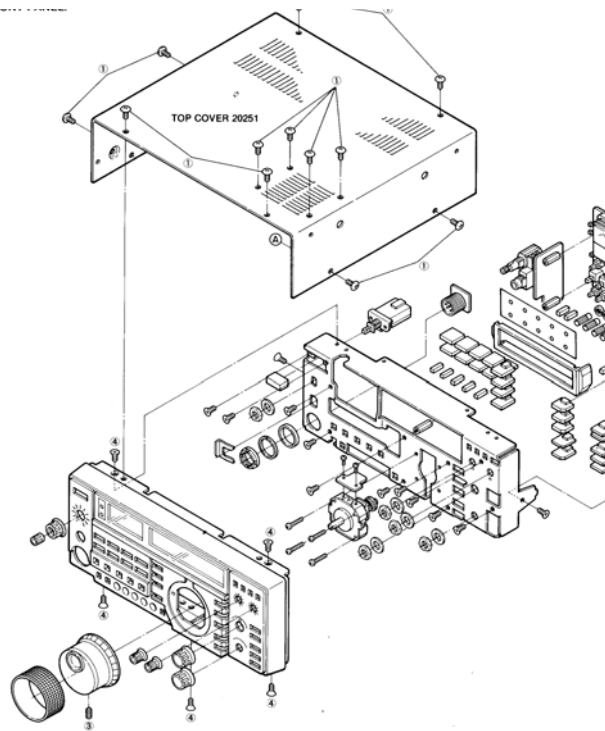


Н.А. КОЛЬТЮКОВ, О.А. БЕЛОУСОВ

ПРОЕКТИРОВАНИЕ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ



• ИЗДАТЕЛЬСТВО ТГТУ •

УДК 621.396(075)
ББК 844-02я73
К625

Р е ц е н з е н т ы:

Начальник кафедры "Радиосвязь (авиационная)"
Тамбовского ВВАИУРЭ(ВИ),
кандидат технических наук, доцент
Ю.И. Левочкин

Доктор технических наук, профессор ТГТУ
П.С. Беляев

Кольтюков, Н.А.

К625 Проектирование несущих конструкций радиоэлектронных средств : учебное пособие / Н.А. Кольтюков, О.А. Белоусов. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2009. – 84 с. – 100 экз. – ISBN 978-5-8265-0845-9.

Содержатся указания по организации основных конструкторских расчётов при проектировании несущих конструкций РЭС, необходимых в процессе изучения дисциплин, а также для курсового и дипломного проектирования; приводятся справочные данные для материалов, применяемых в качестве несущих конструкций РЭС, расчётные формулы; подробно рассмотрены вопросы герметизации электронных блоков, а также приведены примеры проектирования блоков РЭС с использованием базовых несущих конструкций.

Предназначено студентам дневного и заочного отделений, обучающихся по направлениям 210200 – Проектирование и технология электронных средств и 210300 – Радиотехника.

УДК 621.396(075)

ББК 844-02я73

ISBN 978-5-8265-0845-9

© ГОУ ВПО "Тамбовский государственный
технический университет" (ТГТУ), 2009

Министерство образования и науки Российской Федерации
ГОУ ВПО "Тамбовский государственный технический университет"

Н.А. КОЛЬТЮКОВ, О.А. БЕЛОУСОВ

ПРОЕКТИРОВАНИЕ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

Рекомендовано Учебно-методическим объединением по образованию в области радиотехники, электроники, биомедицинской техники и автоматизации в качестве учебного пособия для студентов, обучающихся по направлениям 210200 – Проектирование и технология электронных средств и 210300 – Радиотехника



Тамбов
Издательство ТГТУ
2009

Учебное издание

КОЛЬТЮКОВ Николай Александрович,
БЕЛОУСОВ Олег Андреевич

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ
НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ
РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ**

Учебное пособие

Редактор З.Г. Чернова
Инженер по компьютерному макетированию М.Н. Рыжкова

Подписано в печать 15.09.2009
Формат 60 × 84/16. 4,88 усл. печ. л. Тираж 100 экз. Заказ № 374

Издательско-полиграфический центр ТГТУ
392000, Тамбов, Советская, 106, к. 14

ВВЕДЕНИЕ

Несущей конструкцией (НК) принято называть элемент конструкции или совокупность элементов, предназначенную для размещения составных частей радиоэлектронных средств (РЭС) и обеспечения их устойчивости и прочности в заданных условиях эксплуатации [7]. НК является одной из основных частей электронного блока, определяющей не только его форму и механические характеристики, но и такие важнейшие показатели качества РЭС, как надёжность, ремонтпригодность, технологичность, удобство применения в эксплуатации. Для блока несущая конструкция, образно говоря, является его "скелетом" [1]. В процессе создания электронного блока работа над несущей конструкцией следует непосредственно за этапом его компонования [1] и предшествует разработке лицевой панели сборочного и электромонтажного чертежей, оценке качественных характеристик. Настоящее пособие преследует цель помочь студенту-конструктору принять обоснованные решения при выборе типа НК блока, материала НК, размеров, а также прочностных характеристик.

Исходным пунктом для разработки НК является компоновочная схема блока, получаемая предварительно в процессе компонования. Вместе с компоновочной схемой студенту надо иметь (или получить) принципиальную схему блока и техническое задание, определяющее условия его эксплуатации.

В ходе работы студенту необходимо обращаться к рекомендуемым пособиям, справочной литературе, государственным и отраслевым стандартам.

1. ОПРЕДЕЛЕНИЯ И ТЕРМИНЫ

Электронный блок – конструкция второго уровня – представляет собой радиоэлектронное средство или его часть, имеющее определённую функциональную, схемную и конструктивную завершенность, имеющее своё чёткое назначение и состав заполняемых задач, органов управления и информации и, как правило, свою лицевую панель. Блок должен иметь свою принципиальную электрическую схему с обозначением (номером), соответствующим его сборочному чертежу. Конструкция блока пространственно-ограниченная, защищающая составные части блока от внешних воздействий.

По исполнению блок может быть рассчитан на автономное использование. Тогда у него имеются кожух, футляр, крышки, приспособление для переноски. Для обозначения такой конструкции используется термин "моноблок". Исполнение также может быть носимое (в руках, сумках, ранцах), настольное и напольное (в том числе и в подвижных средствах). В других случаях блок заранее рассчитывается на использование в составе конструкции следующего (высшего) уровня. Он может входить в стойку (шкаф) и быть подвижным, "врубным" (рис. 1.1), откидным (рис. 1.2). Может крепиться на какой-то общей раме с другими блоками, может входить в общий контейнер.

При разработке НК исполнение блока и внешние воздействия должны быть заданными. При вхождении блока в шкаф, стойку, контейнер задаются также установочные размеры посадочного гнезда.

Все крупные пространственно-ограниченные составные части блока будем называть конструктивами. В качестве конструктивов могут выступать: модули (конструкции первого уровня), печатные узлы (конструкции нулевого уровня), а также крупные электрорадиоэлементы (например, трансформаторы, конденсаторы, вариметры, электронно-лучевые трубки, полупроводниковые изделия с радиаторами, электронные лампы со своими панелями), различные механизмы. Специфическим конструктивом можно считать лицевую панель. Её минимально необходимые габариты будут обуславливаться суммарной площадью, необходимой для удобного размещения всех выносимых на неё элементов схемы. Глубина такого конструктива определяется по наибольшему его элементу, например, переключателю, кнопке и т.п.

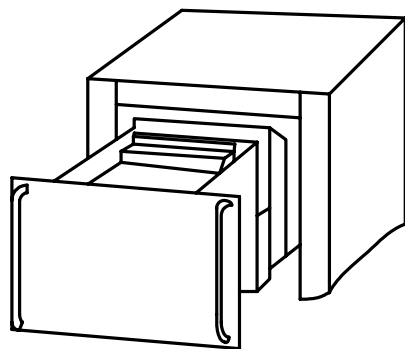


Рис. 1.1. Пример "врубного" блока
(т.е. врубающегося своими ловителями и соединителями в соответствующие гнезда шкафа, стойки)

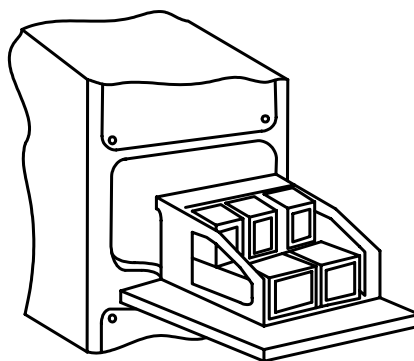


Рис. 1.2. Пример "откидного" блока
(открывающегося в шкафу, стойке на шарнирах)

Все конструктивы имеют свои габариты, массу, определённый способ крепления и подсоединения к схеме. При проектировании НК эти сведения, как и перечень конструктивов, считаются заданными.

Конструктивы блока имеют между собой не только механические, но и электрические (электромагнитные) связи как функциональные, так и паразитные (вредные, мешающие). В результате процесса компонования находится так называемое наилучшее (или предпочтительное) взаимное размещение конструктивов, т.е. компоновочная схема, максимизирующая функциональные связи и минимизирующая паразитные. Примерный вид компоновочной схемы приведен на рис. 1.3. Здесь конструктивы изображаются в изометрии параллелепипедами по своим габаритам в масштабе пока ещё без учёта конкретного способа крепления друг относительно друга.

Несущая конструкция (НК) обеспечивает возможность жёсткого закрепления конструктивов друг относительно друга согласно заданной компоновочной схеме, т.е. реализует идеи, заложенные при компоновке блока.

Компоновочная схема при разработке НК является заданной.

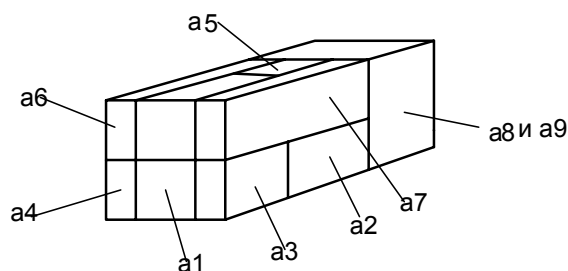


Рис. 1.3. Компоновочная схема видеокamеры:

a1 – видео матрица; a2 – блок формирования сигналов;
a3 – предварительный усилитель; a4 – узел автоматической регулировки режимов видео матрицы; a5 – усилитель формирователь; a6 – генератор 1;
a7 – генератор 2; a8 – источник питания; a9 – батарея

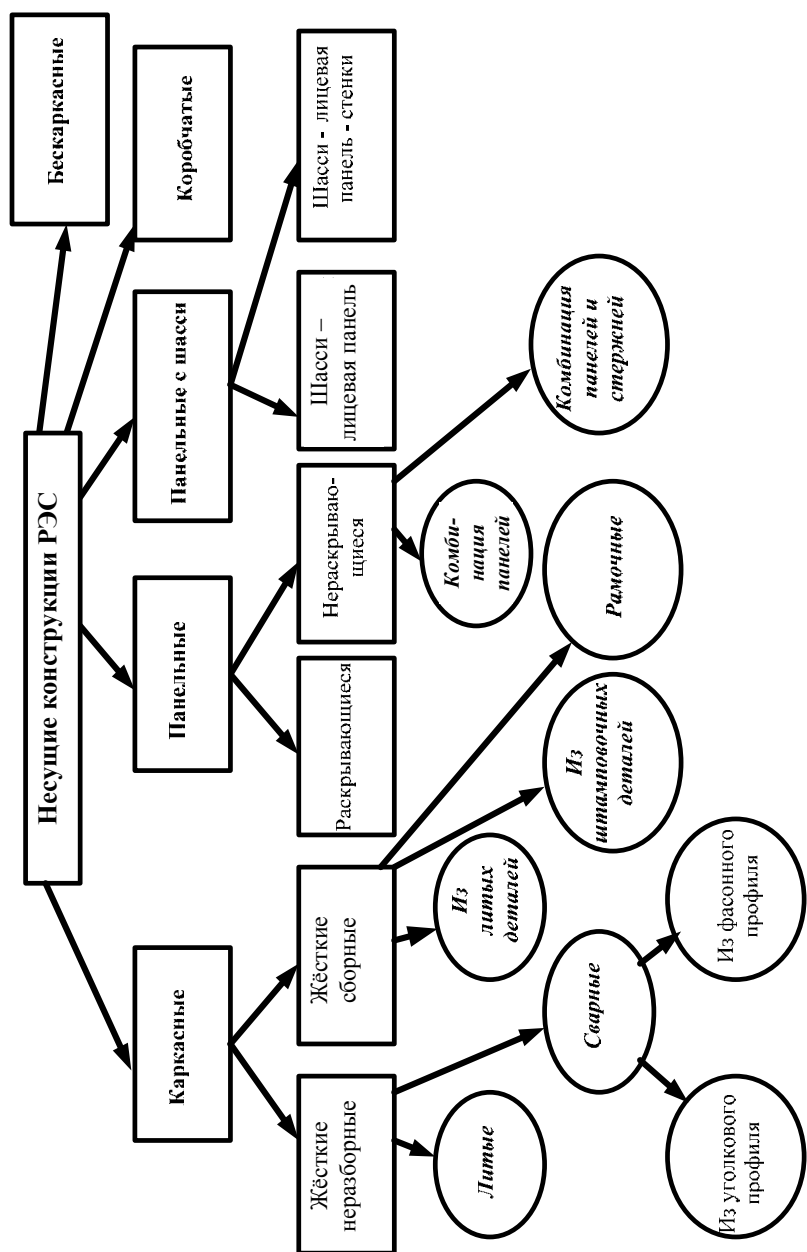


Рис. 1.4. Разновидности несущих конструкций РЭС

Одновременно НК должна обеспечить защиту конструктивов блока от внешних воздействий (в основном механических), а также обеспечить раскрываемость всей конструкции в целях ремонтпригодности, т.е. свободный доступ для осмотра и ремонта к любому конструктиву, креплениям, к пайкам любого разъёма. НК должна создаваться с ориентацией на наименьший вес, простоту, технологичность, оптимальную жёсткость и оптимальные запасы по прочности.

НК в электронном блоке выполняет также ещё одну весьма специфическую роль, а именно, "общей массы", т.е. заземления. Это предопределяет в качестве материала для НК хорошо проводящий металл или же применение металлизующих покрытий для НК из изоляционных материалов. Разнообразие типов НК показано на рис. 1.4.

2. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЯХ

2.1. РАЗНОВИДНОСТИ

Всё разнообразие НК целесообразно подразделять с двух точек зрения. Они, с одной стороны, различаются отношением конструкции к месту и способу установки блока. Можно выделить, исходя из этого, НК моноблоков, т.е. изделий, применяемых отдельно и выполняемых, как уже было ранее отмечено, в переносном, настольном и напольном исполнениях с креплением к месту установки или без него. Такие НК предусматривают всегда индивидуальную защиту блока от внешней среды крышками, съёмными панелями, амортизаторами и

т.п. Это во многом определяет их конструктивные особенности. Свои характерные особенности имеют и НК блоков для стоек и шкафов (ловители, приспособления сопряжения разъёмов, поворотные кронштейны, направляющие и т.п.).

С другой стороны, НК характеризуются способом образования пространственно-ограниченного рабочего объёма блока или способом взаимного расположения своих деталей. С этой точки зрения можно выделить несколько наиболее употребительных типов НК: 1) каркасный; 2) панельный; 3) коробчатый; 4) типа "шасси-панель"; 5) бескаркасный.

Каждый из них имеет свою преимущественную сферу применения и соответствующую конструкции преимущественную технологию изготовления и сборки. Дадим краткую характеристику каждому типу.

1. *Каркасная НК.* Преимущественная область применения – блоки для шкафов и стоек врубные, выдвижные, иногда откидные. Основа такой конструкции – жёсткий каркас (см. рис. 2.1), крепящийся к лицевой панели. Элементарная защита конструктивов от внешних воздействий образуется рёбрами каркаса. Способы выполнения различны. Иногда это цельнолитая конструкция из алюминиевых сплавов с последующей фрезерной обработкой (применяется для тяжёлых блоков мощных устройств с массой 10...20 кг). Иногда – для менее массивных блоков – это каркас из стальных или алюминиевых профилей на сварке, заклёпках или винтах. Для облегчения в качестве образующих каркаса применяют нередко и гнутые из листового материала уголки с узкими полками. Иногда каркас выполняют из штампованных или литых (прессованных) деталей. Особенно это характерно для блоков, укомплектованных полностью модулями (ячейками на печатных платах).

Способы "наполнения" такого неразъёмного каркаса могут быть самыми разнообразными. Важно только, чтобы в любом случае они обеспечивали свободный доступ к конструктивам и элементам блока, к тяжёлым несъёмным конструктивам за счёт свободного пространства около них, для печатных узлов и плат – применение способов "плотной упаковки" с оперативным выемом их для ремонта к осмотра. Тяжёлые элементы можно крепить на вставных или приварных полках (кронштейнах), лапах. Кое-какие тяжёлые элементы могут быть подвижными по направляющим.

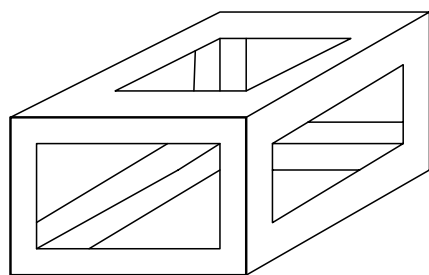


Рис. 2.1. Каркасная НК

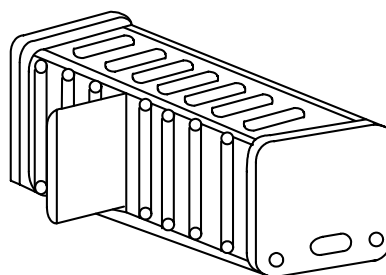


Рис. 2.2. Каркас с направляющими планками для печатных узлов

Каркасы блоков, где преобладающим типом конструктивов являются печатные узлы, ориентируются на применение панелей с направляющими планками для печатных узлов (рис. 2.2) или же на устройство поворотных кронштейнов с рамками для печатных плат (рис. 2.3). Первый из этих способов проще и дешевле, но требует для ремонтов и проверок переходных кабелей или плат. Так называемая "книжная конструкция" (рис. 2.4) поворота печатных узлов отличается лишь устройством сложного многоступенчатого поворотного устройства. Другими вариантами "плотной упаковки" печатных плат для размещения в каркасе являются "верная" (рис. 2.5) и "раскладная" (рис. 2.6) конструкции.

Надо отметить, что показанные на рис. 2.4 – 2.6 кронштейны и рамки конструктивно достаточно сложны, изготавливаются преимущественно литьём под давлением (прессованием) и целесообразны только в крупносерийном производстве.

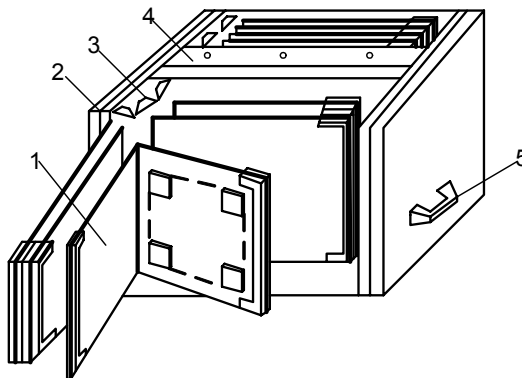


Рис. 2.3. Крепление печатных узлов (модулей) на поворотных шарнирах:

1 – модуль; 2 – задняя панель; 3 – двойной шарнир; 4 – корпус; 5 – ручка

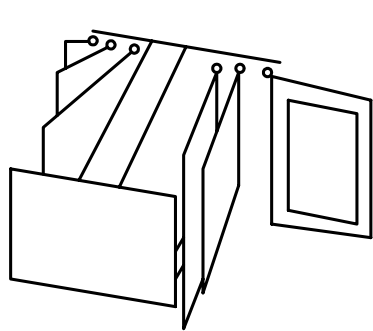


Рис. 2.4. "Книжная" НК

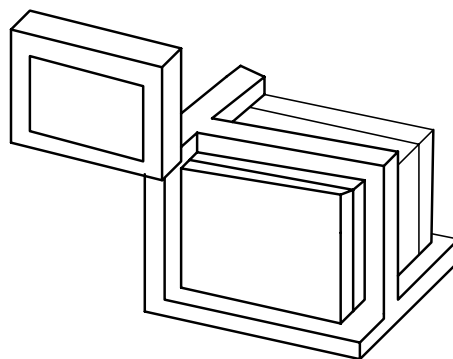


Рис. 2.5. "Верная" НК

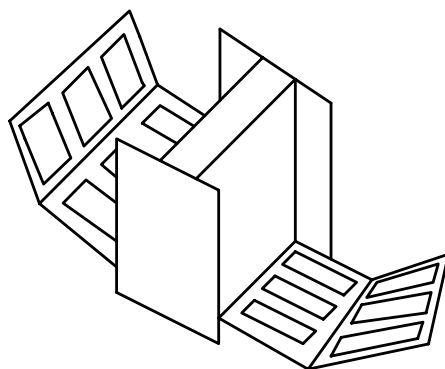


Рис. 2.6. "Раскладная" НК

2. *Панельная НК.* Представляет собой чаще всего сборку из литых или штампованных панелей-плоскостей, на которые опираются печатные узлы и другие конструктивы блока. Не исключается в отдельных случаях не сборка, а сочетание панелей гнутых из общего листа или сваренных. При конструировании сборных каркасов следует обращать внимание на достаточность в креплении панелей площадей, прилегающих друг к другу мест, для обеспечения элементарной жёсткости.

При весьма плотном заполнении объёма блока конструкции выполняются раскрывающимися, например, как показано на рис. 2.7. Менее заполненные блоки допускают открытые нераскрывающиеся НК, жёсткость которых обеспечивается угловыми косынками или стяжными стержнями (рис. 2.8). Не исключается также применение боковых стенок и рамок (рис. 2.9).

Литьё применяется в основном тонкостенное из легких алюминиевых сплавов с большим числом облегчающих отверстий и рёбрами жёсткости. При мелкосерийном или опытном производстве панели изготавливаются из листовых материалов слесарным путём. НК панельного типа применяются для моноблоков, в частности, для измерительной аппаратуры.

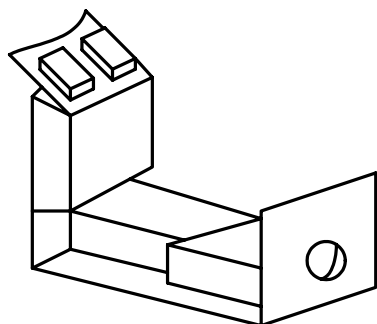


Рис. 2.7. Раскрывающаяся НК

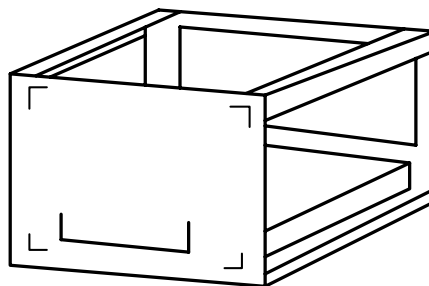


Рис. 2.8. НК со стяжными стержнями

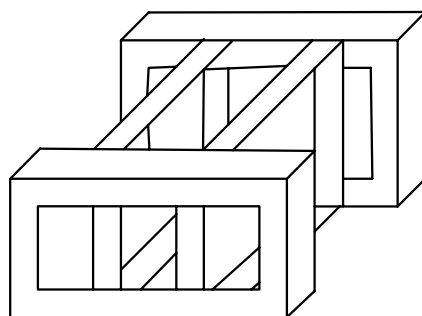


Рис. 2.9. Рамочная НК

3. *Коробчатая НК* представляет собой подобие "чемодана" или "кейса-дипломата", внутри которого располагаются конструктивы блока (рис. 2.10). Форма такого "коробка" может быть, конечно, усложнена. Возможно широкое варьирование применяемых материалов (листовые стали и листовые алюминиевые сплавы, литые сплавы, пластмассы), а также способов изготовления; штамповка, прессование, слесарное изготовление. Преимущественная область применения – переносная аппаратура малых и средних габаритов.

4. *НК типа "шасси-панель"* отличается наличием в составе деталей, так называемого шасси, представляющего собой коробок без дна. Внутренность такого короба – "подвала шасси" – используется для объёмного монтажа, деталей крепления, выхода выводов конструктивов и их разъёмов. Жёсткое сопряжение шасси с лицевой панелью идёт с помощью косынок (рис. 2.11), могут применяться и боковые стенки. Глубина шасси, а также его расположение относительно панели могут варьироваться в зависимости от требований компоновки.

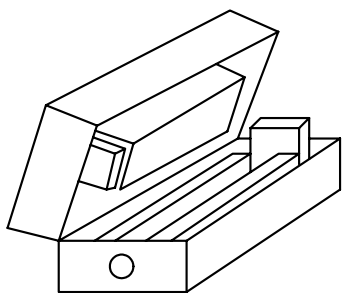


Рис. 2.10. Пример коробчатой НК

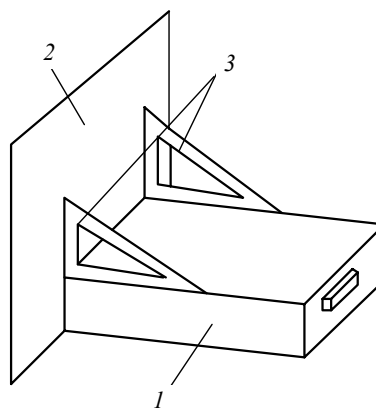


Рис. 2.11. НК комбинированного типа "шасси-панель":

1 – шасси; 2 – панель лицевая; 3 – косынки

При малом числе выводных разъёмов местом их установки, а также и ловителей является задний торец шасси. При большом числе выводов можно ввести заднюю стенку. Для крепления системы печатных узлов применяют направляющие стойки. Конструкция удобна как для установки крупных конструктивов неодинаковых габаритов, так и для размещения модулей, вынимающихся вверх или со стороны лицевой панели (рис. 2.12). Область применения – не крупные врубные конструкции, моноблоки приборной аппаратуры. НК с шасси пригодна как для серийного, так и для индивидуального производства.

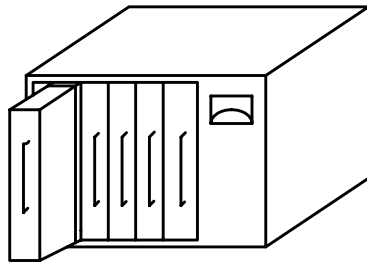


Рис. 2.12. НК с выемными модулями

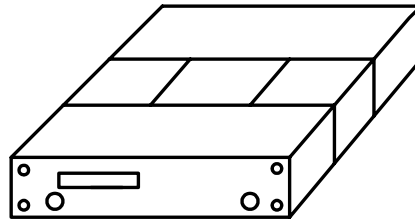


Рис. 2.13. Бескаркасная конструкция

5. *Бескаркасные НК* ориентированы на соединение друг с другом конструктивно законченных модулей (т.е. несущая конструкция у них, как таковая, отсутствует). Модули стягиваются общими винтами или защёлками, закрываются общим кожухом. Модули должны быть так подогнаны друг к другу, чтобы получилась жёсткая единая конструкция (рис. 2.13). Область применения – измерительная бытовая аппаратура. Бескаркасные комбинации печатных узлов могут быть также использованы в рамках какой-либо панельной конструкции. Лицевая панель как конструктив здесь, как правило, отсутствует. Она входит либо в состав одного из конструктивов, либо заменяется "фальш-панелью", т.е. планкой с надписями, поясняющими название органов управления, закреплённых в разных конструктивах, но при сборке оказывающихся в одной передней плоскости.

Тип кассетной конструкции (КК) по месту установки блока задаётся, тип НК по способу образования объёма выбирается.

Унифицированные несущие конструкции. В ряде отраслей отечественной промышленности в целях улучшения отраслевой организации производства, его специализации, сокращения сроков проектирования РЭС и освоения их в серийном производстве предложены так называемые унифицированные несущие конструкции (УНК). Они же называются базовыми (БНК), если на базе типового решения изготавливается целый типоразмерный ряд разновидностей. В рамках отрасли организуется централизованное изготовление и поставка заготовок. В качестве унифицированной обычно выбирают хорошо продуманную, высокотехнологичную и экономичную конструкцию, например, показанную на рис. 2.14. Каждая отрасль имеет свою систему УНК (БНК). Материал по УНК, а также принципы составления типоразмерных рядов даются в лекционном курсе на примере одной из отраслей. В учебном практикуме БНК находят ограниченное применение, так как ограничивают творческую инициативу конструктора (студента), развитие которой и является основной задачей учебного процесса. В рабочем проектировании на производстве применение БНК сложностей не вызывает и регламентируется отраслевыми нормативными документами (отраслевыми стандартами) или Государственными стандартами (ГОСТ).

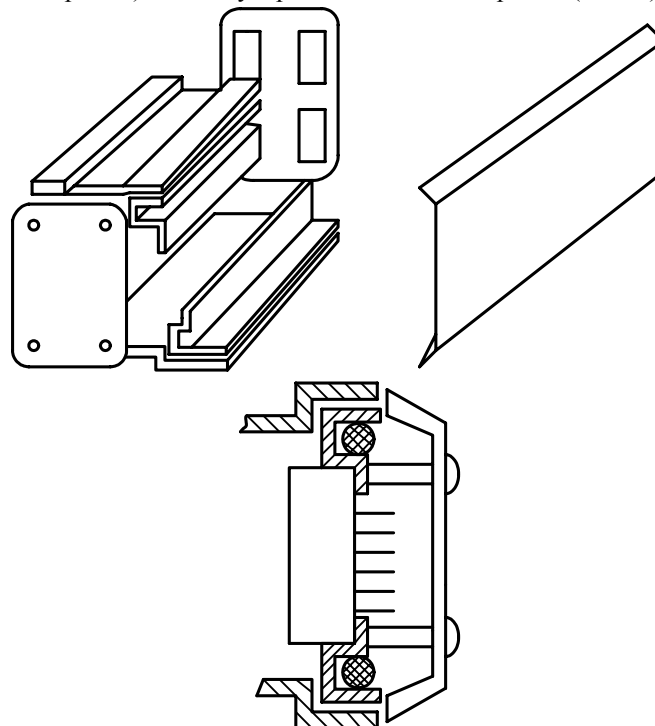


Рис. 2.14. Пример унифицированной (базовой) НК:
 1 – панель; 2 – стенка верхняя; 3 – плата; 4, 9 – стяжка;
 5 – стенка нижняя; 6 – щиток; 7 – разъем; 8 – жгут

2.2. МАТЕРИАЛЫ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ

Как уже отмечалось выше, выбранный тип НК предопределяет вид материала и характер его технологической обработки [14, 15].

Для литья под давлением используются: магниевые сплавы МЛЗ, МЛ5, МЛ6, МА1, МА3, МА5; латуни – ЛС59-1Л, ЛН80-3Л; алюминиевые сплавы – АЛ2, АЛ4, АЛ9, АЛ11, АЛ28, АЛ32. У этих материалов толщина стенок может быть доведена до 0,5 мм.

Для штамповки пригодны: сталь 08КП; титановые сплавы ВТ4 и ВТ5; алюминиевые сплавы АМг и АМц.

Шероховатость обрабатываемых поверхностей при этом $R = 3,2 \dots 1,6$ мкм, точность по квалитетам 6 – 9.

Для обработки на универсальном металлорежущем оборудовании при индивидуальном и мелкосерийном производстве используются: алюминиевый сплав Д16, титановый сплав ВТ4.

В крупносерийном производстве находят применение для прессования металлические порошки и пластмассы. Например, пресс-порошок АГ-4 или ударопрочный полистирол. Пластмассовые детали могут металлизироваться путём химического осаждения, вакуумного или горячего распыления. Свойства наиболее часто применяемых конструкционных материалов приводятся в прил. 1–2. Характеристики материалов: ρ – удельная плотность; G_b – предел прочности; $G_{0,2}$ – предел текучести; E – модуль упругости; G – модуль сдвига, удельная жёсткость, удельная прочность и фактор жёсткости должны быть известны студенту из курсов физики, прикладной механики.

При статическом нагружении в качестве критерия прочности для случая, когда остаточные деформации достаточно малы и не нарушают работы детали, чаще всего применяют условный критерий текучести. Современная практика конструирования отходит от оценки прочности по величине разрушающего напряжения G_b , ибо задолго до разрушения деталь выходит из строя в результате значительных пластических деформаций. Предел $G_{0,2}$ не пропорционален G_b и для различных материалов составляет (0,5...0,9) G_b . Детали, подвергающиеся длительной знакопеременной нагрузке, разрушаются при напряжениях значительно меньших предела прочности G_b при статическом нагружении. Если изделие установлено на вибрирующем основании (самолёт, автомобильное, морское, железнодорожные транспортные средства и т.п.), то детали подвергаются повторно-переменным (циклическим) нагрузкам с большей или меньшей частотой и амплитудой. Число циклов напряжений, которое материал выдерживает до разрушения, зависит от максимального напряжения и интервала между крайними значениями напряжений цикла. По мере уменьшения величины напряжений число циклов, вызывающих разрушение, увеличивается и становится неограниченно большим при некотором достаточно малом напряжении. Это напряжение, называемое пределом выносливости, полагают в основу прочностного расчёта деталей, подверженных циклическим нагрузкам. Наиболее распространён способ определения предела выносливости (усталости) при симметричном цикле, который обозначается G_{-1} . Предел выносливости не является постоянной, присущей данному материалу характеристикой и подвержен гораздо большим колебаниям, чем механические характеристики в статическом нагружении, так как его величина зависит от условий нагружения, типа цикла, методики испытания, формы и размеров образца, технологии его изготовления, состояния поверхности и других факторов. Между характеристиками усталости и статической прочности нет строгой зависимости, но для большинства предварительных расчётов можно использовать соотношения, приведённые в табл. 2.1.

Для особо точных расчётов необходимо пользоваться справочными данными, приводимыми в специальной литературе.

Таблица 2.1

| Материал детали | Род напряжения | Значения G_{-1} / G_b |
|--------------------|-------------------|-------------------------|
| Сталь | Растяжение | 0,28 |
| | Сжатие | |
| | Изгиб Кручение | 0,4 – |
| Алюминиевые сплавы | Изгиб | (0,24...0,5) |

Прочность оценивается коэффициентом запаса надёжности, который представляет собой отношение предельных напряжений к напряжению, возникающему в сечении детали при эксплуатации:

$$n_n \geq \frac{G_{\text{пред}}}{G},$$

где $G_{\text{пред}}$ – предельные нормальные напряжения при расчёте деталей на прочность, МПа; G – расчётные нормальные напряжения в сечениях детали или напряжения, которые могут быть в условиях эксплуатации, МПа.

При предварительном расчёте в качестве характеристики прочности используется также представление о допустимых напряжениях II.

Допустимым напряжением называется такое безопасное напряжение, которое деталь может выдержать в течение заданного срока эксплуатации. В зависимости от характера материала и характера цикла за допустимые напряжения принимают напряжения, соответствующие условному пределу текучести $G_{0,2}$ или G_{-1} . Необходимо стремиться к полному и точному выяснению фактических напряжений, действующих в детали. В помощь аналитическому методу привлекают экспериментальные методы. По мере совершенствования и уточнения расчётных методов число неизвестных факторов уменьшается, а число определяющих увеличивается. Обязательным является уточнение расчётных режимов на основе тщательного изучения возможных в эксплуатации случаев перегрузок и методов их устранения.

Жёсткость – это способность системы сопротивляться действию внешних нагрузок с деформациями, допустимыми без нарушения работоспособности. Величина допустимой деформации деталей в изделиях зависит от взаимодействий их с другими деталями, от назначения и других параметров. В процессе разработки НК стремятся иметь минимальные деформации большинства деталей. Жёсткость оценивается коэффициентом жёсткости λ , который представляет отношение силы P , приложенной к детали, к максимальной деформации Δl , вызываемой этой силой. Величина коэффициента жёсткости зависит от вида нагружения, размеров детали и параметров материала. Коэффициент жёсткости определяется по формулам табл. 2.2.

Таблица 2.2

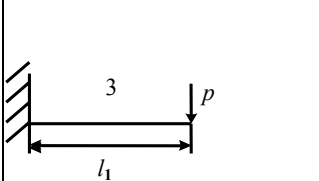
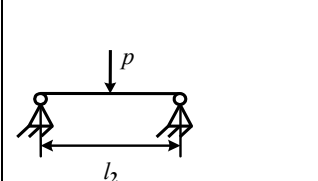
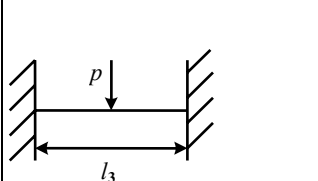
| Вид нагружения | Растяжение, сжатие | Изгиб | Кручение |
|----------------------------------|-------------------------------------|---|--|
| Коэффициент жёсткости, λ | $\frac{P}{\Delta l} = \frac{EF}{l}$ | $\frac{P}{\Delta l} = a \frac{EJ}{l^3}$ | $\frac{M_{кр}}{\phi} = \frac{GJ_p}{l}$ |

Примечание: E и G – модуль упругости и модуль сдвига соответственно, МПа; J – момент инерции сечения детали, мм⁴; J_p – полярный момент инерции, мм⁴; l – длина балки, мм; γ – угол закручивания, рад; a – коэффициент, зависящий от условий нагружения при изгибе; F – площадь сечения детали, мм².

Модуль упругости E и модуль сдвига G являются устойчивыми характеристиками материала; они зависят от плотности кристаллической решетки, т.е. от величины межатомного расстояния. Значения коэффициента жёсткости для нескольких случаев, нагружения изгибом приведены в табл. 2.3. За единицу принято $\lambda_{изг}$, соответствующее изгибу двухопорного бруса, нагруженного сосредоточенной силой P в середине пролета.

Из анализа табл. 2.3 видно, что на жёсткость системы при изгибе сильно влияет длина балки, тип и расположение опор. Например, жёсткость консольной балки составляет только 0,063 жёсткости балки со свободно опёртыми концами, жёсткость балки с защемлёнными концами в четыре раза выше, чем со свободно опёртыми.

Таблица 2.3

| Характер нагружения |  |  |  |
|---------------------------------|---|--|---|
| Величина коэффициента a | 3 | 48 | 192 |
| Коэффициент жёсткости λ | 0,063 | 1 | 4 |

Жёсткость конструкции согласно табл. 2.2 определяют следующие факторы:

- модуль упругости материала E и модуль сдвига G ;
- геометрические характеристики сечения деформируемого тела (сечение F , момент инерции J при изгибе, полярный момент инерции J_p при кручении);
- линейные размеры деформируемого тела l ;
- вид нагрузки и тип опор (коэффициент a).

В процессе конструирования необходимо помнить об этих факторах и стремиться к рациональному применению того или иного материала, формы и размеров деталей.

Масса НК имеет наибольшее значение в носимой, портативной и бортовой РЭА (самолетной, ракетной и космической), где каждый лишний килограмм уменьшает полезную грузоподъёмность, скорость, дальность действия, тактические возможности. Но в других областях использования РЭА уменьшение массы означает снижение расхода материала и стоимости изготовления.

Наибольшие возможности экономии материала (особенно металлов) заложены в снижение массы изделий массового выпуска, бытовых приёмников, радиол и других изделий, но и уменьшение массы изделий единичного и мелкосерийного выпуска также даёт большие выгоды.

Выбирая материал, надо также учитывать массу будущего изделия одновременно с его прочностью. Если по условиям эксплуатации деталь, работающую на растяжение или сжатие, можно выполнить из двух различных по плотности материалов, то окончательное решение принимают, сравнивая их массы

$$M = F\rho l \quad \text{и} \quad F = \frac{P}{G},$$

где F – площадь сечения, мм²; ρ – плотность материала, кг/мм³; l – длина детали, мм; P – сила, действующая на деталь в эксплуатации, Н; G – нормальное напряжение в сечении, МПа; тогда

$$M = \frac{P\rho l}{G} = \frac{Pl}{G/\rho}.$$

Следовательно, при одинаковой силе P и длине двух деталей та из них будет иметь меньшую массу, материал которой будет иметь величину G/ρ наибольшей. Величина $G_{0,2}/\rho$ называется удельной прочностью и должна учитываться при выборе материала, когда заданы жёсткие ограничения по массе. Для случая изгиба и кручения критерием их является отношение $G^{2/8}/\rho$. Ввиду того, что оценка эта является приближенной, обычно для всех видов нагружения пользуются более простым по структуре критерием, соответствующим случаю напряжения сжатия.

Важное значение для нормального функционирования РЭС, особенно если оно работает в условиях вибрационных воздействий, имеет также жёсткость НК. Сравним по жёсткости две детали, имеющие одинаковую массу и длину:

$$\lambda = \frac{FE}{l} : F = \frac{M}{\rho l} \quad \text{при} \quad l_1 = l_2 \quad M_1 = M_2,$$

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{E_1/\rho_1}{E_2/\rho_2}.$$

Отношение E/ρ носит название удельной жёсткости. Если будем сравнивать две детали равной прочности и равной длины, то

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{E_1 F_1}{E_2 F_2}, \quad \text{но} \quad n_1 = n_2 = \frac{G_{0,2}}{G} = n,$$

$$F = \frac{P}{G} = \frac{P_n}{G_{0,2}}$$

Следовательно,

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{E_2/G_{0,21}}{E_2/G_{0,22}}.$$

Величина $E/G_{0,2}$ носит название фактора жёсткости материала. Из вышеизложенного следуют практические рекомендации.

Алюминиевые деформируемые сплавы по удельной прочности близки к легированным стальным сплавам. Детали, выполненные литьём из алюминиевых и магниевых сплавов, имеющих массу, равную массе деталей из углеродистых сплавов, равны им и по прочности.

Конструкционные бронзы и латуни имеют низкие критерии удельной прочности, их использовать нужно очень ограничено. Из неметаллических материалов наивысшую удельную прочность имеют ситаллы. По критерию удельной жёсткости стали алюминиевые сплавы равны. Сплавы титана и магния уступают им на 5 %.

Выбирая материал, учитывают также его стоимость. Задачей конструктора является, создание таких изделий, которые могут быть изготовлены из недорогих и недефицитных материалов, но в то же время соответствуют всем требованиям условий эксплуатации и обеспечивают заданную долговечность. Конструктору в процессе своей работы приходится находить оптимальное решение: выбирать высококачественный материал с высокой стоимостью или брать более дешёвый и различными способами придавать детали недостающие свойства (прочность, жёсткость, коррозионную стойкость и др.).

Жёсткость деталей повышают введением дополнительных механических операций, таких как придание детали швеллерной или уголковой формы, отбортовка краев детали или отверстий, введение рёбер жёсткости и т.д.

Повышение коррозионной стойкости достигается выбором защитных и защитно-декоративных покрытий, которые придают деталям хороший внешний вид. Специальные покрытия могут повысить электропроводность детали, придать ей способность к пайке и т.д. В ряде случаев целесообразно заменять металлические детали пластмассовыми. Пластмассовые детали не требуют антикоррозионных покрытий, имеют меньшую удельную плотность; изготовление их менее трудоёмко. Окончательный выбор необходимых материалов проводится на основе официальных документов: стандартов, межведомственных и ГОСТ.

2.3. ТРЕБОВАНИЯ К НЕСУЩИМ КОНСТРУКЦИЯМ И ИХ ОЦЕНКИ

Проектируя несущие конструкции, не следует забывать об их, в общем-то, вспомогательной роли в составе блока электронной аппаратуры. Мы требуем от НК жёсткого и надёжного (прочного) закрепления конструктивов по заданной компоновочной схеме, требуем защиты конструктивов от внешних механических воздействий, т.е. жёсткости и прочности конструкции в целом. При этом сама НК должна по возможности занимать как можно меньший объём в составе электронного блока и заодно иметь, возможно меньшую массу. Полезными считаются только объём и масса, занимаемые электрорадиоэлементами схемы. Отсюда вывод, что проектирование НК должно идти под девизом: "Легче, жёстче, прочнее!".

Критериями оценки НК с этой точки зрения будут, в первую очередь, показатели массы, жёсткости, прочности, коэффициенты использования объёма и массы.

Специфическими, как уже указывалось выше, являются требования раскрываемости конструкции, а также хорошей электропроводности материала и надёжного электрического контакта составных частей НК. Общим требованием является технологичность.

Оценки по вышеуказанным критериям предпочтительны числовые. Только по численным оценкам в условиях многокритериального сравнения можно выбрать предпочтительный вариант. По численным оценкам же производится и последующая коррекция, и уточнение конструкторских решений по НК и составляющим её деталям.

Первым из критериев, выбираемых для оценки НК, является жёсткость. Как известно, степень жёсткости оценивается деформацией конструкции при воздействии на неё внешних сил. Но для сравнения профилей различных НК в [7] рекомендуется так называемая характеристика жёсткости $G_{ж}$, пригодная как для сравнения профилей по жёсткости, так и для сравнения рациональности профилей по массе:

$$G_{ж} = \frac{F}{\sqrt{J}},$$

где P – площадь сечения профиля; J – момент инерции сечения.

Вычисление момента инерции в общем случае представляет собой довольно громоздкую задачу. Поэтому в практической и учебной работе студенту рекомендуется пользоваться расчётными таблицами, в частности из [7, с. 110, табл. 5.3]. В этой таблице приводятся сечения всех практически применяемых типов НК. Пример каркасной конструкции из уголков с кожухом, а также системы "панель-шасси" с кожухом показан на рис. 2.15. В системе "панель-шасси" характеристика $G_{ж}$ в большой степени зависит от соотношения высоты к ширине и от выбора расположения шасси. А в каркасном варианте – от ширины полок уголков и их толщины. Так для каркасного варианта $G_{ж} = 0,4$ при $B / H = 0,5$ и $G_{ж} = 0,73$ при $B / H = 2$. Характеристика $G_{ж}$ в вышеуказанной таблице приводится относительно осей "x1-x1", "y-y" (оси симметрии) и "x2-x2" (ось плоскости крепления). Для оценки сечения целесообразно выбирать направление преимущественного действия на блок сил. Ориентировка в оценках: чем меньше значение характеристики, тем больше жёсткость и одновременно тем профиль экономичнее по массе. В противоречивости оценки отражается противоречие между массивностью жёсткой конструкции и стремлением конструктора уменьшить массу НК. Поэтому $G_{ж}$ преимущественно используется для сравнения профилей по экономичности, а допустимый предел жёсткости оценивают по фактической деформации δ , рассчитываемой отдельно (см. ниже раздел методических указаний). Подробные характеристики различных сечений блоков см. в прил. 2. Жёсткость лицевой панели хорошо оценить отдельно. Панель при этом представляют как балку на двух опорах. Пример сравнения сечений трёх лицевых панелей (рис. 2.16) приведён в [7]. Вариант 3 оказывается более экономичным по площади и массе, так как при $H = 0,1$ В и $S = 0,01$ В $G_{п1} = 5,2$; $G_{п1} = 7,02$; $G_{п3} = 4,4$, т.е. при сохранении необходимой жёсткости от деталей НК следует требовать минимальной массы.

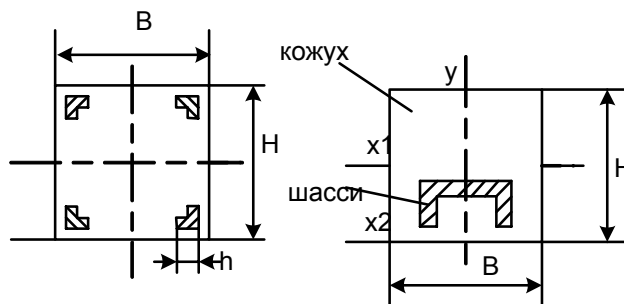


Рис. 2.15. Упрощённые схемы сечений НК для вычисления характеристики жёсткости:
а – каркасная НК; б – шасси

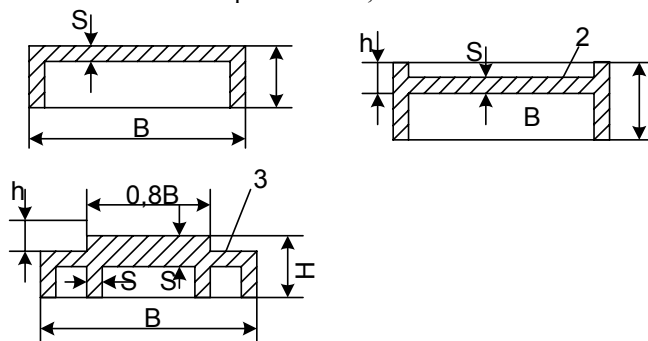


Рис. 2.16. Разъёмные конструкции передних панелей блоков

Следующей оценочной характеристикой НК является масса. При определении массы деталей следует учитывать влияние покрытия. Не следует думать, что существенного влияния оно не оказывает. Например, если к углеродистым сталям кадмиевое покрытие добавляет 6,6 % массы основного материала, то к магниевым сплавам серебряное покрытие добавляет уже 49 %. Подробнее см. табл. 5.5 в [7]. Для облегчения деталей следует широко применять облегчающие отверстия.

В качестве третьей оценочной характеристики НК следует использовать обобщённый коэффициент материала. Он представляет собой произведение удельных прочности и жёсткости:

$$K_{об} = \frac{G_{0,2}E}{\rho^2},$$

где $G_{0,2}$ – условный предел текучести, вызывающий остаточную деформацию 0,2 %; E – модуль упругости; ρ – плотность материала. Рекомендуется использовать табл. 5 и 6 из [7, с. 115].

Как пример сравнения материалов можно привести следующие оценки: для титановых сплавов $K_{об} \cdot 10^4 = 678$; для магниевых сплавов $K_{об} \cdot 10^4 = 306$; для углеродистых сплавов $K_{об} \cdot 10^4 = 162$.

Использование объёма блока, обеспечиваемое НК, т.е. соотношение между общим объёмом блока и полезным, а также соответствующее сравнение по массе принято оценивать коэффициентами. В том числе применяются:

- а) коэффициент заполнения объёма блока

$$K_{зап} = \frac{\Sigma V_{эpz} + \Sigma V_{нк}}{V_{бл}},$$

где $V_{эpz}$, $V_{нк}$, $V_{бл}$ – объёмы, занимаемые электрорадиоэлементами, несущей конструкцией и всем блоком, соответственно;

- б) коэффициент использования объёма

$$K_{испv} = \frac{\Sigma V_{эpz}}{V_{бл}};$$

в) коэффициент использования массы

$$K_m = \frac{\sum M_i}{M_{\text{бл}}},$$

где M_i – масса отдельного i -го электрорадиоэлемента; $M_{\text{бл}}$ – масса всего блока.

Нужно отметить, что допустимые (приемлемые) значения коэффициентов использования объёма весьма разнятся в зависимости от назначения и характера аппаратуры, например, см. табл. 2.3.

Таблица 2.3

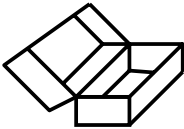
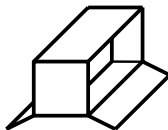
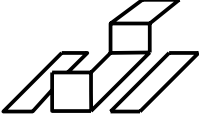
| Аппаратура | $K_{\text{исп } v}$ | | |
|------------|---------------------|-----------|-----------|
| | стационарная | возимая | бортовая |
| Передающая | 0,2 | 0,4 | 0,6...0,7 |
| Приёмная | 0,4 | 0,5 | 0,7...0,8 |
| Релейная | 0,7 | 0,7 | 0,8...0,9 |
| Питания | 0,5 | 0,6...0,7 | до 1 |

В аппаратуре с большими тепловыделениями сознательно ограничивают $K_{\text{зап } v}$ для обеспечения путей охлаждающего воздухопотока. Так, увеличение $K_{\text{зап}}$ в 1,5 раза с 0,24 до 0,37 ухудшает теплообмен примерно на 40 %.

Свойство раскрываемости НК следует сначала грамотно описать для последующего анализа. Делается это с помощью сборочных признаков. Сборочным признаком называется технологически осуществимый способ декомпозиции прообраза (прообраз – предполагаемый внешний вид в сочетании с заданной компоновочной схемой конструктивов), для обеспечения доступа к функциональным узлам, электрорадиоэлементам, электрическим соединениям и другим составным частям изделия. Сборочный признак описывается тремя характеристиками:

- наименование перемещаемого (раскрываемого) фрагмента прообраза – X (ответ на вопрос "Что перемещаем?);
- характер перемещения фрагмента Y (как перемещаем);
- направление перемещения фрагмента Z (куда перемещаем).

Например, для компоновочного эскиза, приведённого на рисунке и прямоугольной формы блока может быть предложено не менее пяти схем НК, обеспечивающих раскрываемость и представленных в табл. 2.4.

| № п/п | Описание сборочного признака | | | Эскиз |
|----------|--|-------------------------|--|---|
| | $X = \{Xp\}$ | $Y = \{Yr\}$ | $Z = \{Zr\}$ | |
| 1. | Верхняя половина параллелепипеда | Поворот | Относительно линии разреза, параллельной наибольшему ребру |  |
| 2. | Левая, правая боковые грани | Поворот | Относительно нижних наибольших ребер |  |
| 3. | Левая, правая боковые грани. Верхняя грань | Отбрасывание Поворот | Относительно заднего верхнего ребра |  |
| 4. | Левая, правая боковые грани. Верхняя грань | Отбрасывание Поворот | Относительно переднего верхнего ребра |  |
| 5. | Левая, правая боковые верхние грани | Отбрасывание | |  |

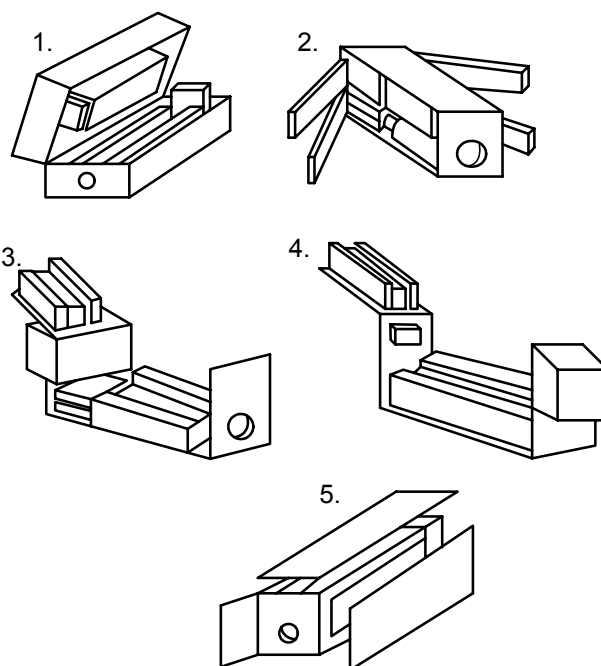


Рис. 2.17. Практическая реализация вариантов раскрытия блока (по табл. 2.4) при неизменной компоновочной схеме (по рис. 1.3)

Соответствующие варианты и решения показаны на рис. 2.17. Оценку раскрываемости целесообразно проводить в баллах (или рангах) по усмотрению разработчиков в пределах массива сравнения. Также в баллах (ран-

гах) на первоначальных этапах разработки следует оценивать и технологичность конструкций (хотя в дальнейшем этот показатель и будет просчитан более строго).

Все вышеуказанные критерии и оценки используются при многовариантном и многокритериальном сравнении при выборе предпочтительного варианта НК (см. раздел методических указаний). Выбранному варианту НК предстоит еще проверка на прочностные характеристики по граничным условиям, т.е. допустимым значениям.

При несоблюдении граничного значения конструкторское решение должно быть забраковано или пересмотрено (доработано).

Проверка осуществляется расчётами. Целью расчётов является определение фактических деформаций в элементах конструкции при действии на блок вибрации, ударов и линейных ускорений в соответствии с заданными для блока условиями по нормативным документам. В перечень основных расчётов включаются:

- расчёт жёсткости наиболее критичного элемента несущей конструкции блока (например, панель, шасси) и величины его прогиба при нагружении комплексом конструктивов в режиме статической или динамической нагрузки; для блока в целом эта характеристика проверяется только в каких-либо сомнительных случаях, например, когда один из габаритных размеров блока много больше других; превышения какого-либо из габаритных размеров над другими более чем вдвое рекомендуется не допускать;

- расчёт на вибропрочность;

- расчёт ударного воздействия при падении блока, как правило, такой расчёт делается только для моноблоков групп 6-7, по ГОСТ 16019–01.

2.4. КОНСТРУКТОРСКИЕ МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТРЕБОВАНИЙ К НЕСУЩИМ КОНСТРУКЦИЯМ ПО ПРОЧНОСТИ И ЖЁСТКОСТИ

Жёсткость определяет работоспособность конструкции в такой же, а иногда и в большей степени, как и прочность. Повышенные деформации могут нарушить нормальную работу задолго до возникновения опасных для прочности напряжений. Не жёсткость корпусов расстраивает взаимодействие расположенных внутри них узлов и блоков. Жёсткость имеет особенно большое значение для изделий облегчённого вида (авиационной, ракетной и др. РЭА). Стремясь облегчить конструкцию и максимально использовать прочностные свойства материалов, конструктор повышает напряжения, что сопровождается увеличением деформаций.

Величину деформаций можно рассчитать только в простейших случаях методами сопротивления материалов и теории упругости. В большинстве случаев приходится иметь дело с нерасчётными деталями, сечения которых определяются условиями изготовления (например, технологии литья или прессования) и имеющими сложную конфигурацию, затрудняющую определение напряжений и деформаций.

Здесь приходится прибегать к моделированию, эксперименту, анализу аналогичных конструкций, а нередко полагаться только на чутьё, вырабатывающееся с течением времени у конструктора. Опытный конструктор, зная направление и величину действующих усилий, оценивает более или менее правильно направление и величину деформаций, выявляет слабые места и, пользуясь разнообразными приёмами и методами, увеличивает жёсткость, komponуя рациональные изделия.

Основными конструкторскими методами повышения прочности и жёсткости являются:

- правильный выбор материалов по их удельным прочностным критериям;
- придание детали равнопрочности во всех сечениях, исключение участков концентрации напряжений;
- выбор рациональных сечений с разноской материала по направлению действия максимальных напряжений;
- устранение напряжений изгиба и кручения, замена напряжениями растяжения-сжатия;
- устранение по возможности консольных нагружений, невыгодных по величине деформаций и напряжений, и упрочнение опасных сечений;
- устранение макро- и микродефектов структуры материалов, введение стабилизирующей термообработки.

Об удельных прочностных и жесткостных характеристиках было сказано в подразделе 2.2.

Равнопрочность – случай, когда напряжения в каждом сечении детали по её продольной оси одинаковы. Такой идеальный случай возможен только при некоторых видах нагружения, когда нагрузка воспринимается всем сечением (растяжение-сжатие, отчасти срез).

При изгибе, кручении и сложных напряженных состояниях напряжения по сечению распределяются неравномерно. Они имеют максимальную величину в крайних точках сечения и могут снижаться до нуля на нейтральной оси. В этих случаях можно только приблизиться к условиям равнопрочности выравниванием напряжений, удалением материала с наименее нагруженных сечений и сосредоточением его в наиболее нагруженных местах. В качестве примера рассмотрим цилиндрическую деталь, подвергаемую растяжению, изгибу или кручению. При растяжении-сжатии нормальные напряжения во всех точках сечения массивной детали равны

$$G = \frac{P}{F},$$

где P – сила, приложенная к детали, Н; F – площадь поперечного сечения, мм².

При изгибе нормальные напряжения распределяются по закону прямой линии, проходящей через центр сечения (рис. 2.18, а).

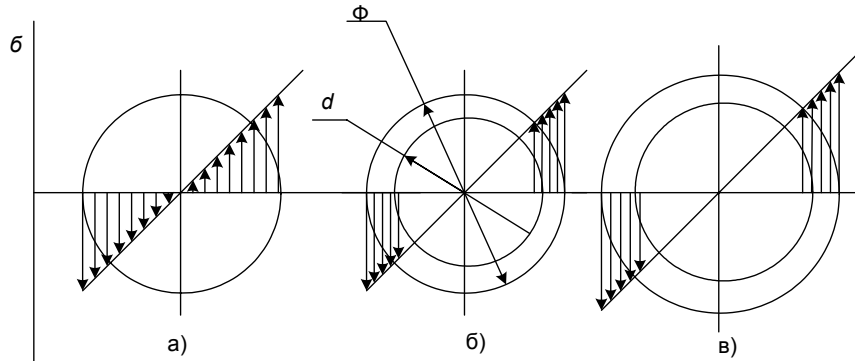


Рис. 2.18. Распределение напряжений по сечению

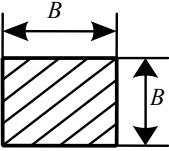
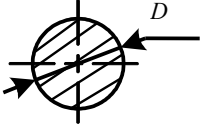
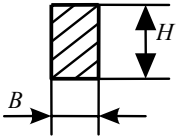
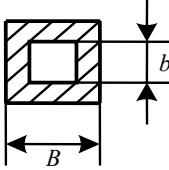
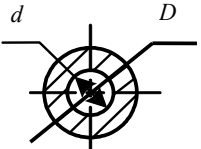
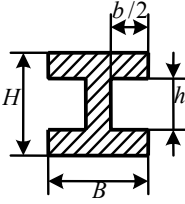
Удаление слабонагруженного центрального участка сечения обеспечивает более равномерное распределение напряжений на остающихся участках (рис. 2.18, б). Чем тоньше стенки кольца (меньше величины $d = 4D$), тем равномернее распределение напряжения. Но при сохранении постоянным нагруженным диаметра, напряжения в сечении повышаются и могут превысить предел прочности. Приведение уровня напряжений к допустимой величине может быть получено увеличением наружного диаметра и соответственно момента сопротивления сечения $W_{из}$ (рис. 2.18, в).

Для несущих конструкций наибольший интерес представляют круглые, квадратные и I -образные сечения профилей. Рассмотрим и сравним показатели прочности, жёсткости и массу и оценим целесообразность их применения в условиях растяжения сжатия, изгиба и кручения. Расчётные формулы для основных профилей даны в [7, табл. 2.5]. При растяжении сжатии напряжения зависят только от площади сечения F , меньшие габариты будут у круга. Для изгиба напряжения обратно пропорциональны моменту сопротивления W_u .

Для несущих конструкций наибольший интерес представляют круглые, квадратные и I -образные сечения профилей. Рассмотрим и сравним показатели прочности, жёсткости и массу и оценим целесообразность их применения в условиях растяжения сжатия, изгиба и кручения. Расчётные формулы для основных профилей даны в [7, табл. 2.5]. При растяжении-сжатии напряжения зависят только от площади сечения F , меньшие габариты будут у круга. Для изгиба напряжения обратно пропорциональны моменту сопротивления W_u .

При одной и той же площади наибольшее значение момента W_u у I -образного сечения, пустотелого квадрата и круга. Наименее выгодными будут сплошное круговое и квадратное сечения. Устранение напряжений изгиба (рис. 2.19, а, б) и замена растяжением-сжатием возможно в случае применения ферменной системы (рис. 2.19, в, г). У ферменной системы верхний стержень работает на растяжение, нижний – на сжатие. Если сравнить напряжения и прогибы в консольной балке и ферме, где стержни имеют равный диаметр и равный вылет, то напряжения в стержнях фермы будут в 85 раз меньше, чем максимальное напряжение в сечении балки, прогиб в 260 раз меньше у фермы, чем у балки в точке приложения силы [9]. Для того чтобы сделать системы равнопрочными, сечение балки надо увеличить в 18,3 раза, при этом масса балки становится в 8 раз больше, массы ферменной системы, а деформация балки при этом будет больше, чем у фермы, так как деформация при изгибе пропорциональна третьей степени длины, а при растяжении – первой степени.

Таблица 2.5

| № п/п | Эскиз | Площадь поперечного сечения | Моменты сопротивления | Моменты инерции |
|----------|---|---|-------------------------------|--------------------------------|
| | | F | W | J |
| 1. |  | B^2 | $B^3/6$ | $B^4/12$ |
| 2. |  | $\frac{\pi}{4}D^2 \approx 0,785D^2$ | $0,1D^3$ | $0,05D^4$ |
| 3. |  | $B^2C,$ где $C = H/B$ | $B^3C^2/6$ | $B^4C^3/12$ |
| 4. |  | $B^2(1 - e\eta),$ где $e = b/B$ | $\frac{B^3(1 - e^4)}{6}$ | $\frac{B^4(1 - e^4)}{12}$ |
| 5. |  | $0,785D^2(1 - \alpha^2),$ где $\alpha = d/D$ | $0,1D^3(1 - \alpha^4)$ | $0,05D^4(1 - \alpha^4)$ |
| 6. |  | $BH(1 - e\eta),$ где $e = b/B,$ $T = h/H$ | $\frac{BH^2(1 - e\eta^3)}{6}$ | $\frac{BH^3(1 - e\eta^3)}{12}$ |

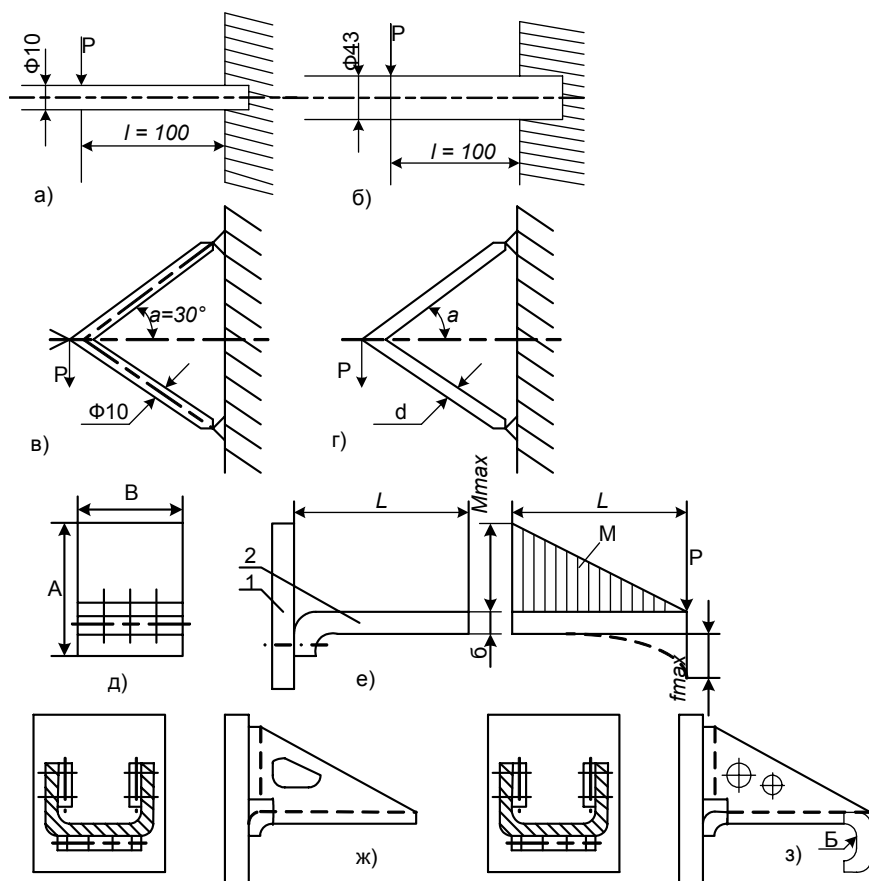


Рис. 2.19. Повышение прочности и жёсткости НК. Принципы и примеры:
a, б – консольная балка (работа на изгиб); *в, г* – ферменная система (работа на растяжение-сжатие); *д, е* – пример консольного крепления передней панели к шасси; *ж* – повышение жёсткости консольной конструкции; *з* – увеличение жёсткости введения опорной плоскости (Б)

Связь между прогибом ферменной системы f_{Φ} и консольной балки f_6 при одинаковых сечениях можно выразить отношением

$$\frac{f_6}{f_{\Phi}} \approx 10,5 \left(\frac{1}{d} \right)^2 \sin^2 \alpha \cos \alpha,$$

где l – длина вылета фермы или балки; d – диаметр стержней; α – половина угла при вершине ферменной системы.

Конструкция, аналогичная балке, показана на рис. 2.19, *д*, на рис. 2.19, *е* – эпюра изгибающего момента балки. При её замене на форму согласно рис. 2.19, *ж* материал детали будет работать преимущественно на растяжение-сжатие, хотя жёсткость её будет отличаться от идеальной ферменной системы.

Если нельзя полностью устранить изгиб, то надо стремиться заменить консольную балку на двухопорные балочные конструкции (рис. 2.19, *з*).

Наибольшие напряжения у консольной балки возникают в месте заделки, у двухопорной – в точке приложения силы, на заданном расстоянии от опор и меньше – в месте заземления. Если применения консольного крепления нельзя избежать, то следует принять все меры, чтобы устранить её недостатки. Для этого уменьшают вылет консоли, увеличивают жёсткость и прочность опасного сечения.

Необходимая жёсткость и прочность наиболее нагруженного сечения обеспечивается увеличением размеров или при снижении массы и уменьшении размеров, введением местных выдавок. Применение рельефов жёсткости или зигов получило большое распространение при холодном штамповании. Рельефные валики следует располагать вдоль действия изгибающего момента. Повышение прочности и жёсткости фланцев тонкостенных цилиндрических деталей проводят отбортовкой. Повышение жёсткости и прочности участков приложения, сосредоточенных сил (опорных площадок, мест крепления) можно обеспечить местными выдавками или с помощью различных упрочняющих накладок. Прогиб тонкостенных деталей на участке малой жёсткости, ослабленном отверстиями, предупреждают разбортовкой отверстий. Для увеличения жёсткости литых и пресованных

из пресспорошков корпусных деталей применяют ребра жёсткости. Упрочнение консольного шасси, отогнутыми боковыми стенками, представлено на рис. 2.20.

Жёсткость и прочность конструкции будут наибольшими при ребре на всю длину консоли. Дополнительное повышение жёсткости может быть получено за счёт введения рельефов на плоскостях шасси и боковых стенок.

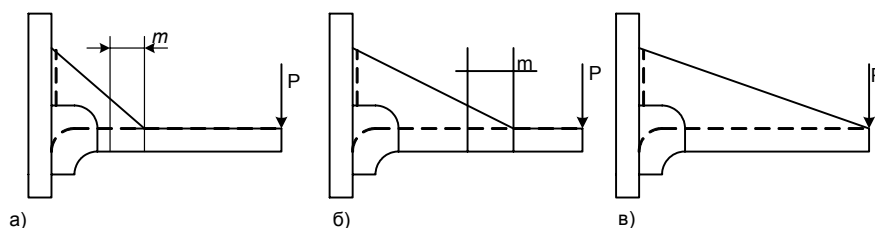


Рис. 2.20. Влияние боковых стенок на прочность НК из листового материала

Крупногабаритные детали (каркасы стоек, шкафов, приборов, крупногабаритных блоков) для большей жёсткости и прочности можно выполнить из балочных открытых или замкнутых профилей (см. рис. 2.21). Профили получают гибкой из тонколистового материала на спецоборудовании, прессованием из порошков. Замкнутые профили, выполненные из листового материала с последующим соединением контактно-точечной или электродуговой сваркой, имеют более высокие прочность и жёсткость, и большую трудоёмкость.

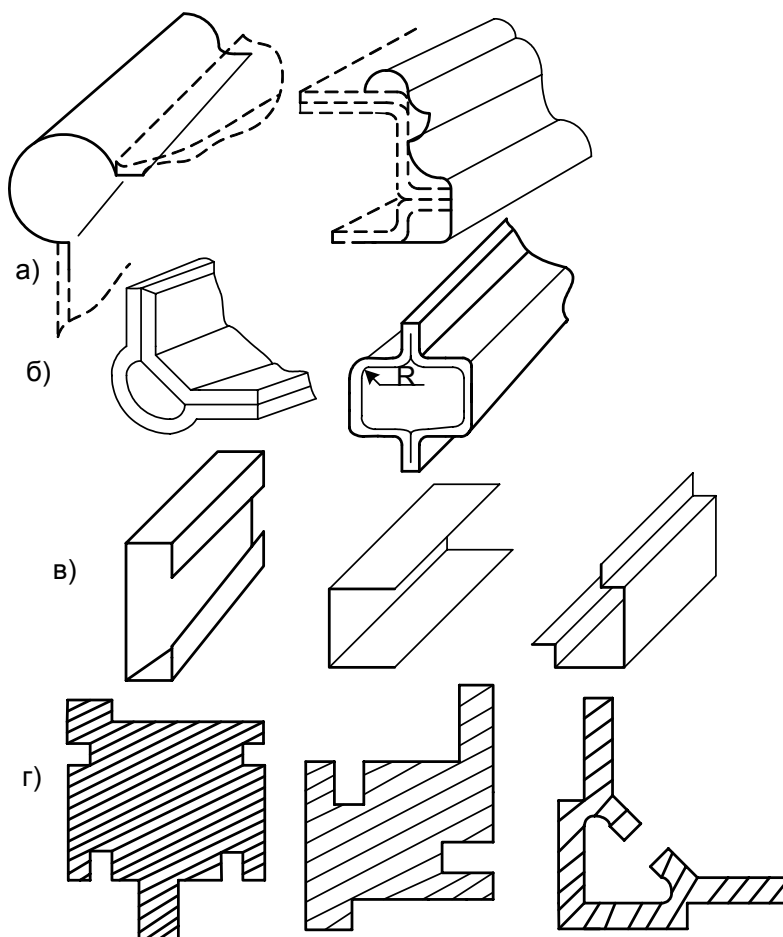


Рис. 2.21. Примеры различных профилей для НК:
a – гнутые из листа декоративные; *б* – замкнутые балочные полые (из листового материала); *в* – гнутые балочные открытые; *г* – прессованные

3. ПРОЕКТИРОВАНИЕ НЕСУЩЕЙ КОНСТРУКЦИИ РАДИОЭЛЕКТРОННОГО СРЕДСТВА

3.1. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

1. Компоновочная схема электронного блока.

2. Перечень конструктивов с указанием массы, габаритов, способа крепления, типа разъёмов или способа подсоединения к схеме.
3. Условия эксплуатации блока.
4. Назначение блока и его требуемое исполнение; при вхождении блока в шкаф, стойку, контейнер задаются также установочные размеры посадочного гнезда.
5. Необходимый способ охлаждения (по результатам анализа тепловыделений).
6. Необходимая площадь лицевой панели под размещение всех необходимых органов управления и информации.

П р и м е ч а н и е: если в учебном процессе ЛКР по НК следует за ЛКР по компоновке, то вышеизложенные исходные данные студент готовит для себя сам в ходе компоновочных работ.

3.2. УТОЧНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК КОНСТРУКТИВОВ

Проверяются ещё раз габариты конструктивов. В рабочую тетрадь (пояснительную записку (ПЗ)) заносятся перечень конструктивов, габариты, масса, эскизы посадочных размеров, способы крепления по каждому конструктиву, резьбы невыпадающих винтов крепления, тип разъёма, расположение разъёма относительно габаритных размеров или образующих печатной платы, сведения об ином возможном способе подключения конструктивов к схеме.

Если на момент учебного проектирования некоторые из этих данных отсутствуют, ими следует задаться по согласованию с преподавателем.

3.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВНЕШНЕГО ВИДА (ПРООБРАЗА) БУДУЩЕГО БЛОКА

Прообраз определяет внешние контуры (обводы) НК. Для "врубных" (вдвижных) блоков прообраз, по сути дела, задаётся автоматически размером посадочного гнезда. Формы же моноблоков могут быть самыми различными – от прямоугольного параллелепипеда до цилиндра и шара, причём выбор определяется, с одной стороны эксплуатационными условиями (например, для буйковой аппаратуры наиболее целесообразной формой является шар), а с другой – эстетическими соображениями (например, при оформлении бытовой радиоаппаратуры и дисплеев). В учебном проектировании мы будем иметь дело, как правило, с прямоугольным параллелепипедом удобной как с конструкторской, так и с технологической точек зрения.

3.4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧИСЛА И РАСПОЛОЖЕНИЯ ПЛОСКОСТЕЙ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ. ГАБАРИТЫ И ОБЪЁМЫ

Исходя из данных п.п. 3.2 и 3.3 и компоновочной схемы необходимо провести анализ расположения конструктивов на предмет выяснения возможности разместить выводы, большинства из них (или их разъёмов) в одной общей, так называемой, "монтажной" плоскости, что обеспечивает удобство монтажа вообще и прокладки жгута в частности. В случае необходимости число таких плоскостей можно увеличить до двух, трёх (горизонтальных и вертикальных). Отдельные конструктивы допускается оставить вне таких плоскостей. В процессе подбора для достижения цели допускается поворот конструктивов относительно горизонтальной и вертикальной оси на 180° . Поскольку и сами выводы и соединяющие их провода требуют определённого объёма, то с этих позиций можно говорить о монтажном пространстве, монтажном объёме (зоне), прилегающем к монтажной плоскости. Монтажная плоскость обычно является и плоскостью крепления конструктивов, но это не обязательно, могут быть и другие решения. Иногда плоскости крепления заменяются лапами под точки крепления конструктивов или кронштейном.

Положение монтажных плоскостей и плоскостей крепления конструктивов подскажет проектировщику целесообразное и необходимое положение плоскостей-панелей будущей несущей конструкции. Исходя из такого требуемого взаимного положения панелей и следует подобрать какой-либо из типов НК, соответствующий назначению и исполнению блока и обеспечивающий нужное число и положение панелей. Выбранный тип и расположение панелей следует отразить эскизом в аксонометрии. Наиболее общий и трудный случай – это сочетание в компоновочной схеме разнохарактерных конструктивов. Однако в частных случаях формирования блока из однотипных печатных узлов-модулей задача проектировщика существенно упрощается. Поскольку этот частный случай встречается на практике довольно широко, рассмотрим его подробно.

В общем случае электронный блок можно представить состоящим из объёмов, занимаемых конструктивами (1), лицевой панелью со своими элементами (2) и зоной межблочной коммутации (3) (см. рис. 3.1). В рассматриваемом частном случае без учёта лицевой панели и зоны межблочной коммутации полезный объём блока можно разделить на две части: объём V_1 , занимаемый функциональными модулями (ячейками), и объём V_2 , занимаемый зонами электрической коммутации. Габариты зоны V_2 формируются из следующих соображений. Электрические соединители занимают в блоке зону, равную по глубине 25...35 мм, что увеличивает вместе со жгутом и объёмным монтажом на столько же одну из сторон блока. При безразъёмных подключениях жгутовые соединения, гибкие печатные и коммутационные платы увеличивают габариты корпуса блока на 15...20 мм. Вместо объёмного монтажа внутриблочные соединения разъёмов ячеек-модулей могут быть выполнены спосо-

бом печатного монтажа в виде отдельного конструктива – объединительной платы – с габаритами несколько меньшими, чем вышеуказанная монтажная зона.

На рисунке 3.2 даны шесть вариантов компоновки блоков РЭС, где обозначено: L, H, B – длина, высота и ширина блока; L_k, H_k, B_k – части блока, занимаемые элементами внутриблочной электрической коммутации; V_1 – объём, занимаемый функциональными модулями; V_2 – объём, занимаемый зонами электрической коммутации (заштрихован).

Практика конструирования блоков свидетельствует, что варианты 1 и 2 обладают наихудшими условиями, как для естественной конвекции, так и для принудительного охлаждения из-за перекрытия каналов потока воздуха внутри блока. Кроме того, по прочностным показателям эти варианты также худшие: печатные платы характеризуются максимальным прогибом при изгибе от воздействия вертикальной весовой нагрузки. Поэтому варианты 1 и 2 не следует использовать. Как правило, для блоков РЭС $L > H, L > B, H \gg B$, поэтому варианты 3 и 4 для "врубных" (разъёмных) модульных конструкций позволяют установить значительно большее число модулей по сравнению с вариантами 5 и 6.

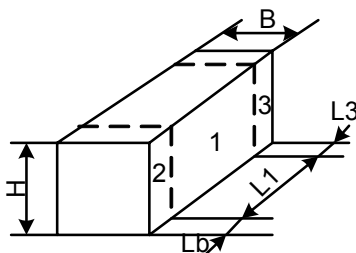


Рис. 3.1. Зоны электронного блока

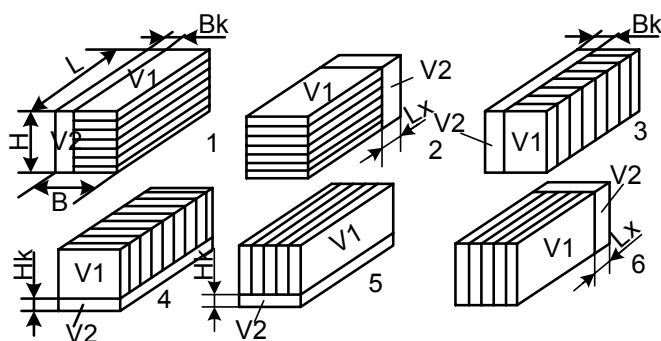


Рис. 3.2. Варианты заполнения каркасной НК односторонними модулями (печатными узлами)

Установка модулей с боковой стороны параллельно лицевой панели блока (вариант 3) имеет следующие преимущества:

а) удобство установки и съёма модуля;

б) обеспечение наилучших условий для прохода охлаждающего воздуха через блок (в направлении дно – верхняя стенка).

С точки зрения объёма V_L , занимаемого функциональными модулями, наиболее предпочтителен вариант 6 книжной конструкции, а наихудший – вариант 3 врубной конструкции.

При использовании естественной конвекции для врубных блоков применяют вариант 4. В случае принудительного охлаждения во врубных блоках применяют вариант 3.

В книжных конструкциях блоков число модулей ("страниц") обычно мало из-за невозможности достаточного раскрытия модулей. Поэтому варианты 5 и 6 предпочтительны для книжной конструкции блока: они имеют меньшее число модулей по сравнению с вариантами 3 и 4 врубной конструкции.

Для вариантов 5 и 6 может быть использована как естественная конвекция, так и принудительное охлаждение. В последнем случае вентилятор может быть установлен на заднюю или лицевую панели блока варианта 5 или снизу для варианта 6.

Во всех вышеописанных случаях положение "монтажных" плоскостей определяется ориентацией выводов печатных узлов или модулей. В такой "монтажной" плоскости и располагаются либо разъёмы (соединители) врубных модулей, либо объёмный монтаж (жгут) подключаемых или припаиваемых к модулям проводов.

3.5. УСТАНОВЛЕНИЕ ВЕЛИЧИН ЗАЗОРОВ

Необходимые величины зазоров между конструктивами принимаются по нижеследующим соображениям.

1. Зазоры должны обеспечивать свободное прохождение воздушных охлаждающих потоков как в случае естественной приточно-вытяжной вентиляции, так и в случаях применения принудительной вентиляции. Естественное направление для таких потоков вертикальное, такой же является предпочтительная ориентация конструктивов типа печатных плат и узлов. Зазор для потоков воздуха от 5 до 10 мм в зависимости от величины тепловыделений. Выступающие части конструктивов и креплений не должны перекрывать путей движений воздуха, увеличивая аэродинамическое сопротивление.

2. Необходимо обеспечивать доступ к местам креплений конструктивов. Снятие их должно производиться, как правило, без применения какого-либо специального инструмента.

3. Должна быть обеспечена прокладка ответвлений жгутов или монтажных проводов по поверхностям НК, если эти провода должны проходить между конструктивами. Жгут вообще должен проходить по поверхности НК и быть прикреплён к ней. Жгут не должен быть механически связан со съёмными конструктивами, кроме как через специальные соединительные устройства (разъёмы, монтажные панели и пр.).

4. К уточнению габаритов нужно отнести также проверку зазоров между панелями и конструктивами для размещения между ними разъёмов или других соединительных устройств. Для этого сначала находят координаты размещения мест креплений соединительных устройств (разъёмов), а затем по ним находят контуры внешних обводов соединительных устройств. Далее, исходя из размеров выступающих частей разъёмов, определяется требуемый зазор.

5. По установленным зазорам уточняются габариты НК и блока в целом.

3.6. ВЫБОР ТИПА НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ. ФОРМИРОВАНИЕ МНОЖЕСТВА ВАРИАНТОВ

Исходя из назначения блока, его формы, по подобранному расположению плоскостей монтажа и крепления, проектировщик должен выбрать тип НК и конкретизировать его контуры (скелет НК), определить размеры, способ раскрываемости. Скелет НК изобразить в аксонометрии. Способ раскрываемости описать по сборочным признакам. Скелет вместе с контурами конструктивов в состоянии раскрытия также отразить эскизом. Качество раскрываемости оценить в баллах (или рангах). Наметить форму жгута монтажных проводов и трассу его прокладки по внутренним поверхностям НК. Учитывая, что жгут должен изготавливаться отдельно от блока, необходимо создать возможность его установки и закрепления после всех механосборочных операций на скелете. Габариты жгута в местах его прохождения целесообразно приблизительно оценить, хотя бы по количеству контактов в разъёмах. Для ориентировки принимать для слаботочных блоков $\varnothing 1$ мм на провод (по изоляции), для силовоточных блоков $\varnothing 3$ мм по изоляции на провод. Эскиз прокладки жгута по скелету НК, выполненный в аксонометрии, включить в пояснительную записку. Описывая выбранный вариант, следует отметить его достоинства и недостатки. Выбрать материал и технологию изготовления НК, обосновать принятое решение, предложить покрытия, способ соединения деталей НК. Для моноблоков отметить, какой предполагается выполнить для него внешнюю защиту: кожух, обшивки, крышки и т.п. Предусмотреть в НК места крепления для них. Учесть основной принцип: кожух должен сниматься с блока, а не блок выниматься из кожуха. Для врубных блоков наметить способы перемещения и крепления блока в стойке (шкафу): направляющие, штыри-ловители, винты крепления лицевой панели. Габариты лицевой панели врубных блоков, как правило, должны выходить за габариты контуров скелета для размещения винтов крепления блока к стойке, и для моноблоков к для блоков врубных должна быть проверена достаточность площади лицевой панели в соответствии с заданием. Всю вышеописанную операцию подбора типа НК следует повторить еще несколько раз (до 4-5 раз), реализуя каждый раз какие-то преимущества других неиспользованных ранее способов решения проблемы. Можно варьировать тип НК, способы раскрываемости, защиты, монтажа, охлаждения и т.д. Таким образом будет сформирован массив вариантов НК для последующего сравнения и выбора наиболее целесообразной конструкции.

3.7. ОЦЕНКА ВАРИАНТОВ

Оценку каждого варианта следует произвести по комплексу критериев. Сами критерии и методика оценивания подробно описаны выше в разделе 2.3. Единственно, что нужно добавить, что расчёты массы и объёмов не нужно превращать здесь в громоздкие и скрупулезные операции. Массы конструктивов известны из задания. Расчёт массы деталей НК можно для упрощения рекомендовать вести с помощью разных вспомогательных таблиц, ориентированных на массу тел простейших геометрических форм. К сумме таких простейших тел при ориентировочном подсчёте можно привести любую деталь НК. При таком подходе массу детали легко вычислить без всяких таблиц по простым геометрическим формулам. Для объёмов и весов электрорадиоэлементов подробные таблицы имеются в приложении к [3]. При пользовании таблицами, естественно, можно прибегать к аналогиям, определять массу печатных узлов и модулей по габаритным размерам не рекомендуется во избежание грубых ошибок. Отбор критериев сравнения выполняет сам разработчик, выбирая из них наиболее существенные. Общее число критериев не рекомендуется брать более пяти или восьми.

3.8. ВЫБОР ПРЕДПОЧТИТЕЛЬНОГО ВАРИАНТА

Выбор предпочтительного варианта НК следует производить на основе многокритериального сравнения. Для таких достаточно сложных систем, как несущие конструкции, при наличии большого числа требований иные методы сравнения практически неприемлемы. Здесь требуется осуществить поиск некоторого разумного компромисса между большим набором весьма противоречивых критериев.

Для решения данной задачи студентам рекомендуется опираться на принцип Парето-оптимальности, излагаемый в курсе лекций по конструированию. Преимуществом данного метода является возможность попарного сравнения вариантов по строчкам критериев, т.е. оценку какого-то критерия одного варианта с оценкой точно такого же критерия другого варианта. В сравнении на данном этапе не участвуют пересчёты оценок критериев в различные обобщённые показатели с помощью малодостоверных весовых коэффициентов. В результате сравнения формируется подмножество Парето-оптимальных вариантов. Если подмножество содержит один вариант, то он и будет наиболее предпочтительным. В противном случае из данного подмножества выбирается вариант одним из следующих способов:

1. Один из частных критериев берётся за основной, а на остальные накладываются ограничения. Наиболее предпочтительным будет вариант с лучшим значением основного критерия.
2. Формируется обобщённый показатель качества на основе какой-либо комбинации частных критериев, выбор варианта производится по обобщённому показателю.

Напомним вкратце методику сравнения в самом общем виде с помощью примера.

Пусть имеем 8 вариантов выполнения изделия ($n = 8$). Каждый вариант будем характеризовать пятью критериями ($m = 5$). Оценки критериев выполняем по 10-балльной системе (условно!), причём, чем выше балл, тем вариант по данному критерию лучше. Оценки вариантов сводим в таблицу (см. табл. 3.1).

Таблица 3.1

| Критерии $m = 5$ | Оценки по вариантам | | | | | | | |
|------------------|---------------------|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| q_1 | 10 | 4 | 6 | 9 | 5 | 3 | 3 | 3 |
| q_2 | 3 | 3 | 3 | 3 | 0 | 0 | 4 | 3 |
| q_3 | 2 | 4 | 5 | 2 | 5 | 2 | 2 | 4 |
| q_4 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 4 | 7 | 4 |
| q_5 | 4 | 1 | 2 | 3 | 2 | 1 | 7 | 1 |

Здесь можно выделить, во-первых, множества оценок каждого из вариантов по всем критериям. Так, оценка 1-го варианта:

$$y^{(1)} = (y_1^{(1)}; y_2^{(1)}; \dots; y_m^{(1)})^T$$

и далее множества $y^{(j)}$ по столбцам, $j = 1, \bar{n}$, $n = 8$.

Во-вторых, выделяем множества оценок вариантов по каждому из критериев. Так, для критерия q_1

$$y_1 = (y_1^{(1)}; y_1^{(2)}; \dots; y_1^{(n)})$$

и далее множества y_i по рядам (строкам) $i = 1, \bar{m}$, $m = 5$. Как множества типа $y^{(j)}$ так и y_i можно объединить в множество оценок

$$Y = (y^{(1)}; y^{(2)}; \dots; y^{(n)})$$

или

$$Y = (y_1; y_2; \dots; y_m)^T.$$

Вводим понятие отношений между вариантами. Если, скажем, один вариант a составлен оценками критериев $y^{(a)}$, а другой b из оценок критериев $y^{(b)}$, то отношения могут быть следующими. Может быть случай, когда все элементы $y^{(a)}$ больше соответствующих элементов $y^{(b)}$. Мы здесь говорим, что множество $y^{(a)}$ строго больше множества $y^{(b)}$, т.е.

$$y_i^{(a)} > y_i^{(b)} \text{ при } i = 1, \bar{m}.$$

Другой случай. Все элементы $y^{(a)}$ могут быть равны соответствующим элементам $y^{(b)}$. Здесь имеем отношение равенства

$$y_i^{(a)} > y_i^{(b)} \text{ при } i = 1, \bar{m}.$$

В третьем случае элементы могут быть либо больше, либо равны, т.е.

$$y_i^{(a)} \geq y_i^{(b)} \text{ при } i = 1, \bar{m}. \quad (*)$$

В этом случае хотя бы один компонент среди прочих должен быть строго больше.

В четвёртом случае может иметь место для некоторых элементов

$$y_i^{(a)} > y_i^{(b)},$$

а для некоторых

$$y_i^{(a)} < y_i^{(b)},$$

т.е. по одним показателям лучше вариант $y^{(a)}$, а по другим – $y^{(b)}$. Условно это обозначим

$$y_i^{(a)} \leq y_i^{(b)}.$$

Пользуясь этими понятиями, можно определять своё отношение к сравниваемым вариантам, а именно: $a \geq b$ – строгое предпочтение: вариант a предпочтительнее b ; $a \sim b$ – варианты неразличимы. Введём понятие оптимальности по Парето. В этом случае для двух вариантов a и b сравнение частных критериев производится в соответствии с соотношением (*). В соответствии с аксиомой Парето, для любых двух оценок $y^{(a)}$ и $y^{(b)}$ из множества Y ($y^{(a)}, y^{(b)} \in Y$), если удовлетворяется отношение $y^{(a)} \geq y^{(b)}$, то вариант a предпочтительнее варианта b ($a > b$). На условиях этой аксиомы формируется множество $P(x)$ вариантов, оптимальных по Парето.

Идея алгоритма формирования множества $P(x)$ состоит в том, что сначала первый вариант x_1 сравнивается с x_2 и далее со всеми остальными. На основании этих сравнений первый вариант либо включается в $P(x)$, либо исключается. При сравнении x_1 и x_2 возможны три случая:

1) $y^{(1)} \geq y^{(2)}$, т.е. $x_1 > x_2$, в этом случае вариант x_2 из дальнейшего рассмотрения исключается, а x_1 сравнивается с x_3 ;

2) $y^{(1)} \leq y^{(2)}$, т.е. $x_1 < x_2$, в этом случае для x_1 есть более предпочтительный вариант (x_2), поэтому x_1 из рассмотрения исключается;

3) $y^{(1)} \geq y^{(2)}$, здесь ни один из двух вариантов не имеет предпочтения перед другим, т.е. они эквивалентны или безразличны в смысле Парето ($x_1 \sim x_2$), в этом случае переходим к сравнению x_1 и x_3 . Если для варианта x_1 не найдётся другого более предпочтительного, то он включается в множество $P(x)$.

На этом заканчивается первая итерация. Затем во второй итерации вариант x_2 сравнивается с оставшимися и т.д., т.е. мы имеем дело с итерационным процессом.

При отборе каждый раз сравниваются только два варианта. Рассмотрим процедуру формирования $P(x)$ для условий П1 первая итерация $X1 = X = \{x_1, \dots, x_8\}$. Поочерёдно сравниваем оценки первого варианта с остальными, сначала сравниваем x_1 и x_2 . Здесь $y^{(1)} \geq y^{(2)}$, так как $10 > 4$, $3 = 3$, $2 < 4$, $2 < 3$, $4 > 1$. В результате между вариантами можно поставить знак безразличия, т.е. $x_1 \sim x_2$. Сравнивая x_1 с другими вариантами, получаем: $x_1 \sim x_3$, $x_1 > x_4$, $x_1 \sim x_5$, $x_1 \sim x_6$, $x_1 \sim x_7$, $x_1 \sim x_8$.

В результате первой итерации вариант x_1 включаем в множество $P(x)$, т.е. $P(x) = \{x_1\}$, а вариант x_4 исключаем из дальнейшего рассмотрения, так как $x_1 > x_4$.

Вторая итерация. $X2 = \{x_2, x_3, x_5, \dots, x_8\}$. Здесь вариант x_2 сравниваем с x_3 и т.д. Так как $x_2 < x_3$, то x_2 из дальнейшего рассмотрения исключаем. В результате второй итерации множество $P(x)$ остаётся прежним.

Третья итерация. $X3 = \{x_3, x_5, \dots, x_8\}$. Попарное сравнение x_3 с другими вариантами показывает: $x_3 > x_5$, $x_3 > x_6$, $x_3 \sim x_7$, $x_3 > x_8$. Таким образом включаем x_3 в множество $P(x)$, а варианты x_5, x_6, x_7 исключаем, так как они уступают x_3 , т.е.

$$P(x) = \{x_1, x_3\}.$$

На четвёртой итерации для исследования остаётся один вариант x_8 , т.е. $X4 = \{x_8\}$. Данный вариант заносим в множество $P(x)$, так как для него нет более предпочтительного.

Таким образом в результате применения итерационной процедуры получаем множество

$$P(x) = \{x_1, x_3, x_8\}$$

из трёх вариантов, оптимальных по Парето. Оптимальным может быть один из этих вариантов для выбранных пяти критериев.

Обычно в множестве $P(x)$ остаётся значительно меньше вариантов, чем было вначале. Поэтому задача конструктора по определению одного оптимального варианта значительно упрощается. Теоретически возможно два крайних случая: 1) все исходные варианты останутся в множестве $P(x)$; 2) в множестве $P(x)$ остаётся один вариант. Пустым множество Парето быть не может. Для выбора одного варианта из множества Парето большую роль играет интуиция и опыт конструктора. В нашем случае это предоставляется сделать студенту на основе каких-то дополнительно вводимых критериев и обоснованных соображений.

Примечание: если при компоновке использовался метод "целевого варьирования", то допустимо объединить вместе сравнения вариантов по комплексам критериев компоновки и критериям несущих конструкций, причём выполнить это сравнение целесообразно на этапе проектирования НК.

4. ПРОЧНОСТНЫЕ РАСЧЁТЫ

4.1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА БЛОК РЭС

При механических воздействиях на РЭС различают механическую прочность и механическую устойчивость (жёсткость) конструкции [4]. Механическая прочность следует из последовательности трансформации механического воздействия по логической цепи: перемещения конструктивов – деформации конструктивов – механические напряжения в конструктивах – разрушение конструктивов – внезапный отказ конструкции за счёт её механического разрушения.

Жёсткость следует из следующей логической цепи: перемещения конструктивов – деформации конструктивов – механические напряжения в конструктивах – преобразования механической энергии в электрическую или другие виды энергии – параметрический отказ конструкции – параметрическая неустойчивость РЭС.

Внешние механические воздействия делятся на вибрации, удары и линейные ускорения (инерционные нагрузки).

Вибрация – длительные знакопеременные воздействия. Удар – кратковременное воздействие, длительность которого примерно равна двойному времени распространения ударной волны через РЭС. В момент удара происходит колебание системы на вынужденной частоте, определяемой длительностью удара, а после него на собственной частоте конструкции.

Линейные ускорения характерны для всех объектов, движущихся с переменной скоростью (например, при разгоне и торможении), а также при движении по криволинейной траектории (центробежное ускорение). В процессе работы может изменяться значение и направление линейного ускорения (например, при выключении двигателя привода). Результат воздействия линейных ускорений на РЭС может носить характер динамический (при изменении ускорения до установившегося значения) или статический (после достижения установившегося значения).

Механические воздействия могут действовать на работающее РЭС, когда оно установлено на подвижном объекте, или только при транспортировке РЭС в нерабочем состоянии, как в случае стационарного и некоторых видов возимых РЭС. Характеристики внешних механических воздействий приведены в табл. 5 [6, 8, 9, 16].

4.2. РАСЧЁТ ЖЁСТКОСТИ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ И ПРОВЕРКА ДЕФОРМАЦИЙ

От действия внешних линейных нагрузок НК РЭС обычно рассчитывают на жёсткость, а не на прочность [1]. Жёсткость конструкции – способность её сопротивляться действию внешних нагрузок с допустимыми деформациями. Коэффициент жёсткости

$$\lambda = \frac{P}{f}, \text{ Н/м}, \quad (4.1)$$

где P – внешняя нагрузка; f – прогиб.

Расчёт прогиба существенно зависит от способа закрепления элементов НК. Наукой о сопротивлении материалов и теорией упругости расчёт на жёсткость и прочность (по сути, расчёт прогибов и напряжений) освоен в достаточной мере лишь для тел простой формы – балок, рам, пластин. Как правило, НК – сложная сборочная единица. Для определения жёсткости НК целесообразно заменить её на модель – сочетание деталей упрощённой формы – балок, пластин.

Балка – тело призматической формы, длина которого значительно превышает все другие его размеры. Концы балки считаются жёстко закреплёнными (прогиб и угол поворота концов равны нулю), если они фиксируются при помощи сварки, пайки, большого числа винтов. Балка считается шарнирно опёртой (прогиб и изгибающий момент в опоре равны нулю) в случае одиночного винтового соединения её концов.

Пластина – тело призматической формы, толщина которого мала по сравнению с другими размерами. Жёсткое закрепление пластины (нет угловых и линейных перемещений закреплённой стороны) реализуется сваркой, пайкой, зажимом, большим числом винтов. Шарнирно-опорное закрепление пластины (нет линейного перемещения, но возможен поворот по опёртой стороне) осуществляется направляющими, винтами или разъемом, например, установкой печатной платы в розеточную часть электрического соединителя. В качестве пластин в РЭС принимают панели, стенки кожухов, печатные платы и т.п.

Расчёт жёсткости НК может быть выполнен двумя путями:

- 1) определение жёсткости её элементов по отдельности (каркаса, крышек, стенок, печатных плат и т.п.) с последующим сравнением полученных величин прогибов с допустимыми значениями;
- 2) определение жёсткости НК в целом.

Первый путь весьма трудоёмок в силу возможного большого числа элементов; кроме того, оценить суммарную жёсткость НК сложно из-за взаимного влияния жёсткостей элементов. Рассмотрим второй путь, суть которого в следующем.

Для получения количественных оценок жёсткости и прочности НК её представляют в виде механической модели с распределёнными параметрами типа пластин, стержней, рам и т.п. В таких модельных системах от действия внешних механических нагрузок возможно возникновение различных видов деформаций: растяжения-сжатия, сдвига, кручения, изгиба. Однако, вследствие того, что стенки НК представляют собой пластины (панели), эти виды деформаций трансформируются в сложный изгиб [4]. Поэтому расчёт жёсткости НК проведём, исходя из деформации изгиба. В большинстве случаев НК можно представить в виде балки. При изгибе балки коэффициент жёсткости

$$\lambda_{\text{изг}} = a \frac{EJ}{l^3}, \text{ Н/м}, \quad (4.2)$$

где a – коэффициент, зависящий от способа закрепления балки и условий её нагружения; E – модуль упругости материала балки, Н/м²; J – осевой момент инерции сечения балки, м⁴; l – длина балки, м.

Для шарнирно-опёртой балки, нагруженной:

- а) распределённой нагрузкой $a = 77$;
- б) сосредоточенной силой в середине пролёта $a = 48$.

Для жёстко закреплённой балки, нагруженной:

- а) распределённой нагрузкой $a = 384$;
- б) сосредоточенной силой в середине пролёта $a = 192$.

Для консольной балки, нагруженной:

- а) распределённой нагрузкой $a = 8$;
- б) сосредоточенной силой из свободного торца $a = 3$.

Приравнявая соотношения (4.1) и (4.2), получим искомое значение прогиба НК

$$f = \frac{Pl^3}{aEJ}, \quad (4.3)$$

где $p = mgn$, Н; $m = V\rho$, кг; m – масса РЭС; V, ρ – объём и плотность РЭС; n – перегрузка.

Жёсткость НК считается удовлетворительной, если $f \leq f_{\text{доп}}$ – допустимое значение прогиба, мм. Для большинства НК $f_{\text{доп}} = 0,5 \text{ мм} = 5 \cdot 10^{-4} \text{ м}$. Для нахождения массы m РЭС приводим значения объёмной плотности ρ некоторых РЭС (см. табл. 4.1).

Величину массы других РЭС следует рассчитывать как сумму масс составляющих конструктивов.

При пользовании формулой (4.3) основная трудность заключается в расчёте осевого момента инерции сечения J НК. Для определения значения J вначале целесообразно отыскать уже рассчитанную для выбранного варианта НК величину характеристики жёсткости. Характеристика жёсткости по [7]:

$$G_{\text{ж}} = \frac{A}{\sqrt{J}},$$

где F – площадь сечения НК, м².

Таблица 4.1

| Наименование РЭС | ρ , кг/м ³ |
|---------------------------------------|----------------------------|
| 1. Магнитофон | 540 ± 50 |
| 2. Радиоприёмник | 430 ± 50 |
| 3. Телевизор чёрно-белого изображения | 400 ± 50 |
| 4. Телевизор цветного изображения | 300 ± 50 |
| 5. Стабилизатор напряжения | 1200 ± 100 |

Напомним, чем меньше характеристика $G_{ж}$, тем больше жёсткость НК, одновременно с этим обеспечивается и меньшая площадь сечения F , т.е. минимальная масса НК [7]. Из этого выражения находим осевой момент инерции сечения:

$$J = \frac{F^2}{G_{ж}^2}, \text{ м}^4. \quad (4.4)$$

Для шести вариантов каркасной НК значения $G_{ж}$ вычислены и представлены в [7, табл. 5.2] для трёх осей координат при трёх различных отношениях ширины к высоте блока H/B и двух разных отношениях высоты каркаса к высоте блока [7]. В случае отсутствия подходящей НК в таблице (следовательно, незнания величины $G_{ж}$), необходимо самостоятельно рассчитать осевой момент инерции J площади сечения. В качестве примера выведем расчётное соотношение для J относительно оси $X1-X1$ для шасси, изображённого на рис. 4.1,

$$J_{x1} = \int_F y^2 dF.$$

Для удобства ось y направим вниз (чтобы пределы интегрирования были положительными). Вначале найдём выражения для элементарных площадей.

$$dF \Big|_{\frac{H}{2}-h+S_{ш}}^{\frac{H}{2}} = S_{ш} dy;$$

$$dF \Big|_{\frac{H}{2}-h}^{\frac{H}{2}-h+S_{ш}} = B dy,$$

где $S_{ш}$ – толщина шасси.

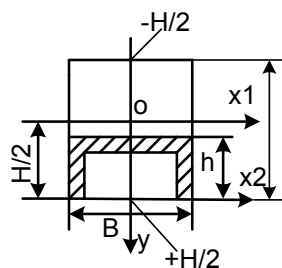


Рис. 4.1. Сечение шасси коробочного типа
(схема для расчёта)

Тогда

$$J_{x1} = 2 \int_{\frac{H}{2}-h+S_{ш}}^{\frac{H}{2}} S_{ш} y^2 dy + \int_{\frac{H}{2}-h}^{\frac{H}{2}-h+S_{ш}} B y^2 dy = S_{ш} \frac{2y^3}{3} \Big|_{\frac{H}{2}-h+S_{ш}}^{\frac{H}{2}} + B \frac{y^3}{3} \Big|_{\frac{H}{2}-h}^{\frac{H}{2}-h+S_{ш}} =$$

$$= \frac{2S_{\text{ш}}}{3} \left[\left(\frac{H}{2} - h + S_{\text{ш}} \right)^3 - \frac{H^3}{8} \right] + \frac{B}{3} \left[\left(\frac{H}{2} - h \right)^3 - \left(\frac{H}{2} - h + S_{\text{ш}} \right)^3 \right].$$

4.3. РАСЧЁТ НА ВОЗДЕЙСТВИЕ ВИБРАЦИИ

При воздействии вибрации мгновенное значение перемещения РЭС имеет вид

$$x = A \sin \omega t,$$

где A – амплитуда перемещения; ω – угловая частота колебания.

Вторая производная по времени от этого выражения даёт величину мгновенного ускорения:

$$a = A\omega^2 \sin \omega t,$$

где $A\omega^2$ – максимальное ускорение, действующее на прибор.

Выразив угловую частоту колебания через частоту вибрации f , Гц,

$$\omega = 2\pi f$$

получим для максимальной величины действующего ускорения

$$a = 4\pi^2 A f^2.$$

Значение ускорения принято выражать в единицах ускорения силы тяжести, т.е.

$$a = ng,$$

где $g = 9,81 \text{ м/с}^2$.

Тогда действующая нагрузка

$$n = 4\pi^2 A f^2 / g = A f^2 / 250.$$

Отсюда максимальная динамическая сила, действующая на РЭС весом mg , будет составлять

$$P = nmg. \quad (4.5)$$

Пусть радиоэлектронный блок помещён в стойку или шкаф, или закреплён на каком-либо столе (основании), которые совершают колебания. Отношение амплитуды колебания блока A_6 к амплитуде колебания стойки A_c называется коэффициентом динамического усиления K или коэффициентом виброизоляции.

Значение K можно оценить по формуле

$$K = \frac{A_6}{A_c} = \frac{1}{\left| 1 - \left(\frac{f}{f_0} \right)^2 \right|}, \quad (4.6)$$

где f – частота колебания стойки; f_0 – собственная резонансная частота блока; f/f_0 – относительная частота колебания.

Зависимость величины K от относительной частоты колебания представлена на графике рис. 4.2, где кривая 1 построена при отсутствии затухания, а кривая 2 – при наличии затухания (т.е. с учётом трения). Пользуясь графиками, проведём анализ поведения блока от воздействия вибраций для трёх случаев:

1. Частота вынужденных колебаний значительно больше собственной резонансной частоты блока ($f/f_0 \gg 1$). Тогда из графика следует, что $K \gg 1$, т.е. блок будет колебаться с весьма малой амплитудой. Однако, если вибрация стойки действует длительно, то эта многократно повторяющаяся деформация приведёт к появлению усталости материала блока, что чревато разрушением какого-либо его конструктива.

2. Частота вынужденных колебаний равна резонансной частоте $f/f_0 = 1$, при этом $K > 1$, т.е. амплитуда колебаний блока больше амплитуды колебаний стойки. В реальных РЭС затухание мало, поэтому при резонансе амплитуда колебаний блока получается большой, что приводит к быстрому выходу блока из строя.

3. $f/f_0 \ll 1$; $K = 1$, т.е. блок совершает такие же колебания, какие стойка; таким образом, блок не деформируется, поэтому нет опасности его повреждения от вибраций.

Следовательно, при воздействии вибраций удовлетворительно могут работать такие блоки, у которых собственная резонансная частота выше, чем частота действующих на РЭС вибраций, т.е. третий случай ($f_0 \gg f$) наиболее предпочтительный.

В итоге расчёт вибропрочности сводится к определению собственной резонансной частоты блока и сравнения её с частотой вибраций, действующих на РЭС.

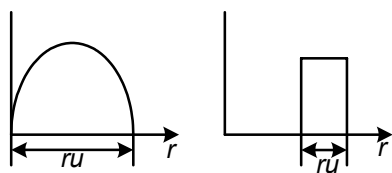


Рис. 4.2. График зависимости коэффициента виброизоляции от относительной частоты колебаний

Из физики известно, что собственная резонансная частота механической системы

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\lambda}{m}}, \quad (4.7)$$

Отсюда следует, что для повышения f_0 надо повышать коэффициент жёсткости λ конструкции и уменьшать её массу. Кстати, миниатюризация РЭС способствует уменьшению массы, следовательно, увеличению f_0 . Рассматривая НК блока как балку, можно воспользоваться для расчёта f_0 следующей формулой сопромата:

$$f_0 = \frac{\gamma}{l^2} \sqrt{\frac{EJ}{m}}, \quad (4.8)$$

где l – длина пролёта балки, m ; m' – приведённая погонная масса, в случае равномерно распределённой массы m'_0 , $m' = m'_0$; γ – коэффициент, зависящий от способа закрепления: для шарнирно опертой балки $\gamma = 1,57$; для балки с жёстко защемлёнными концами $\gamma = 3,56$; для балки со смешанным закреплением (один конец шарнирно оперт, другой жёстко закреплён) $\gamma = 2,45$; для консольной балки с жёстким защемлением $\gamma = 0,56$.

Из формулы (4.8) следует, что резонансная частота f_0 может быть увеличена за счёт сокращения длины l , увеличения размеров поперечного сечения (т.е. осевого момента инерции сечения J) или за счёт применения материала с большим модулем упругости E . Значения модуля упругости материалов приведены в табл. 4.2.

Последовательность расчёта вибропрочности блока.

1. Рассчитываем f_0 по формуле (4.7), при этом коэффициент жёсткости находим по соотношению (4.2).
2. Вычисляем f_0 по формуле (4.8), при этом осевой момент инерции сечения J находим по формуле (4.4).

Таблица 4.2

| Материал | $E \cdot 10^{-10}$, Па | Материал | $E \cdot 10^{-10}$, Па |
|--------------------------------------|-------------------------|--------------------|-------------------------|
| 1. Стали углеродистые и легированные | 22 | 6. Латунь | 9,5 |
| 2. Алюминий и его сплавы | 7,3 | 7. Медь | 9,0 |
| 3. Бронза алюминиевая | 10,5 | 8. Текстолит | 1,0 |
| 4. Бронза фосфористая | 11,5 | 9. Стеклотекстолит | 2,0 |
| 5. Бронза бериллиевая | 13,5 | 10. Гетинакс | 1,5 |

3. Из полученных значений f_0 (п.п. 1 и 2) выбираем меньшее и сравниваем с заданной (нагрузочной) частотой вибрации.

Если $f_0 < f$, то следует изменить конструкцию или заменить материал её. Кроме вышеприведённого можно воспользоваться также методикой оценочного расчёта вибропрочности по [12]. Надо заметить, что основной расчётной моделью в предлагаемой методике следует считать блок в своём нормальном рабочем положении, т.е. это может быть блок в стойке, закреплённый лицевой панелью в четырёх точках винтами и по задней стенке двумя ловителями (получаем балку, закреплённую с двух сторон, одна сторона жёстко, другая с одной степенью свободы). Или это может быть моноблок с креплением в плоскости основания, или с креплением к стене или как-либо еще. Подразумевается, что вибропрочность отдельных конструктивов была проверена при их проектировании.

Если из расчёта выясняется, что вибропрочность конструкции недостаточна, то вводят добавочные крепления, рёбра жёсткости, отбортовки, замкнутые внутренние коробчатые конструкции и т.д. Можно использовать материалы с хорошими демфирующими свойствами (например, магниевые сплавы) или специальные демфирующие покрытия.

В крайне неблагоприятных случаях следует менять конструкцию, либо вводить систему амортизации. Необходимо заметить, что амортизация весьма полезна и для защиты от линейных ускорений, носящих к тому же часто нерегулярный случайный характер.

4.4. РАСЧЁТ УДАРОПРОЧНОСТИ

Удар – кратковременный импульс, длительностью меньше половины периода. Расчёт проведём для двух форм ударного импульса – прямоугольной и полусинусоидальной (рис. 4.3). Максимальное воздействие на НК оказывает импульс прямоугольной формы. Указанные формы импульса обусловлены тем, что непосредственно на НК действует не удар, а ударная волна, прошедшая через шкаф, стойку или упругую систему амортизаторов. Кратковременный импульс силы успевает возбудить лишь колебания РЭС собственной резонансной частоты f_0 , если f_0 велика, то амплитуда колебаний падает быстрее. Поэтому надо стремиться к росту f_0 .

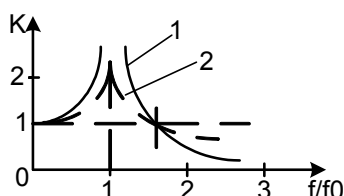


Рис. 4.3. Расчёт на воздействие вибраций:

a – полусинусоидный; b – прямоугольный

Длительность удара для полупериода синусоидального колебания

$$\tau_{и} = \frac{T}{2} = \frac{\pi}{\omega}$$

Полагая $\omega = 2\pi f_0$, имеем

$$\tau_{и} = \frac{\pi}{2\pi f_0} = \frac{\pi}{\sqrt{\lambda/m}}$$

Последовательность расчёта ударопрочности НК.

1. Определяем условную частоту ударного импульса

$$\omega = \frac{\pi}{\tau}$$

где τ – длительность ударного импульса.

2. Рассчитываем ударное ускорение

$$a_y = A_y K_y,$$

где A_y – амплитуда ускорения ударного импульса; K_y – коэффициент передачи удара:

– для прямоугольного импульса

$$K_y = 2 \sin \frac{\pi}{2\nu};$$

– для полусинусоидального импульса

$$K_y = \frac{2\nu}{\nu^2 - 1} \cos \frac{\pi}{2\nu};$$

$\nu = \frac{\omega}{\omega_0} = \frac{\omega}{2\pi f_0}$, ν – коэффициент расстройки (относительная частота); f_0 – собственная резонансная частота НК.

3. Проверяем условие ударопрочности по ускорению

$$a_y < a_{y, \text{доп}},$$

где $a_{y, \text{доп}}$ – допустимое ударное ускорение. Для ЭРЭ $a_{y, \text{доп}}$ определяется из анализа элементарной базы, что более критично по сравнению с НК.

4. Определяем максимальное относительное перемещение:

– для прямоугольного импульса

$$Z_{\max} = \frac{2A_y}{2\pi f_0} \sin \frac{\pi}{2\nu} = \frac{A_y}{2\pi f_0} K_y;$$

– для полусинусоидального импульса

$$Z_{\max} = \frac{2A_y}{2\pi f_0} \frac{\nu}{\nu^2 - 1} \cos \frac{\pi}{2\nu} = \frac{A_y}{2\pi f_0} K_y.$$

5. Проверяем условие ударопрочности по максимальному относительному перемещению:

– для пластин

$$Z_{\max} < \delta_{\text{доп}} l^2,$$

где $\delta_{\text{доп}}$ – допустимый размер стрелы прогиба на длине 1 м;

– для фольгированных стеклотекстолита и гетинакса $\delta_{\text{доп}}$ определяется из табл. 4.3;

– для ПП с ЭРЭ

$$Z_{\max} < 0,003b,$$

где b – размер стороны, параллельно которой установлены ЭРЭ;

– для амортизированных систем

$$Z_{\max} < Z_{\text{св}},$$

где $Z_{\text{св}}$ – свободный ход амортизатора.

Таблица 4.3

| Номинальная толщина листа, мм | Допустимая стрела прогиба $\delta_{\text{доп}}$, мм | | | |
|-------------------------------|--|----------|----------------------------|----------|
| | одностороннее фольгирование | | двустороннее фольгирование | |
| | стеклотекстолит | гетинакс | стеклотекстолит | гетинакс |
| 0,8 | 109 | 109 | 22 | 55 |
| 1,0 | 109 | 109 | 22 | 55 |
| 1,5 | 30 | 55 | 11 | 27 |
| 2,0 | 25 | 40 | 11 | 20 |
| 2,5 | 15 | 30 | 11 | 15 |
| 3,0 | 15 | 30 | 11 | 15 |

Расчёт ударного воздействия при падении РЭС.

1. Определяем скорость РЭС в момент соударения

$$v_y = \sqrt{2gH},$$

где H – высота падения РЭС.

2. Определяем скорость отскока

$$v_{\text{от}} = v_y K_B,$$

где K_B – коэффициент восстановления скорости, выбирается из табл. 4.4.

Таблица 4.4

| Материалы соударяющихся тел | K_b |
|-----------------------------|-------|
| Сталь–бетон | 0,90 |
| Сталь–сталь | 0,94 |
| Сталь–сухая земля | 0,68 |
| Сталь–пенопласт | 0,55 |

3. Рассчитываем относительную скорость соударения

$$v_0 = v_y + v_{от}.$$

4. Вычисляем действующее на РЭС ускорение

$$a_y = v_0 2\pi f_0.$$

5. Для сравнения рассчитываем ударное ускорение по формуле

$$a_y = \frac{v}{\tau} = \frac{v\omega}{\pi} = \frac{v2\pi f_0}{\pi} = 2f_0 \sqrt{2gH}.$$

6. Проверяем условие ударпрочности по ускорению

$$a_y < a_{y \text{ доп}}.$$

Для ЭРЭ допустимое ударное ускорение определяется на анализа элементной базы, что более критично по сравнению с элементами НК.

4.5. РАСЧЁТ НА ПРОЧНОСТЬ РЕЗЬБОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Разрушение резьбовых соединений (винтов, болтов, шпилек) может привести к потере работоспособности несущей конструкции или разгерметизации стыков. Разрушение обычно (при статических и переменных нагрузках) происходит по резьбовой части; реже встречаются поломки винтов и болтов под головкой и срез винтов резьбы в гайке (или в материале несущей конструкции) и на винте. Как правило, оценку прочности резьбовых соединений производят, исходя из расчёта по допускаемым напряжениям. Рассмотрим два наиболее часто встречающихся на практике случая нагружения резьбовых соединений.

1. Винт (шпилька) установлен в отверстие несущей конструкции (например, для соединения крышки с корпусом и т.п.) и нагружен осевой растягивающей силой F (рис. 4.4).

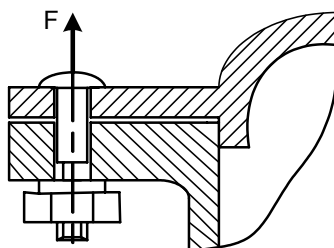


Рис. 4.4. Винт (шпилька) установлен в отверстие несущей конструкции (например, для соединения крышки с корпусом и т.п.) и нагружен осевой растягивающей силой F

Напряжение растяжения в сечении по внутреннему диаметру d_1 резьбы

$$G_p = \frac{F}{S} = \frac{4F}{\pi d_1^2}.$$

Условие прочностной надёжности стержня болта по допускаемому напряжению на растяжение $[G_p]$

$$G_p \leq [G_p].$$

Тогда величина внутреннего диаметра резьбы болта

$$d_1 \geq \sqrt{\frac{4F}{\pi [G_p]}}.$$

Механические характеристики материалов винтов (болтов) и шпилек из углеродистых и легированных сталей согласно ГОСТ 1759–82 приведены в табл. 4.5.

По найденной величине d_1 выбираем ближайшее большее значение, а также наружный диаметр и шаг резьбы в соответствии с ГОСТ 9150–81.

Таблица 4.5

| Винт и гайка из стали марки | 35 | 45 | 38ХА | 30ХГСА |
|-----------------------------|-----|-----|------|--------|
| Напряжение, МПа | | | | |
| $[G_p]$ | 200 | 250 | 300 | 300 |
| G_T | 300 | 360 | 640 | 900 |

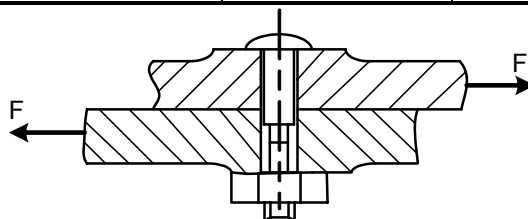


Рис. 4.5. Винт (шпилька) установлен в отверстие соединяемых деталей и нагружен поперечной силой

2. Винт (шпилька) установлен в отверстие соединяемых деталей и нагружен поперечной силой F (рис. 4.5). Разрушение может произойти из-за среза винта в сечении, лежащем в плоскости стыка деталей.

По аналогии с предыдущим случаем нагружения, получим

$$d_1 \geq \sqrt{\frac{4F}{\pi [\tau_c]}}.$$

где $[\tau_c]$ – допускаемое напряжение на срез, МПа; $[\tau_c] = (0,2 \dots 0,3) G_T$; G_T – предел текучести материала винта (см. табл. 4.5).

Примечание. Подбор элементов резьбовых соединений рекомендуется выполнять с использованием программы расчёта на ЭВМ, приведённой в приложении.

Примечания к разделу 4.

1. Проверке на устойчивость к внешним механическим воздействиям в соответствии с требованиями [16], как правило, подвергается не отдельно взятая (ненагруженная) НК, а НК механически нагруженная конструктивами.

2. Проверку ударпрочности следует производить только для моноблоков групп 6 и 7 по [16].

3. Кроме вышеизложенных указаний студентам допустимо так же пользоваться и другими методиками, приводимыми в учебной и технической литературе в соответствующих этим методикам случаях.

5. ГЕРМЕТИЗАЦИЯ БЛОКОВ РЭС

Герметизация блоков, содержащих бескорпусные интегральные схемы (ИС) и микросборки (МСБ), осуществляется с целью предотвращения воздействия внешних климатических факторов на бескорпусные элементы,

входящие в состав ИС и МСБ, т.е. герметизируют для установления внутри корпуса блока допустимой относительной влажности и состава газового наполнителя, что определяется техническими условиями на входящие в состав блока бескорпусные элементы.

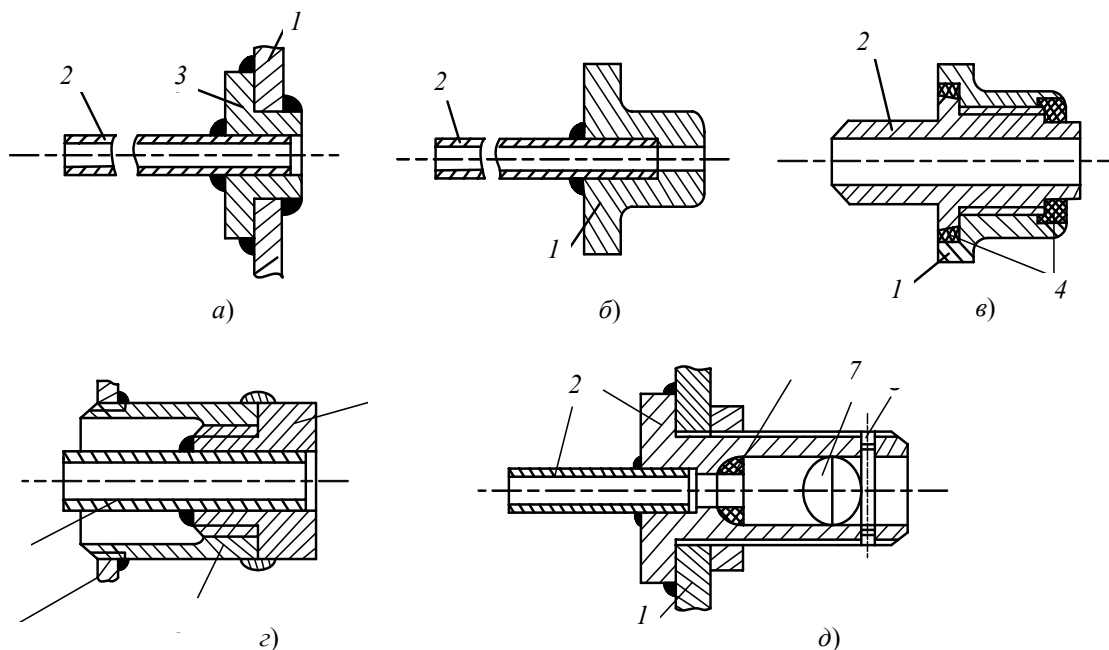


Рис. 5.1. Конструкции откачных трубок:

1 – корпус; 2 – трубка; 3 – втулка; 4 – компаунд; 5 – стакан; 6 – резиновый уплотнитель; 7 – шарик; 8 – штифт

Для создания наиболее благоприятного микроклимата внутри корпуса блока внутренний объём блока через откачную трубку заполняется инертной средой в виде различных газов или смесей газов. Для того чтобы увеличить срок эксплуатации или хранения герметичных блоков до профилактического ремонта, внутренний объём блока заполняется инертной средой с избыточным давлением не более $12 \cdot 10^4$ Па через откачные трубки (рис. 5.1, а – д).

Для создания инертной среды используют сухой азот, который по своим тепловым характеристикам приравнивается к воздуху. В последнее время широко проводятся работы по использованию в качестве инертной среды различных нетоксичных жидких растворов, обладающих теплопроводностью на порядок выше, чем у сухого азота. Однако еще не полностью изучено влияние этих жидкостей на электрические параметры бескорпусных элементов и соответственно на их надёжность.

Герметичность блоков обеспечивается герметизацией их корпусов и внешних электрических соединителей, которые устанавливаются на лицевой или задней панелях корпуса. Учитывая специфику герметизации корпусов блоков и электрических соединителей, эти вопросы необходимо рассматривать отдельно.

Герметизация корпусов блоков может осуществляться следующими способами: сваркой основания и корпуса блока; паяным демонтируемым соединением корпуса (основания) с крышкой (кожухом) блока; уплотнительной прокладкой. Выбор способа герметизации определяется требованиями, предъявляемыми к блокам в зависимости от условий эксплуатации, габарита (объёма) блока, а также материалов, используемых в корпусе и в основании блока.

Герметизацию с помощью сварки применяют для блоков, объём которых не превышает $0,5 \text{ дм}^3$ и не подлежащих ремонту. Вскрытие таких блоков возможно только с помощью механического снятия сварного шва, что влечёт за собой обязательное попадание металлической пыли на бескорпусные элементы и соответственно их отказ. Этот способ герметизации широко используется для герметизации корпусов ИС и МСБ и обеспечивает степень натекания $V_{\text{н}} = 10^{-9}$ л·мкм/с. Герметизация с помощью паяного демонтируемого соединения применяется для блоков, объём которых лежит в пределах $0,5 \dots 5 \text{ дм}^3$. Этот способ обеспечивает степень натекания $V_{\text{н}} = 10^{-6}$ л·мкм / с, что гарантирует работоспособность блока.

Конструктивные элементы герметизации блоков паяным соединением приведены на рис. 5.2, а – з. К элементам паяного соединения конструкции блока предъявляются следующие требования: для устранения перегрева блока в момент пайки в элементах конструкции корпуса крышки, вблизи паяного соединения, необходимо предусмотреть тепловую канавку; прокладку следует выполнять прямоугольного сечения из термостойкой резины; диаметр проволоки должен быть меньше ширины зазора между крышкой и корпусом на $0,1 \dots 0,2 \text{ мм}$.

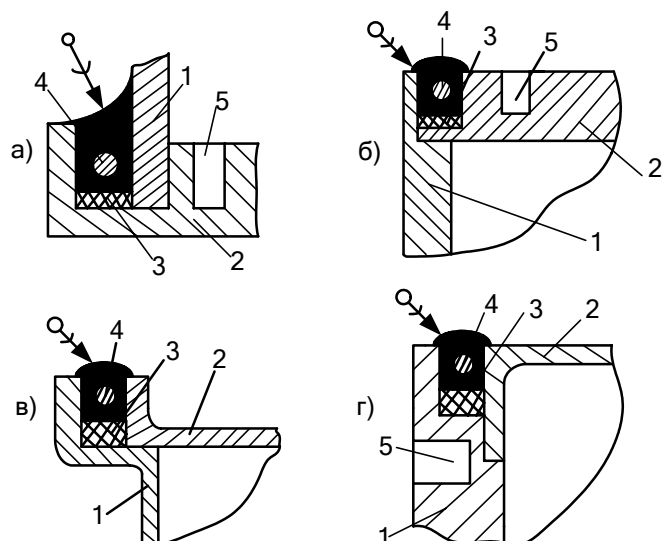


Рис. 5.2. Рекомендуемые варианты паяных соединений:
 1 – корпус блока; 2 – крышка; 3 – прокладка уплотнительная;
 4 – проволока; 5 – тепловая канавка

Особое внимание при проектировании герметичных блоков следует уделять выбору материалов составных частей корпуса блока. Рекомендуемые материалы и покрытия элементов конструкций корпусов блоков, герметизируемых паяным демонтируемым соединением приведены в табл. 5.1.

Таблица 5.1

| Материал | Покрытие | Условия эксплуатации |
|-----------------------|--------------------|----------------------|
| Алюминиевый сплав АМц | Н12.0-Ви (99,7)6 | Легкие |
| Алюминиевый сплав АМг | Н24.0-Ви (99,7)12 | Средние |
| Алюминиевый сплав Д16 | Н24.0-Ви (99,7)12 | Жёсткие |
| Алюминиевый сплав В95 | Н24.0-Ви (99,7)12 | Жёсткие |
| Латунь Л63 | Ср6.Н3.0-Ви(99,7)3 | Средние |
| Латунь ЛС59-1 | Н3.0-Ви (99,7)6 | Жёсткие |
| Сталь 10КП | М3.0-Ви (99,7)3 | Средние |
| Сталь 20 | М3.0-Ви (99,7)3 | Средние |
| Титановый сплав ВТ1 | Н6/М3.Ср6 | Жёсткие |

В паяном соединении проволока над прокладкой укладывается по всему периметру соединения. Один из концов проволоки выводится через паз в крышке из зоны соединения и обычно укладывается в тепловую канавку. Расстояние по всему периметру соединения заполняется легкоплавким припоем, как правило, ПОС-61. Данное паяное соединение позволяет демонтировать (вскрывать корпус) блока до трёх раз.

В целях предотвращения нарушения герметичности блока наружная поверхность паяного соединения не должна быть установочной поверхностью блока и все элементы крепления блоков должны располагаться на максимально возможном расстоянии от паяного соединения.

Герметизация с помощью уплотнительных прокладок применяется для блоков, объём которых превышает 3 дм³, так как блоки меньших объёмов герметизировать данным способом нецелесообразно из-за больших потерь на элементы крепления. Этот способ обеспечивает скорость натекания $V_{\text{ш}} = 10^{-3}$ л·мкм/с. Конструктивные элементы герметизации корпусов блоков уплотнительными прокладками приведены на рис. 5.3.

Размеры конструктивных элементов выбираются в зависимости от герметизируемого объёма и избыточного давления, создаваемого в нём. Ширина фланца определяется по формуле $B_{\text{ф}} = 2\delta_{\text{с}} + 2,6d_{\text{к}}$, где $\delta_{\text{с}}$ – толщина стенки корпуса (кожуха); $d_{\text{к}}$ – диаметр крепёжного болта. Высота фланца h_1 должна быть максимально допустимой. Материал для изготовления болтов должен иметь предел текучести $a_{\text{т}}$ в два или в три раза выше предела текучести материала фланца.

Размеры канавки и прокладка находятся в следующей зависимости: $a_{\text{к}}t_{\text{к}} \approx 1,15b_{\text{пр}}$, где $a_{\text{к}}$ – ширина канавки; $t_{\text{к}}$ – высота канавки; $b_{\text{пр}}$ – ширина прокладки; $m_{\text{пр}}$ – высота прокладки.

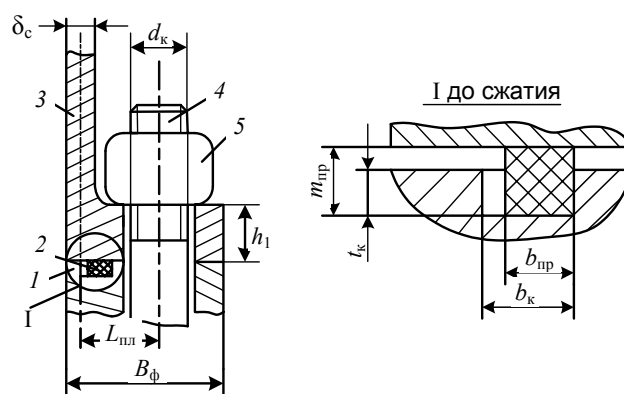


Рис. 5.3. Герметизация корпуса блоков уплотнительной прокладкой:

1 – основание блока; 2 – прокладка уплотнительная; 3 – корпус блока;
4 – болт; 5 – гайка

Плечо $L_{пл}$ определяется по формуле $L_{пл} = 1,5\delta_c + 1,1d_k$. Количество болтов и шаг их установки определяется на основе учёта внутреннего избыточного давления в блоке и усилия, необходимого для деформации уплотнительного кольца для герметизации блока.

Межблочная электрическая коммутация в герметичных блоках осуществляется с помощью герметичных разъёмов типа РСГ или врубных разъёмов типа РПС1 с учётом обеспечения их герметичности. Однако номенклатура существующих электрических соединителей широкого применения не обеспечивает потребность разработчиков герметичной микросистемной аппаратуры, поэтому часто разработчик проектирует специальные электрические соединители с использованием типовых требований к металлостеклянным соединителям.

Герметизация электрических соединителей широкого применения в герметичных блоках показана на рис. 5.4 – 5.6. Герметизация электрических соединителей осуществляется следующими способами: прокладками (рис. 5.4), прокладками и заливкой компаундами мест соединения разъёма с корпусом (рис. 5.5) и пайкой монтажной платы электрического соединителя с корпусом с последующей заливкой компаундами места соединения (рис. 5.6, а, б). Монтажная плата, используемая для герметизации, должна иметь металлизированную поверхность по всему периметру с двух сторон и по торцу.

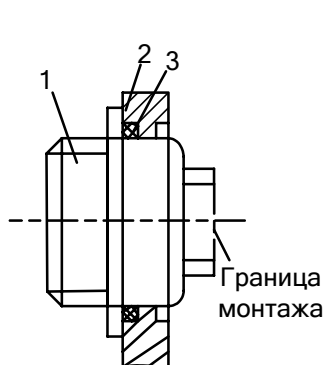


Рис. 5.4. Герметизация вилки электрического соединения РСГ уплотнительной прокладкой:

1 – вилка электрического соединителя; 2 – корпус блока;
3 – прокладка уплотнительная

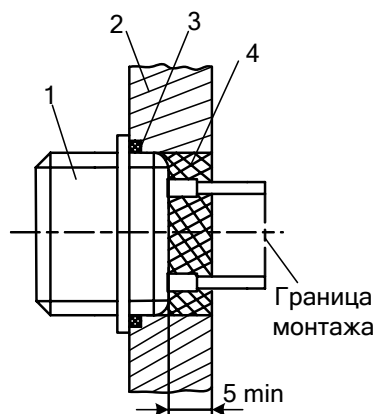


Рис. 5.5. Герметизация вилки электрического соединения РСГ уплотнительной прокладкой и компаундом:

1 – вилка электрического соединителя;
2 – корпус блока; 3 – прокладка уплотнительная; 4 – компаунд

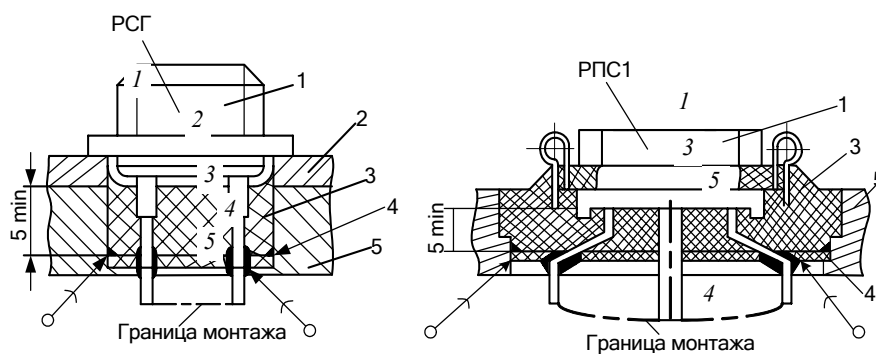


Рис. 5.6. Герметизация вилки электрического соединителя опайкой платы и заливкой компаундом:

1 – вилка электрического соединителя; *2* – пластина; *3* – компаунд;
4 – плата; *5* – корпус блока

При герметизации двумя последними способами выводы электрических соединителей должны удлиняться жёсткой проволокой с помощью пайки. Выбор способа герметизации электрических соединителей определяется требованиями, которые предъявляются к блокам в условиях эксплуатации, а также с учётом материалов и покрытий элементов конструкции корпусов блоков.

Герметизация и конструкции специальных электрических соединителей, герметичность которых осуществляется с помощью металlostеклянных соединений, имеет ряд специфических аспектов, поэтому этот вопрос следует рассмотреть подробнее. Все металlostеклянные соединения, которые используются при проектировании микросхем, микросборок и герметичных блоков микроэлектронной аппаратуры, можно разделить на следующие типы: глазковые, дисковые, окошечные и плоские.

Глазковые соединения применяются при изготовлении цоколей реле, оснований корпусов ИС и МСБ, гермовводов, металлических ножек электровакуумных приборов, вилок штепсельных электрических соединителей и подобных изделий.

Дисковые соединения используются при изготовлении многоконтактных токовых вводов, вилок электрических соединителей, узлов электровакуумных приборов, оснований корпусов.

Окошечные соединения применяются при изготовлении окон резонаторов, высокочастотных фильтров и смотровых окон приборов, необходимых для визуального контроля.

Плоские соединения используются при изготовлении оснований металlostеклянных корпусов ИС и МСБ с прямоугольным сечением выводов.

Металlostеклянные соединения в зависимости от используемых материалов подразделяются на согласованные и несогласованные (сжатые) спаи. Под согласованными спаями понимаются соединения, в которых коэффициенты температурного расширения (КТР) спаиваемых материалов (стекло-металл обоймы) равны или мало отличаются друг от друга. В свою очередь, под несогласованными спаями понимаются соединения, в которых КТР спаиваемых материалов (стекло – металл обоймы) резко отличаются друг от друга в интервале температур от комнатной до температуры размягчения стекла. Поэтому при проектировании отдельных узлов микроэлектронной аппаратуры необходимо большое внимание уделять выбору материалов и соответственно их взаимному сочетанию.

Материалы для изготовления металlostеклянных соединений и допустимые их сочетания приведены в табл. 5.2 и 5.3. Область применения с учётом условий эксплуатации аппаратуры, а также предельные эксплуатационные характеристики металlostеклянных соединений выбираются с учётом рекомендаций, приведённых в табл. 5.4.

Таблица 5.2

| Наименование | ГОСТ |
|--|---------------|
| <i>Металлы и сплавы</i> | |
| Молибден марки МНР | ГОСТ 18905–73 |
| Сталь углеродистая качественная конструкционная марок Сталь 10, Сталь 20, Сталь 45 | ГОСТ 1050–74 |
| Сталь сортовая коррозионно-стойкая и жаростойкая марки Х25Т | ГОСТ 5949–75 |
| Стали высоколегированные и сплавы | ГОСТ 5632–72 |
| коррозионно-стойкие, жаростойкие и жаропрочные марки 12Х18Н10Т | ГОСТ 3836–83 |
| Сталь электротехническая легированная тонколистовая и ленты | ГОСТ 10994–74 |

| | |
|---|-------------|
| Сплавы прецизионные марок 29НК, 30НКД, 38НКД, 47НД <i>Стекло</i> Стекло для электровакуумных приборов марок С38-1, С48-1, С52-1, С72-1, С89-1, С89-8, С90-1, С48-2 Стекло марок С65-1, С54-1 Стекло оконное листовое <i>Керамика</i> Материалы керамические для электровакуумной промышленности марок М-7 | ГОСТ 111–78 |
|---|-------------|

Таблица 5.3

| Материал обоймы | Марка стекла | | Материал волновода | Максимальная температура нагрева соединения, °С |
|---------------------------|--|---------------------------|------------------------|---|
| | для согласованного спая | для несогласованного спая | | |
| Сплав 29НК (ковар) | С48-1 | – | Сплав 29НК | 300 |
| | С48-2 | | | |
| | С-52 | | | |
| Сплав 30НКД | Композиция состава: 85 % С48-2 + + 15 % М-7 | – | Сплав 30НКД | 350 |
| | С38-1 | | | |
| | С65-1 | | | |
| Сплав 38НКД | С72-4 | – | Сплав 38НКД | 300 |
| | – | С48-1 | Сплав 29НК Молибден | 300 |
| Сплав 47НД | С89-1 | С48-2 | | |
| | С89-8 | С52-1 | | |
| | С90-1 | – | | |
| Сталь 10 | – | – | Сплав 47НД | 250 |
| Сталь 20 | – | С48-1 | Сплав 29НД | 300 |
| Сталь 45 | – | С48-2 | Молибден | |
| Сталь Х25Т | – | С52-1 | Сплав 38НКД | |
| Сталь 12Х18Н10Т | – | С65-1 | | |
| Сталь электро-техническая | – | С72-4 | Сплав 29НК | |
| | | С48-1 | | |
| Титан | – | С48-2 | Молибден | 300 |
| | | С52-1 | Сплав 38НКД | 300 |
| | | С65-1 | | |
| Сталь электро-техническая | – | С72-4 | Сплав 47НД | 250 |
| | | С89-1 | | |
| | | С89-8 | | |
| | | С90-1 | Сплав 38НКД | 300 |
| | | С65-1 | | |
| С54-1 | Молибден | 500 | | |
| Оконное | – | – | 125 | |
| Стекло | – | – | | |
| Эмаль | – | – | | |

Для более чёткого определения области применения различных типов металлостеклянных соединений останемся отдельно на каждом из них. Вначале рассмотрим глазковые соединители.

Под глазковыми соединениями следует понимать соединения, в которых один или несколько выводов впаяны (оплавлены) в металлическую обойму через индивидуальный для каждого вывода изолятор. Такие варианты конструкций глазковых соединителей представлены на рис. 5.7 и 5.8. Размеры конструктивных элементов глазковых соединений выбираются по табл. 5.4.

Глазковое соединение, представленное на рис. 5.7, предназначено для герметизации одинарного вывода. Соединение, представленное на рис. 5.8, а, б, применяется в аппаратуре при герметизации нескольких выводов. Глазковые

соединения выполняются в виде согласованного и несогласованного спаев. Однако, соединение, представленное на рис. 5.7, в, может быть сделано только в виде согласованного спаев, так как при несовпадении КТР применяемых материалов в процессе эксплуатации наблюдаются трещины стекла.

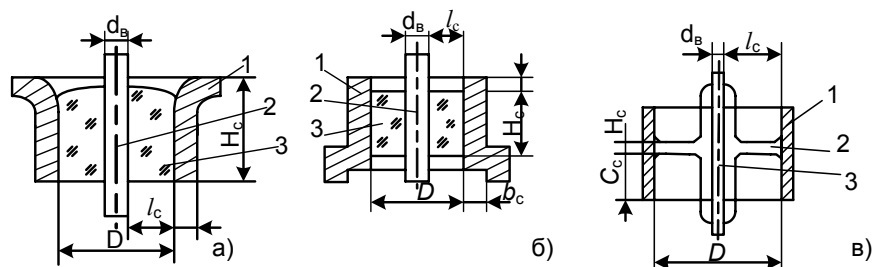


Рис. 5.7. Глазковые одновыводные соединения:

a – конструкция с отбортовкой (или вытяжкой) глазка в тонколистовом металле;
б и *в* – конструкции с пробивкой (или сверлением) глазка в толстостенном металле; *l* – металлическая обойма;
 2 – вывод (стержень или трубка);
 3 – стеклянный изолятор

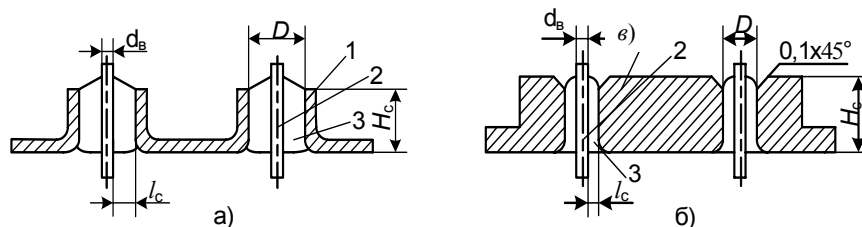


Рис. 5.8. Глазковые многывыводные соединения:

a – конструкция с отбортовкой глазка в тонколистовом металле; *б* – конструкция с пробивкой или сверлением в толстом металле; *l* – металлическая обойма;
 2 – вывод (стержень или трубка); 3 – стеклянный изолятор

Таблица 5.4

| <i>a)</i> | | <i>б)</i> | | |
|-----------------------|---|---------------------------|---|---|
| Диаметр спая D , мм | Протяжённость спаев по обойме $H_{об}$, мм | Диаметр вывода d_b , мм | Расстояние от края обоймы до спаев C_c , мм | Толщина стенки обоймы по месту спаев b_c , мм, не менее |
| 0,8...1,5 | 0,8...3 | 0,3...0,5 | 0...0,5 | 0,5 |
| 1,5...4 | 1...3 | 0,3...1,5 | 0...0,5 | 0,5 |
| 4...10 | 2...10 | 1...3 | Не менее 0,5 | 0,6 |
| 10...20 | 5...20 | 1,5...8 | Не менее 0,5 | 1,5 |

Примечания:

1. Диаметр спаев соответствует диаметру глазка обоймы.
2. Приведённые в таблице C_c и b_c относятся к несогласованным спаям; для согласованных спаев эти размеры не регламентируются.
3. В указанных пределах величин в несогласованных спаях меньшим диаметром спаев соответствует меньшее значение C_c .
4. Для несогласованных спаев при C_c , равном нулю, не допускается выпуклый мениск стекла.

В конструкциях, приведённых на рис. 5.7, *a* и 5.8, *a*, металлическую обойму выполняют из тонколистового металла с формованием глазка методом вытяжки или отбортовки, обычно такие обоймы выполняются методом холодной штамповки. Формирование глазков при использовании конструкций, приведённых на рис. 5.7, *б*, *в* и 5.8, *б*, осуществляется в толстостенном металле путём пробивки или механического сверления. Если толщина обоймы в конструкции рис. 5.8, *б* более 2 мм, то в отверстиях необходимо образовывать фаску под углом 45° с размером 0,1 мм. Во всех глазковых соединениях расстояние l_c между выводом и стенкой металлической обоймы должно быть больше или равно 0,8 от диаметра вывода; при использовании в качестве вывода трубки расстояние между трубкой и стенкой металлической обоймы составляет 0,5 от диаметра трубки.

Область применения и предельные эксплуатационные характеристики металlostеклянных соединений показаны в табл. 5.5.

Допуски на межцентровые расстояния отверстий в металлической обойме и в глазковом многовыводном соединении должны быть взаимосвязаны и определяются требованиями, предъявляемыми к межцентровым расстояниям в готовом изделии. Пример установления допуска на межцентровые расстояния в соединении и обойме приведён в табл. 5.6.

Размеры конструктивных элементов (обоймы, вывода и изолятора) устанавливаются таким образом, чтобы обеспечить определённые зазоры между деталями при сборке (рис. 5.9).

Таблица 5.5

| Тип соединения | Область применения соединения | Эксплуатационные характеристики | | | | Примечания |
|----------------|----------------------------------|---------------------------------------|--|--|-----------------|---|
| | | допустимая степень истекания, л·мкм/с | сопротивление изоляции в нормальных условиях, Ом, не менее | циклическое воздействие температур, °С | | |
| | | | | верхнее значение | нижнее значение | |
| Глазковое | Цоколи реле | | 10^9 | +150 | -60 | Используются преимущества в согласованных спаях |
| | Основания корпусов МСБ и ИС | | 10^9 | +125 | -60 | |
| | Гермовводы различного назначения | | 10^9 (при 500 не более $5 \cdot 10^8$) | +280 +500 | -60 +20 | |
| Дисковые | Вилки ШР | | 10^9 | +280 | -60 | То же |
| | Гермовводы различного назначения | | - | +80 | -60 | - " - |
| Окошечные | Смотровые окна приборов | | - | +80 | -60 | Используются преимущества в согласованных спаях |
| Плоские | Окна резонаторов и ВЧ-фильтров | | 10^9 | + 125 | -60 | |
| | | Основания корпусов ИС и МСБ | | | | |

Примечание. Конкретные требования на каждый вид изделия устанавливаются техническими условиями.

Таблица 5.6

| Допуск на межцентровое расстояние в глазковом многовыводном соединении | Допуск на межцентровые расстояния в отверстиях металлической обоймы |
|--|---|
| (±0,05) | (±0,02) |
| ±0,1 | ±0,05 |
| ±0,2 | ±0,1 |

Примечание. Допуски, заключённые в скобки, рекомендуется выбирать при конструировании малогабаритных изделий.

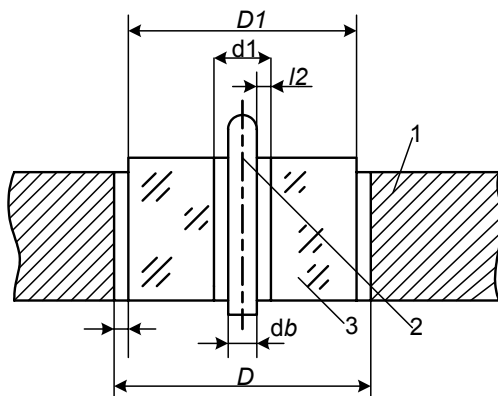


Рис. 5.10. Сборка деталей глазкового соединения:
 1 – металлическая обойма; 2 – вывод; 3 – стеклянный изолятор

Наружный и внутренний диаметры стеклянного изолятора определяются формулами: $D_1 = D - 2l_1$; $d_1 = d + 2l_2$, где D_1 и d_1 – наружный и внутренний диаметры изолятора; D и d_b – диаметры глазка и вывода; l_1 и l_2 – размеры зазоров. Максимально допустимые зазоры между стеклянным изолятором и металлическими деталями выбираются по табл. 5.7.

Таблица 5.7

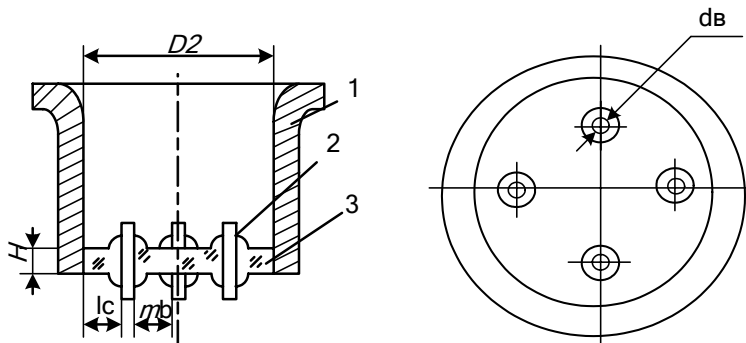
| Диаметр глазка D , мм | Зазор между глазком и изолятором l_1 , мм | Диаметр вывода d_b , мм | Зазор между выводом и отверстием в изоляторе l_2 , мм |
|-------------------------|---|---------------------------|---|
| 0,8...1,5 | 0,03 | 0,3...0,5 | 0,03 |
| 1,5...4 | 0,05 | 0,5...1,5 | 0,05 |
| 4...10 | 0,1 | 1,5...3 | 0,1 |
| 10...20 | 0,5 | 3...8 | 0,2 |

В глазковых соединителях, как правило, реализуется одиночный вывод. Группу выводов позволяет реализовать дисковый соединитель. Под дисковым соединением следует понимать соединение, в котором несколько выводов впаяны (оплавлены) в металлическую обойму через общий стеклянный изолятор (диск).

Варианты конструкций дисковых соединений приведены на рис. 5.11 и 5.12. Размеры конструктивных элементов дисковых соединений выбираются по табл. 5.8.

Дисковые соединения выполняются в виде согласованных и несогласованных спаев. В дисковом соединении (рис. 5.12) стеклянный изолятор располагают симметрично по высоте H_ϕ . Минимальное расстояние между выводами m_b и между выводом и стенкой l_c обоймы должно быть не менее 0,8 от диаметра вывода.

Рис. 5.11. Дисковые соединения. Согласованный спай:



1 – металлическая обойма; 2 – вывод; 3 – стеклянный изолятор

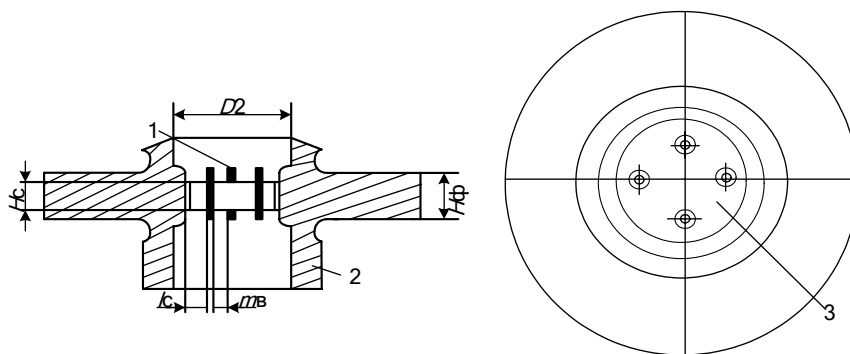


Рис. 5.12. Дискосые соединения. Несогласованный спай:
 1 – вывод; 2 – металлическая обойма; 3 – стеклянный изолятор

Таблица 5.8

| Диаметр спая D , мм | Диаметр вывода d_B , мм | Протяжённость спая по обойме H , мм | Расстояние от края обоймы до спая C_c , мм | Толщина стенки обоймы по месту спая H_c , мм, не менее |
|-----------------------|---------------------------|---------------------------------------|--|--|
| 3...10 | 0,2...2,5 | 2,5...3 | 0...0,5 | 0,5 |
| 10...30 | 0,2...2,5 | 3...6 | Не менее 0,5 | 1,5 |
| 30...60 | 1...10 | 5...10 | Не менее 1 | 4,5 |

Примечания: 1. Приведённые в таблице значения C_c и b_c относятся к несогласованным спаям, для согласованных спаяв эти размеры не регламентируются.

2. В указанных пределах величин в несогласованных спаях меньшим диаметрам спая соответствует меньшее значение C_c .

3. Для несогласованных спаяв при C_c , равном нулю, не допускается выпуклый мениск стекла.

Размеры конструктивных элементов (обоймы, вывода и изолятора) устанавливаются таким образом, чтобы обеспечить определённые зазоры между деталями при сборке (рис. 5.13).

Диаметр изолятора и диаметры отверстий в изоляторе под выводы определяются формулами: $D_3 = D_2 - 2l_1$; $d_0 = d_0 + 2l_2$, где D_3 – диаметр изолятора; d_0 – диаметр отверстия в изоляторе под вывод; D_2 и d_B – диаметр отверстия в обойме и диаметр вывода; l_1 и l_2 – размеры зазоров.

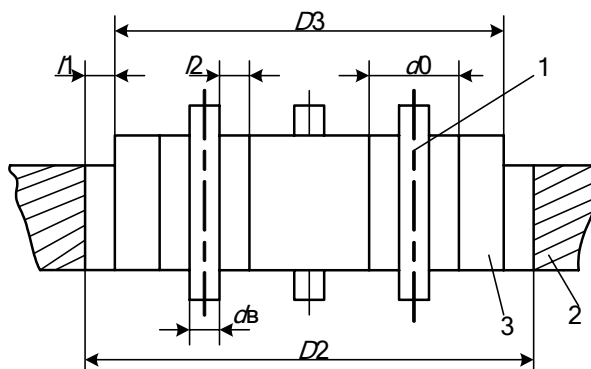


Рис. 5.13. Сборка деталей дискосого соединения:
 1 – вывод; 2 – металлическая обойма; 3 – стеклянный изолятор

| Диаметр отверстия в обойме D_2 , мм | Зазор между обоймой и изолятором l_1 , мм | Диаметр вывода d_b , мм | Зазор между выводом и отверстием в изоляторе l_2 , мм |
|---------------------------------------|---|---------------------------|---|
| 3...10 | 0,1 | 0,2...2,5 | 0,05...0,1 |
| 10...30 | 0,5 | 2,5...5 | 0,1...0,2 |
| 30...60 | 1 | 5...10 | 0,2...0,5 |

Примечание. В указанных пределах меньшим значением диаметра вывода d_b соответствуют меньшие значения зазора l_2 .

Максимально допустимые зазоры между стеклянными изоляторами и металлическими деталями выбираются по табл. 5.9. Следует особо подчеркнуть, что в дисковых соединениях одновременно могут использоваться выводы разных диаметров, что даёт преимущество при проектировании. Под окошечными соединителями следует понимать соединения, в которых в металлическую обойму впаяно стекло в виде диска или пластины.

Окошечные соединения могут быть выполнены методом непосредственного спаивания стекла с металлом (рис. 5.14) или при помощи легкоплавкой эмали (рис. 5.15).

Последний метод исключает деформацию стекла и используется при изготовлении смотровых окон для визуального контроля аппаратуры оператором.

Размеры конструктивных элементов окошечных соединений приведены в табл. 5.10. Соединения, показанные на рис. 5.14, могут выполняться в виде согласованного и несогласованного спаев, а соединение, приведённое на рис. 5.15, – только в виде согласованного. В соединениях, выполненных с помощью легкоплавкой эмали, допускается рассогласование КТР стекла и обоймы на $(20...40) \cdot 10^{-7}$ град $^{-1}$. Эмаль необходимо выбирать таким образом, чтобы её температура плавления была ниже температуры размягчения

Рис. 5.14. Окошечные соединения стекла с металлом:

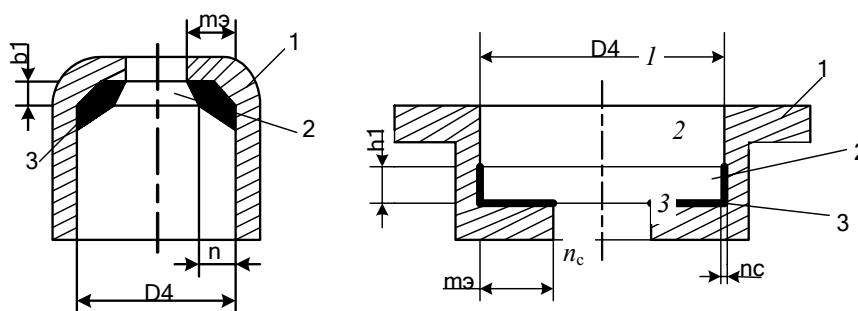
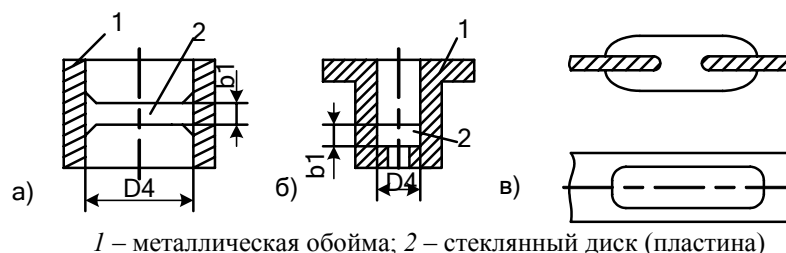


Таблица 5.10

| Внутренний диаметр металлической обоймы D_4 , мм | Толщина впаиваемого стекла b_1 , мм | Зазор между обоймой и стеклом n_c , мм | |
|--|---|--|--|
| | | при непосредственном соедине- нии | при соединении через эмаль, не менее |
| 5...30 | 1...5 | 0,05...0,2 | 0,2 |
| 30...60 | 1,5...5 | 0,05...0,5 | 0,3 |
| 60...150 | 1,5...10 | – | 0,3 |

впаиваемого стекла, а значение КТР эмали равно КТР стекла или находится в пределах между КТР металла и стекла. Наиболее часто применяется эмаль следующего состава: 85 % PbO; 75 % B₂O₃; 75 % SiO₂. Температура оплавления этой эмали составляет 475 ± 5 °С; коэффициент температурного расширения равен $(85...90) \cdot 10^{-7}$ град⁻¹. В соединениях, показанных на рис. 5.15 для фиксации стекла относительно обоймы, в последней следует делать ступеньку шириной 0,5...1,5 мм. Это относится и к лицевым панелям блоков, содержащих герметичные стеклянные окна. В окошечных соединениях углы впаиваемой (оплавляемой) стеклянной пластины должны быть скруглены.

Под плоскими соединениями следует понимать соединения, в которых металлические детали спаяны со стеклом по плоской поверхности. Вариант конструкции плоского соединения приведён на рис. 5.16. Размеры конструктивных элементов соединения выбираются по табл. 5.11.

Максимальная толщина вывода в плоских соединениях равна 0,1 мм. Шаги расположения выводов определяются видом изделий, но обязательно должны быть кратны 2,5 мм.

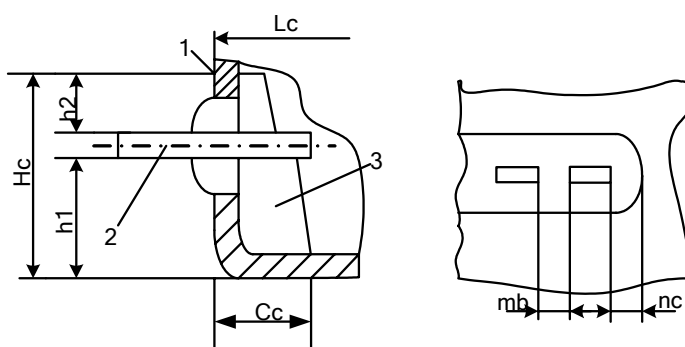


Рис. 5.16. Плоские соединения:

1 – металлическая обойма; 2 – вывод; 3 – стеклянный изолятор

Таблица 5.11

| Протяжённость спая по длине обоймы L_c , мм | Ширина изолятора и протя- жённость спая по ширине обоймы C_c , мм | Протяжённость спая по высоте обоймы H_c , мм | Высота изолятора, мм | |
|---|---|---|-------------------------|---------|
| | | | h_1 | h_2 |
| 11...22 | 1...25,5 | 2...2,3 | 1,3...1,5 | 1...1,1 |

В плоском соединении, представленном на рис. 5.16, расстояние между стенкой обоймы и выводом l_c и между выводами t_b должно быть не менее 0,5 мм. Выше были рассмотрены основные типы металлостеклянных соединений, применяемых в современной герметичной МЭА. Однако в процессе разработки аппаратуры, а точнее тех её частей, где используются металлостеклянные соединения, необходимо учитывать общие технические требования, являющиеся специфическими для перечисленных спаев.

Для согласованных спаев материал наружной металлической детали (обоймы) и стекло следует выбирать с КТР, близкими по своим значениям в интервале температур от комнатной до температуры размягчения стекла. Для несогласованных (сжатых) спаев материал наружной металлической детали (обоймы) следует выбирать с КТР на $(20...80) \cdot 10^{-7}$ град⁻¹ больше КТР стекла.

Для согласованных и несогласованных (сжатых) спаев КТР вывода и стекла должны быть близкими по своим значениям в интервале температур от комнатной до температуры размягчения стекла. В несогласованных

спаях основным размером является толщина стенки металлической обоймы в зоне спая, которая определяется отношением $D_1 \geq 1,3D$, где D_1 – наружный, а D – внутренний диаметр обоймы.

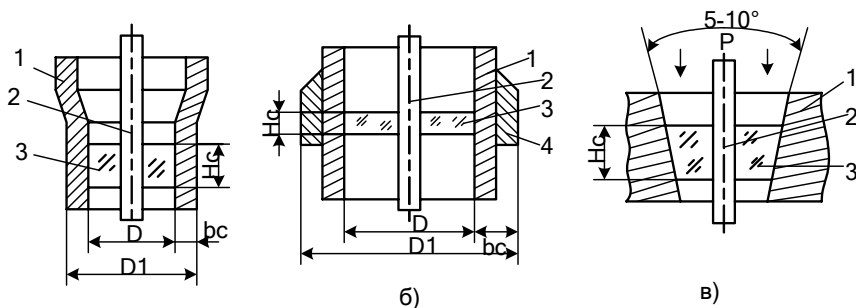


Рис. 5.17. Конструкции металлостеклянных корпусов:

a, б – простейшие конструкции несогласованного спая;
в – конструкция спая, работающего под давлением; *1* – металлическая обойма;
2 – вывод; *3* – стеклянный изолятор; *4* – защитное кольцо

Для получения необходимого напряжения сжатия достаточно увеличить толщину обоймы по месту спая или применить зажимное кольцо, при этом стекло-изолятор следует располагать симметрично по высоте утолщенной части обоймы (рис. 5.17, *a, б*). В несогласованных спаях для предотвращения действия краевого эффекта, который может стать причиной появления трещин в стекле, последнее следует отдалить от края обоймы или заострить его. В соединениях, используемых в герметичных блоках, заполненных инертной средой с избыточным давлением, внутреннюю поверхность обоймы следует делать конусной. Угол при вершине конуса должен находиться в пределах $5 \dots 10^\circ$. Рекомендуемая протяжённость спая по обойме H_c – не менее 3 мм (см. рис. 5.17, *в*). Шероховатость поверхностей металлических деталей в местах спаивания со стеклом должна быть в пределах 5 – 7-го классов чистоты. Кромки деталей, впаиваемые в стекло, не должны иметь заусенцев, острых углов. Все углы следует скруглить.

Соответствие требованиям, предъявляемым к герметичности корпусов блоков (критерий герметичности – допустимая скорость натекания), следует проверять по графикам, приведённым на рис. 5.18 – 5.20, где каждая позиция (1 – 4) графика соответствует определённым условиям эксплуатации МЭА.

Герметичность, определённая по графикам, распространяется на блоки, выполненные в соответствии со следующими требованиями: металлические корпуса блоков должны герметизироваться сваркой, пайкой, уплотнительными резиновыми прокладками, либо одновременно всеми (или несколькими) перечисленными способами герметизации; блоки при изготовлении и смене прокладок должны заполняться сухим азотом; внутренний свободный объём блоков должен лежать в интервале $50 \dots 5000 \text{ см}^3$; критическое сечение должно быть в интервале $0,03 \dots 0,50 \text{ см}$; критическая влажность внутри корпусов должна приниматься равной 60 % при 20°C .

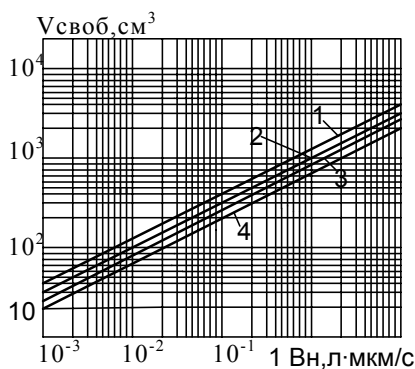


Рис. 5.18. Графики зависимости скорости натекания при герметизации пайкой и сваркой

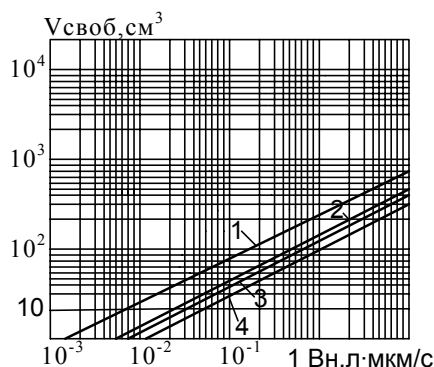


Рис. 5.19. Графики зависимости скорости натекания при герметизации с помощью уплотнительных резиновых прокладок (замена прокладок через три года)

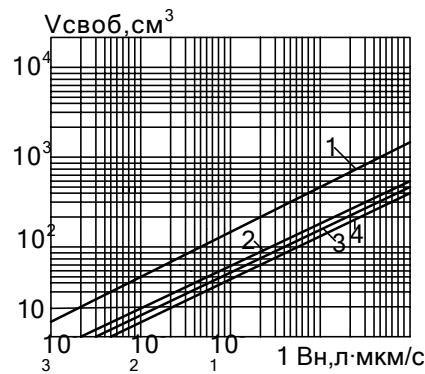


Рис. 5.20. Графики зависимости скорости натекания при герметизации с помощью уплотнительных резиновых прокладок (замена прокладок через пять лет)

Под критическим сечением принимается размер сечения конструктивного элемента герметизации (пайки, сварки или резиновой прокладки). Под критической влажностью следует понимать максимально допустимую влажность внутри корпуса блока с учётом применяемых бескорпусных ЭРЭ и ИС. Для блоков, критическое сечение которых отлично от 0,05 см (l_0) и лежит в интервале 0,03...0,05 см (l_c), определённую по графику расчётную допустимую степень натекания для критического сечения $k = 0,05$ см необходимо умножить на поправочный коэффициент q , равный отношению действительного критического сечения l к критическому сечению $l_0 = 0,05$ см: $q = l_c / l_0$.

Герметичность (критерий герметичности B_p) блока следует принимать равной расчётной допустимой степени натекания B_n для заданного критического сечения с учётом поправочного коэффициента q по формуле: $B_p = B_n q$, где первая значащая цифра округляется до ближайшей цифры 5 или 1 в сторону уменьшения. Если для заданного критического сечения расчётная допустимая степень натекания более 1, то герметичность блока (критерий герметичности) принимается равной 1 л·мкм / с.

6. ОФОРМЛЕНИЕ КОНСТРУКТОРСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ

Конструкторская документация, разрабатываемая студентом в учебном процессе, по объёму должна примерно соответствовать этапу технического проектирования, т.е. состоять из графической части (чертежей) и текстового документа: пояснений, обоснований к чертежам. Состав необходимой графической документации для НК может быть в зависимости от выбранного типа и конкретного решения весьма различным. В общем случае это чертёж сборочной единицы со своей спецификацией и чертежи составляющих сборочную единицу деталей. Однако, в частном случае НК может быть выполнена в виде одной детали, например, представлять собой какой-либо кронштейн сложной формы или литой фрезерованный корпус.

Текстовая часть в случае курсового или дипломного проекта представляет собой специальный раздел (подраздел) общей для проекта пояснительной записки (ПЗ). В нём должны быть обоснованы принятые решения путём изложения использованного принципа отбора вариантов, описаны сами варианты, приведены для каждого варианта необходимые расчёты характеристик и эскизы конструкции для каждого варианта, кроме этого необходимо обосновать выбор необходимых материалов, покрытий и крепежа. Выбор крепежа и покрытий рекомендуется делать применительно к заданным условиям эксплуатации с помощью программ для ЭВМ. Обосновываются также величины зазоров, способы крепления конструктивов, расположение и крепление объёмного монтажа. Схему прокладки жгута по НК показать эскизом. Текстовый материал к лабораторно-конструкторской работе (отчёт) оформляется в том же объёме только в виде отдельной пояснительной записки, причём к такому отчёту должно быть приложено как задание, так и исходная компоновочная схема (эскиз). Отчёт по ЛКР подлежит устной защите.

При оформлении сборочного чертежа НК и чертежей деталей следует строго руководствоваться нормами ЕСКД. Оформление ПЗ производится по нормам ЕСКД для текстовых документов. Основные положения этих норм применительно к учебному процессу изложены в [7].

Примечания:

1. Уместно напомнить, что практикум по разработке электронного блока включает в себя всего пять лабораторно-конструкторских работ (ЛКР), в том числе:

- ЛКР1. Компонование электронного блока;
- ЛКР2. Проектирование несущей конструкции электронного блока;
- ЛКР3. Разработка лицевой панели электронного блока;
- ЛКР4. Герметизация блока или его составных частей;

– ЛКР5. Разработка электромонтажного чертежа.

Лабораторно-конструкторская работа 2 является хотя и частным, но обязательным этапом любого задания по проектированию блока. Поэтому даже в случае применения блока бескаркасного типа надо считать, что несущую конструкцию образует весь комплекс соединённых вместе конструктивов. Прочностной расчёт производится для всего блока в целом, причём особое внимание следует обращать на места соединения конструктивов друг с другом и их крепления.

2. На стадии курсового и дипломного проектов сборка НК иногда может не иметь отдельного чертежа, а выполняться по сборочному чертежу блока в целом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данном учебном пособии рассмотрены наиболее важные вопросы, связанные с разработкой несущих конструкций РЭС. В частности более подробно представлены основные виды несущих конструкций, этапы проектирования несущих конструкций, также рассмотрены вопросы, касающиеся прочностных расчётов в несущих конструкциях и более подробно отражены вопросы герметизации блоков.

Необходимо подчеркнуть, что на каждом этапе конструирования РЭС должны решаться задачи не только технические, но и экономические. Это означает, что на любом этапе проектирования необходимо искать такие конструктивные решения, которые позволяют достигнуть требуемых результатов при минимальных затратах материалов, труда, энергоресурсов как в процессе производства, так и при эксплуатации РЭС.

В настоящее время появляются новые методы моделирования и разработки несущих конструкций. Необходимо подчеркнуть, что на каждом этапе конструирования РЭС должны решаться задачи не только технические, но и экономические. Это означает, что на любом этапе проектирования необходимо искать такие конструктивные решения, которые позволяют достигнуть требуемых результатов при минимальных затратах материалов, труда, энергоресурсов как в процессе производства, так и при эксплуатации РЭС.

Также большую роль при разработке несущих конструкций является применение современных информационных технологий и прикладного программного обеспечения, которое существенно сокращает время разработки несущих конструкций и переводит конструктора на более высокий уровень разработок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Основы конструирования и технологии РЭС : учебное пособие / Ю.Л. Муромцев, А.П. Пудовкин, Н.А. Кольтюков и др. – Тамбов : Изд-во Тамбовского ВВАИУРЭ, 2007. – 267 с.
2. Основы конструирования и технологии радиоэлектронных средств : учебное пособие / Г.Ф. Баканов, С.С. Соколов, В.Ю. Суходольский ; под ред. И.Г. Мироненко. – М. : Академия, 2007. – 368 с. – (Высшее проф. образование).
3. Варламов, Р.Г. Компоновка радиоэлектронной аппаратуры / Р.Г. Варламов. – М. : Энергия, 1990. – 200 с.
4. Токарев, М.Ф. Механические воздействия и защита радиоэлектронной аппаратуры : учебное пособие / М.Ф. Токарев, Е.Н. Талицкий, В.А. Фролов ; под ред. В.А. Фролова. – М. : Радио и связь, 1984. – 275 с.
5. Миннигулов, И.А. Конструирование блоков радиоэлектронной аппаратуры / И.А. Миннигулов. – Рязань : РРТИ, 1977. – 120 с.
6. Ненашев, А.П. Конструирование радиоэлектронных средств / А.П. Ненашев. – М. : Высшая школа, 1990. – 432 с.
7. Несущие конструкции радиоэлектронной аппаратуры / под ред. П.И. Освищера. – М. : Радио и связь, 1988. – 232 с.
8. Проектирование конструкций радиоэлектронной аппаратуры : учебное пособие / Е.М. Парфенов, Э.Н. Камышная, В.П. Усачев. – М. : Радио и связь, 1989. – 272 с.
9. Поляков, К.П. Конструирование приборов и устройств радиоэлектронной аппаратуры / К.П. Поляков. – М. : Радио и связь, 1981. – 240 с.
10. Разработка и оформление конструкторской документации радиоэлектронной аппаратуры : справочник – 2-е изд., перераб. и доп. / Э.Т. Романычева, А.К. Иванова, А.С. Куликов ; под ред. Э.Т. Романычевой. – М. : Радио и связь, 1989. – 448 с.
11. Сватикова, Н.Э. Несущие конструкции РЭА / Н.Э. Сватикова. – М. : МИРЗА, 1978. – 300 с.
12. Справочник конструктора РЭА: Компоненты, механизмы, надёжность / под ред. Р.Г. Варламова. – М. : Радио и связь, 1985. – 800 с.
13. ГОСТ 16019–01. Радиостанции сухопутной подвижной службы. Требования по устойчивости к механическим и климатическим воздействиям и методы испытаний.
14. Белоусов, О.А. Основные конструкторские расчёты в РЭС : учебное пособие / О.А. Белоусов, Н.А. Кольтюков, А.Н. Грибков. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2007. – 84 с.
15. Кольтюков, Н.А. Экранирование в конструкциях РЭС : метод. указ. по выполнению лабораторных работ / Н.А. Кольтюков, О.А. Белоусов. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2007. – 16 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

III. Показатель прочности и жёсткости конструкционных материалов [11]

| Материалы | Удельная плотность, г/см | Предел прочности, МПа | Модуль упругости, $E \cdot 10^2$ | Модуль сдвига, МПа | Удельная жёсткость, км/с ² | Удельная прочность, км/с ² | Фактор жёсткости |
|-----------------------------|--------------------------|-----------------------|----------------------------------|--------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|------------------|
| Сталь углеродистая | 7,85 | 340...780 | 203 | 80 | 25,8 | 10 | 4,2 |
| Сталь легированная | – | 1000...1760 | – | – | – | 23 | 1,4 |
| Сталь сверхпрочная | – | 2000...3500 | – | – | – | 45 | 0,65 |
| Сплавы титана | 4,5 | 700...1800 | 113 | 42 | 25,1 | 40 | 0,8 |
| Бронзы конструкционные | 8,8 | 300...700 | 110 | 42 | 12,5 | 8 | 23 |
| Латуни | 8,65 | 240...500 | 106 | – | 12,3 | 58 | 6 |
| Сплавы алюминиевые литейные | 2,8 | 180...300 | 72 | 25 | 25,8 | 110 | 3,6 |

| Материалы | Удельная плотность, г/см | Предел прочности, МПа | Модуль упругости, $E \cdot 10^2$ | Модуль сдвига, МПа | Удельная жёсткость, км/с ² | Удельная прочность, км/с ² | Фактор жёсткости |
|---------------------------|--------------------------|-----------------------|----------------------------------|--------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|------------------|
| Деформируемые | – | 400...700 | – | – | – | 250 | – |
| Сплавы магниевые литейные | 1,8 | 150...200 | 45 | 18 | 25,0 | 110 | 2,5 |
| Деформируемые | – | 100...350 | – | – | – | 200 | – |
| Текстолит | 1,6 | 10 | 12 | 2,2 | 75,0 | 6 | – |
| Стеклотекстолит | 1,8 | 250 | 21 | 1,5 | 14,0 | 14 | 2,0 |
| Ситаллы | 3,0 | 500...800 | 150 | – | 50,0 | 260 | – |
| Пресс-порошок АГ-4 | 1,8 | 50 | 35 | – | 19,5 | 28 | – |
| Полистирол ударопрочный | 1,1 | 3,5 | 2,6 | – | 2,4 | 3 | – |

П2. Характеристики блоков различных сечений (значение относительно осей) [7]

| Вид блока | Эскиз | Соотношение в сечении | Отношение B/H | Значение G относительно осей | | |
|----------------|-------|-----------------------|-----------------|--------------------------------|-----------|-------|
| | | | | x_1-x_1 | x_2-x_2 | $y-y$ |
| Блок с кожухом | | $h = H/3$ | 1:1 | 0,773 | 0,52 | 0,688 |
| | | | 1:1,5 | 0,557 | 0,385 | 0,736 |
| | | | 1:2 | 0,482 | 0,324 | 0,77 |
| | | $h = H/4$ | 1:1 | 0,712 | 0,512 | 0,684 |
| | | | 1:1,5 | 0,512 | 0,375 | 0,72 |
| | | | 1:2 | 0,44 | 0,31 | 0,75 |
| | | $h = B/5$ | 1:1 | 0,674 | 0,408 | 0,82 |
| | | | 1:1,5 | 0,52 | 0,312 | 0,924 |
| | | | 1:2 | 0,462 | 0,266 | 1,005 |
| | | $h = B/4$ | 1:1 | 0,681 | 0,414 | 0,844 |
| | | | 1:1,5 | 0,522 | 0,315 | 0,94 |
| | | | 1:2 | 0,464 | 0,268 | 1,025 |

Примечание: 1 – кожух; 2 – каркас; 3 – крышка П-образной формы; 4 – плоская крышка; 5 – винты; 6 – шасси. Оси x_1-x_1 и $y-y$ проходят через середину блока, т.е. на расстоянии $H/2$, $B/2$ соответственно.

| Вид блока | Эскиз | Соотношение в сечении | Отношение B/H | Значение G относительно осей | | |
|-----------------|-------|-----------------------|-----------------|--------------------------------|-----------|-------|
| | | | | x_1-x_1 | x_2-x_2 | $y-y$ |
| Блок с каркасом | | $h = H/10$ | 1:1 | 0,554 | 0,357 | 0,554 |
| | | | 1:1,5 | 0,421 | 0,273 | 0,631 |
| | | | 1:2 | 0,368 | 0,232 | 0,691 |
| | | $h = H/8$ | 1:1 | 0,578 | 0,370 | 0,575 |
| | | | 1:1,5 | 0,433 | 0,279 | 0,652 |
| | | | 1:2 | 0,390 | 0,242 | 0,726 |
| | | – | – | 0,48 | 0,357 | 0,48 |

| Вид блока | Эскиз | Соотношение в сечении | Отношение B/H | Значение G относительно осей | | |
|---------------------------|-------|---------------------------|-----------------|--------------------------------|-----------|-------|
| | | | | x_1-x_1 | x_2-x_2 | $y-y$ |
| Блок с крышками | | $h = H/3$ $h_1 = B/10$ | 1:1 | 0,750 | 0,493 | 0,677 |
| | | | 1:1,5 | 0,560 | 0,357 | 0,704 |
| | | | 1:2 | 0,458 | 0,291 | 0,737 |
| | | $h = H/4$ $h_1 = B/10$ | 1:1 | 0,702 | 0,490 | 0,673 |
| | | | 1:1,5 | 0,526 | 0,355 | 0,699 |
| | | | 1:2 | 0,431 | 0,287 | 0,728 |
| | | $h = H/3$ $h_1 = B/10$ | 1:1 | 0,865 | 0,448 | 0,680 |
| | | | 1:1,5 | 0,602 | 0,338 | 0,717 |
| 1:2 | | | 0,522 | 0,265 | 0,745 | |
| $h = H/4$ $h_1 = B/10$ | | 1:1 | 0,833 | 0,440 | 0,677 | |
| | 1:1,5 | 0,584 | 0,317 | 0,710 | | |
| | | 1:2 | 0,502 | 0,254 | 0,735 | |

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|---|----|
| ВВЕДЕНИЕ | 3 |
| 1. ОПРЕДЕЛЕНИЯ И ТЕРМИНЫ | 4 |
| 2. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЯХ | 7 |
| 2.1. Разновидности | 7 |
| 2.2. Материалы несущих конструкций | 13 |
| 2.3. Требования к несущим конструкциям и их оценки | 19 |
| 2.4. Конструкторские методы обеспечения требований к несущим конструкциям по прочности и жёсткости | 25 |
| 3. ПРОЕКТИРОВАНИЕ НЕСУЩЕЙ КОНСТРУКЦИИ РАДИОЭЛЕКТРОННОГО СРЕДСТВА | 32 |
| 3.1. Исходные данные | 32 |
| 3.2. Уточнение характеристик конструктивов | 32 |
| 3.3. Определение внешнего вида (прообраза) будущего блока | 32 |
| 3.4. Определение числа и расположения плоскостей несущих конструкций. Габариты и объёмы | 33 |
| 3.5. Установление величин зазоров | 35 |
| 3.6. Выбор типа несущих конструкций. Формирование множества вариантов | 36 |
| 3.7. Оценка вариантов | 37 |
| 3.8. Выбор предпочтительного варианта | 37 |
| 4. ПРОЧНОСТНЫЕ РАСЧЁТЫ | 41 |
| 4.1. Общая характеристика механических воздействий на блок РЭС | 41 |
| 4.2. Расчёт жёсткости несущих конструкций и проверка деформаций | 43 |
| 4.3. Расчёт на воздействие вибрации | 46 |
| 4.4. Расчёт ударопрочности | 49 |
| 4.5. Расчёт на прочность резьбовых соединений | 52 |
| 5. ГЕРМЕТИЗАЦИЯ БЛОКОВ РЭС | 54 |
| 6. ОФОРМЛЕНИЕ КОНСТРУКТОРСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ | 74 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ | 76 |
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | 77 |
| ПРИЛОЖЕНИЯ | 78 |
| П1. Показатель прочности и жёсткости конструкционных материалов | 78 |
| П2. Характеристики блоков различных сечений (значение относительно осей) | 80 |