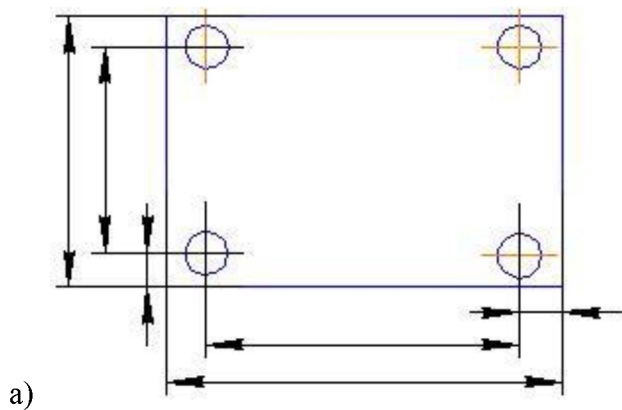
48. Эффективность экранирования электрического поля не зависит от:

- а) материала экрана;
- б) толщины материала экрана;
- в) покрытия экрана.

49. Что значит для конструкции наличие линейных ускорений?

- а) применение амортизаторов;
- б) применение демпферов;
- в) увеличение массы конструкции.

50. Укажите правильную простановку размеров на чертеже печатной платы.



51. Размерная цепь это:

- а) совокупность размеров;
- б) совокупность размеров, образующих замкнутый контур;
- в) разность между несколькими размерами.

52. Какое обозначение на чертежах соответствует охватываемому размеру:

- а) H_{12} ;
- б) h_{12} ;
- в) $\pm H_{12}/2$.

53. Какой метод электрического монтажа увеличивает массогабаритные показатели РЭС?

- а) проводной;
- б) печатный;
- в) жгутовой.

54. Как обеспечить минимум паразитных взаимодействий при конструировании?

- а) выбором материалов;
- б) вариантами компоновок;
- в) выбором термической обработки.

55. Как лучше защитить конструкции от коррозии (кроме элементной базы)?

- а) применить химические антикоррозионные покрытия;
- б) применить пропитку;
- в) применить обволакивание.

56. При каком кипении осуществляется большая отдача тепла с нагретой поверхности?

- а) пленочном;
- б) неустойчивом;
- в) пузырьковым.