

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное агентство по образованию

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

П.П. Бескид, В.Ю. Суходольский, Ю.М. Шапаренко

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЗАЩИЩЕННЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Часть 1

Конструкторское проектирование.
Защита от физических полей

Учебное пособие



Санкт-Петербург
2008

УДК 621.396.6 (075)

ББК 3 844-02 Я 7

Бескид П.П., Суходольский В.Ю., Шапаренко Ю.М. Проектирование защищенных информационных систем. Часть 1. Конструкторское проектирование. Защита от физических полей. Учебное пособие. СПб, изд. РГГМУ, 2008. – 196 с.

ISBN 978-5-86813-235-3

Рецензент: Ю.И. Федюковский, канд. техн. наук, проф. (ФГУП НИИ «Вектор»)

В пособии даны основы конструирования технических средств информационных систем, а также рассмотрены прикладные аспекты обеспечения заданного уровня надежности в условиях механических, тепловых и электромагнитных воздействий. Практические рекомендации по применению современных информационных технологий могут быть использованы при курсовом и дипломном проектировании.

Предназначено для студентов океанологического факультета, обучающихся по специальности 075600 – «Информационная безопасность телекоммуникационных систем».

Beskid, P.P., Sukhodolsky, V.Yu., Shaparenko, Yu. M. Designing of secure information systems. Part 1. Design engineering. Protection against physical fields. – St. Petersburg, RSHU Publishers, 2008. – 196 pp.

The manual gives fundamentals of designing hardware components of information systems, as well as applied aspects of support of a preset level of reliability under conditions of mechanical, thermal and electromagnetic impact. Practical guidelines on application of the modern information technologies can be used in making term and graduation projects.

The manual is intended for students of the Faculty of Oceanology training in Speciality 075600, Information Safety of Telecommunication Systems.

ISBN 978-5-86813-235-3

© Бескид П.П., Суходольский В.Ю., Шапаренко Ю.М., 2008

© Российский государственный гидрометеорологический университет (РГГМУ), 2008

Российский государственный
гидрометеорологический университет

БИБЛИОТЕКА

ЛСН-426

ВВЕДЕНИЕ

При проектировании защищенных информационных систем значительный объем проработки приходится на вопросы защиты информации от несанкционированного использования. Достигнуть необходимых технических характеристик, в том числе и должного уровня защиты информации, позволяют специальный математический аппарат, необходимые информационные технологии, принципиальные электрические схемы функциональных узлов, блоков и устройств, программное обеспечение. Поскольку все они работают на основе принципов радиотехники и электроники, то, в соответствии с терминологией, введенной Государственным стандартом Российской Федерации ГОСТ 26632-85, они могут быть отнесены к радиоэлектронным средствам (РЭС). Поэтому к ним применимы методы конструкторского проектирования, разработанные для РЭС других классов. Специфические для защищенных информационных систем требования защиты информации реализуются при конструировании в “физической” защите. Информационные потоки, циркулирующие в аппаратуре, не должны проникать во внешнее пространство с помощью паразитного электромагнитного излучения или блуждающих токов. Все это обеспечивается и в обычных незащищенных РЭС и называется электромагнитной совместимостью. В нашем случае этим вопросам должно уделяться первостепенное внимание.

Конструкторское проектирование – один из этапов процесса конструирования “от идеи до машины”. Это этап, на котором требования заказчика технических средств, пройдя этапы системотехнической проработки и создания электрической принципиальной схемы, попадают на стол к человеку, который должен составить задание для последующих стадий производства. Таким заданием является комплект конструкторской документации – чертежей и целого ряда других документов, по которым только и может быть на серийном производстве изготовлен проектируемый прибор.

Как это делается? Есть ли здесь место научному подходу или все это область частных решений, опыта, одаренности конструктора, следования эмпирическим рецептам?

Есть две точки зрения. Приверженцы первой считают, что научить человека быть конструктором невозможно – нужна природная одаренность. Вторая точка зрения: все должно и может решаться строго научными методами.

Думается, что истина лежит посередине между этими крайностями.

В нашем курсе мы будем соединять элементы научного подхода с рассмотрением и анализом удачных эмпирических решений.

В чем состоят элементы научного подхода в конструкторском проектировании РЭС? Казалось бы, когда разработана электрическая схема, осталось взять комплектующие элементы, выбрать несущее основание, выполнить сборку и монтаж и на этом завершить создание прибора. Однако схема изображает идеальный случай: составляющие ее части выполняют функции (каждая – свои), не мешают работе других составных частей, а влияние дестабилизирующих факторов окружающей среды отсутствует и утечки информации нет.

На практике же приходится заниматься вопросами, без ответов на которые не удастся решить задачи обеспечения устойчивой работы информационных систем и защиты от попыток несанкционированного доступа. Вот главные из этих задач.

1. Обеспечение устойчивого функционирования, стабильности рабочих характеристик РЭС в условиях разброса и ухода параметров составных частей как электрорадиокомпонентов (ЭРК), так и других элементов конструкции. Научный подход к решению этой задачи дает так называемая теория чувствительности. Использование аппарата теории чувствительности позволяет сформулировать требования к допустимым отклонениям параметров ЭРК и элементов конструкции.

Эмпирическое решение этой задачи вообще невозможно!

2. Обеспечение устойчивого функционирования в условиях воздействия непреднамеренных электромагнитных помех. Такими помехами “забито” как внутриаппаратурное пространство, так и внешнее пространство. Любой проводник с током является излучателем электромагнитного поля, которое, по закону электромагнитной индукции, наводит э.д.с. в соседних проводниках. Эти э.д.с. могут нарушить нормальную работу аппаратуры. К внеаппаратурным помехам относятся излучения работающих радиостанций (для ра-

диоприемника, настроенного на определенную волну они будут мешающими), искровые и коммутационные помехи от электро-транспорта и электросварки, другие индустриальные помехи.

Решение этой задачи электромагнитной совместимости опирается как на знание теории электромагнитного поля, теории помехоустойчивого радиоприема, так и на большое разнообразие эмпирических приемов.

3. Влияние перегрева или сильного охлаждения, перепадов температуры на рабочие характеристики РЭС и обеспечение теплового режима, позволяющего поддерживать необходимую стабильность характеристик.

При решении этих задач конструктор опирается как на теорию тепло- и массообмена, так и на свою интуицию и опыт.

4. Обеспечение устойчивой работы РЭС в условиях воздействия неблагоприятных климатических факторов (повышенное или пониженное атмосферное давление, повышенная влажность воздуха, солнечное излучение, пыль, плесень и т.п.).

Решение этих задач в значительной мере опирается на эмпирические приемы защиты от вредных климатических воздействий, знание свойств материалов, покрытий и т.п.

5. Защита от механических воздействий: вибрации, ударов, транспортной тряски, линейных ускорений.

Теоретическое исследование этой проблемы опирается на знание теории механических колебаний, использование математического аппарата дифференциальных уравнений. Поскольку геометрические размеры элементов конструкций РЭС сравнимы с длиной волны колебаний, возникающих под воздействием механических нагрузок, при строгом подходе необходимо решение дифференциальных уравнений для систем с распределенными параметрами. Это чрезвычайно трудоемкая процедура, поэтому здесь часто применяются упрощения, позволяющие получить необходимый результат с достаточной для практики точностью. Результаты теоретических исследований в этой области находят практическое внедрение в инженерных методиках проектирования.

6. Защита РЭС от воздействия ионизирующих излучений. Это не обязательно проникающая радиация, сопутствующая ядерному взрыву. Радиационную устойчивость РЭС приходится обеспечивать при проектировании аппаратуры, предназначенной для использова-

ния вне атмосферы или на Земле. Например, при использовании РЭС в рентгеновских установках и в дозиметрах немаловажным является ответ на вопрос: насколько влияет контролируемая радиация на достоверность показаний прибора?

7. Выполнение требований эргономики и инженерной психологии. Решение этих задач опирается на результаты объективных исследований удобства работы с приборами, реакции оператора на показания приборов, сигнальные лампы, информацию на табло, утомляемость оператора и т.п.

8. Последняя, но чрезвычайно важная задача в нашем перечислении – обеспечение высокой надежности изделий. Надежность технических средств является комплексным показателем, складывающимся из четырех частных показателей: безотказности, долговечности, ремонтпригодности и сохраняемости. Определение количественных значений для каждого из этих показателей выполняется методами математической (статистической) теории надежности. Физико-технологические факторы, оказывающие влияние на надежность, изучаются в рамках физико-технологической теории надежности.

Возможные решения всех перечисленных задач и обсуждение проблем представлены в этом пособии. В каждом разделе сформулированы инженерные рекомендации и указаны информационные технологии, используемые в профессиональном проектировании.

Специфика применения научных методов в конструкторском деле такова, что, пока не разработан хотя бы предварительный вариант конструкции будущего прибора, – нет объекта, функционирование которого может быть оценено этими научными методами:

- пока нет конструкции – нет возможности применения теории чувствительности для оценки влияния разбросов параметров ее элементов;
- пока нет конструкции – нет возможности составить картину внутренних паразитных электромагнитных полей, нарушающих нормальную работу функционального узла или блока;
- пока нет конструкции – нет возможности составить картину теплообмена ее с окружающей средой и тепловую модель для оценки теплового режима будущего прибора;

- пока нет конструкции – нет возможности расчета частот механического резонанса, коэффициентов динамичности, допустимых деформаций, механических напряжений и других ее характеристик при воздействии механических нагрузок;

- пока нет конструкции – нет возможности выполнить расчет надежности.

Это определяет последовательность изложения материала настоящего учебного пособия. Начнем с краткого обзора эволюции конструкторского дела в радиоэлектронике. Рассмотрим классификацию РЭС по функциональному назначению и условиям применения в защищенных телекоммуникационных системах. Уточним терминологию и дадим ссылки на нормативные документы, регламентирующие практическое конструирование. Затем перейдем к рассмотрению основ научных подходов в конструировании, рассмотрим после этого вопросы конструирования массового типа функциональных узлов РЭС – узлов на печатных платах. Завершим изложение правилами документального оформления конструкторских решений, учитывая основные положения ЕСКД и особенности учебных проектов. В заключение сформулируем сводку требований к содержанию и оформлению конструкторской части студенческих курсовых и дипломных проектов.

1. ЭВОЛЮЦИЯ МЕТОДОВ КОНСТРУКТОРСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ РЭС

Проведем краткий исторический очерк развития методов конструкторского проектирования РЭС от момента изобретения радио и до настоящего времени.

Современный научно-технический прогресс тесно связан с широким внедрением радиоэлектронных средств во все отрасли экономики, с непрерывным усложнением радиоэлектронных систем, которые должны проектироваться и производиться в сжатые сроки. В связи с этим в ходе развития РЭС специалистам приходилось решать целый ряд задач принципиального характера. Важнейшими среди этих задач были и остаются:

- 1) организация массового производства РЭС;
- 2) обеспечение высокой надежности;
- 3) миниатюризация и микроминиатюризация РЭС.

Организация массового производства РЭС обеспечивалась, с одной стороны, за счет наращивания производственных мощностей, с другой – за счет использования прогрессивных технологий производства и автоматизации конструкторского проектирования и технологических процессов производства.

При этом конструкторское проектирование РЭС на протяжении истории развития радиоэлектроники претерпело определенную эволюцию.

Длительное время разработка РЭС велась применительно к индивидуальным требованиям конкретного устройства. Разукрупнение РЭС проводилось лишь до уровня блока. Отсюда произошло название – блочный метод конструирования. Индивидуально-блочный метод конструирования не позволял автоматизировать производственные процессы сборки и монтажа РЭС и по мере усложнения РЭС перестал удовлетворять требованиям практики. В дальнейшем, по мере усложнения и роста объемов информации, обрабатываемой в РЭС, изменился подход к разукрупнению РЭС. Разукрупнение стало проводиться до уровня функционального узла. На смену блочному методу пришел функционально-узловой метод конструирования. При этом оказалось, что для аппаратуры определенного класса перечень функциональных узлов, позволяющих ре-

шить техническую задачу, не слишком широк. Это явилось благоприятным условием для унификации функциональных узлов.

Унифицированные функциональные узлы также прошли свой эволюционный путь. Опуская все его стадии, можно сказать, что в результате этой эволюции появилось новое научно-техническое направление, получившее название микроэлектроники. В настоящее время эта эволюция вылилась в массовое применение интегральных схем (ИС) чрезвычайно высокой степени интеграции. В кристалле интегральной микросхемы сосредоточиваются сотни тысяч транзисторов или других эквивалентных элементов, на которых реализуются десятки тысяч элементарных схемных узлов типа транзисторного усилительного каскада или логической ячейки.

Этому прогрессу в сложности РЭС сопутствует прогресс в области повышения надежности. Повышения надежности удастся достичь благодаря увеличению степени интеграции ИС, применением многократного резервирования, а также за счет внедрения в технологические процессы принципов обеспечения физико-технологической надежности, т.е. анализа и контроля надежности по всем операциям технологического процесса.

Историки техники отмечают также, что за столетний период развития произошла смена ряда поколений РЭС. Каждому поколению соответствует своя компонентная база, собственные методы конструирования и конструкторско-технологическая реализация РЭС.

Нулевым считается поколение РЭС, существовавших с момента изобретения радио в 1895 г. до появления электронных ламп в 1910 г. Это были первые средства беспроводной связи: искровые радиопередатчики и детекторные радиоприемники.

Первое поколение РЭС характеризуется применением электронных ламп для генерирования и усиления электрического сигнала, применением крупногабаритных электрорадиокомпонентов (ЭРК), блочным методом конструирования.

Второе поколение РЭС, приход которого датируется приблизительно 1955 г, характеризуется переходом к массовому применению транзисторов, миниатюризацией других ЭРК, разработкой унифицированных функциональных узлов (УФУ) на их основе, внедрением технологии печатного монтажа, функционально-узлового метода конструирования.

Третье поколение РЭС (с 1962 г.) характеризуется использованием интегральных микросхем малой и, впоследствии, средней сте-

пени интеграции, разработкой технологии многослойных печатных плат (МПП), началом разработки и внедрения машинных методов проектирования.

Четвертое поколение РЭС (с 1971 г.) характеризуется разработкой и внедрением больших и сверхбольших интегральных микросхем (БИС и СБИС), функциональных узлов на новых физических принципах функционирования (акустоэлектроника, оптоэлектроника, криоэлектроника), широким внедрением систем автоматизации проектирования (САПР) конструкций и технологических процессов производства.

Этой же хронологии приблизительно соответствует эмпирическая логарифмическая формула для определения номера поколения по числу электрорадиоэлементов в одном компоненте (микросхеме и т.п.):

$$\kappa = \lg N,$$

где N — количество ЭРЭ в одном компоненте.

Так, при $N = 1$	$\kappa = 0$
$N = 1 \dots 10$	$\kappa = 1$
$N = 10 \dots 100$	$\kappa = 2$
$N > 1000$	$\kappa = 3$ и т.д.

Отметим также, что, несмотря на колоссальный технический прогресс, произошедший за 35 лет с момента появления 4-го поколения РЭС, до сих пор никто не отваживается заявить, что РЭС, разрабатываемые и производимые в настоящее время, — это РЭС пятого поколения. Обещания создать технику пятого поколения время от времени появляются, но одного количественного прогресса для этого недостаточно. На протяжении истории людям поразному удавалось предсказать, какой будет техника будущего. Порой случались гениальные догадки, находившие в последующие годы и века свою реализацию. Неоднократно случалось, что у футурологов не доставало фантазии, чтобы дать предсказание, которое бы в последующем осуществилось.

Сейчас представляется, что РЭС пятого поколения должны будут объединить в себе искусственный интеллект, функционирование по принципу нейронных сетей и сверхбыстродействие на основе использования физических континуальных сред с динамическими неоднородностями. По-прежнему РЭС должны иметь малые габариты, массу и энергопотребление за счет совершенствования конструкций и технологий при удобстве их использования человеком.

2. РАЗУКРУПНЕНИЕ РЭС ПО ФУНКЦИОНАЛЬНО-КОНСТРУКТИВНОЙ СЛОЖНОСТИ

Совершенно очевидно, что радиоэлектронные средства, предназначенные для решения сложных задач передачи и обработки информации должны дробиться на некоторые составные части, проектирование и производство которых может выполняться в самостоятельных, взаимодействующих между собой научно-исследовательских учреждениях, конструкторских бюро и производственных фирмах. Затем эти составные части объединяются вместе фирмой-производителем конечного продукта или в организациях заказчика, где и вводятся в эксплуатацию.

Это дробление на части называется разукрупнением РЭС по функционально-конструктивной сложности. Для установления единого толкования вопросов, связанных с разукрупнением, в стране действует ГОСТ 26632-85, определяющий около 20 терминов. Не повторяя дословно его текста, приведем обзор и некоторые разъяснения по этой терминологии.

Основополагающим термином является термин "Радиоэлектронное средство". В соответствии с ГОСТом 26632-85 — это "изделие и его составные части, в основу функционирования которых положены принципы радиотехники и электроники".

Совершенно естественным является иерархический принцип разукрупнения. Стандартом установлены два вида разукрупнения: по функциональной и по конструктивной сложности. Начнем с первого.

ГОСТ 26632-85 определяет 4 уровня *разукрупнения РЭС по функциональной сложности*.

1. *Радиоэлектронная система (РС)*. Это радиоэлектронное средство, представляющее собой *совокупность функционально взаимодействующих автономных радиоэлектронных комплексов и устройств*, образующих целостное единство, обладающее свойством перестроения структуры в целях рационального выбора и использования входящих средств при решении технических задач.

В состав радиоэлектронной системы могут входить механические, электромеханические и другие средства, без которых невозможна ее эксплуатация.

В зависимости от сложности технических задач радиоэлектронная система может быть автономной частью другой радиоэлектронной системы или совокупности систем.

В качестве примера можно привести радиоэлектронную систему мониторинга окружающей среды или предупреждения стихийных бедствий.

2. *Радиоэлектронный комплекс (РЭК).* Это радиоэлектронное средство, представляющее собой совокупность функционально связанных радиоэлектронных устройств, обладающих свойством перестроения структуры в целях сохранения работоспособности и предназначенное для решения технических задач.

В состав радиоэлектронного комплекса могут входить механические, электромеханические и другие средства, без которых невозможна его эксплуатация.

В зависимости от сложности технических задач радиоэлектронный комплекс может быть автономной частью другого комплекса.

3. *Радиоэлектронное устройство (РЭУ).* Это радиоэлектронное средство, представляющее собой функционально законченную сборочную единицу, выполненную на несущей конструкции, реализующее самостоятельную функцию передачи, приема, преобразования информации или техническую задачу на их основе.

4. *Радиоэлектронный функциональный узел (РЭФУ).* Это радиоэлектронное средство, представляющее собой функционально законченную сборочную единицу, выполненную на несущей конструкции, реализующее функцию преобразования сигнала и не имеющее самостоятельного эксплуатационного применения.

Разукрупнение по конструктивной сложности РЭС также предполагает определенную иерархию уровней дробления. Принципы конструирования могут быть различными. При всем их разнообразии можно выделить модульный и немодульный принцип построения конструкций.

При немодульном принципе различаются три уровня разукрупнения.

1. *Радиоэлектронный шкаф.* Совокупность радиоэлектронных блоков и (или) ячеек, предназначенная для реализации функций передачи, приема, преобразования информации или преобразования сигналов, выполненное на основании несущей конструкции третьего уровня.

2. *Радиоэлектронный блок. Совокупность радиоэлектронных ячеек, предназначенная для реализации функций передачи, приема, преобразования информации или преобразования сигналов, выполненная на основании несущей конструкции второго уровня.*

3. *Радиоэлектронная ячейка. Это радиоэлектронное средство, предназначенное для реализации функций передачи, приема, преобразования информации или преобразования сигналов, выполненное на основании несущей конструкции первого уровня.*

В качестве примечания в ГОСТе 26632-85 указывается очень важный для нашей практики факт. Это указание по поводу наименования радиоэлектронного средства.

Наименование радиоэлектронного средства устанавливается в зависимости от вида несущей конструкции и принципа его действия.

В целях поддержания необходимого режима секретности или по другим соображениям технической целесообразности принцип действия может не указываться. Вместо этого применяется условное обозначение, смысл которого расшифровывается в технической документации.

Примеры: блок индикации; блок сумматоров; блок А-318; ячейка дешифратора; ячейка МТ-36 и т.п.

Модульный принцип конструирования предполагает установление единой системы размеров и модулей приращения размера несущих конструкций. Это позволяет повысить плотность установки РЭС на объектах применения, улучшает взаимозаменяемость и ремонтпригодность сложных радиоэлектронных средств.

При модульном принципе конструирования РЭС определяются четыре уровня разукрупнения по конструктивной сложности.

1. Радиоэлектронный модуль третьего уровня (РЭМ 3). Это функционально законченный радиоэлектронный шкаф, пульт или стойка, выполненные на основе базовой несущей конструкции третьего уровня и обладающий свойствами конструктивной и функциональной взаимозаменяемости.

2. Радиоэлектронный модуль второго уровня (РЭМ 2). Это функционально законченный радиоэлектронный блок или рама, выполненные на основе базовой несущей конструкции второго уровня и обладающие свойствами конструктивной и функциональной взаимозаменяемости.

3. Радиоэлектронный модуль первого уровня (РЭМ 1). Это функционально законченная радиоэлектронная ячейка или кассета, выполненная на основе базовой несущей конструкции первого уровня и обладающая свойствами конструктивной и функциональной взаимозаменяемости.

4. Радиоэлектронный модуль нулевого уровня (РЭМ 0). Радиоэлектронное средство, предназначенное для реализации функции (функций) преобразования информации или преобразования сигналов, выполненное на конструктивной основе, размерно координируемой с базовой несущей конструкцией первого уровня и обладающее свойством конструктивной и функциональной взаимозаменяемости.

Приведем разъяснения еще некоторых терминов, используемых в стандарте.

- Несущая конструкция — элемент конструкции или совокупность элементов конструкции, предназначенные для размещения технических средств и обеспечения их устойчивости и прочности в заданных условиях эксплуатации.

- Базовая несущая конструкция (БНК) — несущая конструкция, предназначенная для размещения радиоэлектронных средств различного функционального назначения, габаритные размеры которых стандартизованы.

- Несущая (базовая несущая) конструкция первого уровня — конструкция, предназначенная для размещения радиоэлектронных модулей нулевого уровня, изделий электронной техники и электротехнических изделий и входящая в несущие конструкции более высокого уровня.

- Несущая (базовая несущая) конструкция первого уровня может быть выполнена в виде корпуса ячейки, кассеты и т.п.

- Несущая (базовая несущая) конструкция второго уровня — конструкция, предназначенная для размещения радиоэлектронных средств, выполненных на основе несущих (базовых несущих) конструкций первого уровня.

- Несущая (базовая несущая) конструкция третьего уровня — конструкция, предназначенная для размещения радиоэлектронных средств, выполненных на основе несущих (базовых несущих) конструкций второго уровня.

Основываясь на приведенной терминологии, следует отметить, что разрабатываемый в процессе выполнения курсового проекта радиоэлектронный функциональный узел на *печатной плате*, в случае использования базовых несущих конструкций, будет модулем нулевого уровня.

После того как собранная и смонтированная *печатная плата* будет установлена в рамку или кассету или хотя бы снабжена *лицевой планкой-панелью* для установки на ней органов управления или индикации и приспособлений для фиксации и извлечения ячейки из блока, наша конструкция *становится модулем РЭС первого уровня*.

3. БАЗОВЫЕ НЕСУЩИЕ КОНСТРУКЦИИ РЭС

Определения и термины, касающиеся несущих и базовых несущих конструкций РЭС, даны при рассмотрении вопросов разукрупнения РЭС по функционально-конструктивной сложности.

Поскольку базовой несущей конструкцией (БНК) называется несущая конструкция, размеры которой стандартизованы, рассмотрим положение со стандартизацией в этой области.

До 1985 года действовали отраслевые стандарты ОСТ 4 Г0.410.206 и ОСТ 4 Г0.410.207 (1979 г.), которые устанавливали схему построения иерархии, систему размеров БНК и способы обозначения их в технической документации.

Варианты конструктивного исполнения БНК РЭС и их обозначения были привязаны к видам РЭС, структурированным по объекту, на котором предполагалась их эксплуатация.

Было установлено 7 видов РЭС:

- 1) стационарные ЭВМ;
- 2) специальные АСУ (для АСУ был выделен отдельный класс, поскольку в те годы бытовало увлечение идеей, что повсеместное внедрение АСУ приведет к существенному прогрессу экономики, однако, вследствие общего застоя в стране, эти надежды тогда не оправдались);
- 3) стационарная аппаратура (термин “радиоэлектронные средства” тогда еще не был введен ГОСТом);
- 4) аппаратура, устанавливаемая на колесных шасси (автомобиль, автоприцеп);
- 5) аппаратура, устанавливаемая на самоходных шасси (имеются в виду транспортные средства на гусеничном ходу);
- 6) морская аппаратура;
- 7) самолетная аппаратура.

Видим, что в классификации отсутствовали ракетно-космические РЭС, хотя в те годы они прекрасно существовали. Это можно объяснить либо секретностью, либо тем, что стандарт был отраслевым и его действие не распространялось на ракетно-космическую отрасль.

Иерархия БНК включала три уровня независимо от принципа конструирования (модульный – немодульный): ячейка; блок; шкаф (стойка, стеллаж, пульт).

В новом ГОСТе 25765.11-85 типы и основные размеры БНК 1 и БНК 2 установлены без привязки к виду РЭС по объекту и условиям эксплуатации. Вид РЭС указывается только в обозначениях БНК 3-го уровня.

БНК 1 и БНК 2 подразделяются на типы в зависимости от основных размеров варианта конструкции; модификации конструктивного исполнения.

БНК 3 подразделяются на типы в зависимости от вида РЭС, варианта конструкции, модификации конструктивного исполнения.

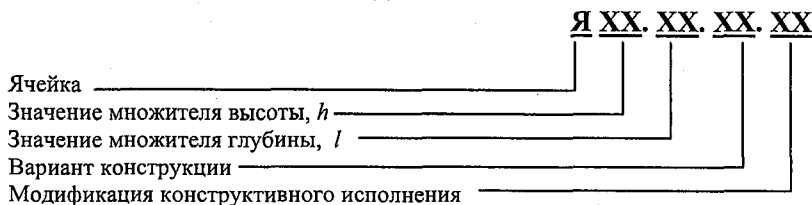
Сразу остановимся на новой классификации РЭС по видам объекта установки и эксплуатации. Этих видов по-прежнему остается семь:

- 1) космические РЭС;
- 2) бортовые ракетные РЭС;
- 3) стационарные РЭС и ЭВМ;
- 4) аппаратура, устанавливаемая на колесных шасси (автомобиль, автоприцеп);
- 5) аппаратура, устанавливаемая на самоходных шасси (на гусеничном ходу);
- 6) морская аппаратура;
- 7) самолетная аппаратура.

Стандарт ГОСТа 26765.11-85 устанавливает следующую структуру обозначений БНК (для внесения в КД, формирования заказа на поставку).

Для БНК 1 и БНК 2 обозначение связано с геометрическими размерами ячейки или блока. Размеры указываются как множители, на которые умножается определенный стандарт модуль приращения размера. Для БНК 1 (ячеек) модуль составляет 5 мм; для БНК 2 (блоков) модуль – 10 мм.

Обозначение БНК 1 имеет вид:



Численные значения высоты H и глубины L получаются после умножения множителей высоты и глубины на модуль приращения габарита 10 мм. Варианты конструкции и модификаций конструктивного исполнения приведены на чертежах 1...33 и в таблице ГОСТа 26765.12-86, с изменением № 1 от 11.07.90.

Определяющим размером БНК 1, указываемым в условном обозначении, являются размеры печатной платы. В целом же конструкция ячейки включает кроме печатной платы зону элементов крепления, контроля и индикации и зону установки электрического соединителя (см. рис. 3.1). Эти зоны, выступающие за габариты печатной платы, не учитываются в условном обозначении.

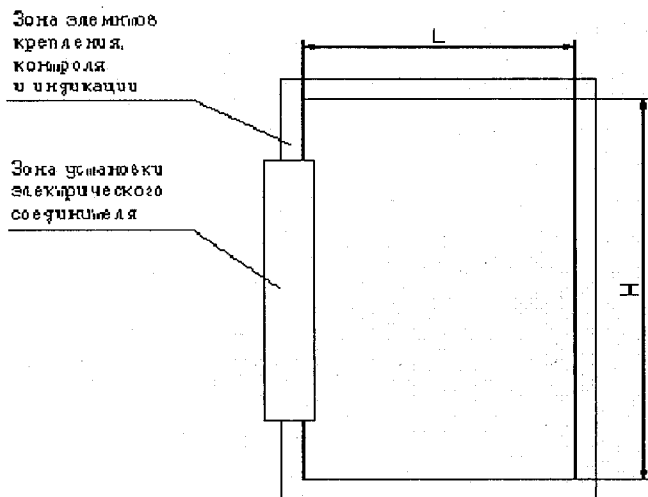


Рис. 3.1. Реальные размеры БНК-1

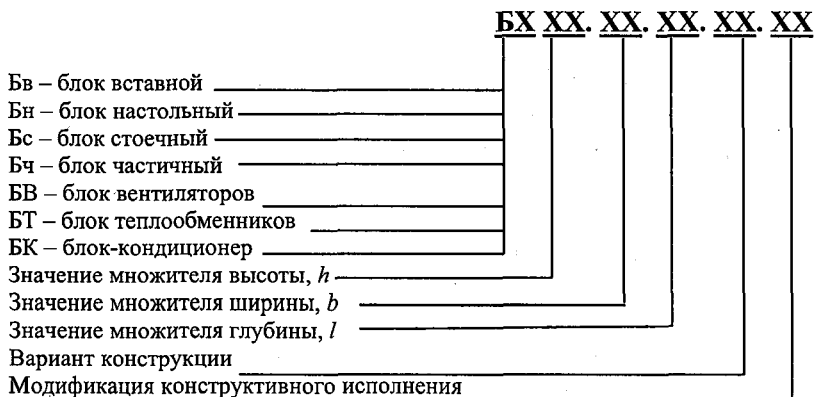
Пример обозначения БНК1 (ячейки) с размерами печатной платы $H \times L = 170 \times 75$ мм, вариант конструкции 04, модификация конструктивного исполнения 01: Я 34.15.04.01

Пример записи БНК 1 в конструкторской документации. (Поскольку БНК стандартизованы, запись в спецификацию делается в раздел “Стандартные изделия”).

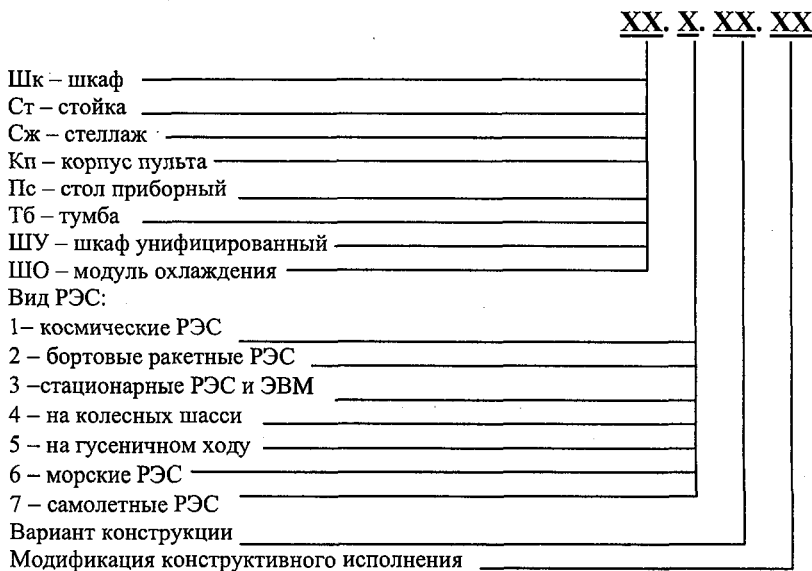
Обозначение	Наименование
АИСТ.469533.001	БНК1 Я 34.15.04.01 ГОСТ 26765.12-85

Пример обозначения БНК2 (вставного блока) с размерами $H \times B \times L = 180 \times 120 \times 300$ мм, варианта конструкции 02, модификации 01:
Бв 18.12.30.02.01

Условное обозначение БНК2:



Условное обозначение БНК3:



Размеры для БНКЗ в обозначении не указываются, но ГОСТом 26765.11-85 к ним установлены следующие требования:

п. 2.7.2. Размеры должны быть кратны модулю 10 мм.

п. 2.7.3. Ширина проема для установки БНК 2 (блоков и т.п.) не менее 60 мм и не более 1000 мм (рекомендовано 480 мм).

п. 2.7.4. Максимальный размер по высоте, без учета сервисных элементов БНКЗ (амортизационные рамы, воздухопроводы, кабельные вводы и т.п.), – не более 2800 мм.

п. 2.7.5. Максимальный размер по глубине, включающий, в случае необходимости, и размеры дверей, не должен превышать 750 мм (допускается до 2200 мм).

п. 2.7.6. Размер по ширине зависит от количества шкафов, агрегированных в одном ряду, и от размеров объекта установки РЭС.

В соответствии с п. 3 стандарта “Общие требования”, БНК в составе РЭС должны обеспечивать:

- удобство осмотра, проверки и ремонта РЭС;
- свободный доступ к установленным в них электронным модулям, микросборкам, микросхемам и другим изделиям электронной техники и к местам электрического соединения;
- рациональную компоновку РЭС на объектах;
- конструктивную взаимозаменяемость каждого типоразмера БНК;
- возможность применения прогрессивных методов формообразования деталей (литье, переработка пластмасс прессованием, порошковая металлургия и т.д.) с учетом обеспечения требований механизированных и автоматизированных производств.

В следующих разделах перейдем к рассмотрению вопросов обеспечения нормального функционирования конструкции в условиях воздействия непреднамеренных электромагнитных помех и неблагоприятных факторов внешней среды. Рассмотрение этих вопросов основывается на научном анализе явлений, оказывающих дестабилизирующее влияние на работу РЭС. Результат – разработка методик инженерного расчета режимов работы и конструктивных методов защиты.

4. АСПЕКТЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ РЭС

При проектировании и эксплуатации РЭС на объектах установки возникает проблема защиты их от помех вследствие взаимного влияния узлов и блоков не по штатным каналам обмена информацией, а по различным “паразитным” путям. Актуальна также проблема защиты окружающего пространства от электромагнитных излучений, возникающих внутри узлов и блоков РЭС, способных стать помехой для работы других радиоэлектронных средств или привести к утечке информации из защищаемых систем.

Эти проблемы стали предметом технической дисциплины, которая получила название “электромагнитная совместимость РЭС” (ЭМС).

ЭМС РЭС – это их способность функционировать совместно с другими средствами, имеющими электромагнитные свойства, при возможном воздействии непреднамеренных электромагнитных помех, не создавая при этом недопустимых помех другим РЭС.

Проблема ЭМС обострилась с развитием радиоэлектроники, с ростом числа информационных систем всех видов. Считается, что количество РЭС различного назначения удваивается за каждые 5 лет.

Обеспечение электромагнитной совместимости РЭС сложилось в самостоятельную научно-техническую дисциплину, фундаментом которой являются базовые дисциплины радиотехнического цикла и теория электрических цепей. Влияние на ЭМС кроме электричества и магнетизма может оказать организация их функционирования. В нашей учебной дисциплине организационный аспект ЭМС (управление радиочастотным ресурсом – создание регламента выходов в эфир радиостанций) рассматриваться не будет.

Специфика дисциплины и трудность решения стоящих на практике задач определяется тем, что помехи находят свои пути проникновения из одних РЭС в другие. Никакими электрическими схемами эти пути не предусмотрены, а задача разработчика РЭС – закрыть нештатные пути проникновения непреднамеренных электромагнитных помех (НЭМП). Задача эта нисколько не легче, чем задача проектирования электрической схемы или конструкции соответствующих РЭС.

Разберемся, какие узлы РЭС могут, так или иначе, создавать помехи работе соседних РЭС или принимать излучение последних.

В сложных РЭС в качестве составных частей используются генераторы незатухающих и модулированных колебаний. Уровни мощности, вырабатываемой этими узлами, находятся в пределах от 10–3 Вт до 106 Вт.

В одном устройстве могут рядом с этими узлами находиться высокочувствительные радиоприемники, работающие на этих же несущих частотах, усилители малых напряжений различных частот, цифровые схемы и т. п. Некоторые из них работают с уровнями мощности входных сигналов не более 10–14 Вт. Таким образом, отношение мощностей, с которыми работают расположенные в одной конструкции радиоэлектронные функциональные узлы, может достигать 1020 или 200 дБ (действующие значения напряжений от 1 мкВ в низковольтных цепях до 10 кВ в высоковольтных).

Опасность возникновения взаимных помех в этих условиях велика и усугубляется еще тем, что электропитание сложного радиоэлектронного комплекса осуществляется, как правило, от общей с другими средствами энергетической сети или от местной бортовой сети, провода которой связывают устройства комплекса друг с другом, служат путями распространения помех и утечки информации.

Определим ряд терминов и обсудим, сначала качественно, возникающие проблемы борьбы с паразитными явлениями в РЭС.

Паразитная наводка — под этим термином понимается передача напряжения из одного радиоустройства или его части в другое, не предусмотренная его схемой и конструкцией.

Такая наводка возникает вследствие *паразитной связи* между этими элементами — связи по электрическим цепям, токопроводящим элементам конструкции или индуктивной либо емкостной связи между изолированными друг от друга электрическими цепями. Эти связи возникают тогда, когда конструктор не заботится об их предотвращении в процессе проектирования.

При изучении явлений, связанных с ЭМС, следует помнить, что генерируемые помехи и наведенные ими напряжения и токи подчиняются общим законам электротехники, без всяких исключений. Это теория цепей с сосредоточенными параметрами для низкочастотных наводок, включая радиочастотный диапазон коротких волн (КВ), и теория цепей с распределенными параметрами для наводок

в УКВ, ДМВ и СВЧ диапазонах. Начиная с диапазонов УКВ и ДМВ, внутренние объемы металлических корпусов блоков РЭС, а также помещения, в которых работают РЭС, следует рассматривать как объемные резонаторы, в которых токами, текущими по проводам, проложенным в этом объеме, возбуждаются электромагнитные колебания.

Паразитные наводки приводят к появлению на выходе узла напряжений и токов, не предусмотренных его основным назначением. При этом, например, паразитные наводки с выходных на входные каскады усилителя могут привести к его самовозбуждению.

Среди вредных явлений, происходящих в РЭС с питанием от сети переменного тока, можно отметить типичный вид помех – так называемый фон переменного тока: проникающая из цепей вторичного питания остаточная, неотфильтрованная переменная составляющая питающего напряжения.

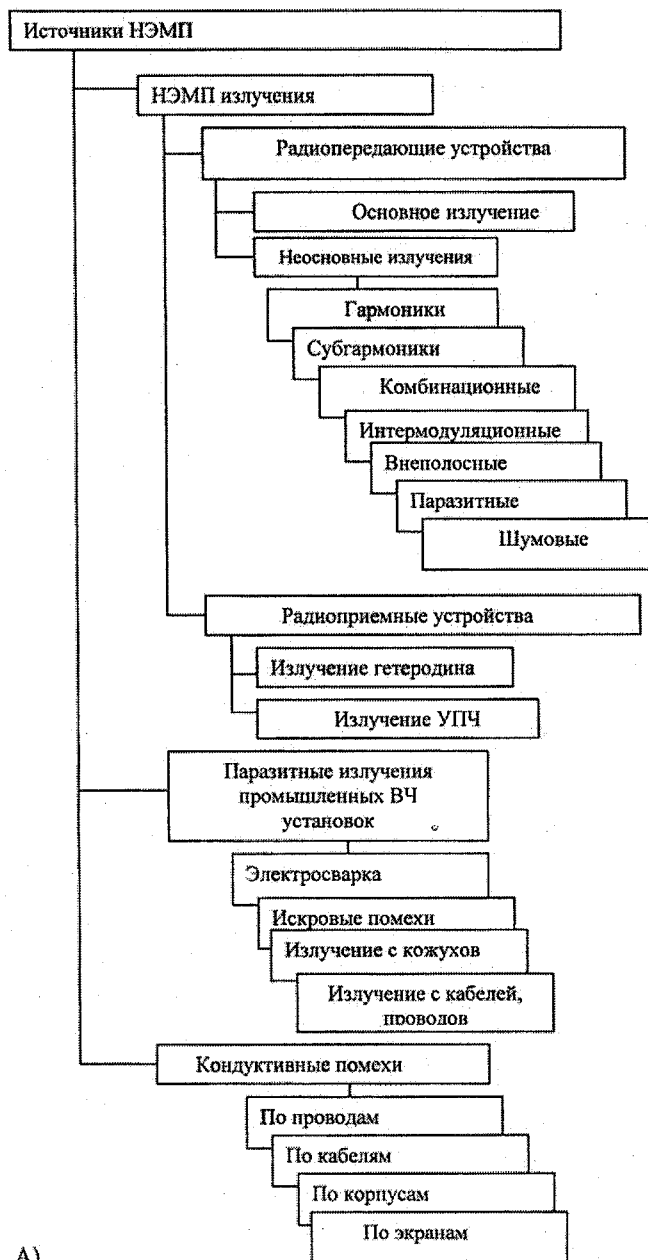
При решении задач ЭМС РЭС всегда приходится иметь дело с тремя элементами:

- 1) источником наводки;
- 2) приемником наводки (рецептором);
- 3) паразитной связью между ними.

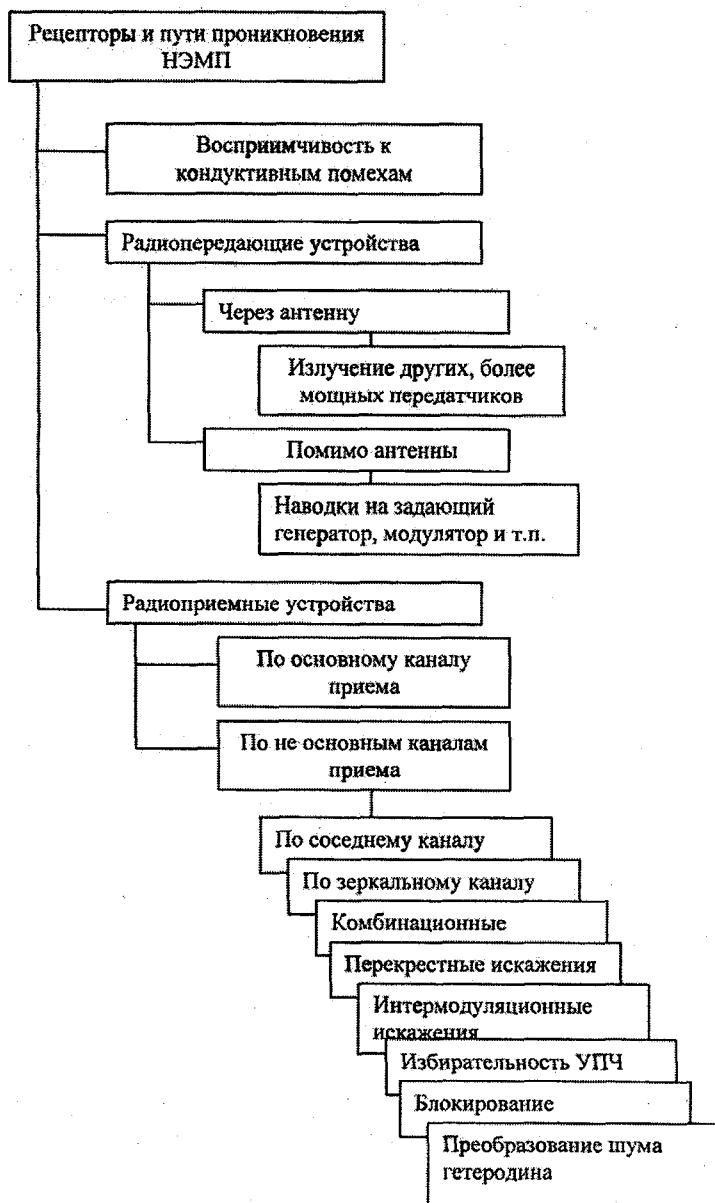
Выявление этих трех элементов часто оказывается самой трудной задачей в комплексе мер по обеспечению ЭМС. Она усложняется еще и по тому, что «паразитные» наводки в большинстве случаев создаются сразу несколькими источниками и проникают по многим цепям паразитной связи. В этих условиях обнаружение более слабых источников возможно только после устранения более сильных.

Если выявлены все три упомянутых элемента, само устранение наводки является, в принципе, более простой задачей. Однако в процессе решения этой задачи может потребоваться существенная переработка всей конструкции. Вот почему обязательным условием правильно организованного проектирования должен быть предварительный учет возможных источников и путей проникновения наводок. Попытаемся выяснить главные источники и пути проникновения наводок в РЭС и осветить накопленный до нас конструкторами опыт борьбы с наводками [3].

Рассмотрим сначала источники (рис 4.1,а) непреднамеренных электромагнитных помех (НЭМП), возможные рецепторы и пути (рис 4.1,б) проникновения НЭМП.



А)



Б)

Рис 4.1. Источники (А), рецепторы и пути проникновения (Б) помех.

Подробнее источники и пути проникновения наводок в функциональных узлах и блоках РЭС рассмотрим в следующем подразделе.

4.1. Источники и пути проникновения наводок в РЭС

4.1.1. Паразитная связь через общее сопротивление

Источник наводки E_H через комплексное сопротивление Z_H подключен к комплексному сопротивлению $Z_{общ}$, входящему в цепи приемника наводки (рис. 4.2).

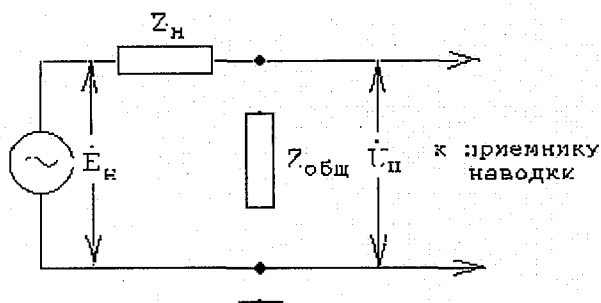


Рис. 4.2. Схема паразитной связи через общее сопротивление.

Напряжение, наведенное в цепях приемника составляет

$$\dot{U}_H = \dot{E}_H \frac{Z_{общ}}{Z_H + Z_{общ}}$$

Чаще всего, если аппаратура сделана грамотно, $Z_{общ} \ll Z_H$, пренебрегая $Z_{общ}$ в знаменателе, получаем:

$$\dot{U}_H \approx \dot{E}_H \frac{Z_{общ}}{Z_H}$$

Такой вид связи встречается чаще всего. На практике могут встречаться несколько разновидностей этой связи. Назовем следующие.

1. Связь через внутреннее сопротивление и соединительные провода источников питания или схем управления (рис. 4.3).



Рис. 4.3. Схема связи через внутреннее сопротивление источника питания.

Величина сопротивления $Z_{\text{общ}}$ зависит от частоты наводки. Для постоянного тока и низкой частоты это, в основном, сопротивление дросселей фильтра и диодов выпрямителя; для звуковых частот — это активное сопротивление соединительных проводов и емкостное сопротивление выходного конденсатора фильтра. Для высоких частот $Z_{\text{общ}}$ зависит, главным образом, от индуктивности проводов и свойств конденсаторов фильтра источника питания.

2. Связь через общий “земляной” лепесток (рис. 4.4).

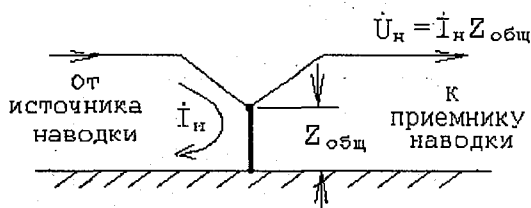


Рис. 4.4. Схема связи через общее заземление.

При выполнении заземления нужно принимать меры для уменьшения сопротивления заземления. Например, при сопротивлении заземляющего лепестка в 1 мОм (миллиом) и текущем через него токе 1 А напряжение наводки составляет 1 мВ, что может служить недопустимо большой помехой для высокочувствительного усилителя.

3. Связь через общий участок корпуса за счет блуждающих токов (рис. 4.5).

При использовании корпуса блока в качестве “земли” и непродуманном расположении точек заземления сильноточных каскадов или узлов и высокочувствительных цепей тока, текущие по корпусу, могут создать наводку на высокочувствительные цепи.

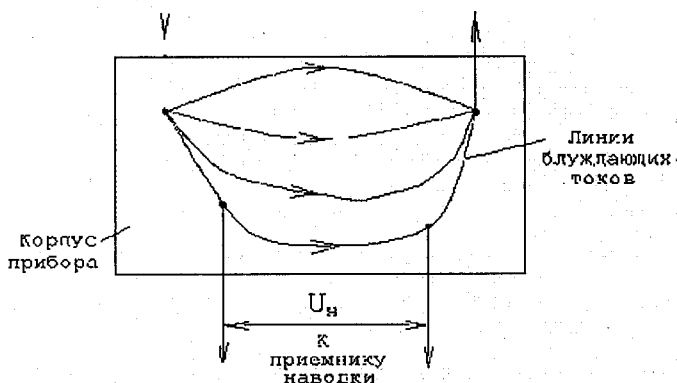


Рис. 4.5. Схема связи через общий участок корпуса.

4. Связь через общий провод присоединения к корпусу, особенно, если по этому проводу текут сильные токи (рис. 4.6).

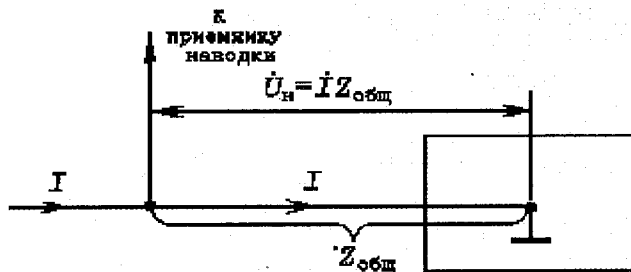


Рис. 4.6. Связь через общий провод присоединения к корпусу.

Приведем ряд рекомендаций по борьбе с этим видом наводок.

1. Стремиться к уменьшению активного сопротивления и индуктивности проводов монтажа.
2. Стремиться к уменьшению переходных сопротивлений заземляющих лепестков, клемм, штекеров и т.п.
3. Рационально выполнять монтаж плат и блоков. Следует помнить, что "прямой" ток, потребляемый каскадом, превращается в возвратный ток, текущий по проводам заземления, в частности, по широким участкам "земляной" металлизации на печатных платах. При этом получается тот же эффект блуждающих токов, о котором говорилось применительно к корпусам блоков.

4. Не использовать металлический корпус в качестве токоведущего элемента схемы: вести “общий” провод схемы проводниками максимально возможного поперечного сечения, по возможности короткими путями и соединять его с металлическим корпусом прибора в одной точке, которая находится эмпирически, исходя из минимума помех.

5. Параллельно оксидно-электролитическим конденсаторам подключать неполярные безындукционные конденсаторы (обычно — конденсаторы с керамическим диэлектриком), чтобы, хотя бы на высоких частотах, их емкостные сопротивления были настолько малы, чтобы можно было считать, что они закорачивают соответствующие цепи на землю.

4.1.2. Паразитная емкостная связь

Принципиально этот случай является частным случаем предыдущего. Разница лишь в том, что между источником и приемником наводки нет гальванической связи, а связь происходит через так называемую паразитную емкость. Эквивалентная электрическая схема для определения напряжения наводки при емкостной связи представлена на рис. 4.7.

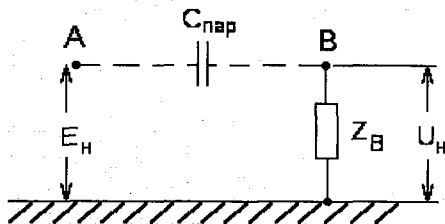


Рис. 4.7. Эквивалентная схема емкостной связи.

Напряжение наводки на входе приемника составляет

$$\dot{U}_H = \dot{E}_H \cdot \frac{Z_B}{Z_B + \frac{1}{j\omega C_{\text{пар}}}}$$

Каков порядок значений этой паразитной емкости? Приведем данные, полученные для двух случаев. В первом случае (рис. 4.8, а)

емкость между двумя параллельно расположенными в свободном пространстве проводниками длиной 100 мм зависит от диаметра проводников и расстояния между ними (табл. 4.1). Во втором случае (рис. 4.8, б) емкость проводника длиной 100 мм, расположенного над бесконечным заземленным металлическим листом зависит от диаметра проводника и высоты над листом (табл. 4.2).

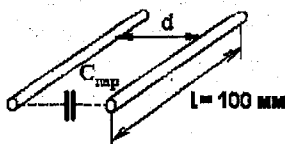


Таблица 1

Ø провода, мм	C _{пар} пФ		
	d мм		
	2	10	50
0,1	0,75	0,5	0,04
0,5	1,4	0,75	0,05
1,0	2,0	0,9	0,06
2,0	5,0	1,3	0,07

а

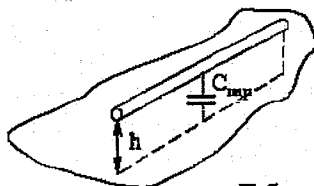


Таблица 2

Ø провода, мм	C _{пар} пФ		
	h мм		
	1	10	100
0,1	1,5	0,9	0,7
0,5	2,7	1,4	0,8
1,0	4,0	1,6	0,9
2,0	8,0	1,8	1,0

б

Рис. 4.8. Схемы и таблицы для оценки величины паразитных емкостей.

Видим, что реальные проводники в конструкции функциональных узлов могут иметь вполне ощутимую паразитную емкость как по отношению друг к другу, так и по отношению к общему проводу или металлизации земляного контура на печатных платах.

Пример. Пусть паразитная емкость между источником и приемником наводки составляет 5 пФ. Частота помехи $f = 15,9$ МГц (коротковолновый диапазон радиоволн). Круговая частота $\omega = 2\pi f = 108\text{с}^{-1}$.

Тогда емкостное сопротивление, через которое проходит, наводка составляет $X_C = \frac{1}{\omega C_{\text{пар}}} = 2$ кОм. Если входное сопротивление

приемника наводки превышает эту величину в несколько раз, наводка попадает на вход приемника без заметного ослабления.

4.1.3. Паразитная индуктивная связь

В пространстве, окружающем проводник с током, возникает магнитное поле (рис.4.9,а). Магнитный поток, возбуждаемый током в проводнике, определяется по известной формуле: $\Phi = LI$, где L – индуктивность проводника, т.е. его способность концентрировать магнитный поток. Представление о порядке величины индуктивности прямого отрезка провода дает табл. 4.3.

Таблица 4.3

Индуктивность прямого провода

Диаметр провода, мм	L , мкГн при длине провода, мм		
	50	100	200
0,1	0,07	0,15	0,33
0,5	0,05	0,12	0,26
1,0	0,04	0,1	0,23

Переменное магнитное поле по закону электромагнитной индукции возбуждает в других проводниках, находящихся в этом поле, э.д.с. наводки. Сама по себе э.д.с. наводки, которую можно измерить между концами проводника-приемника, вызовет негативное действие, если этот проводник образует замкнутый контур, в котором может протекать ток, и этот ток создает на входном сопротивлении приемника напряжение наводки.

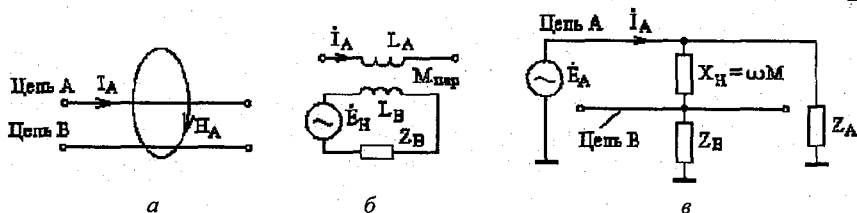


Рис. 4.9. Схемы паразитной индуктивной связи

Эквивалентная схема, позволяющая определить значение напряжения наводки на входе приемника, приведена на рис.4.9,в.

Величина M , присутствующая в схемах на рис.4.9,б и рис. 4.9,в, – это взаимоиנדукция, определяющая степень индуктивной связи между источником и приемником наводки. Значения взаимоиנדукции (в микрогенри) между параллельными проводниками в зависимости от длины проводников и расстояния между ними, приведены в табл. 4.4.

Таблица 4.4

Взаимоиндукция проводов

Длина провода, мм	Расстояние между проводами, мм		
	2	10	30
50	0,03	0,015	0,008
100	0,07	0,04	0,024
200	0,17	0,11	0,07

Из эквивалентной схемы рис. 4.9,б следует, что э.д.с. наводки составляет

$$\dot{E}_H = \dot{I}_H \omega M.$$

Напряжение наводки, на основе эквивалентной схемы рис. 4.9,в, определяется как

$$\dot{U}_H = \dot{E}_A \frac{Z_B}{X_H + Z_B}.$$

Из той же схемы, рис. 4.9, в, вытекает, что рассматриваемая паразитная связь – это также разновидность паразитной связи через общее сопротивление, которое целесообразно представить в комплексной форме Z .

4.1.4. Паразитная связь через электромагнитное поле и волноводная связь

Если внутренние размеры проводящего корпуса прибора сравнимы с длиной волны колебаний, создаваемых наводкой, можно рассматривать такой корпус как объемный резонатор или волновод. Анализировать картину распределения электромагнитного поля внутри объемного резонатора возможно методами теории цепей с распределенными параметрами. Паразитная связь в таком корпусе может возникнуть между элементами и узлами устройства, между которыми отсутствует заметная емкостная или индуктивная паразитная связь. Электромагнитное поле, возбужденное в одном конце протяженного короба, может распространяться как радиосигнал по волноводу на значительное расстояние и излучаться в окружающее пространство через отверстия и щели, как через антенны. Длина волны колебания, способного распространяться вдоль волновода, должна быть меньше некоторого критического значения, которое зависит от типа колебаний, возбуждаемых в волноводе. Для типа

волны H_{01} это значение составляет $\lambda_{кр} = 2b$, где b – размер большей стороны поперечного сечения волновода. Ослабление напряженности электромагнитного поля пропорционально первой степени длины пути распространения. Это приводит к тому, что наводка может быть воспринята на большем расстоянии от источника помехи, чем простая емкостная или индуктивная наводка. Элементы схемы функционального узла, имеющие форму штыря, воспринимают электрическую составляющую E поля наводки; элементы, образующие петли, подвержены действию магнитной составляющей H .

4.1.5. Наводка от скачка постоянного напряжения или тока

В схему сложных радиоэлектронных функциональных узлов могут одновременно входить мощные импульсные или ключевые каскады и высокочувствительные усилительные каскады, на которых скачки напряжения или тока, создаваемые мощными каскадами, по цепям паразитной связи могут вызвать наводки. В частности, в резонансных усилителях происходит так называемое ударное возбуждение колебательных контуров. Особенно сильно оно проявляется в высокочувствительных многокаскадных усилителях.

Для того чтобы оценить возможное напряжение наводки, воспользуемся спектральным представлением.

Известно, что частотный спектр идеального скачка напряжения величиной E_0 выражается как

$$S(\omega) = E_0 \int_{-\infty}^{\infty} \sigma(t - t_0) e^{-j\omega t} dt = \frac{E_0}{j\omega} e^{-j\omega t_0}. \quad (4.1)$$

Модуль спектра (рис. 4.10,а) составляет

$$|S(\omega)| = \frac{E_0}{\omega}, \text{ т.е. мы имеем дело со спектральной плотностью в}$$

бесконечной полосе частот (рис. 4.10).

Любая электронная цепь является, по существу, фильтром, пропускающим сигнал в определенной полосе частот. В частности, в резонансном усилителе (рис 4.10,б) энергия, заключенная в полосе частот $2\Delta\omega$, вызовет затухающие колебания с частотой, близкой к частоте настройки колебательных контуров усилителя.

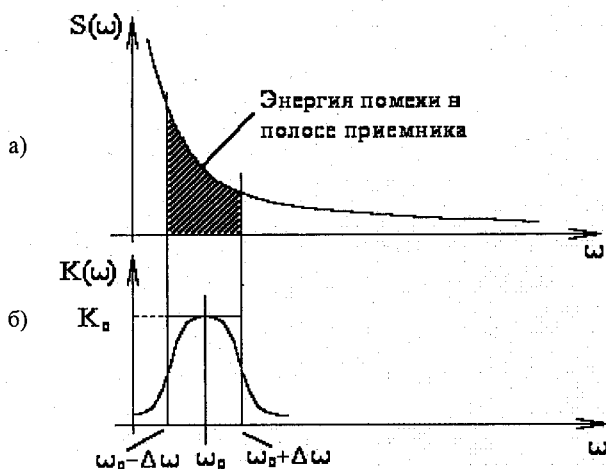


Рис. 4.10. Формы спектра скачка напряжения (а) и АЧХ приемника (б)

Реальная импульсная помеха имеет вид не идеального скачка (функции Хевисайда), а более или менее быстро нарастающего процесса. Скорость нарастания характеризуется так называемым временем установления (t_y) до уровня $0,9E$. При этом верхняя граница частотного спектра определяется как

$$f_B = \frac{0,35}{t_y}.$$

Так, например, при времени установления $t_y = 10$ нс верхняя граница спектра составляет $f_B = 35$ МГц.

В случае идеальной прямоугольной частотной характеристики приемника наводки с коэффициентом передачи K_0 напряжение наводки на нем составит

$$e_H(t) = \frac{2}{\pi} \cdot K_0 E_{\Sigma} \cdot \frac{\Delta f}{f_0} \cdot \frac{\sin \Delta \omega t}{\Delta \omega t} \cdot \sin \omega_0 t. \quad (4.2)$$

4.1.6. Скачок переменного напряжения как источник наводки

Импульсные модуляторы и радиопередатчики вырабатывают так называемые радиоимпульсы — сигнал в виде пакета синусои-

дальних волн. При большой мощности такого сигнала он также может по путям паразитной связи оказать воздействие на высокочувствительные функциональные узлы. Как и в предыдущем случае, рассмотрим воздействие такой помехи на резонансный усилитель, а затем сравним действие скачков постоянного и переменного напряжения. Для простоты рассмотрим случай только включения переменного напряжения и оценим возникающую наводку. Математически включение сигнала переменного тока описывается как произведение

$$u_H(t) = E_m \sigma(t) \sin \omega_{01} t.$$

Будем искать напряжение наводки, также основываясь на спектральном представлении. Известно, что частотный спектр сигнала, который описывается произведением двух функций, есть свертка спектров этих функций:

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} S_1(\nu) S_2(\omega - \nu) d\nu. \quad (4.3)$$

Входящий в выражение (4.3) сомножитель есть спектр единичного скачка – выражение (4.1). Второй сомножитель, $S_2(\omega)$ – это частотный спектр гармонического колебания, представляющий собой пару δ -функций на частотах ω_{01} и минус ω_{01} :

$$S_2(\omega) = \frac{1}{2} \delta(\omega - \omega_{01}) + \frac{1}{2} \delta(\omega + \omega_{01}). \quad (4.4)$$

Решение выражения (4.3) основывается на использовании фильтрующего свойства δ -функции:

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(u) \delta(u - u_0) du = f(u_0). \quad (4.5)$$

Подставляя (4.4) в (4.3), с учетом соотношения (4.5), получаем спектральную плотность скачка синусоиды:

$$S(\omega) = \frac{1}{2} S_1(\omega - \omega_{01}) + \frac{1}{2} S_1(\omega + \omega_{01}), \quad (4.6)$$

т.е. это два “полуспектра” – смещенный по оси частот к частоте синусоидального колебания ω_{01} спектр (4.1) и он же, отраженный зеркально от частоты ω_{01} (рис. 4.11,а). Спектральная плотность реального сигнала с ограниченной мощностью, конечно же, не имеет разрыва на частоте ω_{01} , хотя пик спектральной плотности на частоте помехи может достигать значительной величины.

Воздействие помехи с таким частотным спектром зависит от настройки – разности частоты настройки колебательных контуров усилителя и частоты помехи, $\omega_0 - \omega_{01}$. В случае прямоугольной частотной характеристики приемника наводки напряжение наводки составляет

$$e_{H\sim}(t) = \frac{2}{\pi} E_{m\sim} K_0 \Delta\omega \frac{\omega_{01}}{\omega_{01}^2 - \omega_0^2} \cdot \frac{\sin \Delta\omega t}{\Delta\omega t}. \quad (4.7)$$

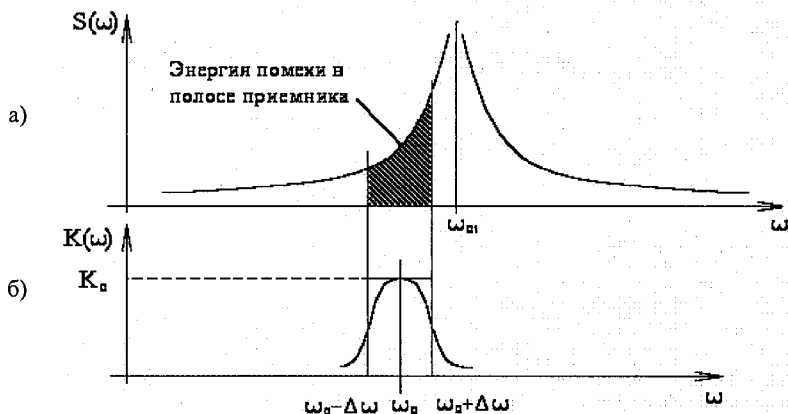


Рис. 4.11 Форма зеркальной составляющей частотного спектра скачка напряжения (а) и АЧХ приемника помехи (б)

Сравним теперь выражения (4.2) и (4.7):

$$\frac{E_{H\sim}}{E_{H\sim}} = \frac{f_{01}^2 - f_0^2}{f_0 f_{01}}. \quad (4.8)$$

Результат сравнения зависит от взаимной настройки приемника наводки и частоты f_{01} помехи. Если $f_{01} > f_0$, то числитель выражения (4.8) всегда больше знаменателя. Это означает, что:

- в стороне от частоты настройки резонансной системы опаснее (больше по величине) наводка от скачка постоянного напряжения или тока;
- при совпадении частоты помехи с частотой настройки резонансной системы опаснее наводка от скачка переменного напряжения или тока.

4.2. Экранирование в РЭС

Подавление паразитных наводок в большинстве случаев сводится к устранению или ослаблению до допустимых величин паразитных связей между источниками и приемниками наводок.

Разъясним основные термины.

Экранирование — локализация электромагнитной энергии в пределах определенного пространства.

Экран — часть конструкции прибора, предназначенная для выполнения экранирования. Экран является существенной частью конструкции почти любого радиотехнического прибора. Радиональное экранирование является одной из важнейших задач конструкторского проектирования. Неудачное решение этой задачи приводит к ухудшению технических характеристик, несоответствию их расчетным, усложнению и удорожанию изделий.

К сожалению, определение необходимости той или иной степени экранирования конкретного узла РЭС, как и достаточности того или иного вида экрана, не поддается строгому техническому расчету. Дело в том, что для строгого инженерного анализа паразитных процессов следовало бы решать, в частности, полевые задачи, связанные с возбуждением и распространением электромагнитной энергии в объемных резонаторах и волноводах сложной формы, с неоднородным заполнением и многими источниками возбуждения. Учесть влияние всех этих источников, взаимодействие и распространение всех создаваемых ими излучений практически невозможно. Возможно достаточно строгое решение лишь простейших задач.

Вследствие этого единственным технически осуществимым способом нахождения рациональной конструкции экрана является эксперимент. Но и здесь приходится сталкиваться с большими трудностями. Экран часто представляет собой сложную и неотъемлемую часть конструкции прибора: кожух, перегородки, крышки,

фильтрующие ячейки для ввода и вывода проводников и т.п. Изменение конструкции экрана, оказавшегося неэффективным, может привести к сложным переделкам, вплоть до разработки новой конструкции прибора в целом.

Поэтому от специалиста, работающего в этой области, требуется ясное понимание физического действия каждой детали экрана и ее относительного значения во всем комплексе.

Далее мы ознакомимся с достижениями наших предшественников, чтобы избежать тех ошибок, которые в свое время довелось совершить им.

Итак, можно различать 4 вида электромагнитных связей, которые могут возникнуть между двумя электрическими цепями, находящимися на некотором расстоянии друг от друга:

- 1) через электрическое поле (емкостная);
- 2) через магнитное поле (индуктивная);
- 3) через электромагнитное поле излучения;
- 4) через провода, соединяющие эти цепи.

Ставить задачу “полного” экранирования, т.е. такой степени подавления паразитных наводок, при которой паразитные поля за пределами экрана не могут быть обнаружены известными способами измерений, как правило, не нужно. В большинстве случаев требования к эффективности экранирования могут быть сильно понижены. Для этого нужно представлять себе, насколько значителен вклад каждого из четырех рассмотренных видов помех.

Напряженность ближнего электрического и магнитного полей в свободном пространстве обратно пропорциональна квадрату расстояния от элемента, возбуждающего поле.

Напряженность электромагнитного поля излучения обратно пропорциональна первой степени расстояния от излучателя.

Напряжение на конце проводной линии или волновода с расстоянием падает мало (характеристикой таких линий является затухание на единицу длины), за исключением случая стоячих волн, когда по длине линии имеют место пучности и узлы, в которых напряженность поля или напряжение на линии существенно различаются.

Отсюда следует, что на малых расстояниях действуют все четыре вида связи, а на больших — преимущественно паразитная связь по проводам и волноводная паразитная связь.

4.2.1. Экранирование электрического поля

Паразитная связь через электрическое поле может быть названа емкостной связью (рис. 4.12).

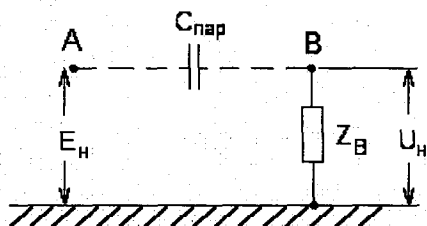


Рис. 4.12. Паразитная связь через электрическое поле

Если источник наводки вырабатывает в точке А э.д.с. наводки $\dot{E}_H^*$, в точке расположения приемника наводки (В) будет действовать напряжение наводки

$$\dot{U}_H = \dot{E}_H \frac{Z_B}{Z_B + X_{\text{ПАР}}}$$

В случае емкостной связи $X_{\text{ПАР}} = \frac{1}{j\omega C_{\text{ПАР}}}$ чем больше паразитная емкость, тем больше напряжение наводки.

Поместим между точками А и В металлическую пластину (рис. 4.13,а) и попытаемся оценить, как меняется напряжение наводки.

Для простоты будем считать, что входное сопротивление приемника наводки чисто емкостное.

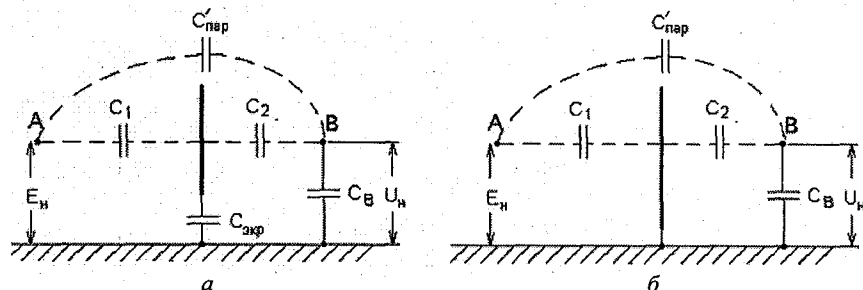


Рис. 4.13. Влияние металлической пластины: а) незаземленной, б) заземленной.

Экран не заземлен, а имеет на землю емкость C_3 .

При таких условиях паразитная емкость между источником и приемником наводки состоит из двух последовательных емкостей, C_1 и C_2 . Значение каждой из этих емкостей может быть больше исходной паразитной емкости, однако, как будет вскоре показано, и при этих увеличившихся значениях может быть достигнут положительный эффект. Нельзя также полностью исключить остаточную емкостную связь источника и приемника наводки по каким-то дальним путям, однако ее вкладом в новую наводку будем пренебрегать.

В приведенной на рис. 4.13,а конфигурации помеха в точку В наводится с экрана. Значение комплексной амплитуды наводки составляет

$$\dot{U}_H = \dot{U}_3 \frac{C_2}{C_B + C_2},$$

где напряжение на экране $\dot{U}_3 = \dot{E}_H \frac{C_1}{C_1 + C_3}$,

отсюда

$$\dot{U}_H = \dot{E}_H \frac{C_1 C_2}{(C_1 + C_3)(C_B + C_2)}.$$

Рассмотрим три варианта.

1. Емкость экрана на землю мала по сравнению с емкостью C_1 , а емкость C_2 значительно больше исходной паразитной емкости $C_{\text{ПАР}}$. Из первого допущения следует, что напряжение наводки на экране становится близким к э.д.с. наводки, $U_3 \approx E_H$, а из второго можно предположить, что напряжение наводки на входе приемника может превышать напряжение наводки в отсутствие экрана.

2. Емкость экрана на землю значительно превышает любую из емкостей C_1, C_2 . В этом случае напряжение наводки на экран значительно меньше э.д.с. наводки; наводка же с экрана на вход приемника наводки дополнительно ослабляется за счет деления на емкостях C_2, C_B .

3. Экран накоротко замкнут на землю (рис. 4.13,б). При этом напряжение наводки на экран становится равным нулю; через паразитную емкость C_2 вход приемника наводки также заземляется, и единственным путем проникновения наводки является "обходной"

путь через паразитную емкость $C'_{\text{ПАР}}$, которая значительно меньше исходной паразитной емкости.

Отметим, что замыкающая перемычка должна иметь как можно меньшее активное сопротивление и индуктивность. Если она будет иметь заметную индуктивность, это чревато появлением в цепи экрана паразитного колебательного контура. Если резонанс в этом контуре попадает в полосу частот передаваемого сигнала, ситуация с наводками резко ухудшается.

Представим себе, что источник и приемник наводки находятся внутри заземленного замкнутого металлического корпуса, который мы хотим закрыть крышкой, с целью защиты от внешних наводок (рис. 4.14). Всегда ли такая крышка приносит пользу? Оказывается — не всегда.

Если крышка плотно закрыта и электрически замкнута на корпус экранируемого отсека (рис. 4.14, б), паразитные емкости C_1 и C_2 между выходом источника и входом приемника наводки и крышкой не составляют дополнительного канала проникновения наводки и напряжение помехи определяется выражением:

$$\dot{U}_H = \dot{E}_H \frac{C_{\text{ПАР}}}{C_B + C_2}.$$

Если же крышка не замкнута накоротко на корпус, а соединяется с ним через емкость $C_{\text{КР}}$ (рис. 5.13, а), все зависит от соотношения этой емкости и емкостей источника и приемника наводки на крышку, C_1 и C_2 . В частности, если эти емкости значительно больше исходной паразитной емкости $C_{\text{ПАР}}$, это обуславливает увеличение паразитной емкости источника на приемник

$$C_{\text{АВ}} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \gg C_{\text{ПАР}}.$$

Если емкость крышки на корпус меньше этой новой емкости $C_{\text{КР}} \ll C_{\text{АВ}}$, наводка возрастает. Специалистам-радиотехникам знаком эффект, когда при поднесении руки к открытому монтажу наводки возрастают. Это как раз тот самый случай.

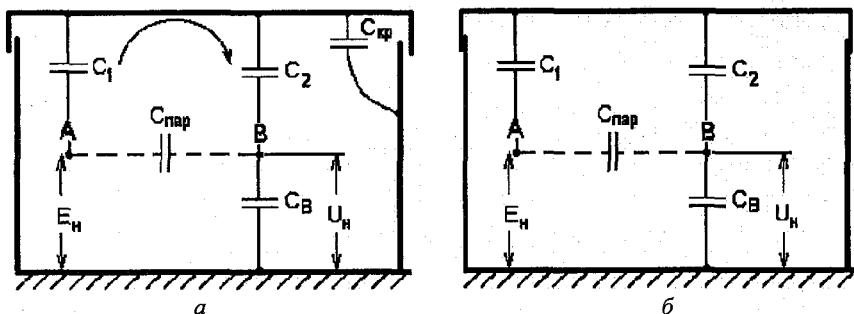


Рис. 4.14. Влияние крышки: а) не замкнутой; б) замкнутой электрически на заземленный металлический корпус.

Таким образом, для экранирования электрического поля следует применять металлические перегородки и кожухи, соединенные с металлическим корпусом прибора или общим проводом схемы. От качества присоединения существенно зависит эффективность экранирования. Особенно важно не иметь длинных соединительных проводников, так как их индуктивное сопротивление, особенно на высоких частотах, оказывает влияние, противоположное влиянию емкостей. В худшем случае индуктивность соединительных проводников может образовать с паразитными емкостями колебательный контур с резонансом на частоте, близкой к частоте передаваемого сигнала, что вызовет существенные искажения.

Отверстия и щели в электростатическом экране не оказывают существенного влияния на эффективность экранировки, если их размеры малы по сравнению с длиной волны передаваемых сигналов. Если размеры отверстия или щели сравнимы с длиной волны передаваемого сигнала, то они становятся антеннами-излучателями для поля, действующего внутри экранируемого объема или приемниками внешних полей. В результате эффективность экранирования резко снижается.

Эффективность экранирования электрического поля практически не зависит от толщины экрана. Это объясняется тем, что токи, текущие по экрану, во-первых, невелики, во-вторых, текут по поверхности из-за скин-эффекта, а сопротивление экрана и корпуса всегда меньше емкостного сопротивления цепей паразитной связи.

4.2.2. Принципы экранирования магнитного поля

Задачей экранирования магнитного поля является устранение или уменьшение магнитной связи между цепями или узлами, приводящее к ослаблению возбуждаемых в приемнике э.д.с. и токов.

Экранирование постоянного или низкочастотного магнитного поля (шунтирование магнитного поля экраном). От постоянного или низкочастотного магнитного поля защищаются экранами из ферромагнитного материала с большой относительной магнитной проницаемостью (рис. 4.15). Существуют сплавы с магнитной проницаемостью до 800000.

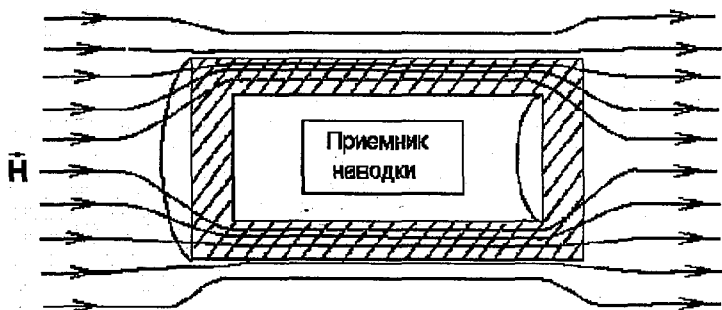


Рис. 4.15. Шунтирование магнитного поля ферромагнитным экраном из магнитомягкого материала.

При использовании такого экрана силовые линии внешнего магнитного поля концентрируются в стенках экрана. В стенках экрана проходит в μ раз большая часть общего магнитного потока, чем проникает во внутренний объем экрана, где располагается приемник наводки. И наоборот, если внутри экрана располагается источник наводки, только в μ раз меньшая часть общего магнитного потока, создаваемого источником, попадает во внешнее пространство.

Качество экранирования зависит от толщины стенок экрана, магнитной проницаемости материала экрана и будет тем выше, чем меньше в экране стыков и щелей, идущих поперек линий магнитной индукции.

Экранирование переменного высокочастотного магнитного поля. Можно ли пользоваться для этого тем же приемом, что и для статического поля? Можно, но такой способ на практике не при-

меняется. Почему? Дело в том, что с гораздо большим эффектом на высоких частотах можно воспользоваться процессами, связанными с действием закона электромагнитной индукции.

Известно, что переменное магнитное поле, пересекая проводник, возбуждает в нем э.д.с. тем большую, чем выше скорость изменения магнитного потока или, что то же самое, частота переменного поля. Эта э.д.с., в свою очередь, вызывает в теле проводника переменные электрические токи – так называемые вихревые токи или токи Фуко. Магнитное поле этих токов внутри проводника направлено против возбуждающего поля, а вне его – согласно с возбуждающим полем. Это то же самое, что и скин-эффект для переменного высокочастотного тока – вытеснение тока в поверхностный слой проводника (рис. 4.16).

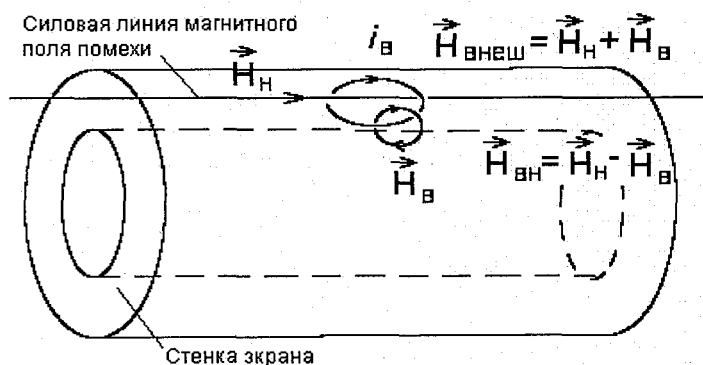


Рис. 4.16. Экранирование высокочастотного магнитного поля за счет вихревых токов в экране-проводнике.

Плотность вихревых токов и напряженность магнитного поля внутри проводника падает по экспоненциальному закону (рис. 4.17):

$$\Delta(x) = \Delta_s e^{-\frac{x}{x_0}}.$$

$x_0 = \sqrt{\frac{\rho}{\mu_0 \mu f}}$ – эквивалентная глубина проникновения тока в мате-

риал проводника, где $\mu_0 = 1,256 \cdot 10^8$ Гн/см – магнитная проницаемость вакуума; μ – относительная магнитная проницаемость мате-

риала проводника; ρ – удельное сопротивление проводника, Ом·см; f – частота, Гц.

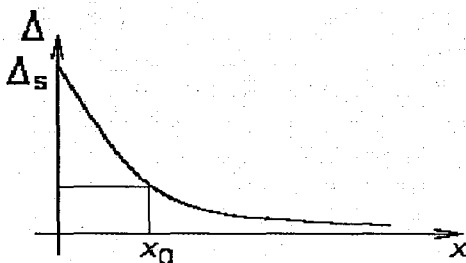


Рис. 4.17. Эффективная глубина проникновения тока в металлический проводник.

Например, для электротехнической меди (с высокой степенью очистки) $x_0 = \frac{66}{\sqrt{f}}$ мкм, где частота (МГц), т.е. при $f = 1$ МГц $x_0 = 66$ мкм.

Приведем сведения о значении эффективной глубины проникновения тока у различных металлов (см. табл. 4).

Таблица 4.5

Эффективная глубина проникновения тока в металлы и сплавы

Металл	ρ , $\frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$	μ	F , Гц	x_0 , мм
Медь	0,0175	1	106	0,067
Алюминий	0,03	1	106	0,088
Сталь	0,1	200	105	0,035
Пермаллой	0,65	12000	105	0,012

Что следует из приведенных данных?

1. Применение толстостенных ферромагнитных экранов для экранирования переменного электромагнитного поля не имеет никакого смысла, так как глубина проникновения высокочастотного магнитного поля в толщу металла крайне мала.

2. Если экран выполнен из ферромагнитного материала, то, при прочих равных условиях, в нем индуцируется большая э.д.с. благодаря более высокой концентрации магнитных силовых линий. При одинаковой с немагнитным материалом удельной электропроводно-

сти в ферромагнетике наводятся большие по величине вихревые токи, в результате чего глубина проникновения внешнего магнитного поля будет меньше, чем у немагнитного материала. К сожалению, такие высокоэлектропроводные ферромагнетики в природе и в технике неизвестны.

3. Тонкостенные экраны из ферромагнетиков могут применяться для экранирования высокочастотных магнитных полей. Однако, во-первых, высокая магнитная проницаемость у этих материалов имеет место в ограниченном диапазоне частот (см. табл. 4.5), за пределами которого она снижается, и глубина проникновения тока в материал экрана растет. Во-вторых, из-за высокого удельного электрического сопротивления ферромагнитных сплавов такой экран вносит в экранируемую цепь большие потери.

4. Хорошие результаты при экранировании высокочастотных полей можно получить, применяя экраны из немагнитных металлов и сплавов с высокой электропроводностью (медь, алюминий, латунь).

5. При выборе толщины материала для экрана следует исходить не столько из электрических свойств материала, сколько из соображений механической прочности, массы, жесткости, коррозионной стойкости, удобства стыковки отдельных частей и осуществления между ними переходных контактов с малым сопротивлением, условий пайки, сварки и т.д.

4.2.3. Одновременное экранирование электрических и магнитных полей

Сравним действие металлического экрана при экранировании электрического и магнитного поля.

- Токи, протекающие по экрану под действием магнитного поля, значительно больше, чем токи, вызванные емкостной наводкой, поскольку первые текут по короткозамкнутому поверхностному слою с малым сопротивлением, в то время как в цепь тока при электрическом экранировании всегда входит паразитная емкость.

- Эффективность электростатического экрана практически всегда определяется наличием короткого замыкания на корпус.

- Заземление магнитного экрана не оказывает никакого влияния на эффективность экранирования.

- Эффективность электростатического экранирования не зависит от частоты наводки (за исключением случая, когда экран заземляется через длинные соединительные проводники).

- Эффективность магнитного экранирования целиком зависит от частоты наводок: чем частота ниже, тем толще должны быть стенки экрана.

Сформулируем ряд правил, соблюдение которых позволяет сконструировать хорошо действующий экран.

1. Внутри идеального проводника не могут действовать переменные электрические и магнитные поля. В реальном проводнике скин-эффект является существенным явлением, определяющим эффект экранирования.

2. Если в отверстие в экране пропустить провод с высокочастотным током, в поверхности экрана возбуждаются токи такого направления и такой силы, что сумма токов, протекающих через поперечное сечение отверстия, должна быть равна нулю. Это приводит к возникновению блуждающих токов в экране при наличии перегородок, разделяющих экран на отсеки (рис. 4.18).

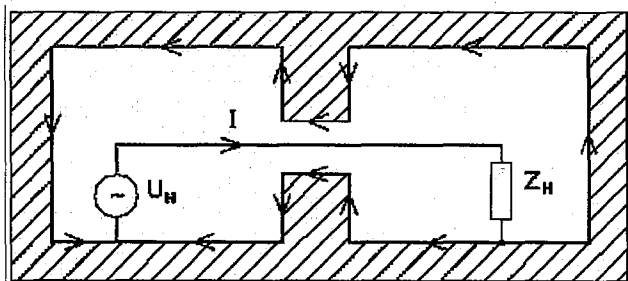


Рис. 4.18. Блуждающие токи в экране с перегородками.

3. Если на пути переменного магнитного потока установлен лист из идеального проводника с отверстием, то суммарный поток, выходящий из отверстия и входящий обратно, должен быть равен нулю. Такое отверстие может стать излучателем или приемником наводки. Если диаметр или другой размер отверстия значительно меньше длины волны колебания, вызывающего наводку, влияние отверстия остается незначительным.

4. Длинные и узкие щели, допустимые в электрическом экране, могут оказаться опасными в магнитном экране, если эти щели рас-

полагаются поперек направления вихревых токов. Отсюда вытекает рекомендация: соединять корпус и крышку экрана, не допуская щелей, по размеру больших, чем $0,1 \dots 1\%$ длины волны колебания, вызывающего наводку.

5. Общая крышка на экран из нескольких отсеков должна конструироваться так, чтобы каждый из отсеков образовывал электрически замкнутый объем (с помощью пружинящих губок, захватывающих стенки отсеков и т.п.).

4.2.4. Экранирование высокочастотных катушек

Распространенным узлом радиотехнических устройств являются колебательные контуры, а их неотъемлемой частью — катушки индуктивности. Для защиты высокочастотных катушек от наводок обычно применяются экраны из высокоэлектропроводных немагнитных металлов.

Физика действия такого экрана рассмотрена выше. Кроме полезного эффекта, о котором уже говорилось, экран оказывает также и вредное влияние на параметры экранируемого колебательного контура. Это влияние состоит в том, что экран, находящийся в создаваемом катушкой высокочастотном магнитном поле, представляет собой короткозамкнутый виток, индуктивно связанный с катушкой взаимной индукцией $M_{\text{эк}}$ (рис. 4.19).

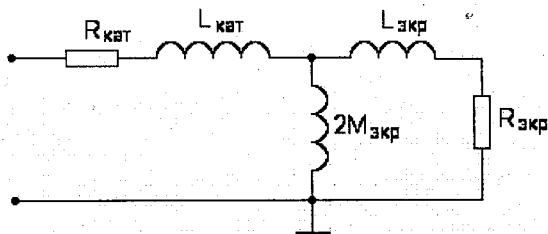


Рис. 4.19. Эквивалентная схема индуктивной связи экрана и экранируемой катушки индуктивности.

Возникающие в экране вихревые токи приводят к рассеиванию на активном сопротивлении экрана некоторой мощности. Поскольку этой мощности взяться неоткуда, кроме как из поля экранируемой катушки, получается, что экран вносит в экранируемую цепь некоторое сопротивление потерь. Это сопротивление, известное в

теории связанных цепей как вносимое сопротивление, тем больше, чем больше удельное сопротивление материала экрана и чем сильнее связь экрана с катушкой. А связь тем сильнее, чем меньше расстояние между катушкой и экраном.

Поэтому, чтобы не внести в экранируемую цепь (колебательный контур) слишком большое затухание, следует выбирать размеры экрана так, чтобы расстояние между экраном и катушкой со всех сторон было не меньше половины диаметра катушки. Для цилиндрического экрана (рис. 4.20) минимальный диаметр должен быть $D_{\text{ЭК min}} \geq 2D_{\text{КАТ}}$, а минимальная длина $l_{\text{ЭК min}} \geq l_{\text{КАТ}} + D_{\text{КАТ}}$.

В случае применения экрана квадратного сечения сторона квадрата может быть меньше диаметра круглого экрана:

$$a = \frac{D_{\text{ЭК}}}{1,2}.$$

Толщина стенок экрана должна быть такой, чтобы плотность тока в толще стенок падала до 0,01 от поверхностной плотности. Это произойдет, если толщина будет превышать эквивалентную глубину проникновения тока более чем в 4,6 раза: $d > 4,6x_0$.

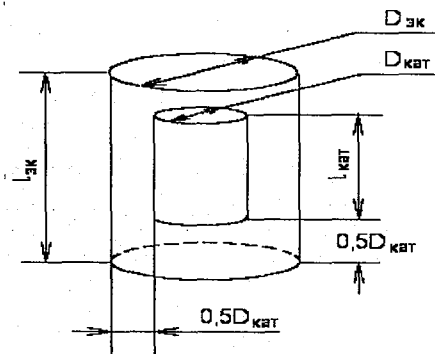


Рис. 4.20. Рекомендуемое соотношение размеров экрана и катушки индуктивности.

Одними потерями дело не ограничивается. По закону электромагнитной индукции наведенная в экране э.д.с. самоиндукции вызывает в экране вихревые токи, препятствующие причине, их порождающей. Это приводит к уменьшению магнитного потока, созда-

ваемого экранируемой катушкой, т.е. к уменьшению ее индуктивности. По-другому это называется размагничивающим действием вихревых токов.

Опыт показывает, что при длине катушки $l_{\text{КАТ}} = (1...3)D_{\text{КАТ}}$ применение экрана указанных выше размеров приводит к снижению индуктивности катушки на 15...18%.

Что касается вносимого экраном затухания, то для медного экрана оно составляет $d_{\text{ЭК}} = \frac{R_{\text{ЭК}}}{\omega L_{\text{КАТ}}} = 3 \cdot 10^4$.

Для экранов из других материалов может использоваться эмпирическая формула

$$d_{\text{ЭК}} = 3 \cdot 10^4 \sqrt{\frac{10^6}{f} \cdot \frac{\rho}{\rho_{\text{М}}}},$$

где f – рабочая частота, Гц;

$\rho_{\text{М}} = 0,017 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$ – удельное сопротивление меди;

ρ – удельное сопротивление материала экрана.

Следует также помнить о сопряжении дна или крышки с цилиндром экрана, о швах и окнах в его стенках. Окон невозможно избежать, поскольку катушка нуждается в электрическом соединении, т.е. изнутри экрана должны выходить провода. Кроме того, часто приходится подстраивать значение индуктивности при наладке функционального узла. Для этого тоже нужны окна в экране (рис. 4.21). Как уже говорилось, окна, вырезы и щели в экране не должны препятствовать протеканию вихревых токов. В частности, недопустимы продольные щели, специально прорезанные или возникающие из-за неконтакта металла в швах. Щели, параллельные основанию цилиндра допустимы, если, конечно, они не отрезают полностью дно экрана.

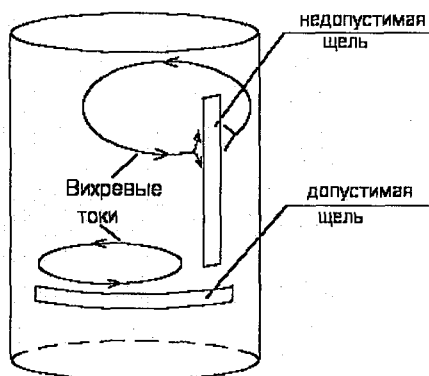


Рис. 4.21. Расположение окна и щели в экране с учетом направления токов.

Для того чтобы не было проблем с продольными швами, экраны для высокочастотных катушек изготавливаются обычно холодной штамповкой.

4.2.5. Экранирование низкочастотных и силовых трансформаторов

В трансформаторах с броневым ферромагнитным сердечником подавляющая доля низкочастотного магнитного потока концентрируется в магнитопроводе. Это означает, что по отношению к магнитным наводкам такой сердечник ведет себя так же, как магнито-статический экран, рассмотренный выше. Только малая часть общего магнитного потока, называемая потоком рассеяния, вырывается во внешнее пространство.

Чтобы этот поток не создавал наводок на находящиеся рядом с трансформатором чувствительные к магнитной наводке цепи, трансформатор приходится экранировать. И наоборот, в силу принципа обратимости, низкочастотный трансформатор может оказаться приемником внешней магнитной наводки. Такая наводка может быть опасной, если трансформатор, например, входит в схему предварительного каскада усилителя звуковой частоты.

В качестве материала для экрана в таком случае применяется мягкая электротехническая сталь или пермаллой, т.е. сплавы с высокой магнитной проницаемостью и относительно низким удельным сопротивлением.

Данные по этим параметрам приводились выше в табл. 4.5. Частотный диапазон, в котором реализуются приведенные параметры, ограничивается для ферромагнитных материалов частотами порядка 50...100 кГц. Для ослабления низкочастотных наводок ферромагнетики вполне пригодны.

Конструирование экранов для трансформаторов мало отличается от конструирования экранов из немагнитных металлов для высокочастотных катушек. Форма экрана чаще прямоугольная.

Окна для ввода проводников выполняются так же, как в высокочастотных экранах. Необходимо учитывать направление силовых линий магнитного поля рассеяния трансформатора или внешней наводки.

Штамповкой экран из ферромагнетика получить труднее, чем экран из меди или алюминия, поэтому для получения короба в основном применяется клепка или сварка — точечная либо шовная.

Для устранения наклепа, возникающего при слесарной обработке, необходим отжиг. Отжиг выполняется в специальных печах при температуре 600...800°C в атмосфере водорода или инертного газа.

Обращаться с отожженным экраном следует очень осторожно, чтобы в нем вновь не возникли механические напряжения или остаточные деформации, которые ухудшат эффективность экранирования.

Для расширения частотного диапазона, в котором сохраняется высокая эффективность экранирования, применяются многослойные экраны, в конструкции которых чередуются слои из ферромагнитных сплавов и слои из меди, латуни или алюминия.

4.2.6. Экранирование проводов

В пространстве, окружающем провод, который соединяет генератор переменного напряжения U с нагрузкой Z_H , создается переменное электрическое и магнитное поле (рис. 4.22, а).

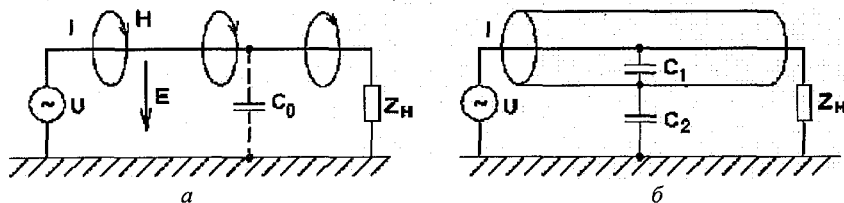


Рис. 4.22. Электромагнитное поле провода:

а) неэкранированного, б) экранированного незаземленного.

Эти поля могут явиться источником наводок на окружающие провода и другие элементы принципиальной схемы прибора.

Будем исследовать возможные способы предотвращения электрической и магнитной наводок.

Окружим провод проводящей оболочкой и посмотрим, что получится.

Если оболочку не заземлить (рис. 4.23, б), никакого эффекта она не даст: емкость C_0 провода на землю или на другие элементы схемы разобьется на две последовательные емкости C_1 и C_2 , каждая из которых больше исходной емкости C_0 , так как от провода до оболочки ближе, чем от него до приемников наводки, а от оболочки до приемников — тоже ближе, да к тому еще площадь поверхности оболочки больше, чем голого провода.

Можно считать, что результирующее значение получившейся емкости примерно равно исходной емкости C_0 :

$$C_{\text{ЭКВ}} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \approx C_0.$$

С магнитным полем, если только оболочка не является магнитостатическим экраном, тоже ничего не происходит.

Заземление оболочки замыкает накоротко емкость C_2 . При этом увеличивается емкостной ток через C_1 , мимо нагрузки Z_H , т.е. увеличивается нагрузка на генератор полезного сигнала (рис. 4.23, а).

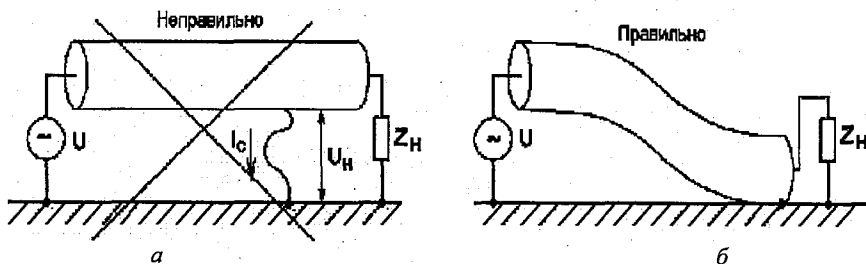


Рис. 4.23. Способы заземления экранированной оболочки провода

Чтобы электрическое поле во внешнем пространстве ослабло до пренебрежимо малого уровня, заземлять оболочку нужно в единственной точке — у нагрузки и не допускать при этом длинных соединительных проводников, на которых емкостной ток может соз-

дать падение напряжения U_H , которое создаст наводки на внешние приемники (рис. 4.23, б).

Посмотрим, как можно устранить магнитную наводку. Для того чтобы в окружающем экранированный провод пространстве не создавалось магнитное поле, необходимо, чтобы обратный ток к генератору сигнала полностью протекал по оболочке. При этом магнитный поток, создаваемый прямым током по проводу, будет равен магнитному потоку, создаваемому обратным током, и

$$\Phi_{\text{пр}} - \Phi_{\text{обр}} = 0.$$

Это достигается, при условии, что оболочка-экран является единственным проводником, соединяющим корпуса отсеков, в которых расположены источник и приемник полезного сигнала (рис. 4.24).

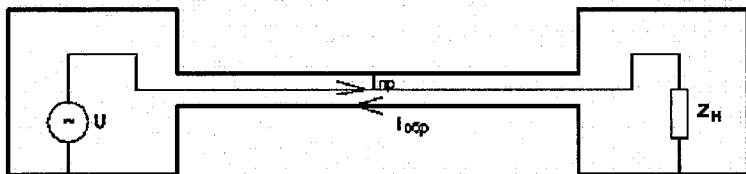


Рис. 4.24. Схема устранения магнитной наводки за счет симметрии токов.

Дополнительное соединение корпусов отсеков или случайное частичное замыкание оболочки (рис. 4.25) может привести к тому, что часть обратного тока потечет по пути с наименьшим электрическим сопротивлением, и симметрия прямого и обратного токов нарушится, что приведет к появлению во внешнем пространстве разностного магнитного потока.

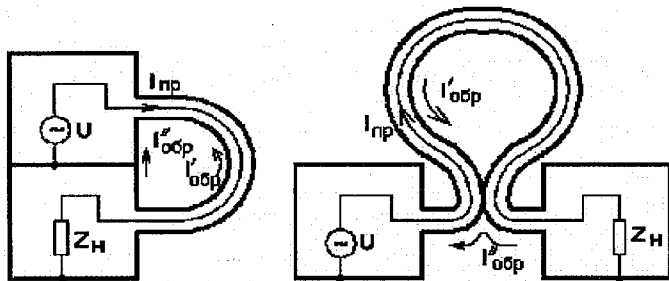


Рис. 4.25. Варианты нарушения симметрии токов.

Этот эффект наиболее опасен на низких частотах.

На высоких частотах из-за скин-эффекта обратный ток протекает преимущественно по тонкому скин-слою внутри оболочки. При толщине оболочки, более чем в 5 раз превышающей эффективную глубину проникновения тока x_0 (см. рис. 4.17), ток на внешней поверхности оболочки составляет менее 1% от полного обратного тока. Этот ток создает во внешнем пространстве настолько малую напряженность магнитного поля наводки, что на частотах выше 10 МГц ухудшения эффективности экранирования данным способом практически не наблюдается.

Какой длины может быть экранированный провод? Его длина должна быть меньше четверти длины волны колебания, соответствующей максимальной частоте спектра передаваемого сигнала:

$$l_{\text{ЭКР,МАХ}} < \frac{1}{4} \lambda_{\text{МИН}} = \frac{1}{4} \cdot \frac{c}{f_{\text{МАХ}}}, \text{ где } c = 3,108 \text{ м/с} - \text{ скорость света в сво-}$$

бодном пространстве. Это верхняя оценка. Скорость распространения электромагнитного колебания по проводным линиям связи, коаксиальным кабелям или волноводам с диэлектрическим заполнением приблизительно в $\sqrt{\epsilon}$ меньше, чем в свободном пространстве. Это означает, что допустимая длина экранированного провода должна быть еще в 2...3 раза меньше.

Если все же длина отрезка экранированного провода не может быть по конструктивным соображениям меньше этой допустимой величины, необходимо работать с таким проводом как с цепью с распределенными параметрами или длинной линией. Для эффективной передачи полезного сигнала по таким линиям в них должен быть обеспечен режим бегущей волны. Для этого необходимо найти волновое сопротивление нашей линии связи и согласовать его с выходным сопротивлением источника сигнала и с сопротивлением нагрузки.

Экран выполняется чаще всего в виде оплетки из тонкой медной проволоки, так называемой плетенки. Окна между проводами плетенки допускаются, но они должны быть по размеру также меньше четверти минимальной длины волны, иначе они будут работать как антенны, возбуждающие во внешнем пространстве электромагнитное излучение.

Не нарушая этих условий, можно добиться хорошего экранирования, применяя вместо экранированного провода двухпроводную линию, скрученную в шнур, так называемую витую пару.

Хорошим экранирующим эффектом обладают также плоские кабели, в которых сигнальные проводники чередуются с заземленными экранирующими проводниками.

Устройство таких линий связи конструктивно проще и дешевле применения по-настоящему экранированных проводников и коаксиальных кабелей, и они широко применяются в сложных устройствах импульсной и вычислительной техники на частотах до сотен мегагерц (100 МГц).

Все изложенное приводит нас к выводу, что применение экранированных проводов — это большое неудобство с негарантированным положительным эффектом.

Если речь идет о внутриблочном соединении, следует рассмотреть все возможные варианты устранения паразитных связей прежде, чем применять экранированные провода. Часто такой вариант удастся найти.

Таким образом, для экранированных проводов остается область применения в межблочном монтаже. При этом удастся:

- 1) освободиться от взаимных паразитных наводок внутри устройства, состоящего из нескольких блоков;
- 2) защитить многоблочные устройства от наводок со стороны других приборов;
- 3) защитить от наводок приборы, находящиеся в пространстве, окружающем наше многоблочное устройство.

Достижение этих целей целиком зависит от качества присоединения экранирующих оболочек соединительных кабелей к корпусам соединяемых приборов.

Количественной мерой эффективности действия экранов всех типов является отношение напряжения, тока или мощности наводки, имеющей место при наличии экрана, к напряжению, току или мощности наводки в отсутствие экрана. В радиотехнике обычно используется логарифмическая мера, исчисляемая в децибелах:

$$20\lg \frac{U_{\text{нэ}}}{U_{\text{но}}} \text{ или } 20\lg \frac{I_{\text{нэ}}}{I_{\text{но}}} \text{ при сравнении напряжений и токов навод-}$$

ки, либо $10 \lg \frac{P_{\text{нз}}}{P_{\text{но}}}$ – при сравнении мощностей. Определить эффективность проектируемого экрана аналитически чрезвычайно сложно, поэтому здесь приходится опираться на опыт предшествующих разработок, пользоваться указаниями, приводимыми в технической литературе, в отраслевых руководящих документах и справочниках, а также проводить экспериментальную проверку на макетах и опытных образцах изделий.

4.3. Развязка цепей и фильтрация напряжений в проводах

По проводам, передающим из блока в блок постоянные напряжения, могут возникнуть паразитные связи по переменному току, если источники этих напряжений имеют высокое выходное сопротивление, а приемники высокое входное сопротивление.

Для снижения напряжения высокочастотных наводок в цепи, независимо от того, экранируются они или нет, включаются так называемые развязывающие или фильтрующие ячейки, состоящие из сопротивлений $Z_1, Z_3, Z_5, \dots$, включенных последовательно и $Z_2, Z_4, Z_6, \dots$, включенных параллельно между проводом и заземленным корпусом или экраном (см. рис. 4.26).

Для фильтруемых частот величина последовательных сопротивлений должна быть большой, а параллельных – малой. Для постоянного тока или другого передаваемого по проводу низкочастотного сигнала последовательные сопротивления, наоборот, должны быть малы, а параллельные – велики. Этим условиям отвечает использование в последовательной цепи катушек индуктивности, а в параллельных ветвях – конденсаторов.

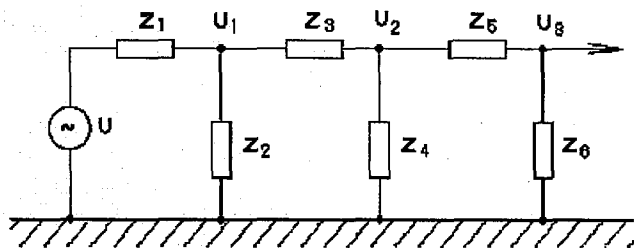


Рис. 4.26. Фильтрующая цепь.

Фильтрующая цепь представляет собой цепочку делителей напряжения. Выходное напряжение одной такой цепочки может быть найдено по приближенной формуле:

$$U_1 = U \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \approx U \frac{Z_2}{Z_1}.$$

Для двух ячеек

$$U_2 \approx U \frac{Z_2}{Z_1} \cdot \frac{Z_4}{Z_3} \text{ и т.д. для } n \text{ ячеек} \quad U_N \approx U \frac{Z_2 Z_4 Z_6 \dots Z_N}{Z_1 Z_3 Z_5 \dots Z_{N-1}}.$$

Степень подавления наводок при этом будет составлять:

$$M = \frac{Z_1 Z_3 Z_5 \dots Z_{N-1}}{Z_2 Z_4 Z_6 \dots Z_N}.$$

Применение катушек индуктивности само по себе еще не гарантирует высокой эффективности такого фильтра. Дело в том, что у катушек есть такой паразитный параметр, как межвитковая емкость. Межвитковая емкость образует с индуктивностью катушки колебательный контур. На некоторой частоте в таком контуре может возникнуть параллельный резонанс, при котором сопротивление последовательной ветви фильтра резко возрастает, что приводит к ослаблению эффективности фильтра. Поэтому следует подбирать катушки для фильтра таким образом, чтобы частота собственного параллельного резонанса у них была выше самой высокой из фильтруемых частот.

К конденсаторам фильтров также предъявляется ряд особых требований. В частности, конструкция должна быть безындукционной, поскольку индуктивность выводов также образует с емкостью конденсатора последовательный колебательный контур. При фильтрации в широком диапазоне частот используется параллельное включение бумажных конденсаторов относительно большой емкости, но с ограниченным частотным диапазоном, и слюдяных, металлопленочных или керамических конденсаторов малой емкости, обеспечивающих фильтрацию на верхней границе частотного диапазона.

При выборе схемы и разработке конструкции фильтрующих ячеек следует добиваться минимального количества деталей, уметь рационально выполнить конструкцию, в частности, монтаж ячеек. При плохом монтаже даже очень сложный фильтр может дать лишь незначительное ослабление наводок.

Рассмотрим такой пример фильтрующей ячейки с неудачно выполненным монтажом (рис. 4.27, а).

Пусть частота помехи составляет $f = 6$ МГц;

Индуктивности $L_1 = L_2 = L = 100$ мкГн;

Емкости конденсаторов $C_1 = C_2 = C = 0,05$ мкФ;

Выходное сопротивление источника сигнала $R_I = 100$ Ом.

Коэффициент подавления наводки, по приведенной выше формуле, должен составлять:

$$M = \frac{Z_1 Z_3 Z_5}{Z_2 Z_4 Z_6} = \frac{R_I \omega L_1 \omega L_2}{\frac{1}{\omega C_1} \cdot \frac{1}{\omega C_2} \cdot \frac{1}{\omega C_3}} = \omega^5 C^3 L^2 R_I =$$

$$= (2\pi)^5 6^5 \cdot 10^{30} \cdot 5^3 \cdot 10^{-24} \cdot 10^{-8} \cdot 10^2 \approx 10^{10}$$

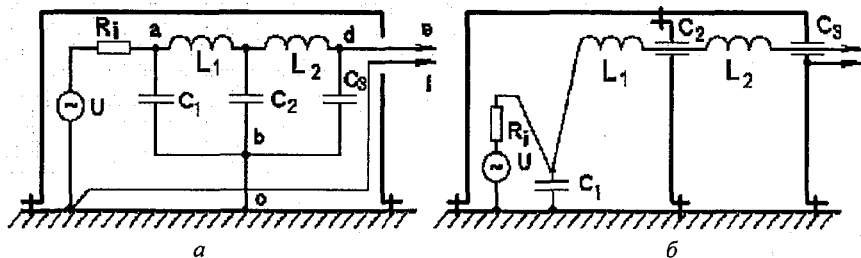


Рис. 4.27. Монтаж фильтрующей ячейки: а) неудачный, б) удачный.

На практике из-за одного только неудачного монтажа эффективность фильтрации значительно уменьшается:

1. Фильтруемое напряжение приложено полностью к участку abc . Если участок монтажа bc имеет длину 30 мм, его индуктивность составляет $L_{bc} \approx 0,03$ мкГн, и его индуктивное сопротивление $\omega L_{bc} \approx 1$ Ом.

Емкостное сопротивление конденсатора $\frac{1}{\omega C} \approx 0,5$ Ом.

Получается, что на участке bc падает около $0,01U$. Это напряжение через конденсатор в обход всего остального фильтра передается через конденсатор C_3 на выход.

Коэффициент подавления наводки получается при этом всего $M \approx 100$, т.е. в 10^8 (в сто миллионов!!!) раз меньше предельного.

Отключение конденсатора C_1 несколько улучшает действие фильтра, так как ток через участок bc уменьшается в

$$\frac{\sqrt{\omega^2 L^2 + R_i^2}}{R_i} = \frac{\sqrt{4\pi^2 \cdot 36 \cdot 10^{12} \cdot 10^4 10^{-12} + 100^2}}{R_i} = 38 \text{ раз.}$$

2. Между дросселями L_1 и L_2 имеется индуктивная связь. Значит, в катушке L_2 возбуждается дополнительная э.д.с., приводящая к ухудшению фильтрации.

3. Между точками a и d есть паразитная емкость. Если она составляет всего $C_{ad} = 0,005$ пФ, эффективность фильтра снижается до $M = 107$, т.е. в 1000 раз по сравнению с предельной.

4. При неверно выполненном монтаже конденсаторов могут появиться соединительные проводники длиной в 20...30 мм. Индуктивное сопротивление таких проводников (примерно 1 Ом) начинает превосходить емкостное сопротивление конденсаторов (примерно 0,5 Ом). Это также приводит к ухудшению фильтрации.

Как все это можно исправить?

Монтаж всех земляных выводов в одной точке не выручает, поскольку все равно остаются длинные соединительные проводники, о вреде которых уже говорилось. Все же можно сформулировать ряд рекомендаций.

1. Индуктивную связь можно устранить, разделив внутренний объем фильтра перегородкой.

2. В качестве конденсаторов C_2 и C_3 использовать конденсаторы особой конструкции – так называемые, проходные конденсаторы, установив их в перегородку и в стенку корпуса в месте выхода сигнального проводника из фильтра.

3. Возможна конструкция корпуса фильтрующей ячейки в виде пластины с тремя проходными конденсаторами и расположением катушек по разные стороны пластины (они могут быть накрыты крышками-экранами).

Первые два из перечисленных усовершенствований отображены на рис. 4.27,б. Этим список возможных конструкторских решений не ограничивается.

В заключение можно сделать вывод, что для эффективного решения вопросов электромагнитной совместимости функциональных узлов РЭС и цепей внутри функционального узла требуются серьезные познания в области теоретической электротехники, радиотехнических цепей и сигналов, а также вся изобретательность инженера.

5. РАБОТА РЭС В УСЛОВИЯХ МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Рассмотрим происхождение механических нагрузок, оказывающих влияние на технические характеристики РЭС и на устойчивость их функционирования.

1. Работа механических или электромеханических устройств в самой аппаратуре: электродвигатели, электромагниты, клапаны, реле и т.п. Наличие несбалансированных вращающихся элементов или возвратно-поступательное движение сопровождается действием сил инерции, действующих в точках монтажа электрорадиокомпонентов (ЭРК), точках крепления и т.д.

2. Вибрация, линейное ускорение или удары, прилагаемые к основаниям, на которых крепятся блоки и стойки РЭС, через точки крепления передаются на корпуса блоков и далее – на ячейки, платы, ЭРК.

3. Воздействие акустического шума через газовую среду: шум авиадвигателей, реактивных двигателей ракет, ударная волна от выстрелов, взрывов, звуковой удар от сверхзвуковых самолетов и т.д.

В чем проявляется влияние механических нагрузок?

– происходит смещение ЭРК и других элементов конструкции, возникающие при этом механические напряжения и остаточные деформации вызывают нарушение регулировки функциональных узлов.

– под влиянием механических напряжений изменяются электрические параметры ЭРК, что вызывает паразитную модуляцию электрических сигналов. Наиболее наглядные случаи – пьезоэффект или магнитострикционный эффект. На основе этих эффектов строится работа определенных функциональных узлов, и эти же узлы больше других подвержены вредному влиянию механических нагрузок.

– ослабление резьбовых соединений в местах крепления блоков, вплоть до развинчивания, возможный срез крепежных винтов и болтов.

– накопление усталости металла в элементах конструкции также чревато появлением остаточных деформаций, трещин, вплоть до разрушения конструкций.

Рассмотрим характеристики механических воздействий и построим классификацию по трем критериям.

1. По характеру сил, действующих на узлы или блоки:

а) силы, порожденные внутри узлов и блоков, говорят, что они вызывают динамическое нагружение узлов и блоков;

б) внешние силы – силы реакции опор при механическом перемещении основания, на котором покоится блок. Эти силы вызывают кинематическое нагружение.

2. По характеру действия сил в пространстве:

а) вектор силы как при динамическом, так и при кинематическом нагружении (скоро мы увидим, что между ними нет большой разницы) направлен вдоль одной оси – одноосное нагружение;

б) вектор силы находится в одной плоскости – плоскостное нагружение;

с) вектор силы трехмерный – объемное нагружение; воздействие объемного нагружения приводит к сложным механическим перемещениям и нагрузкам на элементы внутренней структуры конструкции.

д) в общем случае твердое тело имеет 6 степеней свободы: 3 поступательных и 3 вращательных.

Полная картина характера механических воздействий на блок может быть получена, если проанализировать нагрузки и движения по всем этим направлениям. Рассмотрение такой полной картины требует решения дифференциальных уравнений в частных производных. Это чрезвычайно сложная задача.

На практике среди нагрузок могут быть преобладающие, тогда можно сформулировать ограничения и посмотреть ограниченную задачу, например, только для поступательного движения и, наиболее простой случай, только для одноосного нагружения. Этот вариант мы и рассмотрим в дальнейшем.

3. Классификация по характеру изменения нагрузок во времени.

А. Вибрация:

1) гармоническая – действующая сила изменяется по закону гармонического колебания: $F(t) = F_m \sin(\omega t + \varphi)$;

2) периодическая – действующая сила изменяется по периодическому закону:
$$F(t) = \sum_{k=1}^{\infty} F_k \sin(k\omega_1 t + \varphi_k)$$
;

3) широкополосная (случайная) вибрация – действующая сила изменяется во времени как непрерывная случайная величина.

Вибрация характеризуется:

1) вибрационной перегрузкой – отношением амплитуды ускорения, которое испытывает объект под действием вибрационной нагрузки, к ускорению свободного падения:

$$G = \frac{a}{g},$$

где $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения; масса объекта, распределенная по опорам, как-бы увеличивается в G раз;

2) диапазоном частот, в котором действует вибрационная нагрузка;

3) спектральным составом:

– для гармонической нагрузки – две спектральных составляющих на частотах $+\omega$ и $-\omega$;

– для нагрузки в виде периодического колебания – ансамбль спектральных составляющих на частотах, кратных основной частоте ω_1 , представляющих компоненты разложения функции вибрационной нагрузки в ряд Фурье;

– для нагрузки в виде квазипериодического колебания – ансамбль спектральных составляющих на частотах $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ и т.д., не связанных отношением кратности;

– для нагрузки в виде случайной функции времени – непрерывная спектральная плотность.

Б. Ударная нагрузка – кратковременное одноразовое или повторяющееся импульсное силовое воздействие на объект.

Ударная нагрузка характеризуется:

1) формой импульса – линейная функция (пилообразный импульс), форма импульса в виде полуволны косинусоиды и т.п.;

2) ударной перегрузкой, как и для вибрации, отношением пикового значения ускорения при ударе к ускорению свободного падения;

3) числом ударов в единицу времени или общим числом ударов, которым подвергается и которые должен выдержать объект без нарушения функционирования.

В. Линейное ускорение – ускорение, которое испытывает объект, установленный на борту летательных аппаратов и других подвижных основаниях, при разгоне, торможении и других маневрах.

Линейное ускорение характеризуется также значением перегрузки – отношением ускорения при движении объекта к ускорению свободного падения

Большие значения перегрузок испытывают пилоты скоростных боевых самолетов при маневрах, космонавты на стадии пуска космического объекта и торможения при возврате на Землю, а также и все технические средства, установленные на этих объектах.

Отметим, что величина ударной нагрузки легко может достигать очень больших значений при незначительных, на первый взгляд, ударах.

Приведем простой пример: падение объекта (например, блока РЭС) с небольшой высоты на стол или плиту, которая полностью поглощает кинетическую энергию объекта за короткое время.

Будем считать, что падение было равноускоренным, а торможение – равномерно замедленным, т.е. происходит с постоянным линейным ускорением.

Закон изменения скорости при равномерно-замедленном движении известен из физики: $v = v_0 - at$, где v_0 – начальная скорость, a – ускорение, t – время движения (торможения). Пройденный путь $h = Vt$, скорость $V = h t^{-1}$.

Если торможение продолжается до полной остановки, то из уравнения $v_0 - at_{\text{ТОРМ}} = 0$ легко определяется значение ускорения:

$$a = -\frac{v_0}{t_{\text{ТОРМ}}}.$$

При высоте, с которой падает объект, равной 1 м, скорость, с которой он достигает плиты, составляет 3 м/с.

Если считать, что время торможения составляет 1 м/с, получаем значение ускорения при торможении 5000 м/с^2 или ударную перегрузку приблизительно 500g. Это означает, что нагрузка на точки крепления элементов конструкции объекта или элементов его внутренней структуры (платы, ячейки, фиксаторы и т.п.) увеличивается при ударе в 500 раз.

Задумаемся также над тем, какие ускорения испытывает объект при гармонической вибрации? Если механическое перемещение центра масс описывается гармоническим колебанием $x(t) = X_m \sin \omega t$, где X_m – амплитуда перемещения, ω – круговая частота, то скорость движения составляет $v(t) = \frac{dx}{dt} = X_m \omega \cos \omega t$, а ускорение $a(t) = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2} = -X_m \omega^2 \sin \omega t$.

Рассмотрим числовой пример. Пусть перемещение происходит с частотой 50 Гц и амплитудой $X_m = 1 \text{ мм} = 10^{-3} \text{ м}$. Тогда амплитуда ускорения составит $A_m = X_m \omega^2 = 98,6 \text{ м/с}^2$. Это означает, что объект испытывает десятикратную вибрационную перегрузку.

5.1. Уравнения движения центра масс блока РЭС при одноосном гармоническом вибровоздействии

1. Динамическое нагружение.

Будем считать, что блок установлен на упругом демпфированном подвесе (рис. 5.1). Масса объекта m . К центру масс объекта приложена внешняя сила, изменяющаяся во времени по гармоническому закону: $F(t) = F_0 \sin \omega t$

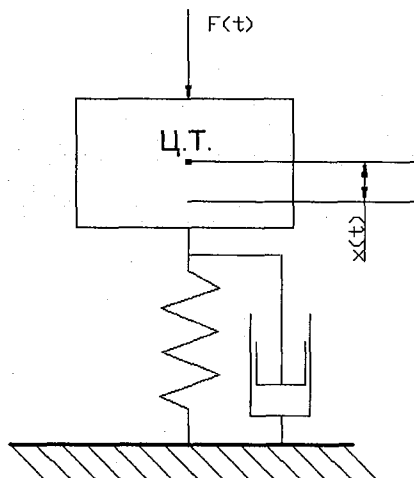


Рис. 5.1 Динамическое нагружение при упругом демпфированном подвесе

Будем также считать, что сила сопротивления упругого подвеса (пружины) и сила сопротивления демпфера действуют по одной линии с силой вибровоздействия (на рисунке они разнесены для простоты изображения).

Внешней силе вибровоздействия противодействуют:

а) сила сопротивления упругого подвеса – сила жесткости, прямо пропорциональная значению жесткости пружины (k) и значению перемещения (x) центра тяжести объекта из статического положения в отсутствии нагрузки:

$$F_{\text{ж}} = kx;$$

б) сила сопротивления демпфера, прямо пропорциональная скорости движения центра масс объекта:

$$F_{\text{д}} = \beta v = \beta \frac{dx}{dt},$$

где β – коэффициент неупругого сопротивления демпфера.

с) сила инерции:

$$F_{\text{и}} = ma = m \frac{d^2 x}{dt^2}.$$

В силу законов динамики, сумма сил сопротивления уравновешивает силу вибровоздействия, и мы приходим к дифференциальному уравнению, описывающему движение центра масс объекта:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + \beta \frac{dx}{dt} + kx = F(t).$$

Поделим левую и правую части уравнения на массу:

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + \frac{\beta}{m} \frac{dx}{dt} + \frac{k}{m} x = \frac{F(t)}{m} \quad (5.1)$$

и введем обозначения:

$$\frac{\beta}{m} = 2\lambda; \quad \frac{k}{m} = \omega_0^2,$$

где $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$ – круговая частота незатухающих колебаний механической системы с упругой подвеской.

Преобразуем также выражение в правой части:

$$\frac{F(t)}{m} = \frac{F_0 \sin \omega t}{m} = \frac{k}{m} \cdot \frac{F_0}{k} \sin \omega t.$$

Обозначим $\frac{F_0}{k} = X_{CT}$ — статическое значение деформации подвески под действием амплитудного значения внешней силы.

Тогда дифференциальное уравнение (5.1) переписывается в виде:

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + 2\lambda \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = \omega_0^2 X_{CT} \sin \omega t. \quad (5.2)$$

Как выглядит решение данного дифференциального уравнения, мы увидим после того, как рассмотрим второй случай — кинематическое нагружение.

2. Кинематическое нагружение

Блок массой m установлен на точно таком же, что и в рассмотренном случае, демпфированном упругом подвесе, но внешняя сила к блоку не прилагается, а массивная плита, на которой установлен подвес (рис. 5.2), совершает возвратно-поступательное движение по гармоническому закону:

$$x_{OCH}(t) = A \sin \omega t.$$

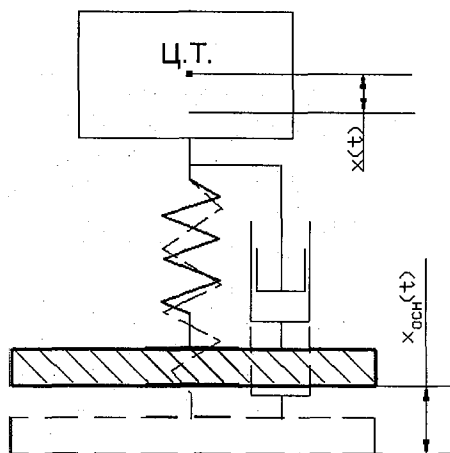


Рис. 5.2. Кинематическое нагружение при упругом демпфированном подвесе.

Реакция опор здесь, как и в рассмотренном случае складывается из тех же трех составляющих, но значения двух из трех составляющих определяются разностью перемещений центра тяжести блока и основания и относительной скоростью движения:

а) сила жесткости подвески:

$$F_{\text{ж}} = k(x - x_{\text{ОСН}});$$

б) сила сопротивления демпфера:

$$F_{\text{д}} = \beta(v - v_{\text{ОСН}}) = \beta \left(\frac{dx}{dt} - \frac{dx_{\text{ОСН}}}{dt} \right);$$

в) сила инерции:

$$F_{\text{и}} = ma = m \frac{d^2 x}{dt^2}.$$

Сила инерции не зависит от того, приложена ли к центру масс блока внешняя сила или под ним колеблется основание.

Поскольку внешней силы в данном случае нет, составляющие реакции опор должны взаимно уравновешиваться, т.е.

$F_{\text{ж}} + F_{\text{д}} + F_{\text{и}} = 0$, это приводит нас к дифференциальному уравнению:

$$m \frac{dx}{dt} + \beta \left(\frac{dx}{dt} - \frac{dx_{\text{ОСН}}}{dt} \right) + k(x - x_{\text{ОСН}}) = 0.$$

Введем те же обозначения:

$\frac{\beta}{m} = 2\lambda$ и $\frac{k}{m} = \omega_0^2$, а также перенесем в правую часть слагаемые, относящиеся к основанию. Получаем дифференциальное уравнение движения центра масс блока при кинематическом нагружении:

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + 2\lambda \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = 2\lambda \frac{dx_{\text{ОСН}}}{dt} + \omega_0^2 x_{\text{ОСН}}. \quad (5.3)$$

Сравнивая выражения (5.2) и (5.3), видим, что в обоих случаях это неоднородные дифференциальные уравнения второго порядка. Левая часть обоих уравнений совпадает.

Известно, что решение таких дифференциальных уравнений состоит из двух составляющих: свободной и вынужденной.

Свободная составляющая, в зависимости от соотношения параметров ω_0 и λ , представляет собой:

- при $\omega_0^2 > 2\lambda^2$ — затухающее колебание с так называемой собственной круговой частотой $\omega_1 = \sqrt{\omega_0^2 - 4\lambda^2}$;
- при $\omega_0^2 \leq 2\lambda^2$ — экспоненциальный затухающий процесс.

Вынужденная составляющая представляет собой колебательный процесс с частотой вынуждающей силы при динамическом нагружении или с частотой колебаний основания при кинематическом нагружении.

Амплитуда вынужденных колебаний зависит от частоты вынуждающего воздействия. Эту зависимость можно назвать частотной характеристикой механической системы.

Для динамического нагружения амплитуда колебаний

$$b_d = \frac{F_0}{m\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\lambda^2\omega^2}}. \quad (5.4)$$

Для кинематического нагружения

$$b_k = A\sqrt{\frac{\omega_0^2 + 4\lambda^2\omega^2}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\lambda^2\omega^2}}. \quad (5.5)$$

В обоих случаях график частотной зависимости амплитуды колебаний напоминает резонансную кривую последовательного колебательного контура. Это не удивительно: колебательные процессы в механических системах и в электрических цепях описываются дифференциальными уравнениями второго порядка.

Вернемся к правой части уравнения (5.2) и, с учетом его, перепишем выражение (5.4):

$$b_d = \frac{\omega_0^2 X_{ст}}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\lambda^2\omega^2}}$$

и разделим числитель и знаменатель на ω_0^2 .

Получим окончательно:

$$b_d = \frac{X_{ст}}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2\right)^2 + 4\lambda^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}}. \quad (5.6)$$

Коэффициент динамичности (μ) — это величина, показывающая, во сколько раз амплитуда вынужденных колебаний центра масс объекта под действием силы $F(t) = F_0 \sin \omega t$ больше или меньше статического прогиба упругой опоры $X_{ст} = \frac{F_0}{k}$;

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2\right)^2 + 4\lambda^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}} \quad (5.7)$$

Из выражений (5.6) и (5.7) также следует, что при равенстве частот $\omega = \omega_0$ имеет место резонанс, называемый резонансом силы или резонансом деформации, и амплитуда вынужденных колебаний центра масс объекта становится максимальной, равной $B_{рез} = \frac{X_{ст}}{2\lambda}$.

Мы рассмотрели простейший случай одноосного нагружения и объекта с сосредоточенной массой. На практике полученные результаты могут быть применены к анализу движения блока РЭС, установленного на упругих подвесах, называемых амортизаторами.

Задачей конструктора является достижение такого значения коэффициента динамичности, при котором блок, элементы его конструкции и ЭРК не испытывали бы недопустимых вибрационных перегрузок при заданной величине воздействия. Здесь могут использоваться три пути:

- уменьшение коэффициента динамичности путем введения неупругих демпфирующих элементов в конструкцию подвески блока (эластичных покрытий печатных плат или залитых эластичным компаундом модулей или наиболее чувствительных узлов;

- уменьшение резонансной частоты за счет снижения жесткости подвески блока (помним, что резонансная частота определяется жесткостью подвески и массой объекта; увеличивать для этого массу неразумно);

- увеличение резонансной частоты за счет уменьшения массы (уменьшение массы всегда желательно!) или увеличения жесткости (жесткость печатных плат может быть увеличена за счет увеличения толщины, что не всегда целесообразно, или за счет изменения способа закрепления, или размещения специальных ребер жесткости).

Первый из указанных путей является универсальным, пригодным во всех случаях.

Два других пути имеют свои области применения. Оба они имеют целью сместить резонансную частоту за пределы диапазона частот вибронагрузки, определенного в техническом задании на проектирование.

Второй путь обычно реализуется при проектировании амортизированных конструкций блоков с большой массой.

Третий путь обычно используется при проектировании функциональных узлов и модулей на печатных платах. Жесткость печатных плат может быть увеличена за счет увеличения толщины, что не всегда целесообразно, или за счет изменения способа закрепления или размещения специальных ребер жесткости.

5.2. Расчет частот механического резонанса печатных плат

Печатная плата также является упругой демпфированной механической системой, похожей на рассмотренную выше.

Сложность определения собственных резонансных частот механического резонанса печатных плат заключается в том, что любая упругая пластина является системой с распределенными параметрами, в частности, массой. Это распределение может быть неравномерным по поверхности платы, если на ней установлены компоненты с неодинаковой массой, да еще и несимметрично относительно геометрического центра. Для строгого решения подобной задачи должны решаться дифференциальные уравнения в частных производных. В худшем случае эти уравнения могут оказаться еще и нелинейными, если механические характеристики материала зависят от нагрузки. Решение подобных задач является предметом само-

стоятельных научных дисциплин: теоретической механики и сопротивления материалов. Мы же воспользуемся рядом готовых результатов, позволяющих решить задачи конструирования.

В зависимости от особенностей конструкции и способа закрепления печатная плата замещается так называемой стержневой, балочной или мембранной моделью. Обычно решение не ограничивается единственной резонансной частотой. Как правило, их несколько, причем они не связаны отношением кратности, хотя на практике первая и вторая резонансные частоты отличаются приблизительно в 2 раза. Обычно поиск резонансных частот ограничивается частотой второго резонанса.

Мы приведем используемые в инженерном проектировании выражения для расчета частоты первого резонанса.

Напомним еще раз, что частота механического резонанса упруго подвешенного объекта массой m определяется из выражения:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}.$$

Жесткость пластины (печатной платы) длиной l , шириной b и толщиной h в направлении поперек длинной стороны определяется выражением:

$$k = 192 \frac{EJ}{l},$$

где E – модуль упругости материала (модуль Юнга); для обычного материала печатных плат – стеклотекстолита $E = 3 \cdot 10^{10}$ Н/м²;

$J = \frac{bh^3}{12}$ – момент инерции поперечного сечения пластины.

С учетом данных обозначений, можно выразить резонансную частоту непосредственно через геометрию поперечного сечения и массу груза посередине пластины:

$$f_0 = \frac{2}{\pi} \sqrt{\frac{Ebh^3}{ml^3}} \text{ Гц}.$$

Кроме модели невесомой пластины с сосредоточенной массой посередине используются модели с массой, распределенной по площади пластины. Эта масса складывается из массы самой пла-

стины и суммы масс навесных элементов, установленных на печатной плате.

В зависимости от соотношения размеров сторон прямоугольника печатной платы и способа ее закрепления, используются две разновидности таких моделей:

- при длине, значительно превышающей ширину, и закреплении по коротким сторонам используется так называемое приближение стержня;

- при близких значениях длины и ширины и разных вариантах крепления по периметру используется приближение пластины.

Рассмотрим обе эти модели.

1. Приближение стержня.

Частота первого резонанса

$$f_{01} = \frac{3,56}{l^2} \sqrt{\frac{EJg}{q}},$$

где $q = \frac{(m_{пл} + m_{эл})g}{l}$ – погонная масса платы с установленными

навесными элементами,

где $m_{пл}$ – масса платы;

$m_{эл}$ – масса элементов.

Прогиб в центре стержня

$$\beta_{max} = \frac{ql^4}{384EJ}.$$

Прогиб не должен превышать допустимую величину, которая для стеклотекстолита составляет $\delta_{доп} = 0,02l$.

2. Приближение пластины.

Для расчета резонансной частоты также должна быть определена приведенная погонная масса этой нагруженной пластины

$$m = m_0 + \frac{1}{l} \sum_{s=1}^n k_s m_s,$$

где k_s – коэффициент приведения сосредоточенной массы к распределенной, зависящий от способа закрепления платы (см. В.Б. Карпушин, Виброшумы радиоаппаратуры, М.: Сов. радио, 1976, табл. 5.3).

Частота первого резонанса определяется из выражения

$$f_{01} = \frac{\varphi}{l^2} \sqrt{\frac{EJ}{m}},$$

где φ – безразмерный коэффициент частоты, зависящий от способа крепления платы ([7] Карпушин, табл. 5.4, 5.5).

В практике используется приближенное выражение для определения частоты первого резонанса:

$$f_{01} \approx \frac{ch}{l^2} \cdot 10^4 \text{ Гц},$$

где $c = \frac{\alpha}{2\pi} \sqrt{\frac{Eg}{12(1-\varepsilon^2)\rho}}$ – частотная постоянная, зависящая от способа крепления ([7] Карпушин, табл. 5.8).

Приведем еще некоторые расчетные выражения для двух видов крепления печатной платы.

1. Жесткое закрепление платы по контуру:

$$f_{01} = \frac{ch}{l^2} \cdot 10^2 \cdot K_1 K_2,$$

где K_1 – коэффициент, зависящий от соотношения физических свойств (плотности и модуля упругости материала платы и стали) равен

$$K_1 = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{\rho_{ст}}{E_{ст}}};$$

K_2 – коэффициент, учитывающий дополнительную нагрузку за счет массы навесных элементов:

$$K_2 = 1/\sqrt{1 + m_{эл}/m_{пл}}.$$

Приведем соответствующие характеристики материалов.

Стеклотекстолит СФ2-50:

- модуль упругости $E = 3,2 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2$;
- удельная плотность $\rho = (2,18 \dots 2,47) \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$;
- коэффициент Пуассона $\varepsilon = \frac{\Delta d}{d} / \frac{\Delta l}{l} = 0,25$.

Сталь:

- модуль упругости $E_{ст} = 3 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^2$;
 - удельная плотность $\rho_{ст} = 7,8 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.
2. Установка в двух направляющих и две свободные стороны:

$$f_{01} = \frac{\pi}{2} \left(\frac{1}{l} + \frac{b}{l^2} \right)^2 \sqrt{\frac{D}{\rho h}} \cdot K_2,$$

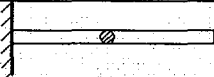
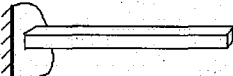
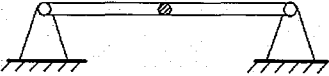
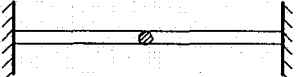
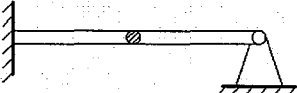
где $D = Eh^3/12(1 - \varepsilon^2)$ – цилиндрическая жесткость пластины.

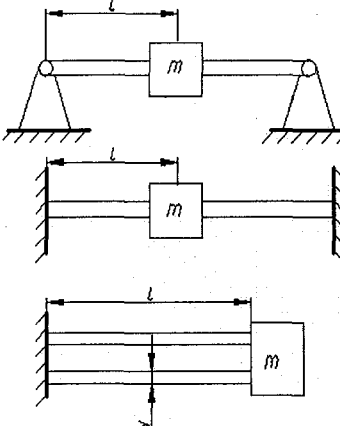
5.3. Механические напряжения в элементах конструкций

Приведем данные для расчета механических напряжений в стержнях с распределенной массой и нагруженных сосредоточенной массой посередине. Эти данные могут быть использованы для оценки устойчивости таких объектов, как навесные электрорадиокомпоненты в печатном монтаже, при разных способах их закрепления (см. табл. 5.1).

Таблица 5.1

Данные для расчета механических напряжений

Вид балки и условия крепления	Напряжение, Н/м ²	Коэффициент A
1	2	3
	$\sigma = A \frac{G}{f_0} \sqrt{E\rho}$	550
		470
		380
		580
		595

1	2	3
	$\sigma = A \frac{Ed}{l^2} \cdot \frac{G}{f_0^2}$	2,5 3,8 3,8

где G – значение вибрационной перегрузки;

σ – механическое напряжение, Н/м²;

f_0 – резонансная частота, Гц;

d – диаметр или поперечный размер стержня;

l – длина стержня (вывода ЭРК);

ρ – удельная плотность материала вывода, кг/м³;

E – модуль упругости, Н/м².

Видим, что механическое напряжение линейно зависит от величины вибрационной перегрузки. Значения напряжений, которые испытывают выводы ЭРК или другие элементы конструкции, не должны превосходить предела прочности материала.

Задания для контроля

1. Охарактеризуйте причины, порождающие механические нагрузки на РЭС.
2. Охарактеризуйте нарушения функционирования РЭС под воздействием механических нагрузок.
3. Приведите классификацию механических нагрузок по характеру сил, действующих на узлы или блоки РЭС.
4. Приведите классификацию механических нагрузок по характеру действия сил в пространстве.
5. Приведите классификацию механических нагрузок по характеру изменения нагрузок во времени.
6. Опишите разновидности вибрационного воздействия и приведите основные параметры вибрации.
7. Перечислите основные характеристики ударной нагрузки.
8. Опишите условия возникновения линейных ускорений и характеристики данного воздействия на объекты.
9. Сравните уравнения движения центра масс блока РЭС при одноосном гармоническом динамическом и кинематическом вибровоздействиях.
10. Назовите составляющие решения дифференциальных уравнений движения центра масс объекта. Дайте определение коэффициента динамичности.
11. Охарактеризуйте возможные пути снижения динамичности конструкций РЭС.
12. Приведите общее выражение для резонансной частоты колебаний упругой механической системы.
13. Опишите модели с сосредоточенной и распределенной массой.
14. Сравните формулы расчета резонансной частоты стержня, закрепленного на концах, и пластины при различных видах крепления.
15. Оцените прогиб печатной платы под воздействием вибрации и механические напряжения в элементах конструкции и выводах электрорадиокомпонентов.

6. УСТОЙЧИВОСТЬ РЭС ПО ОТНОШЕНИЮ К АКУСТИЧЕСКОМУ ШУМУ

Необходимость предъявлять требования к устойчивости РЭС по отношению к воздействию акустического шума связана с тем, что от 0,3% до 3% мощности работающих двигателей различных средств передвижения, на которых устанавливаются РЭС, расходуется на создание шума.

За последние десятилетия звуковая мощность шума, генерируемого подвижными объектами, выросла в десятки раз.

Например, акустическая мощность, создаваемая двигателями самолета на старте, при взлетной массе 175 т и суммарной тяге двигателей $4,75 \cdot 10^5$ Н, составляет 200 кВт. Такие мощные акустические воздействия могут вызвать отказы или даже разрушение конструкций РЭС, если в них возникает механический резонанс: может нарушиться герметичность корпусов, возникнуть усталостные трещины и т.д.

Требования устойчивости по отношению к воздействию акустического шума обычно предъявляются к РЭС, устанавливаемым на ракетах и некоторых типах самолетов, т.е. к аппаратуре, которая должна транспортироваться и нормально эксплуатироваться в полях звукового шума очень большой интенсивности. Следует учитывать воздействие на оператора, который является элементом системы управления РЭС.

Вспомним, каким образом определяется интенсивность акустического воздействия. Есть две оценки:

- интенсивность или плотность потока мощности звукового сигнала, Вт/м²;
- звуковое давление, Па.

Так как звук в природе отличается очень большим диапазоном интенсивности и звукового давления, применяется логарифмическая мера в децибелах по отношению к так называемому порогу слышимости. Этот пороговый для человека уровень соответствует звуку шелеста листьев в безветренную предраассветную пору. В принятых в физике величинах это соответствует интенсивности

10^{-12} Вт/м² или звуковому давлению $2 \cdot 10^{-5}$ Па. Этот относительный уровень принимается за нуль децибел (0 дБ). Само отношение равно единице.

Если говорить о восприимчивости человеческого органа слуха к звукам разного тона и громкости, то следует упомянуть о так называемых кривых равной громкости (рис. 6.1), используемых в акустике.

Видим, что характер восприятия звуков как одинаково громких зависит от интенсивности и от частоты звукового сигнала.

При любом значении интенсивности наибольшую чувствительность человеческий слух проявляет в полосе частот 3000...4000 Гц.

Как при снижении, так и при повышении частоты за пределами этой полосы чувствительность слуха снижается. Это находит отражение в подъеме кривых равной громкости на нижних и верхних частотах звукового диапазона. Отметим также, что этот подъем тем меньше, чем выше интенсивность (громкость) звука.

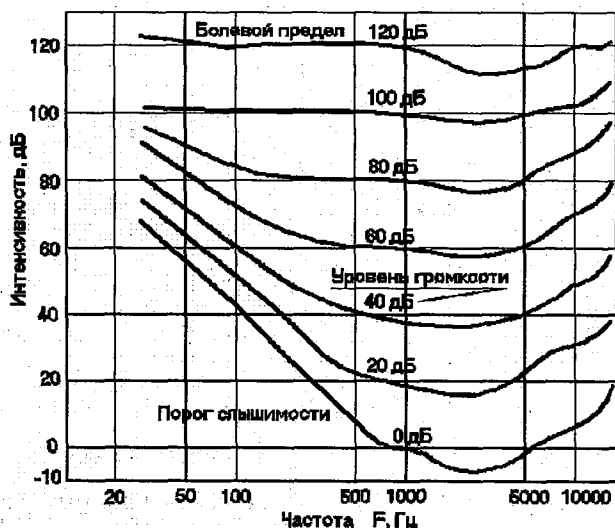


Рис. 6.1. Кривые равной громкости.

Приведенные кривые равной громкости используются при проектировании звуковоспроизводящей аппаратуры: регуляторы громкости проектируются так, чтобы их частотная характеристика при

разной установке органа регулирования повторяла эти кривые. Для более точной подгонки частотных характеристик тракта применяются также регуляторы тембра или эквалайзеры.

Известны данные об интенсивности различных звуков, которые может слышать человек в обыденной жизни:

- шопот – уровень 25 дБ;
- нормальный разговор в закрытом помещении – уровень 60 дБ;
- шум близко проходящего поезда – уровень 100 дБ;
- болевой предел – человек не в состоянии выдержать такой звук – уровень 120 дБ.

Исследовалось поле равных уровней звукового давления вблизи сопла реактивного двигателя при скорости газовой струи 600 м/с. результаты этого исследования приведены в виде графиков на рис. 6.2. Графики построены в относительных координатах – расстояниях от сопла по отношению к его диаметру.

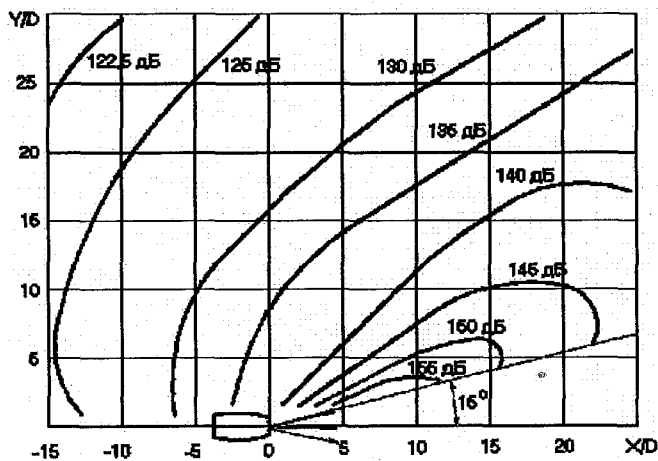
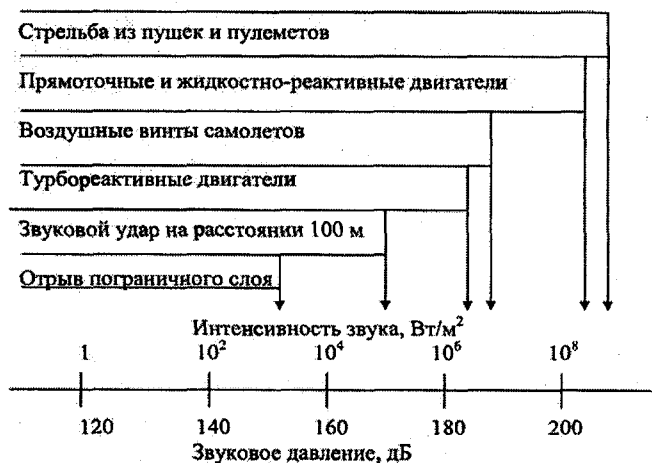


Рис. 6.2. Поле равных уровней звукового давления.

Видим, что человеку находиться вблизи испытательного стенда, на котором замеряются уровни шума, небезопасно, поскольку все замеренные значения интенсивности шума значительно превышают болевой предел восприятия звука.

Приведем также диаграмму с данными по интенсивности и звуковому давлению, создаваемому различными источниками шума, связанными с военной техникой.



Приведем пример, показывающий, какому воздействию подвергается человек, попавший под звуковой удар, создаваемый сверхзвуковым самолетом, пролетающим на высоте 100 м.

Пусть интенсивность звука составляет 105 Вт/м² (см. диаграмму).

Длительность звукового импульса 20 мс.

Тогда плотность потока энергии звуковой волны составит $2 \cdot 10^3$ Дж/м² или (учитывая, что 1 Дж = 0,102 кгм) 204 кгм/м².

Если принять, что площадь человеческого тела, на которую падает звуковая волна, составляет 0,25 м², энергия, которая падает на эту площадь, составит 51 кгм. Учитывая, что удар, энергия которого составляет 8 кгм, сбивает обычного человека с ног, можно предположить, что наш испытуемый окажется в глубоком нокауте.

Если РЭС работают в условиях, когда уровень акустического шума не превышает 130 дБ, считается, что такой уровень воздействия не приводит к отказам.

Обычно РЭС, имеющие острые резонансные характеристики (высокий коэффициент динамичности) в области звуковых частот, бывают чувствительны и к акустическому шуму. Поэтому результаты расчета резонансных характеристик конструкции могут в некоторой степени характеризовать ее устойчивость и к акустическому шуму, хотя в ответственных случаях этих характеристик недостаточно. Требуется специальные исследования и испытания.

Наиболее чувствительной к акустическому шуму является аппаратура и ее элементы, имеющие большую площадь наружной поверхности, относительно малую массу и малодемпфированную конструкцию.

Из электрорадиокомпонентов это электронные лампы, волноводы, клистроны, магнетроны, кварцевые и электромеханические резонаторы, реле, некоторые элементы, имеющие мембраны, различные датчики и пр.

Малочувствительными являются РЭС с высоким отношением массы к площади наружной поверхности, залитые пластичными компаундами и т.п.

При разработке и испытании РЭС, устойчивых к воздействию акустического шума, большая роль принадлежит испытанию макетов и образцов. Методики испытаний сформулированы в ГОСТе 16962-71.

Испытания проводятся в специальных камерах, в которых создается рассеянное звуковое поле. В качестве источника звука используется сирена или специальный источник полигармонических колебаний с заданным частотным спектром.

В американском стандарте на испытания военной техники Mil-Std-810B Environmental Test Methods приводятся требования к устойчивости самолетных и ракетно-космических РЭС к акустическому шуму (табл. 6.1).

Таблица 6.1

Нормы по акустическому шуму (USA)

	Самолетные РЭС (время воздействия шума 30 мин):	Норма, не менее
1	для большинства мест установки на самолете	140 дБ
	установка внутри корпуса вблизи от источника шума, в конусе за источником шума	150 дБ
	установка вне кабины, вблизи от источника или в конусе за источником шума	160 дБ
2	ракетно-космические РЭС (время воздействия 8 мин)	
	для большинства мест установки, за исключением двигательного отсека	160 дБ
	установка в двигательном отсеке носителя, в посадочной ступени	165 дБ

Видим, что все нормы интенсивности звука превышают 140 дБ.

Задания для проверки

1. Охарактеризуйте причины, по которым приходится предъявлять требования устойчивости РЭС к акустическому воздействию.
2. Назовите характеристики интенсивности акустического сигнала.
3. Опишите чувствительность человеческого слуха к звуку и кривые равной громкости.
4. Охарактеризуйте поля равной громкости звука реактивного двигателя.
5. Приведите сведения об интенсивности звука и звукового давления, создаваемого различными мощными источниками.
6. Охарактеризуйте воздействие звукового удара на человека.
7. Дайте характеристики РЭС, наиболее и наименее чувствительных к воздействию акустического шума.
8. Приведите нормы допустимого акустического воздействия на самолетные и ракетно-космические РЭС.

7. Тепловой режим РЭС

Для получения от РЭС полезного эффекта необходимо затрачивать электрическую энергию. Та часть потребляемой энергии, которая не обращается в полезный эффект, в силу теплового действия электрического тока рассеивается в виде тепла. Рассмотрим тепловые процессы в аппаратуре (узле, блоке, приборе), т.е. в части РЭС, занимающей ограниченное козухом пространство.

Преобразование части потребляемой энергии в тепло приводит к перегреву аппарата – превышению температуры всего аппарата или определенных его узлов, деталей по отношению к температуре окружающей среды. Все избыточное тепло, благодаря действующим в природе явлениям теплопередачи, отдается в окружающую среду. Такой средой может быть воздух, окружающий корпуса приборов, жидкость, если они погружены в нее, и даже вакуум, если речь идет об эксплуатации РЭС в такой среде, как открытый космос. При этом в установившемся режиме имеет место динамическое равновесие между выделением тепла во внутреннем объеме корпусов блоков РЭС и рассеянием этого тепла в окружающую среду.

Почему при изменении температуры узлов РЭС происходят отклонения в рабочем режиме, которые могут привести к выходу рабочих характеристик за пределы, установленные в технических требованиях?

1. При изменении температуры изменяются электрические параметры компонентов. Эти температурные уходы нормированы в технической документации на компоненты. Изменение электрических параметров компонентов определяет обратимые уходы рабочих характеристик функциональных узлов, блоков и приборов от нормы.

2. Нагрев и охлаждение (термоциклы) приводят к интенсификации процессов старения элементов и компонентов из-за деградации материалов. Это приводит к необратимым уходам рабочих характеристик приборов, повышает вероятность выхода их из строя.

Обеспечение такого теплового режима, при котором рабочие характеристики аппаратуры остаются в заданных пределах, является одной из важных задач конструкторского проектирования РЭС.

Необходимый тепловой режим обеспечивается за счет теплообмена с окружающей средой – естественной или искусственно создаваемой вокруг аппарата.

Эффективность теплообмена зависит:

- от характеристик среды, окружающей прибор (воздух, жидкость и т.п., даже вакуум);
- от перегрева блока, прибора, относительно окружающей среды – в этом усматривается нелинейность процессов теплообмена;
- от площади соприкосновения с окружающей средой;
- от способа закрепления узла, блока, прибора – один из путей передачи тепла проходит через точки крепления.

7.1. Основные механизмы теплообмена

В природе существуют три механизма теплообмена:

- 1) теплообмен за счет теплопроводности, или кондуктивный теплообмен – основной способ передачи тепла для контактирующих твердых тел;
- 2) теплообмен лучеиспусканием или радиационный теплообмен – любое физическое тело, имеющее температуру выше 0 К, излучает энергию в окружающее пространство;
- 3) конвективный теплообмен – характерен для твердых тел, окруженных газом или жидкостью.

Рассмотрим по порядку все эти механизмы теплообмена.

1. Теплопроводность.

Кондуктивный теплообмен подчиняется закону Фурье (однофамильца автора математического ряда): установлено, что через стержень длиной l , поперечным сечением S , с температурами на концах T_1 и T_2 (рис. 7.1, а) в отсутствие теплоотдачи в стороны проходит количество тепла

$$Q = \lambda(T_2 - T_1) \frac{S}{l} t, \quad (7.1)$$

где Q – количество тепла, Дж;

λ – коэффициент теплопроводности материала стержня (теплопроводность), Вт/м·К;

t – время.

Теплопроводность (Вт/мК) является физической характеристикой материала. Приведем сведения о теплопроводности ряда материалов (имеется в виду коэффициент теплопроводности):

медь	390
алюминий	208
кремний	83,5
окись магния MgO	40
бериллиевая керамика БРОКЕРИТ	203
ковар	15
стекло	1,0
эпоксидные композиции, слюда	0,1...0,3

Введем еще ряд полезных соотношений.

Поделим в выражении (7.1) Q на t , получим поток мощности или тепловой поток:

$$P_T = \frac{Q}{t} = \lambda(T_2 - T_1) \frac{S}{l}. \quad (7.2)$$

Обозначим $T_2 - T_1 = \Delta T$ и перепишем выражение (7.2):

$$P_T = \Delta T / \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{l}{S} \quad (7.3)$$

Обратим внимание на знаменатель выражения (7.3).

Обозначим $\frac{1}{\lambda} \cdot \frac{l}{S} = R_T$ и назовем эту величину тепловым сопротивлением тела. Размерность теплового сопротивления — градус/Ватт. Это название дано по аналогии с электрическим сопротивлением:

$$R = \frac{1}{\sigma} \cdot \frac{l}{S},$$

где σ — удельная электропроводность проводника.

С учетом введенного обозначения выражение (7.3) для теплового потока приобретает вид:

$$P_T = \frac{\Delta T}{R_T}, \quad (7.4)$$

аналогичный виду закона Ома для участка электрической цепи:

$$I = \frac{\Delta U}{R}.$$

Эта аналогия получила название электротепловой аналогии. На основании этой аналогии можно моделировать тепловое поле на плоскости или в объеме теплопроводящих сред: в кристалле монокристаллических интегральных микросхем (ИС), на подложке гибридных ИС и т.п.

Для решения вопросов теплопередачи в объеме твердого тела закон Фурье выражается в дифференциальной форме. Распространение тепла в объеме происходит во все стороны (рис. 7.1, б).

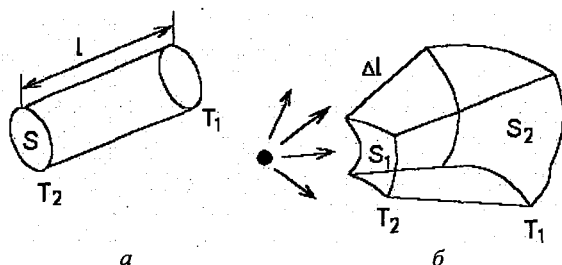


Рис. 7.1. Распространение тепла в стержне а) и его направления б)

Рассмотрим элементарный объем в толще твердого тела, с сечениями S_1 и S_2 и длиной l и найдем плотность теплового потока через среднее сечение $S = (S_1 + S_2)/2$:

$$p = \frac{P_T}{S} = \lambda(T_2 - T_1) \frac{1}{l} = \lambda \frac{\Delta T}{l}. \quad (7.5)$$

Предел $\lim_{l \rightarrow 0} \frac{\Delta T}{l} = -\text{grad}T$ есть градиент температуры.

С учетом этого уравнение теплопроводности записывается в дифференциальной форме:

$$p = -\lambda \text{grad}T. \quad (7.6)$$

Решение этого уравнения в общем виде позволяет, в принципе, находить тепловой режим для кондуктивного теплообмена.

2. Радиационный теплообмен.

Теплообмен излучением подчиняется трем законам физики.

Закон Стефана-Больцмана. Установлено, что любое тело, нагретое до температуры, превышающей абсолютный нуль (0 К или

минус 273°C), излучает, в направлении нормали к поверхности, энергию:

$$P = \varepsilon \sigma_0 T^4, \quad (7.7)$$

где $\sigma_0 = 5,6697 \cdot 10^{-8}$ Вт/м²град⁴ – постоянная Стефана-Больцмана;
 ε – степень черноты тела: $0 < \varepsilon < 1$.

В физике используется абстракция, называемая абсолютно черным телом. Степень черноты абсолютно черного тела – единица. Излучение абсолютно черного тела составляет

$$P_{\text{АЧТ}} = \sigma_0 T^4. \quad (7.8)$$

Расчет теплоотдачи излучением кажется несложным, однако это справедливо только для излучения в открытое пространство. Если излучение происходит в пространство, занятое какими-либо предметами, излученное тепло частично отражается от этих предметов и отраженное излучение попадает обратно на теплонагруженный объект и подогревает его. Это затрудняет решение вопроса: – сколько же тепла реально снимается с нагретого тела излучением. Эксперименты показывают, что в полном объеме тепловой энергии, отдаваемом блоками РЭС, доля излучения составляет не более 10...15%.

Закон Планка. Все известные в природе излучения, в том числе и тепловое, имеют одну и ту же волновую природу. В зависимости от температуры излучение нагретых тел имеет место в разных диапазонах длин волн – от радиоволн сантиметрового диапазона (радиоизлучение тела живых организмов) через инфракрасный диапазон (тепловое излучение), диапазон видимого света (тела, нагретые до температуры 500...1200°C и выше) и выше – к диапазону ультрафиолетовых, рентгеновских лучей.

Закон Планка связывает интенсивность излучения $I_0(\lambda)$ абсолютно черного тела, длину волны излучения и температуру (T) тела:

$$I_0(\lambda) = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1} \quad \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} / \text{м}, \quad (7.9)$$

где постоянные $C_1 = 2\pi\hbar c_2 = 3,7415 \cdot 10^{-15} \text{ Вт} \cdot \text{м}^2$ и $C_2 = \hbar c/k = 1,43879 \text{ м К}$, выраженные через известные величины :

$c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$ – скорость света;

$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/град}$ – постоянная Больцмана;

$\hbar = 6,625 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$ – постоянная Планка.

Из выражения (7.9) следует, что пик спектральной плотности излучения смещается в сторону коротких волн при увеличении температуры (рис. 7.2).

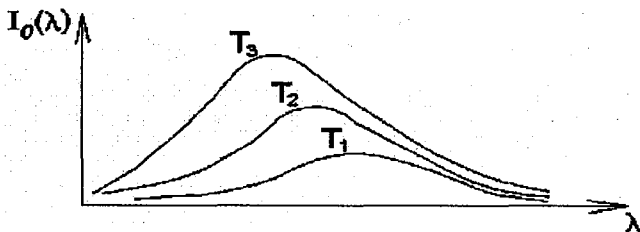


Рис. 7.2. Смещение пика интенсивности излучения при увеличении температуры T .

Это полностью согласуется с нашими обыденными представлениями: нагрев металла “добела” происходит при более высокой температуре, чем нагрев “докрасна”.

Сама же интенсивность излучения с увеличением температуры также увеличивается.

Закон Ламберта определяет “диаграмму направленности” излучения нагретого твердого тела.

Точечный источник, расположенный в свободном пространстве, излучает равномерно во все стороны.

От источника в виде излучающей поверхности максимум интенсивности излучения – вдоль нормали к поверхности. В остальных направлениях интенсивность излучения пропорциональна косинусу угла отклонения от нормали в каждой рассматриваемой точке излучающей поверхности:

$$I(\theta) = I_m \cos \theta, \quad 0 \leq \theta \leq 90^\circ. \quad (7.10)$$

Наблюдать этот факт экспериментально можно только “в дальней зоне” – на расстояниях от излучающего объекта, намного превышающих его геометрические размеры. На меньших расстояниях излучение под углом к нормали для каждой элементарной площад-

ки излучающей поверхности маскируется излучением от соседних элементарных площадок, часть которых излучает в точку приема по нормали, а другая часть – в стороны от нормали.

3. Конвективный теплообмен.

Конвекция возникает в жидкости или в газе при соприкосновении их с нагретым твердым телом. Из-за теплового расширения плотность соприкасающихся с поверхностью нагретого тела областей жидкости или газа (назовем его теплоносителем) уменьшается и возникает архимедова выталкивающая сила, вытесняющая этот прилегающий объем вверх. На место этого вытесненного объема в зону нагрева притекает соответствующий объем холодного теплоносителя, нагревается и, в свою очередь, течет вверх под действием выталкивающей силы. Таким образом возникает конвекционный поток, уносящий тепло от нагретого тела в окружающее пространство.

Конвективный теплообмен подчиняется закону Ньютона (в теплотехнике): мощность, отводимая от нагретого тела конвекционным потоком в свободное пространство, составляет:

$$P_K = \alpha(T_2 - T_1)S, \quad (7.11)$$

где α – коэффициент конвективной теплопередачи $\left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}} \right]$;

S – площадь нагретой поверхности;

T_2 – температура нагретой поверхности;

T_1 – температура окружающей среды.

Простота выражения (7.11) кажущаяся: коэффициент конвективной теплопередачи α является сложной функцией многих переменных – температур нагретой поверхности тела и окружающей среды, а также таких физических характеристик теплоносителя, как удельная плотность, теплоемкость, коэффициент объемного теплового расширения, динамическая вязкость, давление, под которым находится теплоноситель, и др.

Поэтому строгое аналитическое решение задачи конвективного теплообмена представляется крайне сложным, если вообще оно возможно.

7.2. Критериальные уравнения теплопередачи

В инженерной практике конвективная составляющая теплопередачи находится из так называемых критериальных уравнений, составляемых на основе теории подобия.

Введем обозначения, которые в дальнейшем будут использоваться:

α – конвективный коэффициент теплопередачи $[\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}]$;

λ – кондуктивный коэффициент теплопередачи $[\text{Вт}/\text{м} \cdot \text{К}]$;

C_p – удельная теплоемкость теплоносителя $[\text{Дж}/\text{кг} \cdot \text{К}]$;

p – давление в теплоносителе $[\text{Па}]$;

ρ – плотность теплоносителя $[\text{кг}/\text{м}^3]$;

v – скорость течения теплоносителя $[\text{м}/\text{с}]$;

$\nu = \mu/\rho$, где μ – динамическая вязкость теплоносителя;

β – коэффициент объемного расширения теплоносителя $[\text{К}^{-1}]$;

$g = 9,81 \text{ м}/\text{с}^2$ – ускорение свободного падения;

L_m – “определяющий” размер нагретого тела (для вертикальной поверхности – высота, для горизонтальной – наименьшая сторона прямоугольника, для шара и горизонтально расположенного цилиндра – диаметр);

t – температура объекта;

t_c – температура среды.

Из всей массы параметров теплонагруженного объекта и среды, которой он отдает тепло, составляются так называемые критерии подобия:

1) критерий теплоотдачи (*критерий Нуссельта*):

$$Nu = \frac{\alpha L_m}{\lambda};$$

2) критерий подобия полей давления (*критерий Эйлера*):

$$Eu = \frac{\Delta p}{\rho v^2};$$

3) критерий режима течения (*критерий Рейнольдса*):

$$Re = \frac{v L_m}{\nu};$$

4) Критерий подъемной силы (*критерий Грасгофа*):

$$Gr = \beta g \frac{L_m^3}{\nu^2} (t - t_c);$$

5) Критерий подобия температурных и скоростных полей (критерий Прандтля):

$$Pr = \frac{\nu}{a},$$

где $a = \frac{\lambda}{C_p \rho}$ — температуропроводность.

Так как в выражение для критерия Нуссельта входит сама искомая величина α , можно разрешить 1-е выражение относительно α , а все остальные критерии войдут в конечное выражение, так как они включают в себя практически все факторы, определяющие конвекцию.

Получить обозримые и пригодные для практики результаты можно лишь в случае некоторых упрощений, поскольку выразить аналитически связь приведенных критериев практически невозможно. Эти упрощения основаны на результатах экспериментального исследования процессов конвекции и обобщения эмпирических данных.

Проще всего вопрос решается для свободной конвекции в неограниченном объеме. Ограничим наше рассмотрение именно этим случаем без учета Eu и Re .

При свободной конвекции в неограниченном объеме критерий Нуссельта находится в виде:

$$Nu_m = c (Gr \cdot Pr)_m^n,$$

где c и n — эмпирические коэффициенты, а индекс m (medium) означает, что температурозависимые параметры теплоносителя берутся для так называемой определяющей температуры, равной полусумме температур тела и среды.

Для типичных случаев теплообмена в РЭС, когда конвективная теплоотдача происходит в воздух, получены частные формулы для конвективного коэффициента теплопередачи.

Если определяющий размер L_m и разность температур удовлетворяет неравенству

$$(t - t_c) < (840 / L_m \cdot 10^{-3})^3, \quad (7.12)$$

конвективный коэффициент теплопередачи следует рассчитывать по формуле:

$$\alpha_k = N(1,42 + 1,4 \cdot 10^{-3} t_m) \cdot \left(\frac{t - t_c}{L_m} \right)^{1/4}, \quad (7.13)$$

а если не удовлетворяет, то по формуле:

$$\alpha_k = N(1,67 + 3,6 \cdot 10^{-3} t_m) \cdot \left(\frac{t - t_c}{L_m} \right)^{1/3}. \quad (7.14)$$

Коэффициент N определяется ориентацией объекта в пространстве и составляет величину 0,7...1,3.

Приведем пример расчета конвективного коэффициента теплопередачи и отдаваемой блоком РЭС мощности за счет конвекции и лучеиспускания.

Пусть определяющий размер блока РЭС $L_m = 0,5$ м; площадь поверхности блока $S_n = 1$ м²; температура корпуса блока $t_k = 60^\circ\text{C}$; температура среды $t_c = 40^\circ\text{C}$; коэффициент $N = 1$.

Разность температур корпуса и среды составляет 20°C и рассматривается в случаях:

А. Конвекции.

Правая часть выражения (7.12) равна 4,9, значит, коэффициент конвективной теплопередачи следует рассчитывать по формуле (7.14). В результате расчета получается величина $\alpha_k = 9,05$ Вт/м²·К.

Тепловая проводимость $\sigma_k = \alpha_k S_k = 9,05$ Вт/град.

Таким образом, при перегреве в 20° блок отдает конвекцией мощность $P_k = \sigma_k \Delta T = 181$ Вт.

Б. Лучеиспускания.

Коэффициент лучистой теплопередачи определяется на основе закона Стефана-Больцмана как

$$\alpha_l = \epsilon f(T_k, T_c) = 5,67 \frac{(T_k/100)^4 - (T_c/100)^4}{T_k - T_c} \epsilon.$$

При тех же исходных данных: $T_K = 60^\circ\text{C} = 333\text{K}$, $T_C = 40^\circ\text{C} = 313\text{K}$ и степени черноты корпуса $\varepsilon = 0,9$ значение коэффициента теплопередачи составляет $\alpha_L = 6,9 \text{ Вт/м}^2$. Таким образом, корпус с площадью поверхности в 1 м^2 излучает в свободное пространство мощность $P_L = 6,9 \text{ Вт}$ или около 4% мощности, отдаваемой за счет конвекции.

7.3. Расчет теплового режима блоков РЭС

В предыдущем разделе мы рассмотрели существующие в природе механизмы теплообмена и получили оценки теплоотдачи равномерно нагретого (изотермического) корпуса блока РЭС на основе критериальных уравнений конвективного теплообмена и за счет лучеиспускания в свободное пространство.

На практике расчет теплового режима неизмеримо сложнее, поскольку связан с целым рядом факторов, трудно поддающихся точному учету. Сложность также и в том, что тепловой поток в блоках РЭС зарождается во внутреннем объеме, на локальных источниках тепла (резисторах, в нитях накала и на электродах электронных ламп — они до сих пор не вышли из употребления, на PN-переходах полупроводниковых приборов и т.п.) и тепловая энергия, прежде чем нагреть стенки корпуса блока, проходит сложными путями. В общий теплообмен в разной степени вносят свои вклады все три природных механизма.

Отметим также, что не существует таких методов расчета и проектирования, которые давали бы возможность по заданному тепловому режиму определить, какая должна быть конструкция. Только разработав конструкцию и проведя учет всех источников и путей распространения тепла, можно приступить к расчету теплового режима конструкции. Следовательно, расчет теплового режима носит поверочный характер, и если результаты расчета нас не удовлетворяют, мы будем вынуждены так преобразовать нашу конструкцию, чтобы повторный поверочный расчет дал приемлемые результаты, что отнюдь не гарантировано.

При проектировании РЭС в условиях промышленных НИИ и КБ расчет тепловых режимов должен выполняться единообразно в пределах отрасли или других больших сообществ предприятий-разработчиков или производителей приборов. Методики расчетов

закрепляются нормативными документами: руководящими техническими материалами (РТМ) и стандартами. До введения государственных стандартов дело не доходит ввиду сложности процедур их составления и внедрения. Более того, действующий в настоящее время "Закон о техническом регулировании" вообще указывает, что обязательными являются только стандарты, связанные с обеспечением безопасности жизнедеятельности, предупреждением техногенных катастроф и обеспечением безопасного существования людей. Решение о следовании стандартам в других областях деятельности принимается на добровольной основе. При этом, правда, в законе не определен субъект, который имеет право принимать такое решение. По-видимому, все-таки, это не рядовой инженер – если каждый специалист на своем рабочем месте откажется следовать стандартам, на производстве воцарится полный хаос.

Так или иначе, составление методик расчета теплового режима блоков РЭС начинается с определения модели теплообмена в пределах внутреннего объема блока и обмена между внешними поверхностями корпуса и окружающей средой.

При составлении модели теплообмена внутри блока определяется так называемая нагретая зона суммарный объем тепловыделяющих элементов, находящихся внутри блока, равномерно распределенный по поверхности шасси или кассет, устанавливаемых в блоке. Нагретая зона может быть одна либо их может быть несколько.

Далее, определяются пути и, соответственно, механизмы теплопередачи, участвующие в теплообмене нагретой зоны с корпусом или кожухом блока.

Затем определяются тепловые проводимости этих путей, что, в конечном итоге, позволяет, при известном значении выделяемой в виде тепла мощности, найти значение перегрева внутренней нагретой зоны относительно стенок корпуса блока и перегрев стенок корпуса относительно температуры окружающей среды.

Некоторые из известных методик вошли в основу программ компьютерного моделирования и расчета теплового режима на ЭВМ.

Рассмотрим одну из них, которая используется в курсовом проектировании по нашему курсу.

Для расчета теплового режима прибора используется аппарат математического моделирования тепловых полей. Используемая модель (рис. 7.3) включает несколько изотермических областей: окружающую среду с температурой T_c , кожух прибора с температурой T_k и N вертикально ориентированных нагретых зон (НЗ) с температурой T_{zi} , $i = 1, 2, \dots, N$, отображающих печатные платы с тепловыделяющими элементами.

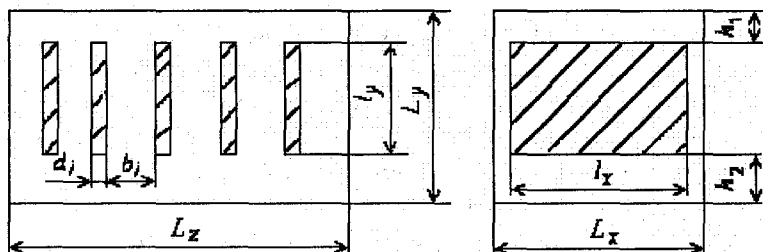


Рис. 7.3 . Размерные величины модели теплового поля

Предполагается, что кожух и нагретые зоны имеют форму прямоугольных параллелепипедов. Толщина каждой НЗ d_i , $i = 1, 2, \dots, N$, определяется толщиной печатной платы и усредненной высотой установленных на ней элементов. Считается, что источники тепловой энергии распределены по поверхности плат равномерно. Перенос тепла внутри прибора осуществляется в основном за счет конвекции и излучения (кондуктивными тепловыми связями плат с корпусом и между собой пренебрегаем).

Мощность P_i , выделяющаяся на i -й плате (в курсовом проекте это сумма мощностей, выделяемых элементами платы), передается путем излучения соседним платам и корпусу блока, а также путем конвекции – воздушному потоку в каналах с шириной b_i . Считаем, что температура воздушного потока в каналах изменяется только в вертикальном направлении. Характер движения воздушных потоков в каналах зависит от их формы. Если каналы узкие и длинные (и если пренебречь движением воздуха в зазорах между передней и задней стенками корпуса и нагретыми зонами), можно считать, что в каждом из них поток воздуха либо поднимается, либо опускается, сливаясь в зазорах между торцами плат и верхней и нижней стенками корпуса. При достаточно большой ширине каналов предполагается, что воздух

поднимается между платами и опускается в зазорах между вертикальными торцевыми поверхностями плат и стенками корпуса.

Для расчета теплового режима блока кассетной конструкции с воздушным охлаждением разработана **информационная технология** с использованием пакета программ **АТЕРЛО**, работающего в оконном интерфейсе **Microsoft Windows**.

Выбор типа конструкции блока (герметичная, перфорированная или с принудительным воздушным охлаждением) осуществляется выбором пункта меню **БЛОК** и соответствующего пункта выпадающего подменю.

Исходные данные вводятся заполнением таблицы в оконном интерфейсе оболочки пакета аналогично редактированию полей в приложении Microsoft Excel. Предусмотрен режим контроля и коррекции данных, не отличающийся от процедуры ввода.

Расчет в курсовом проекте рекомендуется произвести для герметичного блока. Данные для расчета: N – число плат; b_i – ширина вертикальных каналов (данные вводятся для $(N + 1)$ каналов); d_i – эффективная толщина плат (данные вводятся для N плат); P_i – мощности плат (данные вводятся для N плат); l_y – высота плат; h_1 – ширина верхнего канала, $h_1 = (L_y - l_y)/2$; h_2 – ширина нижнего канала, $h_2 = (L_y - l_y)/2$; l_x – глубина плат; L_x – глубина корпуса; ϵ_k – степень черноты корпуса (для металлического окрашенного корпуса $\epsilon_k = 0,9$); ϵ_n – степень черноты плат (для стеклотекстолита $\epsilon_n = 0,83$); T_c – температура окружающей среды по техническому заданию; *test* – имя файла для записи данных и результатов расчета.

Если проектируемый блок имеет одну плату, рекомендуется вводить данные для $N = 3$. При этом боковыми платами считать стенки корпуса (для задания размеров каналов). Мощности, выделяемые стенками корпуса, принимаются равными нулю: $P_1 = P_3 = 0$.

После окончания ввода данных и их коррекции (в случае необходимости) производится расчет.

Расчет запускается щелчком экранной кнопки “Пересчитать” в главном окне программы.

Результатами расчета являются:

- среднее значение температуры корпуса;
- средние значения температур плат;
- средние значения температур воздуха в каналах;

– средние значения скоростей воздуха в каналах (знаки “плюс” или “минус” указывают направление движения воздуха – вверх или вниз).

При анализе результатов сравниваются рассчитанные значения температур плат и предельные значения для элементов платы. Если эти значения превышены, следует произвести расчет для перфорированного корпуса блока, и если результаты опять не удовлетворяют, повторить расчет для блока с принудительной вентиляцией.

При расчете перфорированного блока кроме перечисленных данных необходимо дополнительно задать коэффициент перфорации (отношение площади отверстий к площади корпуса) и диаметр отверстий.

Для блока с принудительной вентиляцией дополнительно задаются удельная теплоемкость, массовый расход воздуха в каналах и температура охлаждающего воздуха.

Окончательные результаты выводятся в специально отведенные поля главного окна программы. Они могут также быть записаны в файл, переданы на распечатку.

7.4. Обеспечение заданного теплового режима РЭС

Тепловой режим РЭС – пространственно-временное распределение температуры, обусловленное соответствующим пространственно-временным распределением тепловыделения.

Под заданным тепловым режимом понимается такой тепловой режим, при котором температура каждого из составных элементов узлов и блоков РЭС равна заданной или не выходит за пределы, указанные в нормативно-технической документации на объект и его составные части.

Тепловой режим может быть стационарным или нестационарным – все зависит от постоянства или непостоянства тепловыделения или характеристик среды, в которую отдается тепло, во времени. В реальной жизни встречаются оба вида тепловых режимов. Когда достаточно быстро изменяется потребление объектом электрической энергии (в силу особенностей функционирования объекта) либо объект перемещается в пространстве, где существенно меняется окружающая температура, давление (при подъеме на высоту), тепловой режим, скорее всего, будет нестационарным.

Комплекс мероприятий, направленных на обеспечение заданного теплового режима, как правило, не может быть выполнен без

дополнительных материальных затрат, поэтому при проектировании РЭС необходимо уделять внимание экономически обоснованному решению конструкции при приемлемом перепаде температур. В зависимости от условий эксплуатации в этот комплекс могут входить как мероприятия по подъему температуры (подогрев в условиях Арктики, высокогорья, стратосферы, космоса), так и по снижению температуры — охлаждению объекта.

Решение первой задачи относительно проще: нужен только дополнительный источник энергии. Выбор таких источников может быть богатым, когда на объекте эксплуатации нет дефицита энергии, а может быть и бедным — при эксплуатации в труднодоступных или не доступных для подачи этой энергии условиях, например, в условиях автономности.

Более сложным является отвод избыточного тепла. Дальнейшее изложение посвящено именно этому вопросу.

Отвод избыточного тепла от блоков РЭС выполняется системами охлаждения. В системах охлаждения РЭС всегда происходит перенос тепла за счет всех трех механизмов теплопередачи.

Кондуктивный и радиационный переносы тепла могут быть только естественными; они подчиняются рассмотренным закономерностям: закону Фурье и закону Стефана-Больцмана. Интенсификация теплообмена за счет этих механизмов возможна лишь при использовании более теплопроводных материалов и за счет увеличения степени черноты покрытий.

Применительно к конвективному теплообмену можно говорить о естественном и принудительном охлаждении — в зависимости от характера движения теплоносителя.

По виду теплоносителя системы конвективного охлаждения делятся на воздушные, жидкостные и системы, действие которых основано на изменении агрегатного состояния вещества теплоносителя (плавление, испарение).

По соображениям экономии следует стремиться к естественному охлаждению, принимая конструктивные меры к интенсификации передачи тепла от теплонагруженных элементов и узлов в окружающее пространство или на другие элементы конструкции.

Рассмотрим основные применяемые в РЭС системы охлаждения и сравним их эффективность.

7.4.1. Кондуктивные системы охлаждения

Кондуктивный теплоотвод является практически единственно возможным способом охлаждения в герметичных узлах и блоках с высокой плотностью заполнения, в монолитных и гибридных интегральных микросхемах, микросборках (МСБ) и гибридных интегральных модулях (ГИМ). Такие узлы и блоки конструируются с применением высокотеплопроводных материалов. Применяются специальные теплостоки из толстой медной ленты, по которым отводится избыточное тепло от теплонагруженных компонентов на печатных платах. При этом имеет большое значение качество тепловых контактов в соединяемых узлах.

Например, для улучшения теплового контакта мощных транзисторов с радиаторами, на которые они устанавливаются, используется теплопроводная паста “СИАЛЬ” (название происходит от названия компонентов, составляющих пасту – кремния и алюминия). Паста не обладает электроизоляционными свойствами, но достаточно хорошо проводит тепло.

Рассмотрим путь теплового потока в блоках на гибридных интегральных модулях от тепловыделяющего кристалла полупроводниковых приборов или интегральных микросхем через все элементы конструкции во внешнее пространство (рис. 7.4).

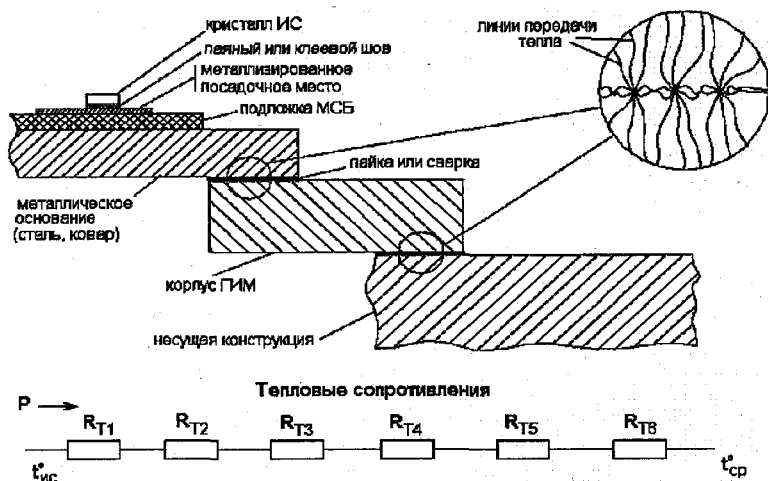


Рис. 7.4. Путь теплового потока

Видим, что тепловой поток преодолевает шесть последовательно соединенных тепловых сопротивлений.

Для эффективного теплоотвода кроме теплопроводности материалов конструкции важно также сочетание материалов контактирующих тел. Данные по величине удельного теплового сопротивления для некоторых пар материалов приводятся в табл. 7.1.

При конструировании интегральных микросхем (ИМС), МСБ и ГИМ выбор материалов для теплового контакта ограничен. Дело в том, что более важной, чем теплопроводность, характеристикой конструкционных материалов является значение коэффициента линейного расширения: он должен быть равен коэффициенту линейного расширения кристалла ИМС керамической или ситалловой подложки МСБ и ГИМ. Если не соблюдать этого требования, это может привести к механическому разрушению чипа ИМС, керамики или стекла подложек МСБ и ГИМ.

Таблица 7.1

Удельное тепловое сопротивление для некоторых пар материалов

Контактирующая пара	ρ_t см ² К/Вт
Медь – алюминий	0,08
Медь – медь	0,1
Медь – латунь	0,18
Медь – сплав Д16Т	0,2
Сплав Д16Т – Д16Т	0,25
Сталь – медь	0,8
Сталь – сплав Д16Т	1,2
Сталь – сталь	2,5
Металл – краска – металл	20,0

В качестве материала корпусов МСБ и ГИМ часто используется сплав КОВАР, имеющий невысокий коэффициент теплопроводности 15 Вт/м·К, но зато коэффициент линейного расширения $6 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$, близкий к коэффициенту линейного расширения керамических или ситалловых подложек МСБ и ГИМ.

Поскольку тепловой контакт имеет место не по всей поверхности соприкасающихся элементов конструкции, только в местах расположения выступов шероховатости этих поверхностей для обеспечения лучшей теплопередачи целесообразно использовать сварные или паяные соединения. Однако не все возможные пары соединяемых материалов могут спаиваться или свариваться, поэтому нет

возможности полностью отказаться от клеевого соединения, несмотря на его невысокую теплопроводность.

Применяемые при сборке винтовые соединения также не обладают высокой теплопроводностью. Для ее повышения применяются покрытия или прокладки из пластичного металла (медь, алюминий, свинец), теплопроводные пасты.

Сложнее всего добиться хорошего теплового контакта при необходимости обеспечения электрической изоляции. За исключением вакуумплотной керамики на основе окиси бериллия (брокерит) с коэффициентом теплопроводности 200 Вт/мК, другие изоляционные материалы, включая стекло, имеют низкую теплопроводность. Традиционно применяемая для изоляции мощных транзисторов от радиатора слюда имеет коэффициент теплопроводности всего около 0,15...0,2 Вт/мК.

Возможным выходом из положения является применение оксидированного алюминия с пленкой Al_2O_3 толщиной 50 мкм. Существует технология печатного монтажа на металлических платах. Применение металлических печатных плат позволяет эффективно отводить тепло.

Каковы реально мощности, выделяемые современными интегральными схемами, МСБ и ГИМ? Известно, что процессорные микросхемы современных персональных компьютеров потребляют, а следовательно, и выделяют в виде тепла мощность более 50 Вт. Такая мощность, выделяемая объектом малых размеров (площадь кристалла около 1 см^2), создает высокую тепловыделенность. Если пересчитать мощность, выделяемую в ГИМ, в удельную тепловыделенность, то при мощности в 50 Вт получается удельная тепловыделенность порядка 120 кВт/м^3 .

Если при меньших мощностях для поддержания нормального теплового режима хватало принудительного обдува корпуса микросхемы воздушным потоком миниатюрного вентилятора, для отвода мощностей более 50 Вт применяются более сложные системы теплоотвода, о которых речь пойдет далее. Тем не менее, непосредственно от кристалла ИМС тепло отводится к корпусу микросхемы исключительно за счет теплопроводности.

Что касается высокотеплопроводных материалов, то в научной литературе приводятся сведения об изоляционных материалах с очень высокой теплопроводностью (например, нитрид алюминия с

$\lambda = 70000 \text{ Вт/мК}$), однако промышленного применения такие материалы пока не получили.

7.4.2. Системы воздушного охлаждения

Опыт показывает, что при нормальных климатических условиях и естественном воздушном охлаждении в РЭС около 70% тепла отводится за счет конвекции, до 20% – за счет излучения и 10% – за счет теплопроводности.

Простейшим способом конвективного теплоотвода является естественное воздушное охлаждение. *Этим способом отводится тепловой поток плотностью до $0,2 \text{ Вт/см}^2$.*

В случае когда конвективный теплоотвод от нагретой зоны кожуху закрытого типа недостаточен (температура нагретой зоны превышает допустимое для используемых компонентов значение), применяется перфорация стенок, дна, верхней крышки кожуха. При этом конвекционный поток частично выводится за пределы кожуха, и нагретый воздух отдает тепло непосредственно в окружающее пространство. Количество протекающего воздуха зависит от суммарной площади отверстий и от аэродинамического сопротивления, зависящего от плотности заполнения внутреннего объема блока.

Применение перфорации позволяет при одном и том же значении перегрева отводить на 30% больше тепла (рис. 7.5).

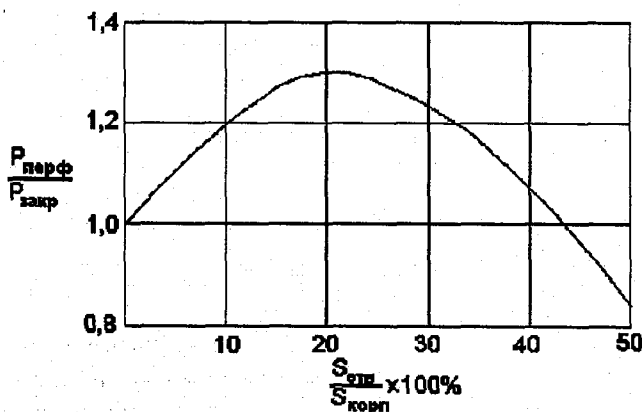


Рис. 7.5 График эффективности перфорации.

При этом, однако, оказывается, что площадь отверстий не должна превышать 20% общей площади поверхности корпуса блока. Это объясняется тем, что при большой площади отверстий уменьшается количество тепла, отводимого от стенок корпуса конвекцией и излучением.

Следует отметить, что при всей заманчивости и простоте воздушного охлаждения его не всегда возможно использовать. Оно эффективно только при атмосферном давлении не ниже 53...60 кПа и относительно невысокой температуре. Оно недостаточно для самолетных РЭС, работающих вне гермоотсеков, малоэффективно для РЭС, работающей в тропическом климате.

Недостатком естественного воздушного охлаждения перфорированных блоков является запыление внутреннего объема блоков, стоек и шкафов. Применять фильтрацию против запыления невозможно, так как фильтр препятствует протеканию охлаждающего воздуха, и блок становится закрытым.

7.4.3. Принудительное воздушное охлаждение

Принудительное воздушное охлаждение позволяет отводить тепловые потоки плотностью до 1 Вт/см².

Конструкция, в которой применяется принудительное воздушное охлаждение, должна отвечать следующим требованиям:

- 1) обладать малым аэродинамическим сопротивлением протекающему воздуху;
- 2) обеспечивать хороший доступ холодного воздуха к теплонагруженным узлам;
- 3) предотвращать попадание нагретого воздуха на теплонагруженные элементы;
- 4) внутренний объем блоков должен быть защищен от пыли (фильтрами);
- 5) обеспечивать резервирование принудительного воздушного потока;
- 6) обеспечивать автоматическое выключение блока при выходе из строя системы принудительной вентиляции (если этого не будет, теплонагруженные элементы выйдут из строя от перегрева).

Системы принудительного воздушного охлаждения делятся на общие и локальные. Локальные применяются для отвода тепла от наиболее теплонагруженных узлов.

Для мощных РЭС системы принудительного воздушного охлаждения выливаются в сложные конструкции, включающие в себя электродвигатели с вентиляторами пропеллерного или центробежного типов, воздухопроводы, фильтры, глушители шума, автоматику для поддержания теплового режима и аварийного отключения. Физический объем системы охлаждения при этом становится сравнимым с размерами самой аппаратуры.

По способу подачи воздуха системы принудительного воздушного охлаждения делятся на приточные, вытяжные и приточно-вытяжные.

Приточные системы позволяют создавать контролируемый воздушный напор, но при их применении не удастся избежать так называемых аэродинамических теней – областей, в которых затруднена циркуляция охлаждающего воздуха.

В вытяжных системах нагретый воздух засасывается вентилятором и выбрасывается из блока наружу. Такая система характеризуется большей равномерностью распределения воздушного потока, но требует на 30...40% большей мощности вентилятора. Кроме того, если электродвигатель вентилятора находится в воздушном потоке, ухудшается его тепловой режим.

Приточно-вытяжная вентиляция дает наибольший эффект при охлаждении крупногабаритных негерметичных стоек и шкафов. Ставятся два вентилятора (приточный и вытяжной) одинаковой мощности. При этом образуется равновесная система с нулевым избыточным давлением посередине высоты стойки. Расход воздуха в такой системе определяется по эмпирической формуле:

$$V_i = 400P, \quad (7.15)$$

где V_i – расход воздуха, $\text{м}^3/\text{с}$;

P – отводимая мощность, кВт.

Расчет принудительного воздушного охлаждения

Процесс теплообмена в РЭС при охлаждении принудительным воздушным потоком определяется двумя механизмами – конвекцией и излучением. Ввиду сложности этого процесса для расчета должны быть введены некоторые допущения.

1. Блок имеет форму прямоугольного параллелепипеда.

2. Платы или субблоки расположены внутри блока равномерно. При этом внутри нагретой зоны отсутствуют широкие каналы, по которым могла бы протечь большая масса воздуха.

3. Все тепловыделяющие элементы омываются равномерным потоком воздуха.

4. В теплоотдаче от нагретой зоны и от внутренних стенок кожуха к воздушному потоку преобладает конвективная составляющая.

5. В теплообмене между нагретой зоной и кожухом, а также между кожухом и окружающей средой присутствует составляющая излучения.

6. Считаем, что отражение излучения от кожуха обратно к нагретой зоне отсутствует.

Это получается, если нагретая зона находится в отдалении от приточных или вытяжных окон или вблизи окон установлены выравнивающие решетки (дефлекторы).

При таких допущениях интенсивность теплообмена определяется средней скоростью воздушного потока.

Не будем подробно рассматривать всю методику расчета. Укажем только, что он выполняется методом последовательных приближений.

Из критериального уравнения

$$Nu_{L_m} = 0,8 \sqrt{Re_{L_m}}, \quad (7.16)$$

где $Re_{L_m} = \frac{V_t L_m}{\nu}$ — число Рейнольдса, характеризующее турбулентность воздушного потока, может быть найден коэффициент конвективной теплопередачи от нагретой зоны в воздушный поток:

$$\alpha_{3-в} = 0,8 \frac{\lambda}{L_m} \cdot \sqrt{\frac{V_t L_m}{\nu F_k}}, \quad (7.17)$$

где F_k — площадь поперечного сечения канала, по которому течет воздух в продуваемом отсеке;

L_m — средний определяющий размер или длина пути воздуха вдоль огибаемого элемента (длина стенки, полупериметр основания цилиндра или призмы);

λ – теплопроводность воздуха, Вт/м К;

ν – кинематическая вязкость воздуха, м²/с;

V_t – объемный расход воздуха, м³/с;

Зная коэффициент конвективной теплопередачи, можно получить тепловую характеристику – зависимость перегрева нагретой зоны от рассеиваемой мощности, после чего рассчитывается производительность и мощность электродвигателя вентилятора:

$$P_{\text{дв}} = \frac{M_e \Delta p}{36,7 \cdot 10^4 \eta p}, \quad (7.18)$$

где η – КПД вентилятора;

ρ – плотность воздуха, кг/м³;

V_t – расход воздуха, м³/с;

Δp – аэродинамические потери, Па.

Аэродинамические потери – это снижение давления в воздушном потоке из-за трения:

$$\Delta p_T = 4,9 \xi_{\text{тр}} \rho v^2 \frac{l}{d_{\text{экв}}},$$

где v – скорость течения воздуха;

$\xi_{\text{тр}}$ – коэффициент потерь на трение;

$d_{\text{экв}}$ – эквивалентный диаметр канала;

l – длина продуваемого участка.

Коэффициент потерь на трение зависит от турбулентности воздушного потока и составляет величину порядка $\xi_{\text{тр}} \approx 0,03$ на гладких участках, величину 0,15...0,2 в воздухозаборниках в виде воронки и около 0,5 в воздухозаборниках, врезанных заподлицо с плоскостью стенки корпуса охлаждаемого блока.

Существуют также методики расчета принудительного воздушного охлаждения элементов внутри блока кассетной конструкции.

Из критериального уравнения для обдуваемого элемента, аналогичного выражению (7.16), а именно:

$$Nu_3 = 0,8 \sqrt{Re_3}, \quad (7.19)$$

где $Re_3 = \frac{V l_3}{\nu S_x}$ – число Рейнольдса для потока, омывающего элемент в x -м сечении блока; S_x – площадь поперечного сечения канала, определяется коэффициент теплоотдачи элемента:

$$\alpha_3 = 0,8 \frac{\lambda_{\text{возд}}}{l_3} \sqrt{Re_3} \quad (7.20)$$

Затем определяется перегрев воздуха, обдувающего $m+1$ -й элемент в канале (принявшего уже тепло от m элементов):

$$\vartheta_{B3} = \frac{\sum_{i=1}^m P_{3i}}{1000 V_i \rho}, \quad (7.21)$$

где P_{3i} – тепловыделение элементов по ходу воздушного потока до сечения с $m+1$ -м элементом;
 V_i – объемный расход воздуха в единицу времени, $\text{м}^3/\text{с}$;
 ρ – плотность воздуха.

Перегрев рассматриваемого $m+1$ -го элемента

$$\vartheta_3 = \vartheta_{B3} + \frac{P_3}{\alpha_3 S_3}, \quad (7.22)$$

где S_3 – площадь поверхности элемента, омываемая воздушным потоком.

Температура корпуса элемента

$$t_3 = t_{B3} + \vartheta_3. \quad (7.23)$$

Средний перегрев воздуха на выходе из блока определяется, исходя из мощности тепловыделения всех элементов:

$$\bar{\vartheta}_B = \frac{\sum P_3}{1000 V_i \rho} \quad \text{или} \quad \bar{\vartheta}_B = \frac{\sum P_3 + P_B}{1000 V_i \rho} \quad \text{соответственно для вытяжной и}$$

приточной вентиляции.

7.4.4. Системы жидкостного и испарительного охлаждения

Системы жидкостного и испарительного охлаждения следует рассматривать вместе, поскольку просто жидкостная система ста-

новится испарительной, если охлаждающая жидкость в ней нагревается до кипения и превращается в пар. При этом от охлаждаемого объекта отнимается скрытая теплота парообразования. Это весьма значительная величина. Опыт показывает, что *жидкостное охлаждение без фазового перехода* теплоносителя (испарения) позволяет отводить тепловые потоки плотностью до 20 Вт/см^2 , а охлаждение с *фазовым переходом* – тепловые потоки с плотностью до 200 Вт/см^2 .

В конструкциях жидкостных систем используется как естественная конвекция, так и принудительное перемешивание теплоносителя.

Контакт теплонагруженных элементов с теплоносителем может быть непосредственный, а также при посредстве специальных теплопроводящих каналов, подводимых к элементам.

В системах, в которых в установившемся режиме жидкость не доводится до кипения, температура жидкости, а следовательно, и температура теплонагруженных элементов зависит от температуры окружающей среды. При этом температурный напор – разность $\Delta t_{\text{кс}} = t_{\text{к}} - t_{\text{с}}$ остается постоянным в широком диапазоне температур среды.

Расчет таких систем аналогичен расчету систем с естественной конвекцией воздуха. При этом во всех расчетных формулах теплофизические характеристики воздуха заменяются на характеристики жидкости.

В качестве охлаждающей жидкости используется дистиллированная вода, этиловый спирт, фреоны, жидкий аммиак.

Жидкость должна отвечать следующим требованиям:

- иметь большую электрическую прочность;
- малую диэлектрическую проницаемость (вода с $\varepsilon = 80$ годится там, где диэлектрическая проницаемость не важна);
- малые диэлектрические потери на рабочей частоте;
- малую вязкость;
- хорошо смачивать поверхности теплонагруженных элементов, кожуха или теплообменника;
- иметь низкую температуру застывания.

В системах испарительного охлаждения происходят противоречивые процессы.

С одной стороны, тот факт, что вскипающая жидкость отнимает у охлаждаемого тела скрытую теплоту парообразования, обеспе-

чивает высокую стабильность поддержания рабочей температуры. При этом температура может быть и не очень высокой: имеются фреоны с температурой кипения около $+25^{\circ}\text{C}$. С другой стороны, охлаждаемое тело в местах контакта с кипящей жидкостью покрывается паровыми пузырьками. При естественном кипении диаметр пузырька в момент отрыва определяется выражением:

$$d = 20\beta \sqrt{\frac{\sigma}{\rho' - \rho''}},$$

где σ — поверхностное натяжение жидкости;

β — краевой угол смачивания;

ρ' и ρ'' — плотность жидкости и насыщенного пара.

Для воды при кипении под нормальным давлением $d = 2$ мм.

Теплонагруженный объект не перегреется до тех пор, пока не будет выделять так много тепла, что покроется теплоизолирующей паровой оболочкой.

Критическая плотность теплового потока, отдаваемого охлаждаемым телом при кипении жидкости на теплоотдающей поверхности, когда весь объем жидкости нагрет до температуры кипения, составляет

$$q_{\text{кр}} = 1470 r \rho'^{0,5} (\sigma(\rho' - \rho''))^{0,25} \left(1 + 30 (g \mu'^2 (\rho' - \rho'')^{0,5})^{0,4} \right) \text{ Дж/кгК},$$

где r — скрытая теплота парообразования, Дж/кг;

ρ' — плотность жидкости, кипящей при данном давлении, кг/м^3 ;

ρ'' — плотность сухого насыщенного пара, кг/м^3 ;

σ — поверхностное натяжение, Н/м;

μ' — динамическая вязкость жидкости, кипящей при данном давлении, Па·с

g — ускорение свободного падения, м/с^2 .

Если жидкость имеет температуру ниже температуры кипения, а охлаждаемое тело — выше температуры кипения, то отрывающиеся от нагретой поверхности пузырьки пара конденсируются в более холодных слоях жидкости. При этом в системе охлаждения имеет место докритический режим, в котором плотность отводимого теплового потока значительно возрастает и составляет величину

$$q_{\text{кр}}|_{t_{\text{ж}} < t_{\text{нас}}} = q_{\text{кр}}|_{t_{\text{ж}} < t_{\text{нас}}} \left(1 + 0,065 \frac{C_p (t_{\text{нас}} - t_{\text{ж}})}{r} \right),$$

где C_p — удельная теплоемкость жидкости, Дж/кг К;

$t_{\text{ж}}$ — температура жидкости вне зоны кипения;

$t_{\text{нас}}$ — температура насыщения (кипения) при данном давлении.

В тех случаях, когда нужно отводить тепловой поток, плотность которого превышает критическую, применяется оребрение теплоотдающей поверхности. При конструировании этих ребристых поверхностей следует выбирать размеры ребер и расстояния между ними так, чтобы они превышали размеры паровых пузырьков и способствовали отводу пара из зоны кипения. Толщина и профиль ребер должны обеспечивать хорошую растекаемость тепла по ребру от основания к кромке.

Удельная мощность, передаваемая радиатором теплоносителю, составляет

$$P_{\text{уд}} = \frac{\alpha_{\text{к}}}{8600} (t_{\text{то}} - t_{\text{тн}}) \frac{S_{\text{то}}}{S_{\text{тв}}},$$

где $t_{\text{то}}$ — средняя температура теплоотдающей поверхности;

$t_{\text{тн}}$ — средняя температура теплоносителя;

$S_{\text{то}}$ — площадь теплоотдающей поверхности (радиатора);

$S_{\text{тв}}$ — площадь тепловоспринимающей поверхности (площадь контакта радиатора с теплонагруженным элементом).

В заключение отметим достоинства, которыми обладают системы испарительного охлаждения:

- 1) возможность отвода тепловых потоков плотностью до 400 Вт/см² (системы с ребристыми радиаторами);
- 2) значительно меньшие количества теплоносителя по сравнению с другим системами охлаждения;
- 3) постоянство рабочей температуры в широком интервале отводимых мощностей и независимость ее от температуры окружающего воздуха.

7.4.5. Охлаждение с помощью тепловой трубы

В XIX в. немецкий булочник изобрел печь, в которой топка была отделена от зоны выпечки хлеба, а тепло передавалось с по-

мощью устройства, получившего название тепловой трубы. Это была вертикальная запаянная труба, на дне которой находилось некоторое количество воды (рис. 7.6).

В таком герметичном сосуде устанавливается динамическое равновесие между испарением жидкости и конденсацией пара. Если сосуд нагревать равномерно, никакими особыми свойствами теплопередачи он обладать не будет. Просто это динамическое равновесие будет устанавливаться при каждом новом значении температуры. Только давление насыщенного пара в нем будет повышаться при нагреве. Давление может повышаться не беспрестанно. Существует критическая температура, до которой имеет место этот эффект. Для воды эта температура составляет 374°C , для этилового спирта 243°C , для аммиака 132°C .

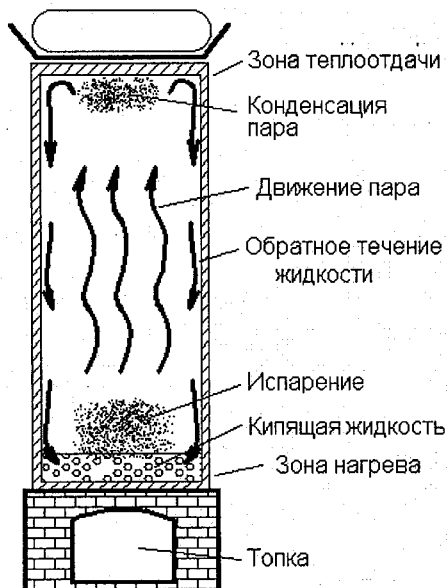


Рис. 7.6. Тепловая труба

Если же нагревать один нижний конец трубы, испарение у этого конца будет происходить интенсивнее, чем в остальном объеме, и произойдет местное повышение давления пара. Пар устремится в область низкого давления, в данной конструкции – вверх по трубе. Если на верхнем торце конструкции поместить предмет, способный отнимать от него тепло, пар внутри трубы в зоне верхнего торца будет конденсироваться и отдавать концу трубы, а вместе с ним и расположенному на нем телу, скрытую теплоту парообразования и нагревать его.

Он не может не отдать теплоту парообразования, если температура среды, окружающей верхний конец трубы ниже температуры самого пара и нагретого им конца трубы. Сконденсировавшаяся жидкость стекает по стенкам трубы вниз, обратно в зону кипения, и

весь процесс повторяется. Таким образом в результате образующегося круговорота тепло переносится в зону нагреваемого тела.

Устройство, работающее на этом принципе, получило широкое применение в системах охлаждения, в том числе и в РЭС. В терминах систем охлаждения топка заменяется на теплонагруженный элемент, а сковорода с булкой – на теплообменник или радиатор, рассеивающий тепло в окружающее пространство (рис. 7.7).

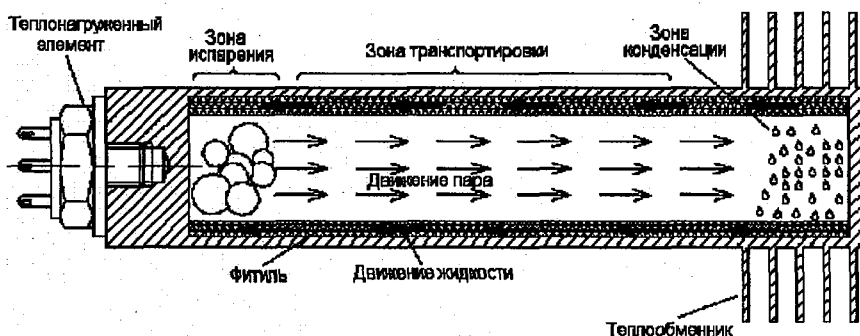


Рис. 7.7 Система охлаждения на основе тепловой трубы.

На макроуровне такое устройство воспринимается как стержень или пластина с аномально высокой теплопроводностью, в сотни раз превышающей теплопроводность меди.

Вертикальное расположение трубы не обязательно. В современных системах стенки трубы устилаются пористым или сетчатым фитилем, по капиллярам которого сконденсировавшаяся в зоне теплообменника жидкость за счет сил поверхностного натяжения подсасывается из зоны конденсации в зону кипения.

Температура кипения жидкости, а следовательно, и температура тепловыделяющего элемента, определяется теплофизическими характеристиками выбранной жидкости и давлением, под которым она находится в холодной трубе. Температура эта не обязательно очень высока, даже для воды. На рис. 7.8 приведена зависимость температуры кипения воды от давления, под которым она находится.

Экспериментальное определение коэффициента конвективной теплопередачи от теплонагруженного элемента в кипящую жидкость показывает, что наибольшая его величина наблюдается при пузырьковом кипении под температурным напором в пределах

1...10°C. Для воды при нормальном давлении его величина достигает значений 200...2000 Вт/м²К.

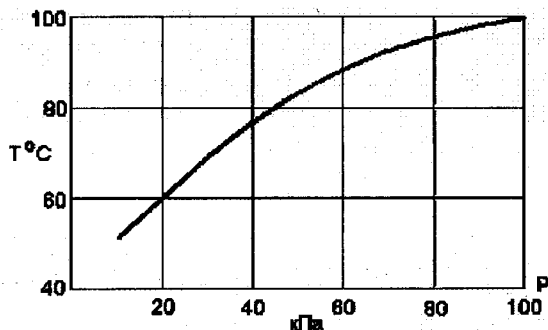


Рис. 7.8. Зависимость температуры кипения воды от давления в трубе.

Теплоноситель в тепловой трубе определяет режим ее работы, давление в рабочем режиме. Требуется, чтобы он:

- в жидком состоянии обладал высокой теплопроводностью, чтобы в смоченном им фитиле было малое поперечное тепловое сопротивление;
- имел высокую теплоту парообразования;
- хорошо смачивал фитиль;
- был химически совместим с металлом, из которого делается труба.

Приведем данные о теплофизических характеристиках некоторых из используемых на практике теплоносителей (табл. 7.2).

Важным требованием является отсутствие в трубе неконденсирующегося газа, так как присутствие постороннего газа блокирует часть трубы в зоне конденсации пара. Газ в трубе может появляться уже в процессе эксплуатации по причинам физического и химического характера.

Физическая причина заключается в десорбции молекул газа с поверхности трубы и фитиля и выделении газа, растворенного в теплоносителе.

Химическая причина состоит в химических реакциях, возникающих при неудачном подборе материалов трубы, фитиля и теплоносителя или в результате деструкции теплоносителя. Например, в алюминиевой трубе возможен гидролиз воды с выделением водо-

рода. Недопустима также коррозия металла при соприкосновении с теплоносителем.

Все это определяет высокие требования к технологическому процессу изготовления тепловой трубы и сложность этого процесса.

При конструировании тепловой трубы необходимо помнить, что она является только проводником тепла. Чтобы это тепло эффективно отбиралось от зоны конденсации, необходимо устройство теплообменников: радиаторов с естественной теплоотдачей, обдувом и т.п.

Таблица 7.2.

Теплофизические характеристики теплоносителей

Материал	Химическая формула	Удельная теплоемкость, Дж/кгК	Теплопроводность Вт/мК	Теплота парообразования МДж/кг	Плотность, кг/м ³	Температура кипения, °С	Совместимость с металлами
Воздух сухой	-	1000	0,026	—	1,21	-	
Вода (бидистиллят)	H ₂ O	4200	0,60	2,26	1000	100	медь, никель, титанов. сплавы
Тосол А-65		2600	0,30		1090		медь, латунь, сталь, чугун
Спирт этиловый	C ₂ H ₅ OH	2500	0,19	0,26	790	80	сталь, никель
Хладон 11	CFC ₁₂	900	0,09	0,17	1400	23,7	алюмин. сплавы, медь, сталь, титанов. сплавы
Хладон 113	C ₂ F ₃ Cl ₃	1000	0,07	0,14	1500	47,6	
Аммиак жидкий	NH ₃		0,38	1,37	680	-33,4	алюмин. сплавы, сталь, никель

В современных РЭС тепловые трубы устраиваются на печатных платах и в других типах субблоков. Поперечное сечение трубы не обязательно должно быть круглым – труба может быть также и плоской, коробчатой формы, со сложной конфигурацией тепловыводящих путей.

8. РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ РЭС

Надежность – комплексный показатель качества функционирования РЭС, образованный четырьмя частными показателями:

- **безотказность** – способность радиоэлектронного средства функционировать без нарушения работоспособности в течение заданного интервала времени;

- **долговечность** – способность радиоэлектронного средства сохранять рабочие характеристики в пределах, установленных нормативно-технической документацией в течение всего жизненного цикла – с момента ввода в действие до наступления предельного состояния, когда меры по поддержанию рабочих характеристик в норме перестают приводить к этому результату;

- **ремонтпригодность** – такое построение электрической схемы и конструкции радиоэлектронного средства, которое позволяет восстановить его работоспособность в случае возникновения отказов;

- **сохраняемость** – способность радиоэлектронного средства функционировать, сохраняя рабочие характеристики в пределах, установленных нормативно-технической документацией, после хранения в течение заданного срока в условиях, оговоренных в нормативно-технической документации.

Определим ряд терминов, связанных с надежностью технических объектов, в том числе радиоэлектронных средств (РЭС):

- **исправность** – состояние объекта, при котором он сохраняет все характеристики (включая внешний вид) в пределах, установленных нормативно-технической документацией;

- **работоспособность** – состояние объекта, при котором объект сохраняет основные рабочие характеристики в пределах, установленных нормативно-технической документацией и выполняет поставленную задачу;

- **повреждение** – событие, приводящее к нарушению исправности объекта (даже такое, как скол краски на наружной поверхности);

- **отказ** – событие, приводящее к нарушению работоспособности или полному прекращению функционирования объекта;

- **нарушение работоспособности** – состояние объекта, при котором он продолжает выполнять свои функции, но при этом один или несколько основных его технических показателей отклонились от значений, установленных нормативно-технической документацией.

Все упомянутые показатели надежности имеют свое количественное выражение, свои единицы измерения. Исчислением этих величин занимается теория надежности.

Остановимся на характеристиках отказов. Отказ может быть:

- **полным** – приводящим к полной потере работоспособности;
- **частичным** – приводящим к частичной потере работоспособности;
- **систематическим** – вызванным причинами, поддающимися выявлению и поэтому прогнозируемым;
- **внезапным** – вызванным причинами, не поддающимися учету и прогнозированию и происходящим неожиданно, в случайные моменты времени;
- **постоянным** – необратимым;
- **перемежающимся** – таким, в результате которого работоспособность нарушается, а затем самовосстанавливается;
- **сбоем** – кратковременным нарушением работоспособности и быстрым ее восстановлением.

В дипломном проекте студенты должны рассчитать значения показателей безотказности разработанного радиоэлектронного средства в условиях действия внезапных отказов.

Внезапные отказы относятся к классу событий, исследование которых должно проводиться методами математической теории вероятностей. Это математическая дисциплина, которая занимается исследованием закономерностей, присущих случайным событиям и случайным величинам.

Следует отметить, что закономерности, присущие отказу, как случайному событию проявляются только в случае, если мы имеем дело с массой однородных объектов, за которыми проводится наблюдение в течение ограниченного временного интервала.

Если мы попытаемся исследовать единственный объект, то никаких закономерностей нам установить не удастся. Отказа может попросту не произойти за время наблюдения. Это подтверждает

весь опыт эксплуатации любых технических средств. Один объект может безотказно работать десятки лет, а другой, точно такой же, откажет через пять минут после ввода в действие.

Если же мы, например, поставим на испытание большое число одинаковых объектов, одни из них откажут раньше, другие позже, это даст возможность выявить устойчивые вероятностные характеристики объекта как представителя той массы, которая подвергается испытаниям.

Ограничимся в нашем рассмотрении исследованием показателей безотказности для случая непрерывной работы объекта от момента включения до первого внезапного (случайного) полного отказа.

Таких показателей три:

1. Интенсивность отказов.

Интенсивность отказов – это математический термин (условная плотность вероятности), который на уровне общего здравого смысла может быть определен как частота, с которой случаются отказы при массовых испытаниях объектов на безотказную работу. В силу случайной природы внезапных отказов эта частота, т.е. число отказов в единицу времени, не остается постоянной, также является случайной величиной. Устойчивой количественной оценкой данной случайной величины является ее математическое ожидание или среднее значение, т.е. средняя интенсивность отказов. Обозначается интенсивность отказов греческой буквой λ .

В течение жизненного цикла изделия интенсивность отказов не остается постоянной. Типичный график зависимости интенсивности отказов от времени приведен на рис. 8.1. На начальной стадии работы объекта, после его изготовления в производстве, интенсивность отказов имеет тенденцию к снижению. Причиной этого являются так называемые приработочные отказы, вызванные не выявленными на этапе заводских и приемо-сдаточных испытаний производственные дефекты (часто производитель принимает на себя обязательства по устранению этих дефектов в течение некоторого гарантийного срока).

Далее следует период нормальной эксплуатации объекта, когда интенсивность отказов остается приблизительно постоянной, после чего следует период старения, когда интенсивность отказов снова возрастает вследствие деградации материалов и компонентов.

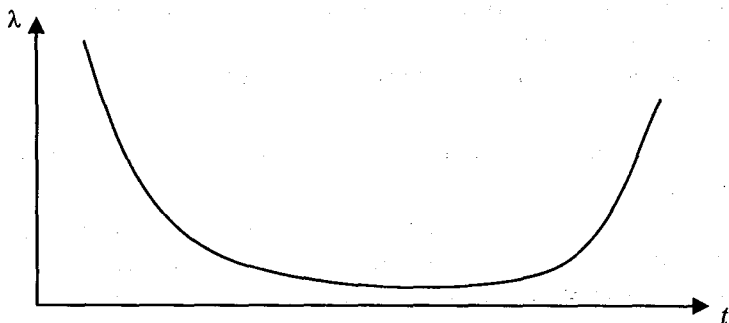


Рис 8.1. График зависимости интенсивности отказов от времени

Значения интенсивности отказов для различных компонентов РЭС приводятся в справочниках по надежности. В качестве единицы измерения принято число отказов в час. Интенсивность отказов у современных электронных радиокомпонентов порядка $(10^{-7} \dots 10^{-9})$ 1/ч с. Значительно выше она у коммутационных изделий, силовых и пр. трансформаторов, дросселей, реле $(10^{-4} \dots 10^{-6})$ 1/ч.

2. Вероятность безотказной работы.

В случае когда случайные события (в нашем случае – отказы), связанные с однородными процессами в массе испытываемых объектов, следуют одно независимо от другого с постоянной средней интенсивностью, не меняющейся с течением времени, они образуют так называемый пуассоновский случайный поток. Строгого определения пуассоновского потока давать не будем. Ограничимся главной его вероятностной характеристикой.

Вероятность того, что за промежуток времени t произойдет ровно n событий, следующих независимо друг от друга, с постоянной средней интенсивностью λ (т.е. событий пуассоновского потока), равна:

$$f(n, \lambda, t) = \frac{(\lambda t)^n}{n!} e^{-\lambda t}, \quad (8.1)$$

где $n = 0, 1, 2, 3, \dots; \lambda > 0$.

Эта функция называется пуассоновским законом распределения.

Рассмотрим частный случай, когда $n = 0$, т.е. за интервал времени t не произошло ни одного события. Если событием, как в нашем случае, является полный внезапный отказ, то этот случай при-

водит нас к определению вероятности безотказной работы в течение заданного отрезка времени.

Рассмотрим отдельно числитель и знаменатель дроби в выражении (8.1).

$(\lambda t)^0 = 1$ – по принятому в математике определению показательной функции;

$n! = 0! = 1$ – по принятому в математике определению факториала.

Подставляя эти значения числителя и знаменателя в выражение (8.1), получаем выражение для вероятности непрерывной работы объекта до первого внезапного отказа:

$$P(t) = e^{-\lambda t}.$$

Это выражение называется экспоненциальным законом распределения времени безотказной работы. По определению экспоненциальной функции с отрицательным показателем степени, при увеличении аргумента (по абсолютной величине) значения функции уменьшаются, начиная с единицы, и асимптотически стремятся к нулю, никогда его не достигая (см. рис. 8.2).

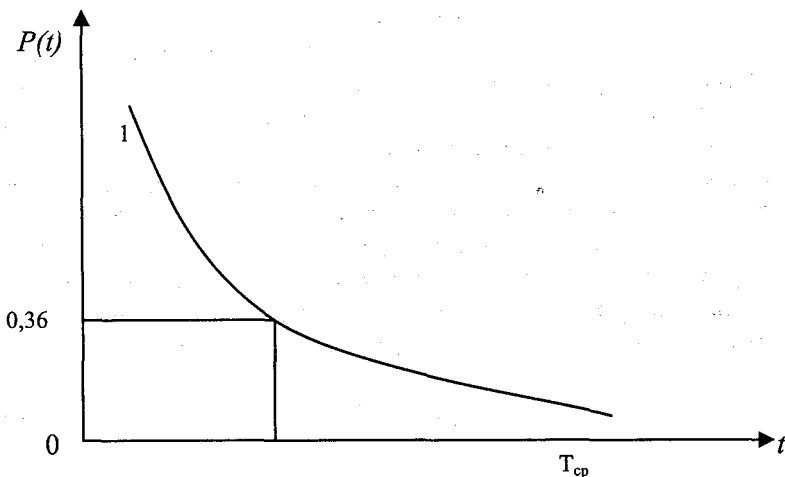


Рис. 8.2. Экспоненциальный закон распределения времени безотказной работы.

Смысл полученной зависимости следующий: вероятность того, что сразу же в момент включения устройство *не выйдет из строя*, равна единице; далее, с течением времени, вероятность безотказной

работы уменьшается, т.е. все меньше и меньше можно надеяться, что устройство будет безотказно работать в течение длительного времени.

При проектировании технических объектов всегда следует стремиться к тому, чтобы вероятность безотказной работы была как можно более высокой. Обычно в техническом задании на разработку задается значение вероятности непрерывной безотказной работы 0,9 и выше в течение интервала времени в 1000...2000 ч и более (например, $P(1000) \geq 0,95$).

Для оценки надежности в условиях действия независимых внезапных отказов используется также третий показатель надежности.

3. Среднее время безотказной работы.

При используемой нами экспоненциальной модели для вероятности непрерывной безотказной работы среднее время непрерывной работы до первого внезапного отказа составляет величину

$$T_{\text{ср}} = \frac{1}{\lambda}. \quad (8.2)$$

Таким образом, среднее время безотказной работы равно обратной величине интенсивности отказа. Это время называется еще средней наработкой до первого внезапного отказа.

Естественно, что говорить о среднем времени безотказной работы будет правильно только для массы объектов. Как уже сказано раньше, время работы объекта до внезапного отказа является случайной величиной. У одиночного объекта никакого среднего времени быть не может: он отказывает единственный раз в какой-то случайный момент времени. Это время в математической статистике называется реализацией случайной величины, и у каждого объекта оно свое. Используя значение среднего времени безотказной работы как показатель надежности единственного объекта, нужно всегда помнить о природе этой величины.

Получив большую величину среднего времени безотказной работы, не спешите радоваться: вероятность безотказной работы в течение такого промежутка времени составляет всего $e^{-1} = 0,36$. Это означает, что из 100 объектов, запущенных в действие или поставленных на испытания в момент времени $t = 0$, только 36 останутся работоспособными к моменту времени $T_{\text{ср}}$, а остальные 64 выйдут за это время из строя.

Как оценить показатели надежности для устройства, состоящего из нескольких составных частей (деталей, узлов, блоков и т.п.)?

Для этого должна быть определена модель безотказного функционирования такого объекта. Так, в случае если единственный внезапный отказ в любой из составных частей сложного объекта приводит к полной потере работоспособности объекта, справедливой является модель в виде цепочки звеньев, соединенных последовательно. Это, как в электрической цепи, содержащей только последовательно соединенные элементы: отказ (обрыв) любого элемента, приводит к потере электропроводности цепи.

При такой модели вероятность безотказной работы сложного объекта – вероятность того, что за время t не произойдет ни одного отказа – равна произведению вероятностей безотказной работы всех его составных частей:

$$P(t) = P_1(t) \cdot P_2(t) \cdot \dots \cdot P_i(t) \cdot \dots \cdot P_N(t) \quad (8.2, a)$$

Как известно, при перемножении экспоненциальных сомножителей вида (8.2, а) показатели степеней суммируются и получается следующий результат:

$$P(t) = e^{-\lambda_1 t} \cdot e^{-\lambda_2 t} \cdot \dots \cdot e^{-\lambda_i t} \cdot \dots = e^{-\sum \lambda_i t} \quad (8.3)$$

Таким образом, для того чтобы найти значение вероятности безотказной работы сложного объекта при используемой математической модели, следует вычислить сумму интенсивностей отказа всех его составных частей и решить выражение (8.3).

Таким образом, расчет надежности при выполнении дипломного проекта должен выполняться по следующей схеме.

1. Найти в справочниках по надежности значения интенсивности отказов для всех компонентов, составляющих проектируемое устройство, так называемые λ -характеристики. Эти данные приводятся обычно в обобщенном виде для однородных групп компонентов (резисторы, конденсаторы, интегральные микросхемы и т.д.), без конкретизации для каждого компонента из группы или для данной марки компонента (существуют и более подробные данные по конкретным компонентам, но они малодоступны).

2. Суммировать значения интенсивности отказов для всех составных частей проектируемого изделия и вычислить интенсивность отказа устройства в целом. (Не забывайте, что это обобщенная характеристика для массы объектов данного вида.)

3. Вычислить значение вероятности безотказной работы (8.3) по таблицам или по приближенной формуле:

$$e^{-\lambda t} \approx 1 - \lambda t, \text{ при } \lambda t < 0,1.$$

4. Оценить полученный результат: соответствует ли он значению, заданному в техническом задании на разработку.

К сожалению, этот расчет надежности носит поверочный характер. Теория надежности не в состоянии дать по заданным значениям показателей надежности ответ на вопрос: какова должна быть структура, схема и конструкция устройства.

Если полученные в результате расчета значения показателей надежности ниже тех, что определены в техническом задании, необходимо выполнить комплекс организационно-технических и конструкторско-технологических мероприятий, направленных на повышение надежности. Совершенствование технологических процессов и организации производства, применение высоконадежной компонентной базы для изготовления продукции, использование компонентов в облегченных режимах по напряжению, току, рассеиваемой мощности и др. возможные пути повышения надежности.

9. КОНСТРУИРОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ УЗЛОВ РЭС НА ПЕЧАТНЫХ ПЛАТАХ

Рассмотрение классификации радиоэлектронных средств по функциональному назначению показывает, что значительный объем РЭС любых классов составляют маломощные и низковольтные радиоэлектронные функциональные узлы. В этих же узлах сосредотачивается преобладающая доля функций обработки сигнала и преобразования информации. В настоящее время типичным способом конструктивного исполнения подобных функциональных узлов является исполнение в виде узлов на печатных платах.

При сборке и электрическом монтаже функциональных узлов РЭС пространственное расположение электрорадиокомпонентов (ЭРК) и электрических связей между ними вольно или невольно оказывается приближенным к их расположению на схеме электрической принципиальной. Такое соответствие психологически сближает разработчика со своим произведением, облегчает понимание процессов прохождения информационных потоков, настройку, регулировку и эксплуатацию функциональных узлов.

До начала 50-х гг. XX столетия единственным способом электрического монтажа радиоэлектронных функциональных узлов был навесной проводной монтаж. При этом пассивные ЭРК устанавливались на монтажные планки с рядами изолированных лепестков и соединялись с активными компонентами (электронными лампами) одножильным или многожильным изолированным монтажным проводом.

Появление полупроводниковых активных приборов позволило проектировать функциональные узлы существенно меньших габаритов, с меньшим тепловыделением и сосредотачивать в меньшем геометрическом объеме гораздо больший объем выполняемых узлами функций.

Одновременно с этим возникла идея печатного монтажа: выполнения электрических соединений плоскими проводниками, закрепленными на основании из листового изоляционного материала. Для реализации этой идеи нужно было решить вопросы размещения ЭРК на плоском монтажном поле таким образом, чтобы соединяю-

щие их печатные проводники не пересекались друг с другом. До тех пор пока не была найдена возможность формирования двух, а позже и нескольких проводящих слоев в одной конструкции это была сложная инженерная задача. На ее решении специализировалось целое поколение конструкторов, занимавшихся узко этой единственной задачей. Это была трудоемкая ручная работа, требующая мобилизации больших человеческих сил (не будем забывать, что руками управляет голова).

Поиски способов увеличения производительности этого труда привели к разработке математических методов описания и моделей печатного проводящего рисунка. Оказывается, описание таких объектов может быть выполнено методами математической теории графов. В частности, для поиска способов выполнения печатного рисунка без пересечений служит процедура планаризации графа — нахождения такого взаимного расположения узлов и ребер графа, при котором отсутствуют пересечения ребер. На основе графовых математических моделей монтажного пространства были разработаны алгоритмы и программы для формирования проводящего рисунка печатных плат средствами вычислительной техники. Развилась индустрия систем автоматизации проектирования (САПР) функциональных узлов РЭС на печатных платах.

Элементами печатной платы являются диэлектрическое (изоляционное) основание, металлическое проводящее покрытие, образующее рисунок печатных проводников, контактных площадок и монтажных отверстий для установки электрорадиокомпонентов (ЭРК), крепежные отверстия, необходимые для механической сборки функционального узла (модуля).

В качестве изоляционного основания используются различные пластики, керамика, листовой металл с нанесенным на поверхность изоляционным слоем окисла или эмали.

Первоначально для выполнения печатных проводников не было другой технологии, кроме известных в полиграфии способов выполнения рисунков типографской краской по трафаретам. Были разработаны составы в виде паст на основе мелкодисперсных металлических частиц и связующей органики, которые после нанесения их на изоляционное основание подвергались обработке, приводившей к слиянию дисперсных частиц металла в сплошной проводник, который удерживается на изоляционном основании силами

адгезии. Такая технология, связанная с нанесением металла на изоляционное основание, называется аддитивной (ADD – прибавить). Эта технология используется до сих пор. Она нашла применение в производстве так называемых толстопленочных гибридных интегральных схем и микросборок. Что касается непосредственно печатных плат, то для их изготовления аддитивным способом были разработаны химические и гальвано-химические процессы нанесения проводника (меди) на поверхность диэлектрика и в отверстия, служащие для монтажа ЭРК и перехода линий электрической связи с одного слоя печати на другой.

Параллельно развивались субтрактивные (SUBTRACT – отнять, удалить) методы изготовления проводящего рисунка печатных плат, основанные на химической обработке (травлении) металлической фольги, наклеенной на листовой диэлектрик. Во всем мире появились специализированные заводы-изготовители фольгированных диэлектриков.

Технологический процесс изготовления печатной платы состоит из этапов нанесения на заготовку рисунка будущих проводников и химической или гальвано-химической обработки, в результате которой проводящий рисунок оказывается нанесенным на плату.

Проводящий рисунок наносится на ПП одним из трех способов, известных в полиграфии: способом сеткографии, офсетной печати или фотопечати. Выбор метода определяется конструкцией печатной платы, требованиями к плотности и точности выполнения проводящего рисунка и соображениями производительности и экономичности процесса.

Метод сеткографии основан на нанесении защитного покрытия на будущие проводники продавливанием специальной краски через сетчатый трафарет, на котором выполнен рисунок проводников.

При офсетной печати предварительно изготавливается печатная форма с рисунком будущих печатных проводников, форма заполняется краской, которая с помощью офсетного цилиндра переносится на подготовленную поверхность заготовки ПП. Оба метода не обеспечивают высокой плотности и точности выполнения проводящего рисунка и могут использоваться при изготовлении ПП низших, не выше 2-го класса точности по ГОСТу 23751-86.

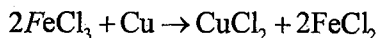
Способом фотопечати могут создаваться печатные платы высоких классов точности, вплоть до 5-го (минимальная ширина проводников и зазоров между ними 0,1 мм). Основные стадии процесса следующие:

- на фольгу наносится пленка светочувствительного материала, так называемого фоторезиста;
- поверхность фоторезиста накладывается фотошаблон, и фоторезист экспонируется высокоактиничным светом кварцевых ламп;
- экспонированные участки фоторезиста удаляются с помощью растворителя;
- плата помещается в ванну с раствором травящего агента; в результате химической реакции образуются растворимые соединения, и участки фольги, не защищенные фоторезистом, удаляются.

Фоторезист может быть негативным или позитивным. Соответствующее название получает процесс выполнения проводящего рисунка. В негативном резисте происходит фотополимеризация экспонированных светом участков, которые и образуют защитную пленку при химической обработке платы.

В позитивном резисте происходит фотодеструкция (разрушение) экспонированных участков, которые смываются растворителем, открывая доступ химических веществ к медной фольге. На эти участки наносится металлическое защитное покрытие, после чего с платы смываются все остатки фоторезиста, и она подвергается химическому травлению. Травитель действует избирательно: непокрытые участки фольги удаляются, а печатные проводники, защищенные металлическим, например, олово-свинцовым, покрытием, остаются на плате.

Известно не менее шести рецептур травящих растворов [1]. Наиболее широко применяется травление в водном растворе хлорного железа. Химическая реакция описывается уравнением:



Продукты реакции – хлорная медь и хлористое железо переходят в водный раствор и удаляются из зоны реакции при перемешивании раствора. При концентрации в 1,36...1,42 г/л скорость травления в свежеприготовленном растворе составляет 40 мкм/мин. По

мере накопления в ванне продуктов реакции скорость снижается до 5...6 мкм/мин.

Более подробно рассмотрим конструирование печатных плат.

9.1. Конструирование печатных плат

Традиционно сложившаяся практика разделения труда при организации разработки и производства функциональных узлов РЭС предполагает участие в этом процессе специалистов разных профилей, работающих в нескольких производственных подразделениях предприятия:

- радиоинженера-разработчика электронной схемы;
- конструктора печатных плат, занимающегося в том числе трассировкой печатного монтажа;
- конструктора модулей-субблоков, объединяющего модуль нулевого уровня (печатную плату) с базовой несущей конструкцией (БНК), в результате чего получается конструкция модуля 1-го уровня;
- работников технологической службы, разрабатывающих технологический процесс производства печатных плат и остальных составных частей модулей РЭС;
- службы нормоконтроля, следящей за соблюдением всеми участниками производственного процесса норм проектирования, установленных действующими стандартами ЕСКД, ЕСТД и др.

Естественно, при этом необходимо тесное взаимодействие всех участников процесса, понимание ими ограничений, которые налагают на полет их инженерной мысли условия и технический уровень производства, на котором предстоит выполнять их проект. Среди этих ограничений, как правило, присутствуют требования унификации конструкций, предписывающие непременно уложить разрабатываемые модули в принятую на предприятии или в отрасли структуру базовых несущих конструкций. Важными факторами являются также точность и степень износа производственного оборудования, стабильность технологических процессов.

Внедрение САПР первоначально мало что изменило в этой традиционной схеме организации производства. Появление электронного посредника между участниками разработки в виде вычислительного центра, оснащенного большими ЭВМ ряда ЕС, мало увеличило производительность труда ввиду громоздкости процедур составления заданий на проектирование и обмена информацией и

большого числа ошибок, вносившихся операторами на стадии подготовки данных для ЭВМ. Разработанные с ориентацией на эту технику стандарты ЕСКД (ГОСТ 2.003-83, ГОСТ 2.031-83, ГОСТ 2.032-77, ГОСТ 2.033-77, ГОСТ 2.034-83) за 25 лет своего существования (примерно с 1975 по 2000 гг.) полностью устарели из-за быстрой смены поколений вычислительной техники.

Разработанные в конце 70-х гг. так называемые автоматизированные рабочие места (АРМ) на основе мини-ЭВМ ряда СМ ЭВМ с программным обеспечением, проблемно-ориентированным на круг задач, решаемых инженером-разработчиком, конструктором и технологом, позволили добиться определенного прогресса. При этом больше других обиженным оставался инженер-разработчик электронной схемы. Несоввершенные средства ввода и оперативного отображения графической информации (графические редакторы и дисплеи) заставляли его по-прежнему вручную вычерчивать схемы и только после этого, если удастся, кодировать графическое изображение для передачи его в ЭВМ, а примитивные программы графического редактирования ограничивали возможность оперативной работы со схемой.

Лишь с приходом на рабочее место инженера-разработчика и конструктора персональных ЭВМ нового поколения, оснащенных мощным программным обеспечением САПР, произошел качественный скачок в производительности труда при разработке и изготовлении такой массовой продукции, как модули РЭС на печатных платах.

При этом оказывается возможным сосредоточить весь процесс проектирования на одном рабочем месте, т.е. отойти от традиционного распределения ролей между участниками проектирования схемы, конструкции и технологии. Это особенно актуально для фирм с малочисленным персоналом и небольшими объемами выпуска продукции, где по экономическим соображениям невыгодно содержать отдельные конструкторские и технологические службы, поскольку их персонал не загрузить работой с полной нагрузкой. В таких условиях специалист, берущийся за разработку модулей РЭС от идеи (электрической схемы) до ее конструктивного воплощения, должен обладать знаниями из смежных областей, в частности, знать технологию печатных плат, без чего невозможно рассчитывать на достижение высоких технических показателей устройств.

Применение компьютера, конечно, не исключает и традиционного разделения труда между участниками производственного процесса. Навстречу этому пошли и разработчики программного обеспечения САПР. Так, например, в состав САПР ACCEL P-CAD 2000...2004 входит программа RELAY (эстафета), обеспечивающая возможность обмена данными между разработчиком схемы и конструктором печатной платы по внутрикорпоративной компьютерной сети, в результате чего каждый из них занимается выполнением своих профессиональных обязанностей, но имеет возможность контролировать прохождение проекта и оперативно вносить в разработку необходимые поправки.

9.1.1. Конструктивные разновидности печатных плат

По конструкции печатные платы (ПП) подразделяются на односторонние (однослойные), двухсторонние (двухслойные или ДПП) и многослойные (МПП).

Односторонние печатные платы обладают невысокой надежностью и механической прочностью крепления навесных ЭРК, которые практически висят на пайках. В местах присоединения ЭРК велика возможность отслоения проводников при перепайках или при механическом воздействии на выводы ЭРК. При невозможности стопроцентной разводки печатных проводников применяются навесные перемычки. Платы этой разновидности применяются почти исключительно в бытовых РЭС.

Двухсторонние печатные платы обеспечивают высокую плотность установки ЭРК и трассировки. Переходы проводников из слоя в слой осуществляются через металлизированные переходные отверстия (пайка перемычек в неметаллизированные переходные отверстия практически не применяется). Эти платы допускают как монтаж ЭРК на поверхности, в том числе и с двух сторон, так и монтаж ЭРК с осевыми и штыревыми выводами в металлизированные монтажные отверстия, которые могут одновременно служить для перехода проводников с верхнего на нижний слой. Двухсторонние ПП являются самой распространенной разновидностью печатных плат в производстве модулей РЭС.

Многослойные печатные платы обеспечивают очень высокую плотность монтажа компонентов и прокладки трасс печатного монтажа. Они допускают монтаж всех видов ЭРК (микросхемы любой степени интеграции, поверхностно-монтируемые и штыревые и т.п.).

Из множества предложенных в свое время вариантов конструкций в настоящее время практически используются три:

- многослойные платы попарного прессования;
- многослойные ПП с металлизацией сквозных монтажных и переходных отверстий;
- многослойные печатные платы с "глухими" (накрытыми выше- и нижележащими слоями) межслойными переходами печатных проводников.

Первая разновидность изготавливается по технологии двухсторонних ПП с металлизацией отверстий. Две двухсторонние платы точно совмещаются и склеиваются под прессом через изоляционную прокладку. После этого в получившемся пакете сверлятся и металлизуются отверстия для перехода сигнальных цепей с платы на плату и монтажа ЭРК со штыревыми выводами.

Вторая разновидность выполняется путем последовательного наращивания слоя на слой, с точным совмещением и склеиванием, после чего вскрываются и металлизуются сквозные отверстия для перехода сигнальных цепей со слоя на слой и монтажа штыревых выводов ЭРК. Металлизация сквозных отверстий – очень ответственная операция: нужно обеспечить надежный контакт металла, наносимого на стенки отверстия, со слоями фольги толщиной порядка 0,035 мм, выходящими заподлицо с поверхностью стенок отверстия.

Еще более трудоемка технология изготовления МПП со скрытыми межслойными переходами во внутренних слоях. При их изготовлении также выполняется последовательное наращивание слоев; переходные отверстия выполняются по двухлазерной технологии: лучи первого лазера прожигают медную фольгу на поверхности очередного слоя; лучи второго сжигают межслойный диэлектрик, но отражаются от фольги нижележащего слоя. Металлизация отверстий выполняется по ходу наращивания слоев МПП.

Чрезвычайно сложно устранять допущенные ошибки трассировки МПП. Принято считать, что двухсторонние платы без ошибок получаются с третьей попытки, а многослойные не менее чем с пятой-шестой. Стоимость МПП значительно выше стоимости ДПП.

Тем не менее, к настоящему времени технология МПП в достаточной степени освоена во всем мире. Можно встретить узлы РЭС массовых классов с 6–12-слойными МПП. Известны опытные образцы, содержащие до 100 слоев. Широко используемые САПР

P-CAD допускают автоматическую трассировку до 32-х слоев печатного монтажа, хотя, как следует из проведенного обсуждения, трудность изготовления МПП определяется возможностями технологии, а не производительностью САПР.

Рассмотрим требования к ряду параметров ПП, регламентированных стандартами и принятыми при проектировании.

9.1.2. Классы точности печатных плат

Отечественным стандартом ГОСТа 23751-86 предусматривается пять классов точности (плотности рисунка) печатных плат (см. табл. 9.1). Выбор класса точности определяется достигнутым на производстве уровнем технологического оснащения. В конструкторской документации должно содержаться указание на необходимый класс точности ПП.

Платы первого и второго классов точности не требуют для своего изготовления оборудования с высокими техническими показателями. Такое оборудование обычно имеется на рядовом радиозаводе с тех времен, когда только внедрялась технология печатного монтажа. Платы этих классов просты в изготовлении, дешевы, но не отличаются высокими показателями плотности компоновки и трассировки.

Таблица 9.1

Классы точности печатных плат по ГОСТу 23751-86

Наименование параметра	Условные обозначения параметров	Размеры элементов проводящего рисунка для классов, мм				
		1	2	3	4	5
Ширина проводника	t	0,75	0,45	0,25	0,15	0,1
Расстояние между проводниками, контактными площадками, проводником и контактной площадкой или проводником и металлизированным отверстием	S	0,75	0,45	0,25	0,15	0,1
Расстояние от края просверленного отверстия до края контактной площадки данного отверстия	bm	0,3	0,2	0,1	0,05	0,025
Отношение минимального диаметра металлизированного отверстия к толщине платы	f	0,4	0,4	0,33	0,25	0,2

Для изготовления плат высшего – пятого класса требуется специализированное высокоточное оборудование, специальные, как правило, дорогие материалы, безупрочная пленка для изготовления фотошаблонов, идеальная чистота в производственных помещениях, вплоть до создания “чистых” участков (гермозон) с кондиционированием воздуха и поддержанием стабильного температурно-влажностного режима. Технологические режимы фотохимических и гальвано-химических процессов также должны поддерживаться с высокой точностью. Большинство отечественных предприятий не располагает такими условиями производства. Так что будем считать пятый класс практически недостижимым в условиях отечественного производства, по крайней мере, массового.

Массовый выпуск плат третьего класса надежно освоен основной массой отечественных предприятий, поскольку для их изготовления требуется рядовое, хотя и специализированное, оборудование, требования к материалам и технологии не слишком высоки.

Для изготовления плат четвертого класса точности также требуется высокая культура производства и высокоточное оборудование, но требования к его характеристикам ниже, чем для плат пятого класса, поэтому целому ряду производителей удастся массовый выпуск плат этого класса.

Зарубежными стандартами установлена другая классификация точности печатных плат. Эта классификация (см. табл. 9.2) увязана с шагом проектирования и шагом расположения контактов ЭРК.

Таблица 9.2

Зарубежный стандарт классификации точности печатных плат

Класс	Ширина проводника и зазоры	Шаг проектирования		Шаг выводов ЭРК	
		наужные слои	внутренние слои	планарные	матричные
0	0,2	1,25	0,625	0,625	2,5
1	0,15	0,625	0,625	0,5	1,25
2	0,1	0,625	1	0,5	1
3	0,075	0,5	1	0,5	1
4	0,05	0,5	0,5	0,25	0,5
5	0,05	0,25	0,25	0,25	0,5

Видим, что из элементов печатного рисунка нормированы только ширина проводника и зазоры. Что касается самой точности, то оказывается, что платы самого грубого нулевого зарубежного

класса по точности превосходят платы массового отечественного третьего класса.

Данные по шагам проектирования и шагу выводов связывают точность плат с применяемой компонентной базой, в частности, с типами корпусов интегральных микросхем.

9.1.3. Размеры печатных плат

Требования к размерам печатных плат регламентированы отечественными и зарубежными стандартами, наиболее распространенные из которых фактически стали международными.

Отечественный ГОСТ 10317-79 устанавливает следующие требования к размерам ПП:

а) предельный размер стороны не более 470 мм (ограничивается размерами гальванических ванн, листа фотопленки и аппаратуры для экспонирования фоторезиста);

б) размеры сторон должны быть кратны:

- 2,5 мм при длине стороны не более 100 мм;
- 5,0 мм при длине стороны не более 350 мм;
- 10,0 мм при длине стороны более 350 мм;

с) соотношение сторон не более 3 : 1;

д) шаг координатной сетки должен составлять 0,5 мм, 1,25 или 2,5 мм.

Предписывается делать размеры печатной платы, располагать монтажные и переходные отверстия и элементы проводящего рисунка на расстояниях, кратных шагу координатной сетки. Требование обязательно пользоваться координатными сетками с указанными размерами шага следует признать устаревшими. Эти размеры были назначены применительно к существовавшей на момент выхода стандарта в свет (в 1979 г.) компонентной базе и были ориентированы на черчение вручную и механическую обработку на станках с ручным управлением. В настоящее время на рынке появилась компонентная база с шагом расположения выводов 0,625 мм и менее. Кроме того, в отечественных разработках порой допускается применение импортных ЭРК, выполненных в дюймовой системе единиц измерения, в том числе и одновременно с отечественными компонентами, выполненными в метрической системе. В этих условиях приходится пользоваться сетками проектирования с шагом менее 0,5 мм. Это не вызывает сколько-нибудь серьезных трудно-

стей ни в процессе проектирования, ни при механической обработке на станках ЧПУ. Более того, отметим, что получающая все более широкое распространение в отечественной практике САПР ACCEL P-CAD 2000...2004 даже при настройке на метрическую систему единиц использует внутреннее дюймовое представление всех размеров. Конвертируя миллиметры в дюймы при вводе данных, она округляет данные при выводе до необходимого миллиметрового размера с точностью в 0,001 мм. Точность позиционирования рабочих органов современных станков ЧПУ также не препятствует использованию такой процедуры в САПР.

Габаритные, установочные и присоединительные размеры печатной платы обычно координируются с той или иной системой базовых несущих конструкций (БНК).

Известно множество систем БНК, и все они предполагают прямоугольную форму плат всех типов и размеров. Лишь в исключительных, технически обоснованных случаях допускается отступать от прямоугольной формы, применяясь к конкретным условиям установки и эксплуатации функционального узла.

Начнем с “европейских” стандартов, нашедших также широкое применение в отечественной практике. Это два стандарта Международной электротехнической комиссии: стандарт МЭК 297 (IEC 297-3), совпадающий с немецким стандартом DIN 41494, и так называемый метрический стандарт МЭК 917 (IEC 917-2-2), который, по мысли его авторов, должен заменить стандарт МЭК 297.

Стандарт МЭК 297 носит название 19-дюймового по размеру ширины передней панели (482,6 мм) базового модуля 2-го уровня (РЭМ-2). Несмотря на “дюймовое” название, геометрические размеры печатных плат в этом стандарте представляют гибрид метрических и дюймовых размеров. Это объясняется, по-видимому, англо-германскими корнями стандарта:

- Базовый размер печатной платы составляет 100×100 мм.
- Единица приращения размера по высоте, обозначаемая как 1U, равна 1,75″=44,45 мм. Этой величине кратна высота передних панелей блоков (РЭМ-2). Значение этой кратности входит в обозначение печатных плат, хотя самого этого размера на плате нет.
- Единица приращения размера в длину (глубину) составляет 60 мм.

- Единица кратности по ширине передней панели РЭМ-1, обозначаемая как 1ТЕ, составляет $0,2''=5,08$ мм.

Сводка значений геометрических размеров плат в стандарте МЭК 297 приведена в табл. 9.3.

Таблица 9.3

Геометрические размеры печатных плат по стандарту МЭК 297

Обозначение	Высота, мм	Глубина, мм
3U	100	100
		160*
		220*
		280
4U	144,45	100
		160
		220
		280
5U	188,9	100
		160
		220
		280
6U	233,35	100
		160*
		220*
		280

Существует отечественный стандарт ГОСТ 28601.3-90, в котором ряд типоразмеров для плат и других элементов конструкции модулей РЭС полностью соответствует стандарту МЭК 297. Четыре типоразмера плат из этого ряда, отмеченные в табл. 9.3 звездочками, образуют ряд унифицированных типовых конструкций УТК 2, они получили в отечественной практике название “Европлата”. Под эти платы поставляются также все остальные конструктивные элементы БНК.

На практике ничто не мешает разрабатывать на таких платах проекты модулей в метрической системе единиц измерения и использовать в этих проектах отечественную “метрическую” компонентную базу. Осложнения могут возникнуть разве что при организации контроля размеров плат после механической обработки, если инструментальное хозяйство предприятия не обеспечено соответствующими калибрами.

Метрический стандарт МЭК 917 предусматривает значение модуля приращения размеров блоков и шасси, равное 25 мм; для ячеек и плат модуль приращения составляет 2,5 мм. Глубина печатных плат также имеет приращение, кратное 25 мм. При этом предусмотрено

применение переходных конструкций, обеспечивающих совместимость с модулями дюймового стандарта. Предполагается использование соединителей с шагом расположения контактов 2,5 мм. В дополнение к этим находят применение соединители с шагом 2,0 мм. Основные типоразмеры плат в этом стандарте приведены в табл. 9.4.

В нашей стране также уделялось внимание стандартизации размеров печатных плат и разработке базовых несущих конструкций модулей РЭС.

До 1985 г. в этой области действовали нескоординированные между собой отраслевые стандарты. Так, в радиопромышленности и ряде других отраслей, разрабатывавших радиоэлектронные средства, действовали отраслевые стандарты ОСТ 4 Г0.410.206 и ОСТ 4 Г0.410.207, которые устанавливали схему построения иерархии БНК. Типоразмеры и конструкции модулей нулевого и первого уровней (плат и ячеек) были привязаны к видам аппаратуры по условиям эксплуатации. Работа отраслевых организаций в этой области нашла обобщение в государственном стандарте ГОСТ 26765.12-86. Этот стандарт объединил существовавшие к тому времени ряды размеров модулей 1-го уровня (ячеек), установил единый модуль приращения линейных размеров 5 мм для ячеек и 10 мм для блоков, освободил модули 1-го уровня от привязки к видам аппаратуры, установил систему обозначений для модулей трех уровней разукрупнения РЭС.

Таблица 9.4

Основные типоразмеры плат в стандарте МЭК 917

Обозначение	Высота, мм	Глубина, мм
6SU	115	110
		160
		235
		285
12SU	265	110
		160
		235
		285
18SU	415	110
		160
		235
		285
24SU	565	110
		160
		235
		285

Таблица 9.5

Типоразмеры плат для БНК-1 по ГОСТу 26765.12-86

Высота, мм	Глубина, мм	Типы электр. соединителя	Условное обозначение БНК-1
140	280	СНПЗ4	Я28.56.30.01
160	220	СНПЗ4	Я32.44.02.01...04
	280		Я32.56.01.01, Я32.56.02.01...04
170	75	СНПЗ4, ГРПМШ, ГРПМ1, ГРПП72, ОНП-КС-23, ОНП-ВГ35/48 РППМ-27	Я34.15.XX.XX
	110		Я34.22.XX.XX
	150		Я34.30.XX.XX
	200		Я34.40.XX.XX
	220		Я34.44.XX.XX
	240		Я34.48.XX.XX
	280		Я34.56.XX.XX
	320		Я34.64.XX.XX
240	150	СНП58	Я48.30.23.01
280	160	СНПЗ4, РП10, ОНП-ВГ35/48	Я56.32.24.01...04
300	150	ГРПМ, СНПЗ4	Я60.30.29.01
360	200	СНПЗ4	Я72.40.25.01
	280	СНП49, ОНП-ВГ-35	Я72.56.26.01...06
390	240	СНПЗ4,	Я78.48.33.01...02
	280	СНП49 (50)	Я78.56.33.01...02

Значения линейных размеров печатных плат из этого стандарта и ряд других данных по ячейкам БНК-1 приведены в табл. 9.5.

Полные сведения о габаритных размерах РЭМ-1, шаге установки модулей в блоки и др. приведены в ГОСТе 26765.12-86, табл. 3 (с изменениями, внесенными "Постановлением..." от 11.07.90 г., № 2182).

В разработанном позднее ГОСТе 26765.20-91 сделана попытка совместить координационные размеры отечественных плат с международным метрическим стандартом IEC917-2-2. Взамен приведенного выше (табл. 9.5) ряда размеров, установлены 6 значений размера плат по высоте: 115, 170, 265, 365, 415 и 565 мм. Для глубины ячеек и печатных плат установлены 10 типоразмеров от 115 до 465 мм с шагом приращения, кратным 25 мм.

Все эти попытки оказались не в состоянии комплексно решить проблему унификации БНК и структуризации их по модульному принципу. Унаследованные от предыдущих разработок системы типоразмеров, технологии, оснастка производства, недостаточная

динамичность отечественных производителей – все это сдерживает внедрение новых норм, а сами эти нормы тоже не успевают за потребностями развивающейся техники.

9.1.4. Материал печатных плат

Современные двухсторонние и многослойные печатные платы изготавливаются обычно из разных сортов фольгированного стеклотекстолита. Материал этот получается пропиткой стеклоткани эпоксидной смолой, отвердевающей под прессом. Промышленность выпускает множество сортов фольгированного стеклотекстолита. Перечень сортов, предназначенных для изготовления печатных плат, приводится в ГОСТе 23751-86, табл.2, а также в [1].

При проектировании узлов РЭС выполняется расчет механических характеристик модуля: механической прочности, частот механических резонансов при вибрационном воздействии, динамичности, т.е. степени ослабления или, наоборот, усиления вибрационной перегрузки, приходящейся на смонтированные на плате компоненты. Приведем сводку значений, необходимых для этого механических характеристик массового материала СФ-2-35 ГОСТ 10316-78:

- удельная плотность $(2,3...2,8) 103 \text{ кг/м}^3$;
- предельно допустимое напряжение на изгиб $39,2 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2$;
- предельно допустимое напряжение на срез $31,4 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2$;
- модуль упругости $3,2 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2$;
- коэффициент Пуассона 0,25;
- логарифмический декремент затухания свободных колебаний 0,2.

При изготовлении печатных плат на автоматизированном оборудовании большое значение имеет неплоскостность листов материала. Деформация заготовки (изгиб, скручивание, коробление) препятствует нормальному закреплению заготовок при сверлении, экспонировании фоторезиста, в конечном счете, снижает точность изготовления печатной платы.

9.1.5. Толщина печатных плат

Толщина односторонних и двухсторонних печатных плат практически полностью определяется толщиной изоляционного основания фольгированного диэлектрика.

В случае если на краю платы выполнены ламели вилки печатного соединителя, толщина платы определяется размерами гнезда на ответной части соединителя.

Толщина многослойных печатных плат зависит от многих факторов, среди которых следует отметить такие главные факторы, как толщина материалов, используемых при формировании слоев, количество слоев и толщина изоляционных прокладок между слоями, способ формирования МПП. Заметную часть общей толщины составляет здесь суммарная толщина проводящей фольги, поскольку сама толщина фольги в слоях становится сравнимой с толщиной диэлектрического основания слоев. Для МПП с четным числом слоев, формируемых попарно на листах двухстороннего фольгированного материала, общая толщина составляет

$$H_{\text{пл}} = 0,5 N_{\text{сл}} \times H_{\text{сл}} + (0,6 \div 0,9) (0,5 N_{\text{сл}} - 1) N_{\text{пр}} \times H_{\text{пр}},$$

где $H_{\text{пл}}$ – толщина МПП;

$N_{\text{сл}}$ – число слоев;

$H_{\text{сл}}$ – толщина фольгированного диэлектрика у пары слоев;

$N_{\text{пр}}$ – количество слоев прокладочной стеклоткани в одном промежутке;

$H_{\text{пр}}$ – толщина слоя прокладочной стеклоткани.

Опыт показывает, что МПП, выполненные, например, из фольгированного стеклотекстолита ФТС-2-18Б-0,18 с прокладочной стеклотканью СПТ-3-0,06 (в три слоя) толщиной 1,5...1,6 мм, могут содержать не более восьми слоев.

9.1.6. Отверстия печатных плат

Отверстия в печатной плате вскрываются с целью:

- монтажа компонентов со штыревыми выводами;
- перехода печатных проводников со слоя на слой;
- установки на плату компонентов, нуждающихся в механическом креплении;
- крепления платы к конструктивным элементам несущей конструкции.

Крепежные и установочные отверстия не нуждаются в металлизации внутренних поверхностей. К их выполнению предъявляют-

ся такие же требования, как к любым отверстиям в элементах конструкций: необходимый запас размера, обеспечивающий беспрепятственный проход винта, шпильки или заклепки; чистота обработки внутренней поверхности, допуск на межцентровые расстояния, обеспечивающий, совместно с запасом по диаметру, возможность установки компонентов или присоединения платы к деталям несущей конструкции.

При автоматизированном проектировании и изготовлении ПП на автоматизированном оборудовании целесообразно иметь в технологическом процессе единую операцию сверления отверстий и металлизацию всех отверстий на плате, без различия их назначений. Металлизация в крепежных отверстиях никак не мешает им выполнять свои функции. Более того, если снабдить эти отверстия контактными площадками и электрически соединить их, например, с "Общим" проводом схемы, металлизация отверстий и контактные площадки могут служить для дополнительного соединения "Общего" с металлом БНК. Правда, давать безоговорочно такую рекомендацию нельзя, поскольку соединение "Общего" провода схемы с корпусом нельзя делать, где попало: это может привести к увеличению помех за счет неконтролируемого перетекания токов схемы по металлическим деталям конструкции. В сложных модулях РЭС часто приходится экспериментально находить оптимальную, с точки зрения помех, точку присоединения "Общего" провода к корпусу.

К монтажным и межслойным переходным отверстиям, подлежащим металлизации, предъявляется ряд специфических требований, обусловленных необходимостью обеспечить их качественную металлизацию, а также проникновение флюсов и расплавленного припоя на всю глубину отверстия при монтаже компонентов:

1. Диаметры отверстий должны выбираться из ряда, установленного ГОСТом 10317-79: от 0,4 мм с шагом 0,1 мм до 3,0 мм, исключая диаметры 1,9 и 2,9 мм.

2. Минимальный диаметр отверстий, подлежащих металлизации, ограничивается условиями получения качественной металлизации и связан также с классом точности печатных плат. В табл. 9.6 (нижняя строка) приводились установленные по ГОСТу 23751-86 значения минимально допустимого отношения диаметра отверстия к толщине платы.

3. Предельные отклонения размеров отверстий также определены в ГОСТе 23751-86 (см. табл. 9.6).

4. Диаметр сверления металлизированных отверстий должен задаваться таким образом, чтобы обеспечивался заданный диаметр по металлизации, поскольку на готовой плате может быть без разрушения проконтролирован только диаметр готового металлизированного отверстия. Толщина слоя металлизации, как правило, не превышает 0,05 мм. Таким образом, диаметр сверла должен превышать диаметр готового отверстия на 0,1 мм.

Таблица 9.6

Предельные размеры отклонения отверстий				
Диаметр отверстия, мм	Металлизация отверстия	Класс точности		
		1 и 2	3 и 4	5
До 1,0	Без металлизации	$\pm 0,1$	$\pm 0,05$	$\pm 0,025$
	С металлизацией, без оплавления	$+0,05$	$-0,1$	$-0,075$
		$-0,15$		
	С металлизацией и оплавлением	$+0,05$ $-0,18$	$-0,13$	$-0,13$
Свыше 1,0	Без металлизации	$\pm 0,15$	$\pm 0,1$	$\pm 0,1$
	С металлизацией, без оплавления	$+0,1$	$+0,05$	$+0,05$
		$-0,2$	$-0,15$	$-0,15$
	С металлизацией и оплавлением	$+0,1$ $-0,23$	$+0,05$ $-0,18$	$+0,05$ $-0,18$

5. Диаметр монтажных отверстий должен обеспечивать возможность установки многоштыревых ЭРК с зазором между штырями и стенками отверстий не менее 0,1 мм, но не должен быть слишком большим, чтобы расплавленный припой удерживался в зазоре силами поверхностного натяжения. ГОСТ 10317-79 устанавливает нормы на разницу между диаметром металлизированных отверстий и штыря:

- не более 0,4 мм – для выводов ЭРК диаметром от 0,4 до 0,8 мм;
- не более 0,6 мм – для выводов диаметром свыше 0,8 мм.

6. Диаметр металлизированных переходных отверстий в ДПП должен быть, по возможности, минимально допустимым для данного класса точности и толщины печатной платы.

7. Шероховатость поверхностей неметаллизированных отверстий должна быть не более Rz80 по ГОСТу 2789-73, шероховатость

поверхностей монтажных и переходных металлизированных отверстий должна быть не более Rz40 по ГОСТу 2789-73.

8. Металлизированные отверстия следует выполнять без зенковки (п.1.3.8, ГОСТ 23751-86).

9.1.7. Проводники и зазоры

Трассировочная способность печатных плат в значительной мере определяется геометрическими размерами элементов печатного рисунка. Важное место среди этих размеров занимает ширина проводников и зазоров между ними. Естественно, что чем меньше эти размеры, тем плотнее могут быть проложены трассы печатного монтажа. Однако здесь мы можем встретиться с двумя ограничениями: допустимой плотностью тока и допустимым напряжением между цепями.

ГОСТом 23751-86 установлены следующие нормы допустимой плотности тока в печатных проводниках: для односторонних, двухсторонних печатных плат и наружных слоев МПП плотность тока не должна превышать 20 А/мм^2 , для внутренних слоев МПП – 15 А/мм^2 .

В табл. 9.7 приведены значения допустимой силы тока в печатных проводниках при разной их ширине и толщине, рассчитанные на основании приведенного ограничения.

Таблица 9.7

Значения допустимой силы тока в печатных проводниках

Толщина фольги, мкм	Толщина печатного проводника, мкм	Метод изготовления печатной платы	Допустимая сила тока, А, не более							
			0,15	0,25	0,5	0,7	1,0	1,5	2,0	3,0
			Ширина проводника, мм							
20	20	Химический	0,06	0,10	0,20	0,28	0,40	0,60	0,80	1,20
35	35		0,11	0,18	0,35	0,49	0,70	1,05	1,40	2,10
50	50		0,15	0,25	0,50	0,70	1,0	1,50	2,0	3,0
20	70	Комбинированный позитивный	0,21	0,35	0,70	0,98	1,40	2,10	2,80	4,20
35	80		0,24	0,32	0,80	1,12	1,60	2,40	3,20	4,80
50	90		0,27	0,36	0,90	1,26	1,80	2,70	3,60	5,40

При превышении силой тока указанных значений происходит разогрев проводников, вплоть до их разрушения (перегорания). Считается, что проводники можно эксплуатировать в условиях перегрева, не превышающего 20°C. Для оценки допустимой ширины проводников достаточно помнить, что проводник толщиной 35 мкм и шириной в 1 мм при перегреве в 20°C может выдерживать токовую нагрузку в 1 А.

Кроме допустимой токовой нагрузки при проектировании ПП следует учитывать величину сопротивления печатных проводников. В аналоговых цепях это сопротивление может внести заметные изменения в расчетные параметры цепи. Значения сопротивления печатного проводника длиной 1 м при разных значениях ширины и толщины приведены в табл. 9.8.

Нормы допустимых рабочих напряжений между печатными проводниками, расположенными на одном слое, независимо от наличия защиты электроизоляционным лаком, приведены в табл. 9.9 (изоляционный материал платы – стеклотекстолит). Там же приведены значения испытательных напряжений при испытаниях в нормальных условиях в течение 1 мин.

Таблица 9.8

Значения сопротивления печатного проводника длиной 1 м

Толщина фольги, мкм	Толщина печатного проводника, мкм	Метод изготовл. печатной платы	Сопротивление, Ом, не более								
			0,15	0,25	0,5	0,7	1,0	1,5	2,0	0,29	
			Ширина проводника, мм								
20	20	Химический	5,83	3,50	1,75	1,25	0,87	0,58	0,43	0,29	
35	35		3,33	2,01	1,00	0,71	0,5	0,33	0,25	0,16	
50	50		2,33	1,40	0,70	0,50	0,35	0,23	0,17	0,11	
20	70	Комбинированный позитивн.	2,78	1,67	0,83	0,59	0,42	0,27	0,20	0,13	
35	80		2,12	1,28	0,79	0,45	0,32	0,20	0,16	0,09	
50	90		1,71	1,04	0,52	0,37	0,26	0,17	0,13	0,08	

Таблица 9.9

Нормы допустимых рабочих напряжений между печатными проводниками на одном слое

Зазор между проводниками, мм	0,15	0,25	0,30	0,50	0,70	1,00	1,50	2,50
Допустимое рабочее напряжение, В	20	30	50	100	150	250	400	500
Испытательное напряжение, В	150	250	350	700	900	1200	1800	2100

Электрическая прочность изоляции между несвязанными элементами печатного рисунка должна обеспечивать отсутствие пробоев и поверхностных перекрытий при указанных испытательных напряжениях.

Сопротивление изоляции между электрически не связанными элементами проводящего рисунка на стеклотекстолитовом основании при минимальном расстоянии между ними согласно чертежу ПП в нормальных условиях должно быть по ГОСТу 23752-79 не менее 10000 МОм. При испытаниях в течение 2-х суток в условиях повышенной влажности воздуха $93 \pm 3\%$ при температуре $40 \pm 3^\circ\text{C}$ допускается снижение сопротивления изоляции до 30 МОм.

9.1.8. Контактные площадки на печатных платах

Контактные площадки на печатных платах подразделяются на две группы:

- площадки, совмещенные с металлизированными или неметаллизированными монтажными отверстиями;
- площадки, предназначенные для монтажа поверхностно-монтируемых (SMD) компонентов.

Контактные площадки ОПП, связанные с монтажными отверстиями, принимают на себя механические нагрузки, в том числе и перегрузки, обуславливаемые массой ЭРК и механическими напряжениями, возникающими при их монтаже, являющемся одновременно креплением к плате. Механическая прочность обеспечивается у них за счет площади металлизации. Приняты следующие нормы площади металлизации таких контактных площадок:

- для плат 1-го и 2-го классов точности – $2,5 \text{ мм}^2$;
- для плат 3-го класса – не менее $1,6 \text{ мм}^2$ (ОПП более высоких классов точности никто не делает).

В двухслойных и многослойных ПП компоненты, монтируемые в металлизированные отверстия, удерживаются за счет сил адгезии меди к поверхности металлизированных отверстий. Держит также припой, проникающий при монтаже на всю глубину монтажных отверстий, да еще образующий мениски на поверхности контактной площадки. Поэтому здесь нет необходимости расширять контактные площадки: можно оставлять вокруг монтажных и переходных отверстий поясок металлизации минимальной ширины.

Контактные площадки у металлизированных отверстий могут иметь круглую, овальную, прямоугольную или любую другую сложную форму. Как правило, массовой формой является круглая. Для обозначения первого вывода интегральных схем целесообразно использовать площадки какой-либо другой формы. В версиях P-CAD Master Designer для этого, по соглашениям пакета, используются квадратные контактные площадки.

В P-CAD 2002 предусмотрена возможность задавать следующие формы контактных площадок:

- эллиптическую (elliptical), в том числе круглую, как частный случай эллипса с одинаковыми осями;
- овальную (oval) форму с прямыми сторонами и закруглениями на концах;
- прямоугольную (rectangle), в том числе квадратную;
- прямоугольную со скругленными углами (rounded rectangle);
- полигональную (Polygon) – в виде правильного или произвольного многоугольника.

Контактные площадки, к которым подходят широкие проводники или площадки, расположенные в сплошном или сетчатом экранированном слое целесообразно выполнять с тепловым барьером (рис. 9.1), препятствующим оттоку большого количества тепла от контакта по фольге и локальному снижению температуры в зоне пайки вывода ЭРК.

В сплошной фольге широкого проводника или экрана стравливается часть металлизации, окружающей контактную площадку. Электрический контакт площадки с металлом слоя осуществляется через узкие печатные перемычки, пересекающие барьерную зону. В P-CAD 2002 параметры контактных площадок с тепловыми барьерами задаются так называемым “стилем” контактных площадок.

Задаются внутренний и внешний диаметры барьерной зоны (см. рис. 9.1, б), число и расположение печатных перегородок (две или четыре, вдоль координатных осей или под углом 45°).

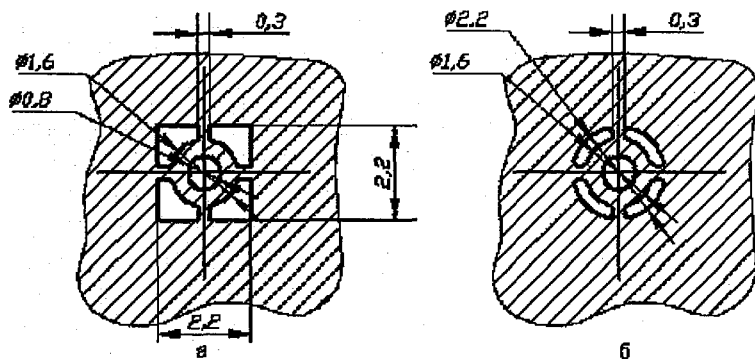


Рис. 9.1 Контактные площадки с тепловым барьером.

Для повышения механической прочности печатного рисунка в местах слияния узких печатных проводников с контактной площадкой целесообразно оставлять плавные переходы фольги от проводника к площадке, так называемые “слезки” (teardrops). Средствами P-CAD PCB сформировать такие слезки не удастся, поскольку заранее неизвестно, какой ширины печатный проводник подойдет на плате к контактной площадке и с какой стороны, а в программе отсутствуют средства анализа геометрии проводников. “Слезки” формируются при разработке фотошаблона одной из программ SAM_350 или SAMtastic 2000 DE, анализирующими геометрию проводников и автоматически добавляющими напылы металлизации.

Расчет параметров контактных площадок может выполняться исходя из двух посылок: из требования получить определенную плотность трассировки или из требования обеспечить наиболее плотную трассировку в тех свободных зонах, которые остаются после расположения на плате компонентов с минимально допустимыми для них контактными площадками. Второй путь представляется более практичным.

Правила и расчетные формулы для расчета параметров элементов печатного рисунка, в том числе контактных площадок, приведены в рекомендуемом “Приложении 2” к ГОСТу 23751-86. Кроме

таких очевидных факторов, как значения ширины проводников и зазоров между ними минимально допустимая ширина пояска металлизации контактной площадки, формулы учитывают факторы, связанные с погрешностями операций механической обработки и особенностями технологических процессов изготовления печатной платы. От этих особенностей зависит стабильность ширины проводников и зазоров, подтрав или непотрав проводников и т.п.

На практике часто не занимаются сложными расчетами для каждого изделия. Зная уровень культуры производства у изготовителя печатных плат, конструктор задает такие параметры печатного рисунка, которые в состоянии обеспечить это производство. Так, например, для печатных плат 3-го класса точности минимальный диаметр круглой контактной площадки может составлять величину, равную расчетному диаметру монтажного отверстия плюс 0,6 мм. Это соответствует минимально допустимой ширине пояска металлизации 0,3 мм независимо от диаметра монтажного отверстия. В этом случае контактные площадки для монтажа интегральных микросхем со штыревыми выводами могут иметь минимальный диаметр 1,4 мм; при шаге выводов 2,5 мм расстояние между соседними контактными площадками остается 1,1 мм, и в этом зазоре удастся проложить не более одного печатного проводника, даже при минимальной его ширине в 0,25 мм. Раз так, целесообразно увеличить диаметр контактной площадки до $1,5 \div 1,6$ мм.

Контактные площадки для поверхностно-монтируемых компонентов ничем не отличаются от обычных печатных проводников. Их размеры определяются конструктивными размерами монтируемых компонентов и некоторыми технологическими ограничениями, связанными с пайкой.

9.1.9. Экранные слои на печатной плате

Для ослабления емкостных наводок с одних печатных проводников на другие на печатной плате редко устанавливаются экраны объемной конструкции. Тем не менее, если создать на свободных от проводников участках поверхности платы площадки металлизации и соединить их электрически с “Общим” проводом схемы или проводом питания, эти площадки будут выполнять функцию электростатического экрана, поскольку емкость помехоизлучающих и помехопринимающих цепей на этот экран оказывается больше паразитной

емкости с цепи на цепь по воздуху. Чтобы наличие площадок металлизации не увеличивало коробления платы, в ДПП целесообразно делать эти экраны сетчатыми. При проектировании ПП в среде таких САПР, как P-CAD разных версий этой цели служит операция размещения полигонов ENTR/POLY или Place Copper Pour.

В МПП устраиваются специальные экранные слои и слои питания, которые выполняют такую же защитную функцию. В них делаются окна в местах прохода сквозных металлизированных отверстий. В сверхбыстродействующих устройствах, когда длина проводника оказывается более четверти длины волны передаваемых по цепям колебаний, печатные проводники должны проектироваться как отрезки длинных линий. Например, частоте сигнала в 1 ГГц соответствует длина волны около 30 см, так что печатный проводник длиной более 75 мм должен рассматриваться как отрезок линии с распределенными параметрами. При этом должны быть под контролем такие параметры этих линий связи как характеристическое или волновое сопротивление, значения времени задержки сигнала и затухания на единицу длины. Наличие экранного слоя или даже нескольких экранных слоев частично отвечает этой задаче: проводники сигнальных цепей совместно с экранными слоями образуют микрополосковые линии связи. Расчет таких линий не дает достаточной точности, поэтому параметры подобных линий чаще определяются экспериментально и контролируются на готовой плате.

9.1.10. Покрытия и маски

Покрытия и маски на печатной плате выполняются с различными целями.

1. *Защита проводников от коррозии.* Медные печатные проводники активно окисляются на воздухе, поэтому они должны быть защищены. Защита проводников может быть достигнута либо с помощью гальванического или термического покрытия металлом, не подверженным коррозии на воздухе.

2. *Технологическая защита и наращивание толщины проводников.* Гальваническое покрытие может быть чисто технологическим, защищающим проводники от травления при изготовлении платы, или оно может применяться одновременно для увеличения толщины проводников. Наибольшее распространение имеют покрытия сплавом олова и свинца, аналогичным оловянно-свинцовому при-

пою ПОС. Применяются покрытия сплавом олова и висмута. Эти сплавы обеспечивают защиту от коррозии, качественную пайку и надежный контакт.

3. *Защита контактов соединителя.* Если на плате устраиваются контакты электрического соединителя непосредственного контактирования, на эти контакты должно наноситься покрытие, дающее стабильное низкое переходное сопротивление и обладающее высокой износостойчивостью. В таких случаях применяется многослойное покрытие, в верхнем слое которого наносится золото или палладий. Толщина слоя составляет от 0,5 до 2 мкм.

Покрытие печатных проводников серебром в настоящее время не применяется. У серебра обнаружено очень неприятное свойство, так называемая миграция: в условиях повышенной влажности под действием электрического поля происходит рост кристаллодендритов по поверхности и в глубину изоляционного основания печатной платы. Это приводит к уменьшению сопротивления и электрической прочности изоляции.

Нанесение гальванического покрытия на всю поверхность печатных проводников является признаком устаревшей технологии. Часто нет необходимости в сплошном покрытии проводников и контактных площадок. В таких случаях при проектировании ПП разрабатываются дополнительные фотошаблоны с окнами непосредственно в местах расположения контактных площадок и других элементов рисунка, подлежащих покрытию. Вся остальная поверхность платы защищается при этом изоляционным покрытием-маской. Эта маска выполняет одновременно несколько функций:

- электрическую изоляцию печатных проводников на случай соприкосновения поверхности платы с посторонними предметами;
- защиту от замыкания соседних контактных площадок при пайке, в том числе и групповой;
- влагозащиту большей части поверхности платы;
- размещение маркировки печатной платы.

Нанесение защитных покрытий имеет свою историю. В технологии недавнего прошлого для защиты меди от коррозии на время от выпуска платы до монтажа применялось нанесение на всю поверхность платы спирто-канифольного флюса. После монтажа и промывки поверхность смонтированного узла покрывалась эпок-

сидным лаком УР-231 или Э-4100. После полимеризации лак образует прочную изоляционную и влагозащитную пленку, обволакивающую плату кругом. При такой технологии приходится принимать сложные меры по устранению натеков лака и защите от покрытия контактов электрических соединителей, органов регулирования, элементов индикации, расположенных на плате. Эта технология используется до сих пор, но ее следует считать устаревшей.

Современные технологии жертвуют сплошной защитой всей поверхности печатной платы ради удешевления продукции и повышения технологичности. В качестве материала для защитных масок используются составы на основе эпоксидных смол, сухой пленочный резист и др.

Размеры окон в маске на платах 3-го и более высоких классов точности должны превышать размеры контактных площадок на небольшую величину – от 0,05 до 0,1 мм. В терминах P-CAD 2001 эта величина называется Solder Mask Swell – расширение паяльной маски и задается при определении стиля контактных площадок и переходных отверстий (в местах расположения любых отверстий диаметром более 0,6 мм в маске необходимо выполнять окна, чтобы пленка маски не повисала над отверстием).

9.1.11. Маркировка на печатной плате

Маркировка печатной платы подразделяется на обязательную и дополнительную. К обязательной маркировке относится обозначение печатной платы по ГОСТу 2.201-80 (“децимальный номер”) или какой-либо условный шифр, даты изготовления и номера версии фотошаблона, а также технологические маркеры, не обозначаемые на чертеже печатной платы, но вводимые в фотошаблон изготовителем платы.

Дополнительная маркировка содержит обозначение заводского номера платы или партии плат, обозначение контуров мест установки и позиционные обозначения ЭРК и другую информацию, служащую для удобства монтажа, регулировки и эксплуатации модуля.

Часть маркировки может быть выполнена травлением одновременно с проводниками, но для этого на плате должно быть свободное место. Далеко не всегда такое место есть. Кроме того, при выполнении проекта средствами САПР маркировочные знаки, выполняемые травлением в слоях проводников, получают статус це-

пей, не имеющих подключенных компонентов. К таким цепям САПР относится с большим подозрением и выдает при электрическом контроле или при сверке списков цепей схемы и платы сообщения об ошибках, нервирующие разработчика. Тем не менее, такая маркировка применяется для обозначения номера чертежа ПП или ее шифра с тем, чтобы в массовом производстве можно было идентифицировать платы, поступающие с операций химической обработки, когда на них еще нет другой маркировки. Высота символов такой маркировки должна быть не менее 2,5 мм, иначе их невозможно будет читать. Шрифт для маркировки должен быть близок по начертанию к стандартным шрифтам по ГОСТу 26.020-80.

Дефицит свободного места на ПП не мешает выполнять маркировку способами офсетной печати (сеткографии, шелкографии и т.п.). Маркировка лишь не должна попадать на места пайки. Это достигается легко: в проекте создаются специальные маркировочные слои. В частности, в P-CAD 4.5 это слои SLKSCR, SLKTOP и SLKBOT, в P-CAD 2001 – слои Top Mask и Bot Mask. Высота символов, выполняемых способом офсетной печати, должна быть не менее 1,5 мм.

Замечание. В руководствах по P-CAD Master Designer указывается, что слой SLKSCR (аббревиатура от Silkscreen – экран шелкографии, т.е. маркировки) должен использоваться для размещения изображения контуров печатной платы и контуров корпусов ЭПК. Хотя для изображения контуров ЭПК в структуре слоев программы PC-CARDS имеются два предопределенных слоя – DVCTOP и DVCBOT, все известные библиотеки компонентной базы используют именно слой SLKSCR. Это приводит к тому, что, когда мы хотим сформировать из интегрального образа оттрассированной печатной платы чертеж по ГОСТу 2.417-91 и отключаем для этого видимость контуров корпусов ЭПК, вместе с ними исчезает и контур платы. Для преодоления этого эффекта приходится дублировать изображение контура платы в специальном пользовательском слое.

Маркировка может также выполняться вручную штемпелями или рейсфедером. Шрифт надписей при ручной маркировке должен соответствовать ГОСТу 2.008-85. Для маркировки должны использоваться краски, устойчивые к воздействию нейтральных растворителей, используемых при промывке (этиловый спирт, бензин или

их смеси и лак), которыми готовая плата может быть защищена от воздействия влаги. Это может быть пентафталева эмаль ПФ-115 ГОСТ 6465-76 или эпоксидная эмаль ЭП-773 ГОСТ 23143-83. Используемая для маркировки краска ТПНФ-58 не обладает достаточной устойчивостью к климатическим факторам, поэтому выполненная с ее помощью маркировка должна быть дополнительно защищена прозрачным лаком, например, УР-231 ТУ 6-10-863-84.

9.1.12. Установка навесных элементов

Навесными элементами будем называть все электрорадиокомпоненты, устанавливаемые на печатную плату при сборке и монтаже. Термин "элемент" достается нам в наследство от тех времен, когда различий между элементом и компонентом не проводилось. В настоящее время в инженерной практике такое различие проводится, но нормативные документы с новыми терминами до сих пор не введены в действие.

Значительная часть компонентной базы требует при установке и монтаже формовки выводов: придание им такой формы, которая позволяет согласовать пространственное расположение точек крепления с установленной сеткой проектирования и другими ограничениями, сформулированными в технических требованиях к условиям установки компонентов. Такими требованиями являются:

- необходимость дополнительного крепления;
- минимально допустимое расстояние от корпуса компонента до места гибки выводов;
- минимально допустимое расстояние от корпуса компонента до места пайки;
- максимально допустимое время нагрева при пайке компонентов;
- ограничения по промывке и покрытию защитными лаками;

Кроме технических условий на компонентную базу существуют нормативные документы, устанавливающие обобщенные требования по установке навесных элементов. В отечественной практике это два стандарта: отраслевой стандарт ОСТ 4.010.030-81 и ГОСТ 29137-91.

Для микросхем, полупроводниковых приборов, резисторов, конденсаторов допустимое расстояние от корпуса до места гибки

выводов в обоих стандартах определено как расстояние от корпуса до центра окружности изгиба вывода (см. расст. А, рис. 9.2). Если это расстояние не указано в ТУ на компоненты, ГОСТ 29137-91 устанавливает следующие нормы:

- для резисторов и конденсаторов – 0,5 мм;
- для интегральных микросхем – 1,0 мм;
- для полупроводниковых приборов – 2,0 мм;
- для дросселей – 3,5 мм.

Радиус гибки выводов определяет механические напряжения в месте изгиба и не может быть произвольно малым. На практике трудно контролировать значение радиуса изгиба по оси вывода.

Поэтому должны быть определены значения радиуса закругления оправки, на которой производится гибка. ГОСТ 29137-91 рекомендует для выводов диаметром или толщиной до 0,5 мм радиус оправки R0,5 мм, а для выводов толщиной от 0,5 до 1,1 мм радиус 1,0 мм. В условиях производства всегда целесообразно пользоваться одной оправкой вместо двух, поэтому следует остановиться на большем из двух значений, так как. больший радиус не наносит вреда компонентам с тонкими выводами.

Расстояние до места пайки (см. расст. В, рис.9.2) не может быть сколь угодно малым из условий теплопередачи и нагрева компонента при пайке. Оно измеряется от корпуса компонента вдоль оси вывода до точки касания паяльника или волны припоя (рис. 9.2). ГОСТ 29137-91 определяет это минимально допустимое расстояние в 2,5 мм.

Компоненты с осевыми и штыревыми выводами

Значительная часть компонентов, монтируемых на печатные платы, имеет выводы, расположенные вдоль продольной оси компонента. Эти компоненты проектировались вне связи с возможностью их монтажа на ПП, но они широко применяются до сих пор. Для их монтажа разработано автоматизированное оборудование, применяемое в массовом производстве. Поэтому следует обсудить условия установки и монтажа таких компонентов. Перед установ-

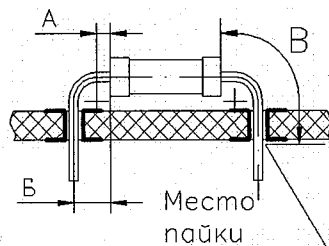


Рис. 9.2. Установка ЭРЭ

кой производится формовка выводов, о которой только что говорилось. В процессе формовки решаются две задачи:

- согласование установочных размеров компонента с координатной сеткой проектирования печатной платы;
- временная фиксация компонентов в заданном положении относительно поверхности печатной платы и удержание их в этом положении до момента монтажа (пайки).

Упомянутые стандарты ОСТ 4.010.030-81 и ГОСТ 29137-91 предписывают применение сетки проектирования и установки выводов компонентов в 2,5 мм или, при необходимости, 1,25 мм. Использование мелкой сетки с шагом 1,25 мм не приводит к выигрышу в плотности установки компонентов, так как габаритные размеры подавляющего большинства ЭРК превышают величину этого шага.

В отраслевом стандарте ОСТ 4.010.030-81 предусмотрено 7 основных вариантов установки навесных ЭРК, каждый из которых имеет подварианты. В нем также собраны данные по установочным размерам для большого количества ЭРК и приведены варианты их установки. Тем не менее, данные по современным ЭРК туда не попали. Новые компоненты разрабатываются и поступают на рынок быстрее, чем это находит отражение в нормативных документах. Кроме того, в этом стандарте вообще не отражены данные по импортной компонентной базе, появившейся в нашей стране в последние годы.

Для фиксации компонентов на время, предшествующее монтажу, в простейшем случае применяется подгибка выводов на обратной стороне печатной платы. При этом, однако, не обеспечивается установка корпуса ЭРК на заданной высоте от поверхности ПП, чтобы выдерживалось необходимое расстояние от корпуса ЭРК до места пайки. Подклейка прокладок под ЭРК нетехнологична и применяется только в тех случаях, когда функциональный узел должен эксплуатироваться в условиях значительных вибрационных или ударных нагрузок.

Эффективным способом фиксации ЭРК на заданной высоте относительно поверхности платы является формовка в виде зига или зиг-замка (рис. 9.3, а, б).

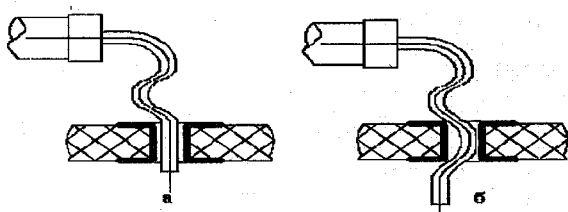


Рис. 9.3. Способ фиксации ЭРК.

Точно такой же способ установки применим и к другим компонентам, имеющим выводы, подлежащие монтажу в отверстия ПП: транзисторам, интегральным микросхемам в DIP-корпусах и др.

При установке навесных компонентов следует учитывать возможность прогиба печатной платы вследствие коробления, теплового расширения или механических нагрузок. В особенности опасны такие деформации для компонентов со штыревыми или шариковыми выводами, выступающими под дно корпуса компонента. Выводы DIP-корпусов обычно выступают горизонтально и изгибаются изготовителем под прямым углом вниз. Такой изгиб частично компенсирует деформацию печатной платы. В случае когда выводы расположены под дном корпуса ИМС, усилия, возникающие при деформации платы, работают как на срез, так и на разрыв штыря или отрыв шарикового вывода в месте пайки.

9.1.13. Обозначение варианта формовки выводов и установки ЭРК на печатную плату

В терминологии стандарта ГОСТ 29137-91 электрорадиокомпоненты (ЭРК) обозначаются термином “изделия электронной техники” (ИЭТ). При этом к ИЭТ отнесены даже такие ЭРК, как дроссели, которые по природе своей ничего “электронного” собой не представляют. Обычно электронными приборами называют такие ЭРК, функционирование которых существенно основывается на управлении потоком носителей электрического заряда – электронные лампы и полупроводниковые приборы. В термине ИЭТ просматривается наследие ведомственной принадлежности производителей ЭРК в Советском союзе на момент формирования стандарта.

Обозначение варианта формовки выводов и установки ЭРК на печатную плату должно записываться в технических требованиях на поле сборочного чертежа функционального узла. ГОСТ 29137-91 устанавливает следующую структуру обозначения.

XXX. XX. XXXX. XX. XX

Обозначение варианта

формовки и установки

Номер чертежа, приведенного в тексте стандарта

Шифр позиции ИЭТ

Глубина формовки

Наличие дополнительной формовки

Все сведения о варианте формовки и установки ИЭТ кодируются цифрами. Группы цифр разделяются точкой.

Поясним смысл цифр в кодовых группах обозначения.

- Обозначение варианта формовки и установки состоит из номера типового конструктивного исполнения, от 01 до 42, в соответствии с табл.9.10, приведенной в тексте стандарта, а третьей цифрой обозначается вариант дополнительного крепления (если крепление не предусматривается, то третья цифра – нуль).

- Номер чертежа – число от 02 до 19. Указывается в случаях, когда конструкция компонента не определяет однозначно способ его установки. В противном случае в данную кодовую группу записываются два нуля.

- Шифр позиции ИЭТ – четырехзначное условное обозначение габаритных и установочных размеров компонента. Выбирается из таблиц 2...7 и 9...11 ГОСТа 29137-91. Для отдельных типов компонентов обозначение может быть нулевым.

- Глубина формовки – расстояние от нижней плоскости выводов до плоскости, в которой после формовки должны лежать концы выводов, в миллиметрах, в пределах от 0,7 до 5,0 мм (обозначение дается в виде 07 и т.п.). Указывается для компонентов, монтируемых на поверхность.

- Дополнительная формовка предусматривается в виде зига, зиг-замка или замка. Соответственно коды 01, 02 или 03. При отсутствии дополнительной формовки – код 00.

Каждый вариант формовки требует определенного расчета таких параметров, как радиусы изгиба выводов, высота расположения корпуса над поверхностью печатной платы и других. Часто конструктор выполняет эту работу один раз для некоторого множества ЭРК, с которым ему предстоит работать в обозримый период и со-

ставляет для себя настольное руководство. Приведем пример такого списка вариантов обозначения формовки и установки ряда широко применяемых интегральных микросхем в планарных корпусах типа 4, металлостеклянных корпусах типа 3, DIP-корпусах (тип 2) и ряда других компонентов (табл. 9.10).

Таблица 9.10

Список вариантов обозначения формовки

Тип компонента	Корпус	Вариант установки
1	2	3
142ЕН10	41168.3	381.18.1104.21.00(прокладка) 381.18.1104.50.00(радиатор)
1НТ251	401.14.5	381.18.1102.12.00(прокладка)
1526КТ3	401.14.5	381(370).18.1102.12.00(прокладка)
1533АП5	4153.20.1	381.18.1105.22.00(прокладка)
1564ИД7	402.16.33	381.18.1104.17.00(прокладка)
1567АП1	401.14.5	381(370).18.1102.12.00(прокладка)
1806ВМ2	4138.42.10	381.18.1108.22.00(прокладка)
249ЛП1	401.14.5	381(370).18.1102.12.00(прокладка)
530ГГ1	402.16.23	381.18.1104.17.00(прокладка)
537РУ16А	4183.28.2	381.18.1108.20.00(прокладка)
564ИЕ10	402.16.33	381.18.1104.17.00(прокладка)
588ВА1	4119.28.3	381.18.1105.07.00(прокладка)
590КТ1	402.16.23	381.18.1104.17.00(прокладка)
140УД14	301.8.2	290(301).12.0000.00.00
140УД7	301.8.2	290(301).12.0000.00.00
521СА3	301.8.2	290(301).12.0000.00.00
580ВВ51	2121.28.6	330.00.0000.00.00
2Д212А	-	180(211).00.0000.00.00
2Д522Б	КД3	010(011,140).02.0303.00.00
2Д708А	-	010(011,140).02.0305.00.00
2ДС627А	2ДС627А	381.18.1102.16.00 (16 выв.)
2ДС628А	2ДС628А	381.18.1103 (12 выв.)
2С133А	КД4.1	010(011,140).02.0306.00.00
2С210Ж	КД2	010(011,140).02.0305.00.00
Д818И	КД2	010(011,140).02.0305.00.00
КД510А	-	010(011,140).02.0303.00.00
2Т830	КТ2.5Б	241.09.1003.00.00
2Т831	КТ2.5Б	241.09.1003.00.00
С2-33Н-0,125	-	220.03.0401.00.00 (вертикально)
Б18-13В	-	381.18.1102.10.00
К10-17А-1	-	200.00.0000.00.00
К10-47А	-	211.00.0000.00.00

Пример записи в технических требованиях на поле сборочного чертежа:

хх. Установку ИЭТ производить по ГОСТу 29137-91:

поз. 12 – вариант 140.02.0203.12.00,

поз. 15 – вариант 301.14.0000.00.00 и т.д.

9.2. Рабочие конструкторские документы

Чертеж печатной платы

В терминах ГОСТа 2.101-68 “Виды изделий” односторонняя и двухсторонняя печатные платы являются деталями, поскольку при их изготовлении не применяются операции сборки. Исключение составляют платы, у которых контактные площадки укрепляются заклепками-пистонами. Их следует относить к классу сборочных единиц. Сборочными единицами являются также многослойные печатные платы: операции соединения отдельных слоев или пар слоев в пакет, независимо от способа соединения, являются операциями сборки.

В соответствии с ГОСТом 2.102-68 “Виды и комплектность конструкторских документов” основным конструкторским документом на деталь является чертеж детали. Применительно к печатным платам действует стандарт – «Единая система конструкторской документации» (ЕСКД) ГОСТ 2.417-91, определяющий правила выполнения чертежей печатных плат.

Следует сделать оговорку, что этот стандарт, как и многие другие документы ЕСКД, формировался во время, когда основным, если не единственным способом выполнения операций механической обработки было чтение размеров с чертежа и ручное управление сверлильными и фрезерными станками, обрезка по контуру ножницами и т.п. Для этого требовалось указание на чертеже исполнительных размеров. Фотошаблоны также изготавливались вручную, путем черчения или наклейки черной изоляционной ленты на листы бумаги и последующего их фотографирования.

В настоящее время проектирование выполняется преимущественно средствами САПР, операции ручной обработки вытесняются обработкой на программно-управляемых станках, фотошаблоны выполняются на программно-управляемых фотоплоттерах. Это позволяет, в принципе, организовать полностью бездокументное производство печатных плат или разработать систему стандартов, рег-

ламентирующих правила выполнения конструкторских документов и отражающих или даже опережающих достигнутый уровень автоматизации проектирования и производства. Эта работа в стране ведется: в 2006 г. вносится целый ряд изменений в стандарты ЕСКД, наиболее радикальным из которых является введение понятий электронной структуры изделия и электронного документа, признание равноправия электронного и бумажного документов. Но все это пока далеко от внедрения в практику. До сих пор на производстве для изготовления и контроля печатных плат для определения ответственности в случае брака и разрешения спорных ситуаций требуются конструкторские документы по ЕСКД. Стандарты ЕСКД действуют пока в прежнем виде, поэтому нам следует ознакомиться с их основными положениями.

1. На чертеже печатной платы должны быть изображены контуры готовой платы, в проекциях – по правилам машиностроительного черчения с указанием данных для механической обработки (исполнительные и справочные размеры, предельные отклонения размеров, указание чистоты обработки), а также рисунок печатных проводников, контактных площадок, монтажных и межслойных переходных отверстий.

2. Размеры должны указываться на чертеже одним из трех способов:

- в соответствии с требованиями ГОСТа 2.307-68 – нанесением выносных и размерных линий и указанием размерных надписей;
- нанесением координатной сетки в прямоугольной или полярной системе координат;
- комбинированным способом при помощи выносных и размерных линий и координатной сетки.

Исполнительные размеры, по которым производится обрезка контура печатной платы, а также положение центров крепежных отверстий, их диаметры обязательно должны указываться по ГОСТу 2.307-68.

Предельные отклонения линейных размеров и межцентровых расстояний вносятся в размерные надписи в виде условных обозначений полей допусков (кавалитетов) или в виде числовых значений либо указываются общей записью в технических требованиях на поле чертежа. Приведем пример такой общей записи:

xx. Неуказанные предельные отклонения $H14$, $h14$, $\pm \frac{IT\ 14}{2}$

3. Координатную сетку следует наносить либо на все поле чертежа, либо на изображаемую поверхность печатной платы, либо рисками по периметру контура печатной платы. Риски могут наноситься без отступа от контура либо на некотором расстоянии от контура печатной платы. Для печатных плат прямоугольной формы достаточно нанести риски вдоль двух сторон контура печатной платы.

4. Шаг координатной сетки в прямоугольной системе координат – по ГОСТу 10317-79:

- при длине наибольшей стороны до 100 мм – 2,5 мм;
- при длине наибольшей стороны от 100 до 350 мм – 5 мм;
- при длине более 350 мм – 10 мм.

Еще раз отметим, что государственные стандарты не поспевают за современным уровнем развития средств автоматизированного проектирования и за развитием компонентной базы РЭС. В частности, использование координатной сетки с шагом более 2,5 мм в настоящее время утратило смысл. Сетка с таким шагом использовалась в свое время как для размещения компонентов, так и для прокладки печатных проводников. С ростом сложности и уменьшением габаритов ЭРК шло соответствующее уплотнение размещения и трассировки. Если сетка с шагом в 2,5 мм еще годится для размещения компонентов со штыревыми выводами в корпусах DIP и т.п., то для широко используемой современной компонентной базы с шагом расположения выводов 0,5 мм и меньше нужен другой подход. Сетку с шагом 2,5 мм можно оставить для размещения компонентов на поле печатной платы. Для трассировки же современными средствами САПР назначение сетки вообще не обязательно. Современные “бессеточные” автотрассировщики вместо сетки оперируют понятием “канал” – суммарное значение ширины печатного проводника и зазора между проводниками, назначенного в правилах трассировки. Это не означает, что проводники будут проложены на плате, как попало. В любом случае автотрассировщик проложит проводники по линиям некоторой сетки, однако назначать ее в правилах проектирования нет необходимости.

Для механической обработки на фрезерных и сверлильных станках с ЧПУ также допустимы гораздо более мелкие шаги сетки,

поскольку шаг позиционирования рабочих органов таких станков может составлять величину до 0,01 мм и менее.

Если все же необходимо следовать правилам ЕСКД, то нужно назначить координатную сетку с шагом 2,5 мм или другим шагом, установленным отраслевым стандартом или стандартом предприятия и обеспечивающим наибольшее удобство при проектировании.

Значение шага координатной сетки указывается в технических требованиях на поле чертежа.

5. За нуль в прямоугольной системе координат следует принимать одну из следующих точек:

- центр крайнего левого нижнего отверстия на поле платы, в том числе крепежного или технологического;
- левый нижний угол печатной платы;
- левую нижнюю точку, образованную линиями построения вдоль контура платы.

Линии координатной сетки или риски, расположенные вдоль сторон контура нумеруются с пропусками, обеспечивающими необходимые зазоры между числами, но без ущерба для восприятия чертежа, порядковыми номерами или оцифровываются непосредственно в миллиметрах.

6. Изображение печатных проводников и круглых отверстий, в том числе и контактных площадок, в соответствии с пп. 17...19 стандарта, должны выполняться одной линией. При изображении проводников, ширина которых превышает 2,5 мм, допускается изображать двумя линиями. Допускается также зачернение или штриховка широких проводников и контактных площадок.

Все это утратило смысл при проектировании средствами САПР. Обычно САПР выдает графический образ печатного проводящего рисунка в виде проводников и контактных площадок с их реальными геометрическими размерами, залитых цветом соответствующего слоя графического редактора печатных плат. Такое изображение не противоречит ГОСТ 2.417-91, п. 19.

Отдельного разговора заслуживают контактные площадки со сквозными отверстиями для монтажа компонентов со штыревыми выводами. По правилам ЕСКД следует использовать на чертеже для групп отверстий одинакового диаметра маркировку в виде зачерненной четверти, половины площади отверстия и т.п. Расшировка

этих обозначений приводится в технических требованиях на поле чертежа. При проектировании средствами САПР такие изображения обычно не используются. При выводе чертежа печатной платы контактные площадки и межслойные переходы изображаются в естественном виде, с отверстием и окружающим его кольцом металлизации (рис. 9.4).

Если при выпуске конструкторских документов жестко ставится вопрос о наличии на чертеже монтажных отверстий, маркированных специальными знаками, это потребует дополнительных операций по преобразованию графического образа печатной платы.

7. На изображении печатной платы допускается наносить надписи, знаки и т.п., которые отсутствуют на самом изделии. В таких случаях в технических требованиях должна приводиться соответствующая запись.

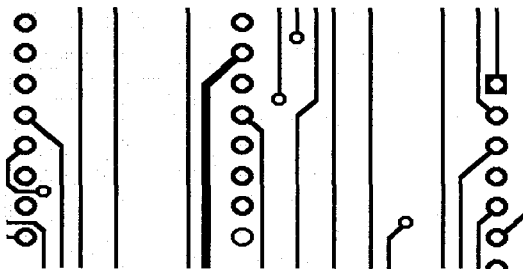


Рис. 9.4. Чертеж печатной платы с переходами в естественном виде

8. При необходимости указания способа изготовления печатной платы его следует записывать первым пунктом в технических требованиях. Например: 1. Плату изготовить комбинированным позитивным методом.

9. При автоматизированном способе изготовления печатных плат ГОСТ 2.417-91 допускает включать в состав конструкторской документации документы на перфолентах и перфокартах, определяющие конструкцию и способ изготовления печатных плат. В настоящее время это положение следует расширить на “электронные” документы на современных носителях информации. К таким документам могут быть отнесены графические файлы фотошаблонов и файлы управляющей информации для фотоплоттера, сверлильных и фрезерных станков и т.д. Соответствующие записи должны быть сделаны в технических требованиях.

10. Обозначение конструкторского документа на печатную плату выполняется по ГОСТу 2.201-80 “Обозначение изделий и конструкторских документов”.

Код классификационной характеристики выбирается по Классификатору ЕСКД. Для деталей отраслевых видов техники классификатором ЕСКД выделены специальные группы классификационной характеристики, в частности, для печатных плат – группы 758700 – 758800 «Детали – тела и (или) не тела вращения крепежные, электрорадиоэлектронные, платы печатные», для многослойных плат – группы 687250 – 687260. Группа 758700 включает печатные платы на жестком основании с прямолинейным контуром в плане или непрямолинейным; одно- и двухсторонние; с печатными проводниками, элементами, схемой (табл. 9.11).

Таблица 9.11

Печатные платы на жестком основании

Класс, подкласс, группа	Под-группа	Вид	Описание
Односторонние и двухсторонние печатные платы			
7587	1		с печатными проводниками, односторонние;
	2		с печатными проводниками, двухсторонние;
	3		с печатной схемой, односторонние;
	4		с печатной схемой, двухсторонние;
	5		с печатными элементами
		1	шириной до 20 мм включительно
		2	шириной св. 20 до 30 мм включительно
		3	шириной св. 30 до 50 мм включительно
		4	шириной св. 50 до 80 мм включительно
		5	шириной св. 80 до 125 мм включительно
		6	шириной св. 125 до 200 мм включительно
		7	шириной свыше 200 мм
Многослойные печатные платы			
6872	5		до 5 слоев включительно
	6		свыше 6 слоев
		1	шириной до 20 мм включительно
		2	шириной св. 20 до 50 мм включительно
		3	шириной св. 50 до 125 мм включительно
		4	шириной св. 125 до 200 мм включительно
		5	шириной св. 200 до 400 мм включительно
		6	шириной св. 400 мм

Приведем пример записи печатной платы в спецификацию сборочного узла – модуля нулевого или первого уровня. Поскольку в терминах ГОСТа 2.101-68 двухсторонняя печатная плата является деталью (при ее изготовлении не применяются операции сборки), запись для двухсторонней печатной платы заносится в рубрике “Детали”:

Обозначение	Наименование
	<u>Детали</u>
<i>АБВГ.758726.022</i>	<i>Плата печатная</i>

Многослойная печатная плата при любой технологии изготовления, является продуктом сборки, поэтому соответствующая запись заносится в рубрику “Сборочные единицы”:

Обозначение	Наименование
	<u>Сборочные единицы</u>
<i>АБВГ. 687264.071</i>	<i>Плата печатная</i>

10. ДОКУМЕНТАЛЬНОЕ ОФОРМЛЕНИЕ КОНСТРУКТОРСКИХ РЕШЕНИЙ

Учитывая тот факт, что параллельно изучению научных основ конструкторского проектирования студент должен выполнять курсовой проект, целесообразно изложить материал, касающийся документального оформления результатов проектирования.

Наряду со сложными творческими процессами в работе конструктора присутствует трудоемкая исполнительская часть – выполнение конструкторской документации (КД) по строго определенным правилам.

Конструкторские решения могут быть переданы в производство только после документального оформления.

Состав КД, а также правила его оформления, выпуска и обращения, включая внесение изменений, исправлений и дополнений, определяется системой государственных стандартов – ЕСКД. Эта система введена в действие в 1968 году на смену ранее действовавшим стандартам.

Строгая регламентация правил оформления конструкторской документации необходима для того, чтобы избежать разночтений и разного толкования документов на разных предприятиях-изготовителях техники в пределах страны или группы стран, заключивших соглашение о единой системе стандартизации.

10.1. Назначение и область распространения ЕСКД

Рассмотрим общие положения, определяющие назначение, область распространения, состав и классификацию стандартов ЕСКД. Эти общие положения сформулированы в ГОСТе 2.001-93. В стандартах отслеживаются изменения, возникающие по мере технического прогресса, в отдельных случаях формулируются опережающие нормы; обновленные стандарты перерегистрируются: в нашем случае в обозначении стандарта указан год последней перерегистрации.

В соответствии с ГОСТом 2.001-93 основное назначение ЕСКД заключается в установлении общих правил выполнения, оформления и обращения КД, обеспечивающих:

- возможность взаимобмена конструкторскими документами между организациями без их переоформления;
- стабилизацию комплектности, исключаящую дублирование и разработку не требующихся производству документов;
- возможность расширения унификации;
- упрощение форм конструкторских документов и графических изображений, снижающих трудоемкость проектно-конструкторских работ;
- улучшение условий технической подготовки производства;
- улучшение условий эксплуатации изделий;
- оперативную подготовку документации для быстрой переналадки действующего производства.

Область распространения ЕСКД:

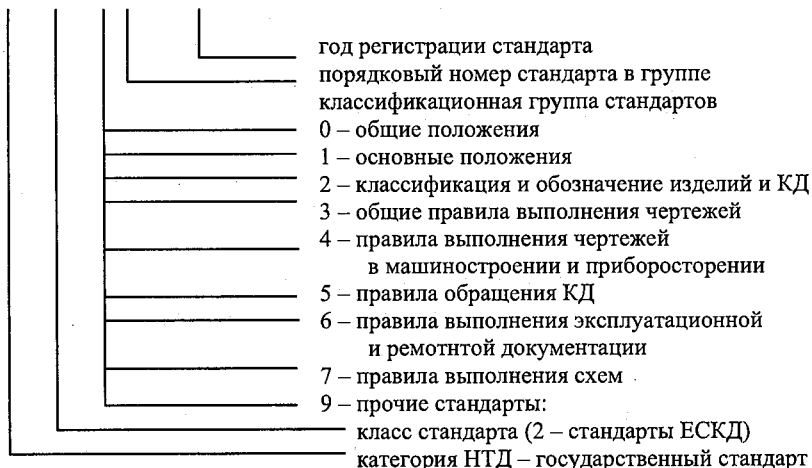
- 1) на все виды конструкторских документов (КД);
- 2) на учетно-регистрационную документацию и документацию по внесению изменений в КД;
- 3) на нормативно-техническую документацию (НТД) и технологическую документацию, научно-техническую и учебную литературу (в части форматов, шрифтов и т.п.).

Теперь можно вернуться к нормальному порядку изложения и рассмотреть вопрос, который логически должен был бы находиться “над” ГОСТом 2.001-93, но в реальности включен в него как один из пунктов. Это состав, классификация и обозначение стандартов ЕСКД.

10.2. Состав, классификация и обозначение стандартов ЕСКД

Состав стандартов ЕСКД определяется перечнями, публикуемыми Государственным комитетом по стандартизации РФ.

Обозначение стандартов строится по классификационному принципу следующим образом:



10.3. Основные положения ЕСКД

Следующая группа стандартов определяет основные положения ЕСКД. Мы уделим внимание нескольким стандартам из этой группы и рассмотрим наиболее важные их положения.

ГОСТ 2.101-68. Виды изделий

Изделием называется любой предмет или набор предметов производства, подлежащих изготовлению на предприятии (п. 2).

В зависимости от назначения изделия делятся на изделия основного и вспомогательного производства (п. 3).

Изделия основного производства предназначены для поставки заказчику, на рынок и т.п.

Изделия вспомогательного производства – те, которые выпускаются предприятием для собственных нужд (штампы, прессформы, оснастка и т.п.).

Стандартом устанавливаются следующие 4 вида изделий (табл. 10.1):

ГОСТ 2.101-68 Виды изделий

Деталь	Изделие, изготовленное из однородного по наименованию и марке материала без применения сборочных операций
Сборочная единица	Изделие, составные части которого подлежат соединению на предприятии-изготовителе сборочными операциями (свинчивание, клепка, пайка, сварка, опрессовка, развальцовка, склеивание, сшивка, укладка).
Комплекс	Два и более специфицированных изделия, не соединенных на предприятии-изготовителе (это могут быть разные предприятия, поставляющие свои изделия одному потребителю), но предназначенные для выполнения общих эксплуатационных задач.
Комплект	Два и более несоединенных изделия, имеющие вспомогательное назначение (комплект инструментов для ремонта, комплект сменных объективов и т.п.)

В зависимости от наличия или отсутствия составных частей изделия делятся на (п. 5):

➤ неспецифицируемые – при отсутствии составных частей (детали);

➤ специфицированные – состоящие из двух и более составных частей (сборочные единицы, комплексы или комплекты).

В дальнейшем мы поймем, что происхождение данного термина связано с тем, что документ, определяющий состав изделия, состоящего из составных частей, называется спецификация – от английского *specification* – перечисление деталей (конструкторы старой, довоенной школы произносили это на английский лад “спесификация”; позднее это произношение приобрело “немецкую” окраску, хотя в немецком языке такого слова нет).

ГОСТ 2.102-68 Виды и комплектность конструкторских документов

Виды конструкторских документов подразделяются на:

- графические;
- текстовые.

Графические и текстовые конструкторские документы, в отдельности или в совокупности, определяют состав и устройство изделия и содержат необходимые данные для его разработки, изготовления, контроля, приемки, эксплуатации и ремонта.

Комплектность конструкторских документов устанавливается следующим образом. Это может быть:

- основной конструкторский документ;
- основной комплект конструкторских документов;
- полный комплект конструкторских документов.

Что такое основной конструкторский документ?

- Для детали – это *чертеж детали*.
- Для сборочной единицы, комплекса или комплекта – *спецификация*.

Основной комплект КД изделия объединяет КД, относящиеся к изделию, в целом (сборочный чертеж, схема электрическая принципиальная, перечень элементов, технические условия (ТУ), эксплуатационные документы).

Полный комплект КД состоит из основного комплекта КД на изделие в целом и основных комплектов КД на составные части.

Состав комплекта КД зависит от стадии разработки, от характера, назначения или условий производства изделия. В табл. 10.2 приведена выдержка из ГОСТа 2.102-68, в которой приведен список документов, составляемых на стадии разработки рабочей конструкторской документации по ГОСТу 2.103-68. Среди них есть обязательные и остальные: остальные нельзя назвать необязательными, поскольку любой из них может стать обязательным, если этого требуют условия производства или применения изделия.

Таблица 10.2

Список документов на стадии разработки рабочей конструкторской документации по ГОСТу 2.103-68

Код докум	Наименование документа	Рабочая документация			Дополнительные указания
		Детали	Сб. един.	Комплексы	
1	2	3	4	5	6
–	1. Чертеж детали	•	–	–	
СБ	2. Сборочный чертеж	–	•	–	
МЭ	5а. Чертеж электро-монтажный	–	о	–	
МЧ	6. Монтажный чертеж	–	о	о	
	7. Схемы	–	о	о	Номенклатура схем по ГОСТу 2.701-84
	8. Спецификации	–	•	•	

Окончание таблицы 10.2

ВС	9. Ведомость спецификаций	—	о	о	Составляется на сборочные единицы, имеющие 2 и более ступени вхождения составных частей
ВД	10. Ведомость ссылочных документов	—	о	о	Составляется при передаче документации изготовителю
ВП	11. Ведомость покупных изделий	—	о	о	Составляется на изделия, предназначенные для самостоятельной поставки (реализации)
ВР	12. Ведомость разрешения применения покупных изделий	—	о	о	Составляется на изделия, предназначенные для самостоятельной поставки (реализации)
	13. Ведомость держателей подлинников	о	о	о	
ТУ	18. Технические условия	о	о	о	Составляется на изделия, предназначенные для самостоятельной поставки (реализации)
ПМ	19. Программы и методики испытаний	о	о	о	
ТБ	20. Таблицы	о	о	о	Номенклатура устанавливается разработчиком в зависимости от характера и условий производства
РР	21. Расчеты	о	о	о	
И...	21а. Инструкции	о	о	о	
Д...	22. Документы прочие	о	о	о	
	24. Документы эксплуатационные	о	о	о	Номенклатура и обязательность устанавливается в соответствии с ГОСТом 2.601-68
	25. Документы ремонтные	о	о	о	Номенклатура и обязательность устанавливается в соответствии с ГОСТом 2.602-68

• — обязательные документы;

о — документы составляются в зависимости от характера, назначения или условий производства изделия.

ГОСТ 2.103-68 Стадии разработки

Данным стандартом установлена последовательность стадий разработки конструкторской документации на продукцию во всех отраслях промышленного производства.

Техническое предложение — стадия, на которой проводится анализ технического задания заказчика, анализ различных вариантов существующих и возможных новых инженерных решений, патентные исследования. В результате разрабатывается документация, содержащая техническое и технико-экономическое обоснование разработки.

Эскизный проект — стадия, на которой вырабатываются принципиальные инженерные и конструктивные решения, дающие общие представления об устройстве и принципе работы изделия, а также данные, определяющие его назначение и основные параметры.

Технический проект — стадия, на которой разрабатывается совокупность конструкторских документов, содержащих окончательные технические решения, дающие полное представление об устройстве разрабатываемого изделия.

Рабочая конструкторская документация — разработка конструкторской документации, предназначенной для изготовления опытного образца или опытной партии изделий.

На каждой из стадий предусмотрена разработка документов, фиксирующих результат работы и определяющих дальнейший ход разработки.

При выполнении курсовых и дипломных проектов разрабатываемый комплект конструкторских документов приближен к тому, что требуется разрабатывать на стадии разработки рабочей конструкторской документации.

ГОСТ 2.104-68. Основные надписи

При выполнении графического или текстового конструкторского документа кроме содержательной его части на чертеже или листах текстового документа должна присутствовать информация, включающая наименование и условное обозначение изделия, к которому относится документ, фамилии и личные подписи лиц, разрабатывавших, проверявших и утверждавших документ, даты создания, контроля и утверждения документа, сведения о внесенных изменениях и т.п. — всего до 34 различных сведений. Эти сведения

называются реквизитами документа. Все это сводится в так называемую основную надпись и дополнительные графы к ней.

Основная надпись представляет собой таблицу, формат которой определен стандартом ГОСТ 2.104-68. Основная надпись располагается в правом нижнем углу листа. На листах формата А4 (219х297 мм) основная надпись располагается вдоль короткой стороны листа.

Основная надпись на первом листе документа выполняется по форме 1 для графических или по форме 2 – для текстовых документов; на последующих листах многолистных документов – по форме 2а или 2б.

Дополнительные графы к основной надписи располагаются горизонтально в левом верхнем углу листа и вертикально вдоль левого поля.

Далее рассмотрим основное содержание стандарта, без знакомства с которым невозможно правильно оформить такие текстовые документы, как пояснительную записку (в частности, к курсовому или дипломному проекту), технические описания, инструкции, технические условия и т.п.

ГОСТ 2.105-95. Общие требования к текстовым документам

Ограничимся рассмотрением тех требований, невыполнение которых является массовым у неопытного работника, чтобы, по возможности, их избежать.

➤ Полное наименование изделия на титульном листе документа в основной надписи и при первом упоминании в тексте документа должно быть одинаковым с его наименованием в основном конструкторском документе (п. 2.2.1).

➤ Текст документа должен быть кратким, четким и не допускать различных толкований (п. 2.2.2).

При изложении обязательных требований в тексте должны применяться слова “должен”, “следует”, “необходимо” и производные от них.

➤ В документе должны применяться научно-технические термины, обозначения и определения, установленные соответствующими стандартами, а при их отсутствии – в научно-технической литературе.

➤ В тексте документа *не допускается*:

- применять для одного и того же понятия различные научно-технические термины, близкие по смыслу (синонимы), а также иностранные слова или термины, если есть соответствующие русские;

- сокращать обозначения единиц физических величин, если они употребляются без цифр (за исключением заголовков таблиц и расшифровок буквенных обозначений в формулах);

- применять сокращения слов, кроме установленных правилами русского языка и государственными стандартами;

- использовать математический знак “минус” (–) перед отрицательными значениями: следует писать слово “минус”;

- употреблять математические знаки $<$, $>$, $\geq$, $\leq$, $\neq$, а также № и % без цифр;

- применять индекс стандартов (ГОСТ, ОСТ и др.) без регистрационного номера (все приведенные положения – п. 2.2.3).

➤ Поясняющие надписи, наносимые непосредственно на изделие (таблички, надписи к элементам управления и т.п.) выделяются в тексте шрифтом, например, ВКЛ, ПУСК (без кавычек) или кавычками, если эти надписи состоят из цифр или знаков. Примеры текста: ...кнопка ПУСК; ...индикатор “50” и т.п. (п. 2.2.4).

➤ Условные буквенные обозначения величин и условные графические обозначения должны соответствовать государственным стандартам (п. 2.2.6).

➤ Единица физической величины одного и того же параметра в пределах одного документа должна быть постоянной: нельзя в одном месте написать, например, + 0,3 В, а в другом месте об этом же параметре 300 мВ (п. 2.2.8).

➤ Все иллюстрации, если их больше одной, нумеруются в пределах раздела арабскими цифрами; ссылки на иллюстрации дают с сокращенным словом “смотри”, например, “см. рис. 2.2”. Допускается сквозная нумерация иллюстраций (п. 2.3.1).

Следующий стандарт детализирует требования к форме и содержанию различных видов текстовых документов.

ГОСТ 2.106-96. Текстовые документы

Нас данный стандарт больше всего интересует в части правил выполнения спецификации. Эти правила вошли в него практически без изменений после отмены действовавшего ранее ГОСТа 2.108-68.

Типичной ошибкой студентов и неопытных разработчиков является выполнение сборочного чертежа и последующая подгонка спецификации под него либо вообще непонимание, для чего нужна спецификация, в особенности в случае разработки КД на радио-электронные функциональные узлы и модули нулевого и первого уровней. Наличие перечня элементов к схеме электрической принципиальной создает иллюзию, что для сборки узла больше ничего не нужно. На самом деле это неверно: кроме набора электрорадио-компонентов, вошедших в “Перечень”, в состав сборочной единицы входит печатная плата или другое монтажное основание, силовые элементы конструкции (рамка, лицевая панель, штыри-ловители соединителя), крепеж и т.п. Весь этот список и определяется в спецификации.

Поскольку спецификация определена в ГОСТе 2.102-68 как основной конструкторский документ, она должна составляться перед тем как конструктор приступает к работе над сборочным чертежом изделия.

➤ Спецификация определяет состав сборочной единицы, комплекса и комплекта и необходима для изготовления, комплектования КД и планирования запуска в производство указанных изделий.

➤ Спецификацию составляют на отдельных листах на каждую сборочную единицу, комплекс и комплект по формам 1 и 1а (последующие листы) на листах формата А4, с основной надписью по ГОСТу 2.104-68.

➤ В спецификацию входят составные части, а также конструкторские документы, относящиеся к этому изделию и к его неспецифицируемым составным частям.

➤ Спецификация состоит из разделов, которые располагают в следующей последовательности:

- документация;
- комплексы;
- сборочные единицы;
- детали;
- стандартные изделия;
- прочие изделия;
- материалы;
- комплекты.

Наименование каждого раздела указывают в виде заголовка в графе “Наименование” и подчеркивают. Если какая-то из перечисленных групп составных частей отсутствует, соответствующий заголовок опускают.

➤ В раздел “Документация” вносят документы, составляющие основной комплект КД специфицируемого изделия, кроме его спецификации (схема электрическая принципиальная, перечень элементов, сборочный чертеж).

➤ В разделы “Комплексы”, “Сборочные единицы”, “Детали” вносят обозначения и наименования соответствующих изделий:

- в алфавитном порядке сочетания букв кодов организаций-разработчиков;
- в пределах этих кодов – в порядке возрастания классификационных характеристик;
- при одинаковой классификационной характеристике – в порядке возрастания регистрационного номера.

Начиная с раздела “комплексы” (если комплексов нет – “сборочные единицы”; если сборочных единиц нет – “детали”), составные части, вносимые в спецификацию, обозначаются порядковыми позиционными обозначениями в графе “Поз.”. На случай возможного внесения дополнительных составных частей допускается оставлять в спецификации пустые строки и пропускать позиционные обозначения.

➤ В разделе “Стандартные изделия” записывают изделия, применяемые по ГОСТу – государственным стандартам; ОСТу – отраслевым стандартам; СТП – стандартам предприятия:

- в пределах каждой категории стандартов записи рекомендуется производить по группам изделий, объединенных по функциональному назначению;

- в пределах каждой группы – в алфавитном порядке наименований;

- в пределах каждого наименования – в порядке возрастания обозначений стандартов;

- в пределах каждого обозначения стандартов – в порядке возрастания основных параметров или размеров изделия.

➤ В раздел “Прочие изделия” вносят изделия, применяемые не по основным конструкторским документам, за исключением стан-

дартных изделий (применяемые по ТУ). Запись изделий производят по однородным группам:

- в пределах каждой группы – в алфавитном порядке наименований;
- в пределах каждого наименования – в порядке возрастания основных параметров или размеров изделия.

➤ В раздел “Материалы” вносят все материалы, непосредственно входящие в специфицируемое изделие. В случае функциональных узлов и блоков РЭС это провода, кабели и т.п.

Не записывают материалы, количество которых не может быть определено конструктором, а устанавливается технологом (лаки, краски, клей, герметик, припой).

➤ В графе “Обозначение” указывают:

- в разделе “Документация” – обозначение записываемых документов по ГОСТу 2.201-80;
- в разделах “Комплексы”, “Сборочные единицы”, “Детали” и “Комплекты” – обозначения основных конструкторских документов;
- в разделах “Стандартные изделия” и “Прочие изделия” *графу не заполняют.*

➤ В графе “Наименование” указывают:

- в разделе “Документация” – только наименование документов (сборочный чертеж, перечень элементов и т.п.);
- в разделах “Комплексы”, “Сборочные единицы”, “Детали” и “Комплекты” – наименование изделий, в соответствии с основной надписью в основных конструкторских документах на эти изделия;
- в разделах “Стандартные изделия” и “Прочие изделия” наименование изделия и обозначение стандартов или других документов на поставку (ТУ, ОТУ, ЧТУ и т.п.).

Далее рассмотрим требования важнейшего стандарта, устанавливающего правила присвоения обозначений изделиям и конструкторским документам на эти изделия.

ГОСТ 2.201-80. Обозначение изделий и конструкторских документов

В соответствии с требованиями данного стандарта, каждому изделию должно быть присвоено обозначение (п. 1.1).

Обозначение изделия одновременно является обозначением его основного конструкторского документа (п. 1.2).

Изделия и конструкторские документы сохраняют обозначение независимо от того, в каких других изделиях и конструкторских документах они применяются (п. 1.4.).

Обозначения строятся по классификационному принципу.

Обозначение состоит из:

- кода организации-разработчика изделия – четырех заглавных букв русского алфавита, присваиваемого компетентной инстанцией по запросу организации и распространяющегося на всю ее продукцию;

- шестизначной числовой классификационной характеристики, выбираемой по “Классификатору” ЕСКД в соответствии с функциональным назначением и другими характеристиками изделия;

- трехзначного порядкового регистрационного номера, присваиваемого на предприятии по каждой классификационной характеристике и хранящегося в “Карточке учета обозначений”.

Элементы обозначения разделяются точкой.

Таким образом, обозначение основного конструкторского документа имеет вид:

XXXX.XXXXXX.XXX

Код организации-разработчика _____

Код классификационной характеристики _____

Порядковый регистрационный номер _____

Обозначение записывается в графу 1 основной надписи документа.

Структура кода классификационной характеристики следующая:

XX XX XX

Класс _____

Подкласс _____

Группа _____

Подгруппа _____

Вид _____

Приведем пример построения кода классификационной характеристики для *пассивного полосового фильтра с сосредоточенными параметрами*. В Классификаторе ЕСКД находим:

- класс 460000 – средства радиоэлектронные управления, связи, навигации и вычислительной техники;
- подкласс 467000 – узлы функциональные: генераторы, усилители, фильтры, антенно-фидерного тракта и др.;
- группа 467200 – фильтры;
- подгруппа 467210 – с сосредоточенными параметрами, пассивные;
- вид 467213 – полосовые.

По каждой классификационной характеристике выпускаемых предприятием изделий на предприятии ведутся карточки учета обозначений. Основному конструкторскому документу на каждое вновь разрабатываемое изделие присваивается код классификационной характеристики, а в пределах классификационной характеристики – очередной незанятый порядковый регистрационный номер от 001 до 999.

Обозначение неосновного конструкторского документа

Кроме основного конструкторского документа при проектировании изделия создается еще целый ряд документов, которые считаются неосновными. Всего таких документов может быть более 25.

Обозначение неосновного конструкторского документа состоит из обозначения основного документа и добавляемого к нему буквенно-цифрового кода документа:

XXXX.XXXXXX.XXX YYYU

Обозначение изделия _____

Код документа – до 4-х символов _____

В случае студенческих курсовых и дипломных проектов составляются следующие не основные конструкторские документы:

- схемы электрические (структурная – код Э1, функциональная – код Э2, принципиальная – код Э3);
- перечни элементов (к принципиальной схеме – код ПЭ3);
- сборочные чертежи – код СБ.

При проектировании радиоэлектронных устройств любого назначения (и не только их) неперенной разновидностью выпускаемых конструкторских документов являются схемы.

Следующие два стандарта ЕСКД устанавливают общие требования и правила выполнения схем.

ГОСТ 2.701-84. Схемы. Виды и типы. Общие требования к выполнению

➤ Виды схем обозначаются буквами:

Электрические	Э
Гидравлические	Г
Пневматические	П
Кинематические	К
Оптические	Л
Вакуумные	В
Газовые	Х
Энергетические	Р
Деления	Е
Комбинированные	С

➤ В зависимости от назначения схемы подразделяются на типы; типы обозначаются цифрами:

Структурная	1
Функциональная	2
Принципиальная (полная)	3
Соединений (монтажная)	4
Подключения	5
Общая	6
Расположения	7
Прочие	8
Объединенная	0

Совмещенной схеме присваивают шифр схемы, тип которой имеет минимальный порядковый номер.

➤ Количество типов схем на изделие должно быть минимальным, но в совокупности они должны содержать сведения в объеме, достаточном для проектирования, изготовления, эксплуатации и ремонта изделия.

➤ Между схемами одного комплекта должна быть установлена однозначная связь.

➤ Форматы листов схемы выбирают в соответствии с требованиями, установленными в ГОСТе 2.301-68. Выбранный формат схемы должен обеспечивать компактное выполнение схемы, не нарушая ее наглядности и удобства пользования ею.

➤ Условно-графические обозначения (УГО) элементов изображают в размерах, установленных в стандартах на УГО.

➤ Графические обозначения на схемах выполняют линиями той же толщины, что и линии связи.

➤ Линии связи выполняют толщиной от 0,2 до 1,0 мм, в зависимости от форматов схемы и размеров УГО.

➤ Линии связи должны состоять из горизонтальных и вертикальных отрезков и иметь наименьшее количество изломов и взаимных пересечений.

➤ Расстояние между соседними параллельными линиями связи должно быть не менее 3,0 мм.

➤ Для выполнения заказа на поставку комплектующих изделий, для работы по составлению спецификаций сборочных единиц совместно со схемой электрической принципиальной выпускается Перечень элементов. Обозначение перечня элементов состоит из обозначения основного конструкторского документа на изделие (функциональный узел, модуль) и добавляемого к нему кода документа – ПЭЗ.

Далее рассмотрим основные положения стандарта, определяющего правила выполнения электрических схем.

ГОСТ 2.702-75. Правила выполнения электрических схем

Логика курса требует, чтобы перед определением правил выполнения электрических схем, входящих в состав комплекта КД проекта были сформулированы правила выполнения условно-графических обозначений элементов, образующих схему.

Правила выполнения условно-графических обозначений (УГО) в схемах формулируются в большой группе стандартов, с ГОСТа 2.721-74 по ГОСТ 2.796-95. Из этой группы выделим стандарты, регламентирующие условные графические обозначения в электрических схемах, без которых невозможно правильно выполнить проект функционального узла или блока РЭС.

ГОСТ 2.721-74. Обозначения условные графические в схемах. Обозначения общего применения.

ГОСТ 2.723-68. Обозначения условные графические в схемах. Катушки индуктивности, дроссели, трансформаторы, автотрансформаторы и магнитные усилители.

ГОСТ 2.728-74. Обозначения условные графические в схемах. Резисторы, конденсаторы.

ГОСТ 2.730-73 Обозначения условные графические в схемах. Приборы полупроводниковые.

ГОСТ 2.743-91. Обозначения условные графические в схемах. Элементы цифровой техники.

ГОСТ 2.747-68. Обозначения условные графические в схемах. Размеры условных графических обозначений.

ГОСТ 2.759-82 Обозначения условные графические в схемах. Элементы аналоговой техники.

Мы не имеем возможности рассматривать подробности, касающиеся УГО схемных элементов. Скажем только, что при использовании информационных технологий проектирования целесообразно провести подготовительную работу по формированию библиотек схемных УГО, а лучше всего построить связанные (интегральные) библиотеки компонентной базы, в которых схемному УГО соответствует конструктивное изображение соответствующего компонента, в той проекции или проекциях, в которых он будет виден на сборочных чертежах функциональных узлов. Это очень большая и ответственная работа: ошибки, допущенные при формировании библиотек, могут привести к переделке больших фрагментов проекта и вызвать убытки.

Рассмотрим теперь *основные положения ГОСТа 2.702-75*. Больше всего нас будут интересовать нормы, установленные в п. 3 “Правила выполнения принципиальных схем”.

➤ На схеме электрической принципиальной должны быть изображены все электрические элементы и связи между ними, а также все элементы, которыми заканчиваются входные и выходные цепи: разъемы, клеммы, штекеры, гнезда и т.п. Допускается указывать соединительные и монтажные элементы (п. 3.1, 3.2).

➤ Схемы должны быть изображены в отключенном состоянии (п. 3.3).

➤ Условно-графические обозначения (УГО) элементов должны выполняться в соответствии с требованиями стандартов ЕСКД (ГОСТ 2.721-74...ГОСТ 2.759-82). Размеры УГО – в соответствии с ГОСТом 2.730-73 (с изменением ИУС № 6 1989 г.), ГОСТа 2.747-68.

Допускается совмещенный и разнесенный способы изображения компонентов, в конструкцию которых входит несколько одинаковых

или функционально разнородных элементов (обмотки и контактная группа электромагнитных реле, логические элементы сложной интегральной микросхемы и т.п.) Элементы, используемые частично, допускается показывать не полностью. При ручном способе выпуска документов на поле схемы должны помещаться текстовые указания о том, куда подключаются неиспользуемые выводы частично изображенных элементов; при проектировании средствами САПР все неиспользуемые элементы должны быть включены в схему (целесообразно сгруппировать их в отдельную группу) и их выводы должны быть явно подключены к цепям питания, земли и т.п. в соответствии с требованиями руководств по эксплуатации компонентов.

➤ Всем элементам на принципиальной схеме должны быть присвоены **позиционные обозначения** (п. 3.16). Правила выполнения позиционных обозначений установлены в ГОСТе 2.710-81 "Обозначения буквенно-цифровые в электрических схемах". Позиционное обозначение должно обязательно включать буквенный код (латинскими буквами), обозначающий функциональное назначение элемента, и его порядковый номер в пределах документа (схемы).

➤ Порядковые номера элементам следует присваивать, начиная с единицы, в пределах группы функционально однородных элементов, которым присвоено одинаковое буквенное позиционное обозначение (п. 3.18).

➤ Порядковые номера присваиваются в порядке расположения элементов на схеме, сверху вниз в направлении слева направо (п. 3.19).

➤ Позиционные обозначения проставляются на схеме сверху или справа от обозначаемого элемента (п. 3.20).

➤ *Надписи*, знаки или графические обозначения, предназначенные для нанесения на изделие, заключают в кавычки (п. 3.38).

➤ *Электрические связи* выполняются сплошными линиями основной ширины; изломы линий выполняются под прямым углом. Ширина линии зависит от размеров чертежа и может быть от 0,2 до 1 мм.

➤ *Линии групповой связи*. Для упрощения схемы допускается несколько электрически не связанных линий связи сливать в линию групповой связи:

- линия групповой связи вычерчивается линией увеличенной толщины, без пересечений с другими линиями групповой связи (разветвления линий групповой связи допускаются).

- при слиянии линий связи в линию групповой связи каждую линию помечают в месте слияния и выхода из групповой линии условными обозначениями (п.3.15). В случае проектирования средствами САПР признаком принадлежности входящих и выходящих из линии групповой связи индивидуальных линий является единое для соответствующих индивидуальных линий имя цепи. Это полностью соответствует требованию п. 3.15.

- при подходе линии групповой связи к контактам элементов каждую связь следует изображать отдельной линией.

➤ Рекомендуется указывать на схеме в виде таблиц характеристики входных и выходных цепей либо наименование цепей или контролируемых величин, а также адреса внешних соединений.

<i>Конт.</i>	<i>Цепь</i>	<i>Адрес</i>
1	Питание +5 В 0,5 А	=B1-XS1:12
2	Общий	=B1-XS1:10
3	U _{вых} = +20 В R _н = 1 кОм	=A1-XP1:4

Вместо заголовка графы “Конт.” может помещаться условно-графическое обозначение контакта, которым оканчивается линия связи на изделии. В случае если связи проходят через контакты электрического соединителя, над таблицей помещается позиционное обозначение соединителя.*

➤ На схеме следует указывать обозначения выводов (контактов) элементов (устройств), нанесенные на изделие или установленные в их документации (п. 3.37). При подготовке библиотек компонентной базы для использования в САПР обозначения контактов являются неременной составляющей описания компонентов. При формировании электрической принципиальной схемы изделия эти

* При выполнении проекта средствами САПР библиотечные УГО электрических соединителей часто выполняются в виде одной строки подобной таблицы, с контактом для присоединения линии электрической связи. Разработчик помещает на листе графического редактора столько контактов, сколько ему требуется по схеме, а программа контролирует, не превышено ли число контактов, которое имеет выбранный тип соединителя.

обозначения, как правило, появляются вместе с УГО при помещении его на поле чертежа.

➤ *Перечень элементов* составляется на листе схемы электрической принципиальной, выше основной надписи, или выпускается как отдельный не основной документ, с кодом документа “ПЭЗ” на листах формата А4, с основной надписью по ГОСТ 2.104-68. Графление листа – по ГОСТ 2.701-84 (рис. 10.1).

15	Поз. обозначение	Наименование	Кол.	Примечание	8mm
20	110	10			
185					

Рис. 10.1 Перечень элементов. Графление листа – по ГОСТу 2.701-84

➤ Связь Перечня элементов с УГО осуществляется через позиционные обозначения.

➤ Записи в Перечень элементов заносятся по группам функционально однородных элементов в порядке возрастания латинской буквы в позиционном обозначении, а в пределах одного буквенного обозначения – в порядке возрастания номеров элементов.

➤ Запись должна включать:

- в графе “Поз. обозначение”:
 - позиционное обозначение;
- в графе “Наименование”:
 - словесное обозначение (“конденсатор”, “микросхема” и т.п.);
 - обозначение типа компонента;
 - электрические параметры и другие данные в соответствии с техническими данными и примерами, приводимыми в “Справочных листах” ВНИИ “Электронстандарт”;
- обозначение документа на поставку (ГОСТ, ОСТ, ТУ);
- в графе “Кол.” – количество элементов, если в одной записи указано несколько позиционных обозначений;
- в графе “Примечание” указывают дополнительные сведения о характере использования элемента, допустимых заменах и т.п.

➤ Для сокращения записей допускается указывать обозначения документов на поставку для групп однотипных компонентов в виде подзаголовков, как например,

“Конденсаторы К10-17а ОЖ0.460.107 ТУ”
К73-39 РАЯЦ.673633.000 ТУ.

Подзаголовки подчеркивают.

➤ Записи о компонентах с полностью идентичными обозначениями и техническими данными допускается объединять в одну строку, помещая в графу “Поз.” сразу несколько позиционных обозначений, *только в том случае, если порядковые номера в их позиционных обозначениях следуют подряд.*

Далее рассмотрим требования ЕСКД к выполнению сборочных чертежей всех видов. Правила выполнения чертежей специфических для радиоэлектроники изделий – печатных плат подробно рассмотрены в разделе курса, связанном с проектированием функциональных узлов РЭС на печатных платах.

ГОСТ 2.109-73. Основные требования к чертежам

➤ Количество сборочных чертежей должно быть минимальным, но достаточным для рациональной организации производства (сборки и контроля) изделий (п. 3.1.1).

➤ Сборочный чертеж должен содержать:

- изображение сборочной единицы, дающее представление о расположении и взаимной связи составных частей, соединяемых по данному чертежу и обеспечивающее возможность сборки и контроля сборочной единицы;

- размеры, предельные отклонения и другие параметры и требования, которые должны быть выполнены или проконтролированы по данному сборочному чертежу;

- указания о характере сопряжения составных частей и методах его осуществления;

- номера позиций составных частей, входящих в изделие (обозначенных в спецификации);

- габаритные размеры изделия;

- установочные, присоединительные и другие необходимые справочные размеры;

- техническую характеристику изделия (при необходимости);

- координаты центра масс (при необходимости).

➤ Перемещающиеся части изделия допускается изображать в крайних положениях с соответствующими размерами.

➤ Допускается не изображать:

- фаски, скругления, проточки, углубления и другие мелкие элементы;

- зазоры между стержнем и отверстием;

- крышки, щиты, перегородки и т.п., если необходимо показать закрытые ими составные части; при этом над изображением делают надпись, например, “Крышка поз. 3 не показана”;

- надписи на табличках, фирменных планках и т.п., изображая только их контур;

➤ На разрезах изображают нерассеченными составные части, на которые выпущены самостоятельные сборочные чертежи.

➤ Нерассеченными также показывают типовые, покупные и другие широко распространенные изделия, в частности, крепежные изделия: винты, болты, шпильки, гайки, шайбы и т.п.

➤ Сварные, паяные, клеевые соединения составных частей из однородного материала на разрезах и сечениях штрихуют в одну сторону, показывая границу разделения составных частей и дают обозначение неразъемного соединения по ГОСТу 2.313-82.

➤ На сборочном чертеже допускается не наносить позиционные обозначения на элементы принципиальной схемы, устанавливаемые способом электромонтажа (ГОСТ 2.413-72, п. 2.19).

В этом случае в графе спецификации “Примечание” даются позиционные обозначения этих элементов в соответствии с принципиальной схемой, и эти же обозначения наносятся поверх их изображений на сборочном чертеже. В технических требованиях на поле сборочного чертежа записывается фраза: “позиционные обозначения элементов в соответствии с АБВГ.ХХХХХХ.ХХХ ЭЗ показаны условно”.

Это облегчает выполнение и чтение сборочного чертежа, не перегружая его позиционными выносками, которых, в случае радиоэлектронных функциональных узлов, могут быть сотни.

10.4. Адаптация ЕСКД к требованиям информационных технологий

В момент ввода в действие ЕСКД (1968–70 гг.) отражала уровень развития техники 60-х годов. Информационные технологии в те годы только еще зарождались, и до их применения в инженерном

проектировании было далеко. Однако стремительный технический прогресс в этой области быстро (к 80-м гг.) привел к положению, когда нормы ЕСКД стали отставать от достижений информационной технологии. Положение усугубилось тем, что отечественные программные средства не выдержали конкуренции с западными, и в настоящее время в стране, за редкими исключениями (графические редакторы КОМПАС, ТОПОР, Schemagee), используются пакеты прикладных программ (ППП) САПР иностранного происхождения, адаптированные к стандартам западных стран, отличающимся от принятых в нашей стране. При этом возникают проблемы при нормативном контроле конструкторской документации.

В 2006 г. предпринята попытка адаптации комплекса стандартов ЕСКД к новым условиям. Решением Межгосударственного совета по стандартизации, метрологии и сертификации СНГ от 28.02.2006 г. введены 22 изменения в действующие стандарты, разработаны проекты двух стандартов взамен действующих и четырех новых стандартов.

Наиболее заметными чертами этих нововведений является юридическое закрепление следующих основных положений:

- наличие двух форм конструкторских документов (КД: традиционной (бумажной) и электронной (безбумажной) формы и возможности их параллельного существования;

- равноправные статусы этих двух форм документации и возможность их преобразования друг в друга;

- ввод в ЕСКД новых сущностей и видов конструкторских документов и их определения на основе понятия электронной структуры изделия:

- электронная структура изделия (дерево состава изделия);
- электронная модель как обобщенное понятие (математическая, геометрическая, топологическая модель и т.п.);
- электронная модель детали и электронная модель сборочной единицы как конструкторские документы.

- правил отображения этих новых документов в существующие виды традиционных КД;

- признание факта существования электронных документов, не отображаемых в традиционные виды КД (3D-модели, аудио-документы, видеоролики и т.п.).

Полные тексты изменений к действующим стандартам и тексты новых стандартов пока не опубликованы, тем не менее, необходимо готовиться к вводу их в действие в ближайшее время.

Путь этот не будет легким. Формирование электронной модели изделия предполагает использование программно-технических комплексов САПР. САПР позволяют строить цельную иерархическую модель сложного продукта, из которого должны извлекаться или, наоборот, в которую могут включаться модели составных частей. Каждая такая составная часть может являться продуктом специализированной САПР. В настоящее время существуют так называемые “тяжелые” САПР, оперирующие иерархическими моделями сложных технических изделий (PRO Enginner и др.), однако для их функционирования требуется более высокий, чем персональный компьютер, уровень технических средств – рабочие станции, число которых на отечественных предприятиях невелико из-за их высокой стоимости.

Опять же, вся эта техника и программные средства импортные, поэтому требуется их адаптация к требованиям отечественных нормативных документов. В особенности сложно сделать это для программного обеспечения.

Одним из нововведений данного проекта является наделение служб нормоконтроля обязанностью производить приемку программно-технических средств САПР, предназначенных для реализации заявленных в проекте подходов. Сами эти службы не в состоянии предложить разработчикам необходимую технику и программное обеспечение, работающее по ЕСКД – такой техники в достаточном объеме просто не существует.

Как будет решен этот вопрос – пока неизвестно. Вероятнее всего, разработчикам и производителям будет “в виде исключения” разрешено пользоваться теми средствами, которые есть в их распоряжении. В противном случае вся работа будет парализована.

В заключение данного раздела приведем сводку требований к конструкторской части студенческих курсовых и дипломных проектов по содержанию и в части выполнения требований ЕСКД.

Требования к содержанию и соблюдению норм ЕСКД в курсовых и дипломных проектах

1. Содержание конструкторского раздела пояснительной записки:
 - обоснование конструктивного исполнения:
 - ✓ выбор несущей конструкции (в зависимости от требований руководителя или производства это может быть БНК или другая несущая конструкция);
 - ✓ выбор материалов;
 - ✓ расчет размеров для размещения элементов принципиальной схемы;
 - ✓ расчет коэффициентов заполнения площади и объема;
 - расчет потребляемой устройством мощности (для использования полученного результата при расчете теплового режима);
 - расчет теплового режима блока (если конструкция не предполагает исполнения в виде конструктивно обособленного блока, искусственно принять модель в виде блока с тремя модулями на вертикально расположенных печатных платах);
 - расчет механических характеристик функционального узла на печатной плате или блока и обоснование системы защиты от механических воздействий (вибрация, удар);
 - расчет надежности:
 - ✓ суммарная интенсивность отказов всех элементов принципиальной схемы и конструкции узла;
 - ✓ среднее время непрерывной работы до первого отказа;
 - ✓ вероятность непрерывной безотказной работы в течение заданного времени;
 - описание разработанной конструкции и анализ результатов: выполнено или не выполнено техническое задание на разработку.

2. Оформление пояснительной записки.

Пояснительная записка должна быть оформлена на листах формата А4 по ГОСТу 2.301-68, в соответствии с требованиями ЕСКД – ГОСТ 2.104-68, ГОСТ 2.105-95, титульный и последующие листы выполняются на бланках по формам 5 и 5а ГОСТ 2.106-96.

3. Графическая часть.

Графическая часть проекта включает в себя следующие графические и текстовые конструкторские документы:

а) схема электрическая структурная (если в разрабатываемом устройстве могут быть выделены структурные узлы);

б) схема электрическая принципиальная;

с) перечень элементов к схеме электрической принципиальной;

д) чертеж печатной платы радиоэлектронного функционального узла;

е) спецификацию радиоэлектронного функционального узла на печатной плате (модуля РЭС 1-го уровня);

ф) сборочный чертеж радиоэлектронного функционального узла на печатной плате (модуля РЭС 1-го уровня по ГОСТу 26632-85);

г) спецификацию сборочной единицы 2-го уровня (модуля РЭС 2-го уровня (блока) по ГОСТу 26632-85);

х) сборочный чертеж сборочной единицы (модуля) 2-го уровня.

Комплектность представляемого к защите графического материала определяется требованиями производства и согласуется на этапах выполнения проекта.

Графические и текстовые конструкторские документы могут быть выполнены вручную или средствами САПР P-CAD, AutoCAD КОМПАС и т.п. и в любом случае оформляются в соответствии с требованиями ЕСКД:

- все документы выполняются на листах стандартных форматов по ГОСТу 2.301-68;

- основные надписи документов должны соответствовать ГОСТу 2.104-68;

- документы должны иметь обозначение по ГОСТу 2.201-80:

- ✓ в качестве буквенного кода организации-разработчика может быть, с разрешения руководителя, указан реальный код предприятия, на котором выполняется проект, в противном случае указывается аббревиатура названия учебного заведения – 4 заглавные русские буквы;

- ✓ в случае невозможности дать классификационную характеристику функционального узла по классификатору ЕСКД допускается условное обозначение в виде: АБВГ. XXXXXX.001 ЭЗ и т.п.;

- электрические схемы и перечни элементов должны соответствовать ГОСТу 2.701-84 и ГОСТ 2.702-75;

- чертеж печатной платы должен соответствовать ГОСТ 2.417-91 и требованиям к чертежам деталей ГОСТ 2.109-73;

- спецификации должны соответствовать требованиям стандарта ГОСТа 2.106-96;

- сборочные чертежи должны соответствовать требованиям раздела 3 ГОСТа 2.109-73;

Все чертежи выполняются в стандартных масштабах по ГОСТу 2.302-68, в видах, разрезах или сечениях по ГОСТу 2.305-68, с обозначением размеров и предельных отклонений по ГОСТу 2.307-68.

Задания для проверки усвоения материала

1. Дайте краткий обзор истории происхождения печатных плат.
2. Дайте краткий обзор способов изготовления печатных плат.
3. Дайте характеристику конструктивных разновидностей печатных плат.
4. Дайте характеристику классов точности печатных плат.
5. Охарактеризуйте требования к размерам печатных плат по ГОСТу 10317-79 и соответствие их современным условиям проектирования и производства.
6. Приведите структуру размеров печатных плат в стандарте МЭК 297.
7. Приведите структуру размеров печатных плат в стандарте МЭК 917.
8. Приведите сведения о структуре размеров печатных плат в стандарте ГОСТа 26765.12-86.
9. Дайте сведения об основных материалах для изготовления печатных плат. 10. Назовите факторы, определяющие толщину печатных плат.
10. Сформулируйте требования к отверстиям в печатных платах.
11. Сформулируйте требования, определяющие длину и ширину печатных проводников, величину зазоров между элементами проводящего рисунка..
12. Сформулируйте требования, определяющие форму и размеры контактных площадок.
13. Опишите экранные слои печатных плат, покрытия и маски на печатных платах, маркировку печатных плат.
14. Сформулируйте основные требования, определяющие установку навесных элементов на печатные платы.
15. Охарактеризуйте требования ГОСТа 29137-91 к обозначению вариантов формовки выводов и вариантов установок навесных элементов.
16. Сформулируйте требования ЕСКД к чертежу печатной платы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гелль П.П., Иванов-Есипович Н.К. Конструирование и микроминиатюризация радиоэлектронной аппаратуры: Учебник для вузов. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд. 1984.
2. Дульнев Г.Н., Тарновский Н.Н. Тепловые режимы электронной аппаратуры. – М.: Энергия, 1971.
3. Дульнев Г.Н., Парфенов В.Г., Сигалов А.В. Применение ЭВМ для решения задач теплообмена. – М.: Высшая школа, 1990.
4. Волин М.Л. Паразитные процессы в радиоэлектронной аппаратуре. – М.: Радио и связь, 1981.
5. Князев А.Д., Кечиев Л.Н., Петров Б.В. Конструирование радиоэлектронной и электронно-вычислительной аппаратуры с учетом электромагнитной совместимости. – М.: Радио и связь, 1989.
6. Полонский Н.Б. Конструирование электромагнитных экранов для РЭА. – М.: Радио и связь, 1979.
7. Карпушин В.Б. Виброшумы радиоаппаратуры. – М.: Сов. радио, 1976
8. Суровцев Ю.А. Амортизация радиоэлектронной аппаратуры. – М.: Сов. радио, 1971.
9. Бердичевский Б.Е. Вопросы обеспечения надежности РЭА при разработке. – М.: Сов. радио, 1977.
10. Соколов С.С., Суходольский В.Ю. Основы конструирования и технологии радиоэлектронных средств. Защита от внешних воздействий. Учебное пособие. СПб., изд. СПбГЭТУ (ЛЭТИ), 2003.
11. Картажов В.Б., Суходольский В.Ю., Исакова В.А., Чукулаева В.А. Защита РЭС от тепловых и механических воздействий. Учебное пособие. – СПб., изд. СПбГЭТУ (ЛЭТИ), 2006.
12. Применение ПЭВМ при конструировании РЭС. Методические указания к курсовому проектированию по дисциплине "Проектирование РЭС на ПЭВМ" / Сост. А.А.Иванов, В.Б.Картажов, С.С.Соколов и др.. изд. СПбГЭТУ (ЛЭТИ), СПб., 1999.
13. Выбор электрорадиокомпонентной базы в курсовом и дипломном проектировании РЭС: Методические указания к курсовому проекту по дисциплине "Конструкторское проектирование РЭС на ПЭВМ"/ Сост.: А.А.Иванов, В.А.Исакова, В.Б.Картажов, изд. СПбГЭТУ (ЛЭТИ), СПб., 2000.
14. Уваров А. P-CAD 2000, ACCEL EDA. Конструирование печатных плат. Учебный курс. – СПб.: Питер, 2001. – 320 с.
15. Сквозное проектирование модулей РЭС в САПР ACCEL EDA/P-CAD 2000/2001. Учебное пособие/ И.Г.Мироненко, В.Ю.Суходольский, К.К.Холуянов и др.: СПб., изд. СПбГЭТУ (ЛЭТИ), 2002. - 140 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
1. Эволюция методов конструкторского проектирования РЭС	8
2. Разукрупнение РЭС по функционально-конструктивной сложности	11
3. Базовые несущие конструкции РЭС	16
4. Аспекты электромагнитной совместимости при проектировании РЭС	21
4.1. Источники и пути проникновения наводок в РЭС	26
4.2. Экранирование в РЭС	37
4.3. Развязка цепей и фильтрация напряжений в проводах	57
5. Работа РЭС в условиях механических воздействий	61
5.1. Уравнения движения центра масс блока РЭС при одноосном гармоническом вибровоздействии	65
5.2. Расчет частот механического резонанса печатных плат	71
5.3. Механические напряжения в элементах конструкций	75
6. Устойчивость РЭС по отношению к акустическому шуму	78
7. Тепловой Режим РЭС	84
7.1. Основные механизмы теплообмена	85
7.2. Критериальные уравнения теплопередачи	91
7.3. Расчет теплового режима блоков РЭС	94
7.4. Обозначение заданного теплового режима РЭС	98
8. Расчет надежности РЭС	116
9. Конструирование функциональных узлов РЭС на печатных платах	124
9.1. Конструирование печатных плат	128
9.2. Рабочие конструкторские документы	159
10. Документальное оформление конструкторских решений	166
10.1. Назначение и область распространения ЕСКД	166
10.2. Состав, классификация и обозначение стандартов ЕСКД	167
10.3. Основные положения ЕСКД	168
10.4. Адаптация ЕСКД к требованиям информационных технологий	187
Требования к содержанию и соблюдению норм ЕСКД в курсовых и дипломных проектах	190
Литература	193

CONTENTS

Introduction	3
1. Evolution of methods of design engineering	8
2. Subdivision of electronic equipment by functional and constructive complexity	11
3. Basic carrier constructions of electronic equipment	16
4. Aspects of electromagnetic compatibility in designing electronic equipment	21
4.1. Sources and ways of interferences penetration in electronic equipment	26
4.2. Shielding in electronic equipment	37
4.3. Circuit isolation and filtration of voltage in wires	57
5. Operation of electronic equipment under conditions of mechanical impact	61
5.1. Equations of motion of mass centre of electronic equipment with uniaxial harmonic vibration impact	65
5.2. Frequency calculation of mechanical resonance of printed circuit boards	71
5.3. Mechanical stress in constructional elements	75
6. Acoustic noise stability of electronic equipment	78
7. Thermal regime of electronic equipment	84
7.1. The basic mechanisms of heat exchange	85
7.2. Criterion equations of heat transfer	91
7.3. Calculation of thermal conditions of blocks of electronic equipment	94
7.4. Support of the preset thermal conditions of electronic equipment	98
8. Calculation of reliability of electronic equipment	116
9. Designing of function boxes of electronic equipment on printed circuit cards ...	124
9.1. Designing printed circuit cards	128
9.2. Working designing documents	159
10. Documentary execution of designer solutions	166
10.1. Assignment and area of employment of the Unified System of Design Documentation (USDD)	166
10.2. Composition, classification and designation of USDD standards	167
10.3. Basic provisions of USDD	168
10.4. Adaptation of USDD to requirements of information technologies	187
Requirements to the content and observance of USDD standards in term and graduation projects	190
References	193

157-30

Учебное издание

Павел Павлович Бескид
Вячеслав Юрьевич Суходольский
Юрий Михайлович Шапаренко

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЗАЩИЩЕННЫХ
ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Часть 1

Конструкторское проектирование.
Защита от физических полей.

Учебное пособие

*Редактор О.С. Крайнова
Компьютерная верстка Н.И. Афанасьевой*

ЛР № 020309 от 30.19.96.

Подписано в печать 14.11.08. Формат 60×90 1/16. Гарнитура Times New Roman.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Уч.-изд. л. 12,4. Тираж 250 экз. Заказ № 09/09.
РГГМУ, 195196, Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 98.
ЗАО «НПП «Система», 197045, Санкт-Петербург, Ушаковская наб., 17/1.
