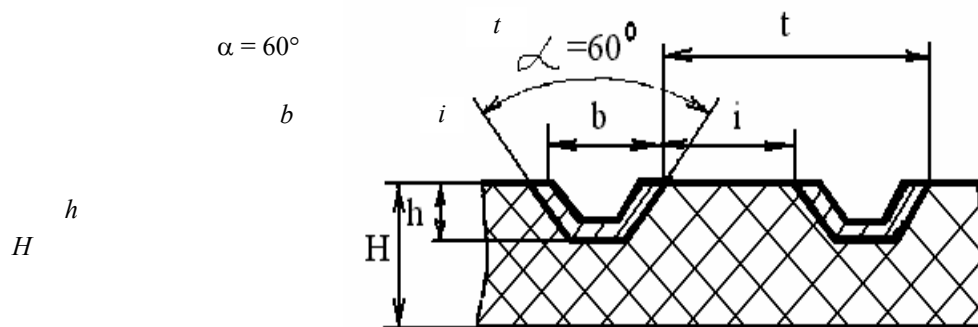


Н.А. МАЛКОВ, А.П. ПУДОВКИН, В.П. ШЕЛОХВОСТОВ

# ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ

РЕЛЬЕФНОГО  
ПЕЧАТНОГО МОНТАЖА



◆ ИЗДАТЕЛЬСТВО ТГТУ ◆

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Тамбовский государственный технический университет»

**Н.А. МАЛКОВ, А.П. ПУДОВКИН, В.П. ШЕЛОХВОСТОВ**

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ  
И ТЕХНОЛОГИЯ  
РЕЛЬЕФНОГО  
ПЕЧАТНОГО МОНТАЖА**

*Утверждено Ученым советом университета в качестве учебного пособия*



---

Тамбов  
Издательство ТГТУ  
2005

УДК 621.3.049.75  
ББК 844.16я73-5  
П881

**Р е ц е н з е н т**

Доктор технических наук, профессор  
*Д.А. Дмитриев*

**Малков, Н.А.**

П881 Проектирование и технология рельефного печатного монтажа : учеб. пособие / Н.А. Малков, А.П. Пудовкин, В.П. Шелохвостов. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2005. 80 с.

Приведены особенности проектирования и технологии рельефного печатного монтажа, даны рекомендации по оформлению конструкторской и технологической документации, справочная информация для курсового и дипломного проектирования.

Предназначено для студентов 3 – 6 курсов специальности 210201 дневной и заочной форм обучения.

УДК 621.3.049.75

ББК 844.16я73-5

ISBN 5-8265-0361-0

© Малков Н.А., Пудовкин А.П., Шелохвостов В.П., 2005

© Тамбовский государственный  
технический университет  
(ТГТУ), 2005

Учебное издание

МАЛКОВ Николай Аркадьевич,  
ПУДОВКИН Анатолий Петрович,  
ШЕЛОХВОСТОВ Виктор Прокофьевич

ПРОЕКТИРОВАНИЕ  
И ТЕХНОЛОГИЯ  
РЕЛЬЕФНОГО  
ПЕЧАТНОГО МОНТАЖА

Учебное пособие

Редактор Т.М. Глинкина  
Инженер по компьютерному макетированию Т.А. Сынкoвa

Подписано к печати 27.04.2005.

Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Гарнитура Times New Roman. Объем: 4,65 усл. печ. л.; 4,5 уч.-изд. л.

Тираж 100 экз. С. 295

Издательско-полиграфический центр  
Тамбовского государственного технического университета  
392000, Тамбов, ул. Советская 106, к. 14

## ВВЕДЕНИЕ

---

**РЕЛЬЕФНАЯ ПЕЧАТНАЯ ПЛАТА (РПП) ПРЕДСТАВЛЯЕТ СОБОЙ ПЛАСТИНУ, ВЫПОЛНЕННУЮ ИЗ НЕФОЛЬГИРОВАННОГО ДИЭЛЕКТРИКА (НАПРИМЕР, СТЕКЛОТЕКСТОЛИТА) И СОДЕРЖАЩУЮ НЕОБХОДИМЫЕ ОТВЕРСТИЯ, НА КОТОРУЮ НАНОСИТСЯ ПРОВОДЯЩИЙ РИСУНОК МОНТАЖА. РПП ПРЕДНАЗНАЧАЕТСЯ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ НА ЕЕ ОСНОВЕ РАЗЛИЧНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ И УСТРОЙСТВ. ГАБАРИТЫ РПП МОГУТ СОСТАВЛЯТЬ ОТ ДЕСЯТКОВ МИЛЛИМЕТРОВ ДО 500 × 500 ММ ПРИ ТОЛЩИНЕ ОТ 0,2 ДО 2,0 ММ.**

Основной отличительной особенностью РПП, определяющей ее электрические, механические и эксплуатационные характеристики, является способ нанесения проводящего рисунка на диэлектрик.

**РАЗРАБОТАННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ИНДИВИДУАЛЬНОГО И СЕРИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА ПОЗВОЛЯЮТ НАРАЩИВАТЬ ПРОВОДЯЩИЙ СЛОЙ ОДНОВРЕМЕННО И НА ТРАССАХ ПРОВОДНИКОВ И В МЕЖСЛОЙНЫХ ОТВЕРСТИЯХ. В РЕЗУЛЬТАТЕ ОБРАЗУЕТСЯ МОНОЛИТНАЯ, МЕТАЛЛИЧЕСКАЯ ПРОСТРАНСТВЕННАЯ РЕШЕТКА, ИСКЛЮЧАЮЩАЯ ОТСЛАИВАНИЕ И РЕЗКО УВЕЛИЧИВАЮЩАЯ ПРОЧНОСТЬ МОНТАЖА.**

По своим коммутационным возможностям двухсторонняя РПП обычно не уступает плате, выполненной по многослойной технологии (при идентичных геометрических размерах), превосходя последнюю по надежности и экономичности.

## 1 КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ и эксплуатационная надежность РПП

---

### 1.1 СПЕЦИФИКА ТОПОЛОГИИ РПП И ТЕХНОЛОГИИ ЕЕ ИЗГОТОВЛЕНИЯ

Специфика обусловлена особенностями топологии (геометрии проводящего рисунка) РПП и технологии ее изготовления.

Топологические особенности РПП заключаются в следующем.

1 Проводники, как правило, имеют одну ширину, за исключением ламелей, ширина которых определяется шириной выводов или контактов с учетом технологических припусков. Для прокладки цепей с большой токовой нагрузкой целесообразно и с технологической, и с электрической, и с эксплуатационной точек зрения использовать группы параллельных проводников одинаковой ширины. Так как шири-

на проводника определяется размерами режущего инструмента, уменьшение типоразмеров проводников сокращает номенклатуру режущего инструмента и количество управляющих программ. В РПП несколько параллельных проводников обладают большей токонесущей способностью, чем один широкий проводник, их заменяющий. (Это обусловлено трапецидальной формой сечения заглубленных в тело диэлектрика проводников, в результате этого их развертка на плоскость занимает большую площадь, чем площадь занимаемой поверхности платы). Кроме того, узкие заглубленные проводники более устойчивы к воздействию механических и температурных факторов в процессе эксплуатации.

2 Переходные металлизированные отверстия имеют диаметр, не превышающий ширину проводника, и не препятствуют прокладке проводников в соседних трассах.

3 Диаметр монтажных отверстий, как правило, меньше диаметра контактной площадки вокруг отверстий, чем в традиционных платах.

4 Строгая ортогональность проводников на разных сторонах платы и отсутствие ограничений по размещению переходных отверстий существенно повышают трассировочные возможности платы, сокращают машинное время разводки и исключают "петляние" проводников.

Технологические особенности РПП также накладывают соответствующие требования к процессу их проектирования.

### **1 УПРАВЛЯЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОГРАММЫ ПО ФОРМИРОВАНИЮ РИСУНКА ПЛАТЫ ПРЕДНАЗНАЧАЮТСЯ НЕ ДЛЯ ФОТОПОСТРОИТЕЛЕЙ, А ДЛЯ СТАНКА С ЧПУ, НА КОТОРОМ БУДЕТ ОСУЩЕСТВЛЯТЬСЯ ИЗГОТОВЛЕНИЕ ПЛАТЫ.**

2 Для каждого типоразмера поперечного сечения проводника (или ламели) должна быть отдельная программа.

3 Если в станке с ЧПУ режимы резания (число оборотов шпинделя и скорость перемещения стола) управляются от программы, то следует учитывать, что фрезерование проводников различной ширины и холостые перемещения целесообразно осуществлять с различными скоростями.

4 Поскольку формирование проводников и ламелей осуществляется вращающимся инструментом, реальная длина проводника больше длины перемещения инструмента на величину, равную ширине проводника, т.е. в управляющей программе конец проводника проектируется на пересечении трасс.

5 Так как сверление отверстий в РПП осуществляется с двух сторон, требуются две программы сверления. Если переворачивание платы производится вокруг оси, проходящей через центры базовых отверстий, используется одна программа с изменением координат исходной точки и знака перемещения по оси, перпендикулярной оси переворачивания.

**Примечание.** Исходная точка – это точка, в которую выходит режущий инструмент при первом перемещении из "нуля станка". Если исходная точка лежит на оси переворачивания, в программе сверления обратной стороны меняется только знак перемещения. Целесообразно исходную точку на столе станка выбирать посередине между базовыми штифтами, а на плате – ближе к ее геометрическому центру. Тогда плата будет располагаться в центре заготовки.

6 Последовательность программ механической обработки РПП должна учитывать, что сверление отверстий следует после фрезерования проводников, чтобы при фрезеровании отверстия не забивались стружкой.

7 Если перемещение инструмента программируется в приращениях, то необходимо учитывать возможность накопления ошибки при округлении значений приращений.

Проектируемая на РПП радиоэлектронная аппаратура обладает следующими преимуществами перед отечественной и импортной аппаратурой аналогичного назначения, базирующейся на использовании многослойных печатных плат.

**Хорошие электрические характеристики.** При проектировании аппаратуры на РПП относительно легко могут быть получены заданные электрические параметры. Это обусловлено следующими факторами. Толщина проводящего слоя может устанавливаться необходимой, а не определяемой фиксированной толщиной проводящего слоя фольгированного материала. На одной плате может быть произведен неразрывный монтаж различных электрорадиоэлементов (ЭРЭ), начиная от сверхбольших интегральных схем (СБИС) до обычных и достаточно мощных ЭРЭ, вплоть до специальных СВЧ-элементов. Используя дополнительные экранирующие слои и слои питания (по обычной технологии многослойных плат), может быть обеспечено требуемое волновое сопротивление проводников, что позволяет работать на СВЧ, используя их, например, для устройств радиосвязи и ЭВМ.

**Технологичность.** Компьютерная подготовка производства для аппаратуры на РПП (трассировка) производится с использованием системы проектирования P-CAD. Она проще, чем для многослойных плат, так как может использоваться ортогональный (для обеих сторон платы) монтаж.

Сами технологические процессы для единичного и серийного производства, хотя и требуют специальной оснастки (сверлильно-фрезерных станков с программным управлением), не сложнее принятых при производстве многослойных плат, но экологически более чисты и требуют меньшего расхода меди.

**Высокая плотность монтажа.** Рельефный проводник в несколько раз уже плоского при одинаковой площади поперечного сечения проводящего слоя. Это позволяет повысить число проводников на 1 мм (до 4-х).

Так как минимальные ширина проводников и расстояния между ними могут достигать до 0,1...0,12 мм (шаг – 0,2...0,254 мм), а диаметр сквозных переходных отверстий до 0,1 мм (меньше или равен ширине проводника), отпадает необходимость в контактных площадках и можно переходить со слоя на слой в любых местах трассы. Это позволяет применить ортогональную трассировку на обеих сторонах РПП и дает возможность резко увеличить плотность монтажа: двухсторонние РПП по коммутационной способности заменяют 5 – 14-слойную плату, выполненную по обычной технологии.

**Экономические характеристики.** В процессе производства аппаратуры не используются дорогие материалы (фольгированные диэлектрики, фотостекла, безусадочная фотопленка и т.п.). Кроме того, аппаратура, построенная на РПП, значительно превосходит аппаратуру, построенную на обычных многослойных печатных платах, так как обладает качеством ремонтпригодности практически на любых стадиях технологического процесса. Существенно более низкая стоимость аппаратуры может быть достигнута при массовом ее производстве. Экономия достигается также за счет более экологически чистого технологического процесса.

**Экологические характеристики.** Аппаратура, построенная по предлагаемой конструкции и технологии, обладает существенно лучшими (от 6 до 10 раз) экологическими характеристиками, чем построенная на обычных многослойных печатных платах. Отсутствуют массовые технологические процессы, связанные с применением вредных химических веществ (например, травления меди).

РПП обладают надежностью существенно более высокой, чем многослойные печатные платы (МПП), выполненные по обычной технологии (на фольгированных диэлектриках). Это обусловлено следующими факторами.

Как двухсторонние платы РПП сами по себе обладают высокой эксплуатационной надежностью, а благодаря рельефному рисунку, углубленному относительно поверхности, и неразрывности металлического слоя в проводниках и межслойных переходах создают дополнительный запас по стойкости к различным воздействиям факторов окружающей среды.

Особенности технологического процесса обеспечивают сплошное заполнение соединительных отверстий и исключают возможность "подтравливания" проводников, а также позволяют избежать одного из источников ненадежности в месте соединения прокатанной поверхности медной фольги и осажденной меди в соединительных отверстиях.

В отличие от печатных плат, построенных на фольгированном материале, межслойные отверстия для электрических соединений слоев в РПП не только не снижают надежность, а наоборот увеличивают ее, так как они образуют вместе с рельефными проводниками монолитную пространственную решетку. Они обеспечивают дополнительное скрепление проводников с основой.

Надежность РПП подтверждена многолетней (более 10 лет) их эксплуатацией в жестких полевых (компьютеры для геологов) и бортовых авиационных условиях. Не зафиксировано ни одного случая отказа по вине РПП.

Платы ремонтпригодны и допускают многократную перепайку устанавливаемых ЭРЭ и микросхем (обычно эта процедура недоступна для многослойных плат).

## 1.2 ПРОЕКТИРОВАНИЕ РПП

Проектирование РПП в принципе ничем не отличается от проектирования двухсторонних печатных плат. Но учитывая технологию изготовления, необходимо соблюдать следующие правила:

1 Трассировка должна производиться только прямолинейными ортогональными проводниками. Косые отрезки можно использовать для описания контура платы.

2 С одной стороны платы проводятся горизонтальные проводники, с другой – вертикальные. Электрорадиоэлементы можно располагать на обеих поверхностях платы, но их ориентацию целесообразно согласовать с преимущественным направлением проводников на стороне установки элементов. Допустимо проведение небольших отрезков (до 5 % максимальной длины проводника), перпендикулярных

основному направлению на стороне, если необходимо оптимизировать по критерию "количество переходных отверстий".

3 Все конструктивные элементы рисунка платы, такие как проводники, ламели, монтажные отверстия, с точки зрения САПР, должны быть описаны следующим образом:

*отрезок* имеет координаты начала и конца фрезерования, ширину (диаметр инструмента). Этот элемент может быть использован для проводников и ламелей;

*сквозное металлизированное отверстие* имеет координаты центра, диаметр. Выходит на обе стороны платы. Этот элемент может быть использован как монтажное и переходное отверстие;

*глухое монтажное отверстие* имеет координаты центра, диаметр. Расположено на одной стороне платы. Может быть использовано как элемент контактных площадок для монтажа на поверхности.

Все элементы рисунка следует унифицировать по ширине для минимизации количества применяемого инструмента.

4 Выполнение трасс питания. РПП – двухсторонняя плата, поэтому нет возможности отвести на питание целые слои. Для успешной работы электронной схемы обязательно следует придерживаться классического правила: разводить питание в виде двух сеток  $0V$  и  $V_{pp}$  с размером ячеек, соответствующим преимущественному шагу расположения элементов. Подключение выводов питания элементов к сетке следует производить по кратчайшему пути. Шины питания и проводники с повышенной токовой нагрузкой лучше трассировать несколькими параллельными проводниками с сокращенным шагом – в этом случае площадь металлизации больше, чем при трассировке одним широким проводником.

5 Проектирование аналоговых и высокочастотных устройств. В принципе проектирование ничем не отличается от проектирования на обычных печатных платах. Дополнительным элементом платы может служить общий сплошной экран (третий слой), который можно подключить к сигнальному общему проводу.

6 Типовые группы сложности плат:

#### **I ШАГ ТРАССИРОВКИ (ММ): 0,635 / 0,630 / 0,625 / 0,250.**

Ширина проводника (мм) – 0,2.

Диаметр переходного отверстия (мм) – 0,2

Минимальный зазор (мм):

- между проводниками – 0,3;
- между проводником и переходным отверстием – 0,3;
- между переходными отверстиями – 0,3;
- между контактной площадкой и любым элементом рельефного рисунка – 0,4 (кроме случаев, когда контактная площадка выполняется инструментом диаметром менее 0,5 мм).

II шаг трассировки (мм): 0,420 / 0,425 – 0,420 – 0,425.

Ширина проводника (мм) – 0,15.

Диаметр переходного отверстия (мм) – 0,15

Минимальный зазор (мм):

- между проводниками – 0,27;
- между проводником и переходным отверстием – 0,24;
- между переходными отверстиями – 0,22;
- между контактной площадкой и любым элементом рельефного рисунка – 0,3 (кроме случаев, когда контактная площадка выполняется инструментом диаметром менее 0,5 мм).

#### **III ШАГ ТРАССИРОВКИ (ММ): 0,315 / 0,310 – 0,320 / 0,3175 / 0,3125.**

Ширина проводника (мм) – 0,1.

Диаметр переходного отверстия (мм) – 0,15

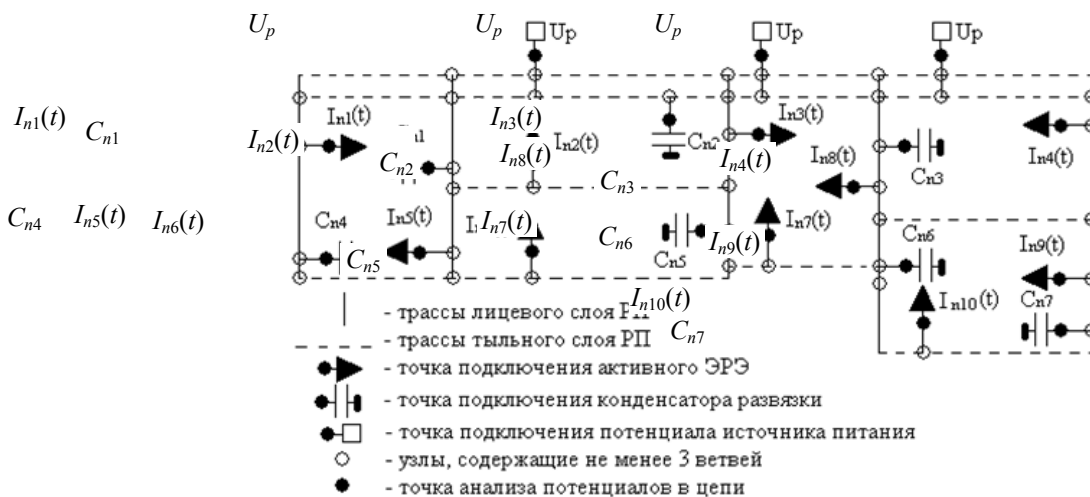
Минимальный зазор (мм):

- между проводниками – 0,2;
- между проводником и переходным отверстием – 0,18;
- между переходными отверстиями – 0,18;
- между контактной площадкой и любым элементом рельефного рисунка – 0,2 (кроме случаев, когда контактная площадка выполняется инструментом диаметром менее 0,5 мм).

## 2.1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

**ЗАДАЧА АНАЛИЗА ЦЕПЕЙ ПИТАНИЯ ЯВЛЯЕТСЯ В ЗНАЧИТЕЛЬНОЙ МЕРЕ СПЕЦИФИЧЕСКОЙ ДЛЯ РЕЛЬЕФНОЙ ПЛАТЫ (РП), ПОСКОЛЬКУ ЦЕПИ ПИТАНИЯ РЕАЛИЗУЮТСЯ НА ТЕХ ЖЕ СЛОЯХ И С ТЕМ ЖЕ СОЧЕТАНИЕМ ПРОВОДНИКОВ, ЧТО И СИГНАЛЬНЫЕ ЦЕПИ. ЭТО ВЫНУЖДАЕТ ВЫПОЛНЯТЬ ТРАССЫ ТАКИХ ЦЕПЕЙ "РЕДКОЙ СЕТКОЙ". ПРОСТОЙ ПРИМЕР "РЕДКОЙ СЕТКИ" ПРИВЕДЕН НА РИС. 2.1. ЗНАЧИТЕЛЬНЫЕ ПОГОННЫЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ РЕЛЬЕФНЫХ ПРОВОДНИКОВ И ВЫСОКОЕ ПОТРЕБЛЕНИЕ ТОКА ОТДЕЛЬНЫМИ ЭЛЕКТРОРАДИОЭЛЕМЕНТАМИ (ЭРЭ) МОГУТ ПРИВЕСТИ К СУЩЕСТВЕННОЙ РАЗНОСТИ ПОТЕНЦИАЛОВ ДЛЯ ОДНОЙ И ТОЙ ЖЕ ЦЕПИ В РАЗЛИЧНЫХ ТОЧКАХ РП ПОДКЛЮЧЕНИЯ ЭРЭ И ПОДВОДА ПИТАНИЯ. ЭТО, В СВОЮ ОЧЕРЕДЬ, ПРИВОДИТ К СНИЖЕНИЮ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ РЕАЛИЗОВАННОЙ СХЕМЫ.**

Обычно допустимое отклонение напряжения  $\Delta U_{\text{доп}}$  в конкретной цепи питания задается в технических условиях (ТУ) на используемые ЭРЭ. Расчет реального максимального отклонения напряжения  $\max \Delta U_{\text{ст}}$  для конкретной трассированной цепи питания при заданных постоянных токах потребления ЭРЭ является *задачей анализа цепи питания в статическом режиме*.



**Рис. 2.1 Пример "редкой сетки"**

Расчет максимума реальной суммы статического и динамического отклонений напряжения  $\max(\Delta U_{\text{ст}} + \Delta U_{\text{дин}})$  для конкретной трассированной цепи питания при заданных потреблении токов ЭРЭ, а возможно, и флуктуациях напряжений, вызванных внешними для РП факторами, является *задачей анализа цепи питания в динамическом режиме*.

Существенными особенностями цепей питания являются доминирующая зависимость силы токов, потребляемых ЭРЭ, от внутреннего состояния и режимов переключения и весьма малая зависимость силы этих токов от изменения напряжения питания, во всяком случае для большинства реальных импульсных ЭРЭ и реальных значений  $\Delta U_{\text{ст}} + \Delta U_{\text{дин}}$ . Указанная особенность позволяет в качестве исходной модели для расчета динамического режима использовать систему алгебраических и дифференциальных уравнений. Причем все дифференциальные уравнения в такой системе являются неоднородными линейными с постоянными коэффициентами при неизвестных. Кроме того, число узлов цепей питания для реальных РП достигает иногда нескольких тысяч. Время расчета такой цепи должно быть весьма малым для успешного использования интерактивного режима с "ручной" корректировкой при оптимизации конфигурации цепи.

**ИЗЛОЖЕННЫЕ ОСОБЕННОСТИ ОГРАНИЧИВАЮТ ЭФФЕКТИВНОЕ (ПО БЫСТРОДЕЙСТВИЮ) ПРИМЕНЕНИЕ СУЩЕСТВУЮЩИХ ПРОГРАММНЫХ РЕАЛИЗАЦИЙ, ОРИЕНТИРОВАННЫХ НА РЕШЕНИЕ СИСТЕМ НЕОДНОРОДНЫХ ЛИНЕЙНЫХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ С ПЕРЕМЕННЫМИ КОЭФФИЦИЕНТАМИ,**



## ОБЫЧНО ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ДЛЯ РАСЧЕТА НЕБОЛЬШИХ СХЕМ (НЕ БОЛЕЕ 200 УЗЛОВ).

С учетом изложенного принимается, что к цепи питания могут быть подключены следующие виды нагрузок и источников:

- источник тока  $I_n$ , сила тока которого зависит от времени (активный ЭРЭ);
- конденсатор развязки  $C_n$  (обычно используемый для уменьшения пульсаций напряжения питания);
- источник напряжения питания  $U_p$ , изменяющегося от внешних для РП воздействий (для анализа влияния таких изменений на напряжения в различных точках РП);
- источник постоянного напряжения питания  $U_p$  с активным и реактивным сопротивлениями проводников подвода и электрической емкостью "соседних" РП (иллюстрация конструкции, приводящей к модели такого источника, показана на рис. 2.2).

### ПРИ ТАКИХ ВИДАХ НАГРУЗОК ИСТОЧНИКОВ ИСХОДНЫМИ ДАННЫМИ ДЛЯ АНАЛИЗА ЦЕПИ ПИТАНИЯ ЯВЛЯЮТСЯ:

- конкретная конфигурация цепи питания и длина всех сегментов трасс;

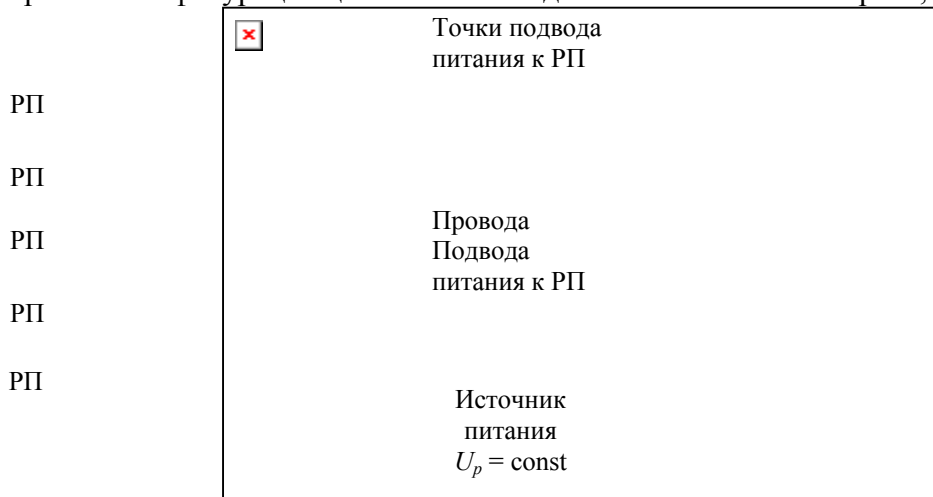


Рис. 2.2 Иллюстрация конструкции источника

- погонное сопротивление  $r$  рельефных проводников;
- погонная индуктивность  $l$  рельефных проводников;
- кусочно-линейная аппроксимация зависимости силы потребляемого тока питания  $I_{nj}$  каждого ЭРЭ для каждой  $j$ -й точки их подключения от времени;
- емкости  $C_{nj}$  конденсаторов "развязки" анализируемой цепи для каждой  $j$ -й точки их подключения;
- сопротивления  $R_{pj}$  подводов питания к каждой  $j$ -й точке таких подводов;
- кусочно-линейная аппроксимация зависимости потенциалов питания  $U_{pj}$  для каждой  $j$ -й точки их подключения (в случае отсутствия  $R_{pj}$ ,  $L_{pj}$  и  $C_{pj}$ ) от времени или постоянный потенциал питания  $U_{pj}$  для каждой  $j$ -й точки их подключения (при наличии  $R_{pj}$ ,  $L_{pj}$  и  $C_{pj}$ ).

### ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ:

- максимальное отклонение напряжения в каждой точке подключения ЭРЭ и подвода питания в статическом режиме ( $\max \Delta U_{\text{ст}}$ );
- максимальное отклонение напряжения в каждой точке подключения ЭРЭ и подвода питания в динамическом режиме ( $\max(\Delta U_{\text{ст}} + \Delta U_{\text{дин}})$ ).

### В ПРИВЕДЕННОЙ ПОСТАНОВКЕ ЗАДАЧИ ДОПУЩЕНЫ СЛЕДУЮЩИЕ УПРОЩЕНИЯ, КОТОРЫЕ ПРИ ОПРЕДЕЛЕННЫХ УСЛОВИЯХ МОГУТ ПОВЛИЯТЬ НА ТОЧНОСТЬ РЕЗУЛЬТАТА:

- используемая погонная индуктивность рельефных проводников имеет смысл только для конструкций РП с приклеенным металлическим слоем, и даже в этой ситуации погонная индуктивность проводников разных слоев может быть различной (при отсутствии металлического слоя существенный вклад в индуктивность проводников вносят их конфигурация и взаимное расположение);
- в проводниках подводов питания на РП (рис. 2.2) вместо  $R_{pj}$ ,  $L_{pj}$  и  $C_{pj}$  реально присутствуют "цепочки" с разделенными параметрами  $R$ ,  $C$  и  $L$ ;

- для удобства задания временных диаграмм применяются кусочно-линейные аппроксимации аналитических функций величин  $I_{nj}$  и  $U_{nj}$ ;
- не учитывается зависимость  $I_{nj}$  от текущего значения напряжения в  $j$ -й точке (для некоторых реальных ЭРЭ такая зависимость в цепях питания, хотя и слабая, но имеется).

Данные упрощения в большинстве случаев несущественно влияют на результаты, но позволяют решать данную задачу для большого числа узлов при существенно ограниченных машинных ресурсах (даже на средних моделях IBM PC).

## 2.2 ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

При описанной выше формальной постановке задачи ее решение можно получить, используя *метод узловых напряжений*. При этом узлом цепи является либо точка соединения не менее трех трасс (внутренняя точка "сетки" цепи питания), либо точка подключения нагрузки или конденсатора "развязки" или подвода напряжения питания (см. рис. 2.1).

Для статического режима такой подход приводит к системе линейных алгебраических уравнений, а для динамического режима – к системе алгебраических и дифференциальных уравнений (из-за наличия реактивных составляющих).

Для упрощения решения задачи для динамического режима используются интерполяционные формулы

$$U_j^t - U_j^{t-\Delta t} = \Delta t \frac{dU_j^t}{dt}; \quad I_j^t - I_j^{t-\Delta t} = \Delta t \frac{dI_j^t}{dt},$$

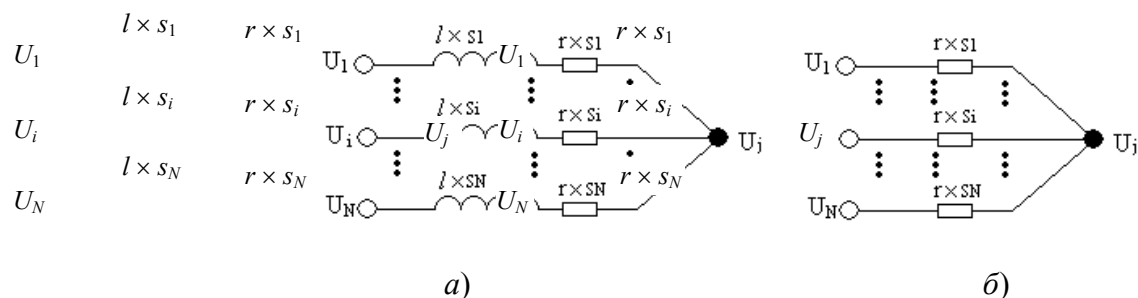
где  $U_j^t (I_j^t)$  – напряжение (сила тока) в  $j$ -й точке цепи питания в момент времени  $t$ ;  $U_j^{t-\Delta t} (I_j^{t-\Delta t})$  – напряжение (сила тока) в  $j$ -й точке в момент времени  $t - \Delta t$ ;  $\frac{dU_j^t}{dt} \left( \frac{dI_j^t}{dt} \right)$  – первая производная напряжения (силы тока) в  $j$ -й точке цепи питания в момент времени  $t$ ;  $\Delta t$  – интервал дискретности времени.

Тогда каждое из дифференциальных уравнений узла можно представить, как разностное уравнение для моментов времени  $t$  и  $t - \Delta t$  (а иногда и для  $t - 2\Delta t$ ). При решении таких уравнений напряжения и силы токов для моментов времени  $t_1, t_1 - \Delta t$  и  $t_1 - 2\Delta t$  принимаются равными значениям, полученным при решении уравнений для статического режима.

Ниже приводятся эквивалентные схемы и уравнения, полученные после простых преобразований исходных уравнений, для статического и динамического режимов пяти типов узлов цепей питания – внутреннего узла цепи, двух видов нагрузки и двух видов подвода напряжения питания (рис. 2.3).

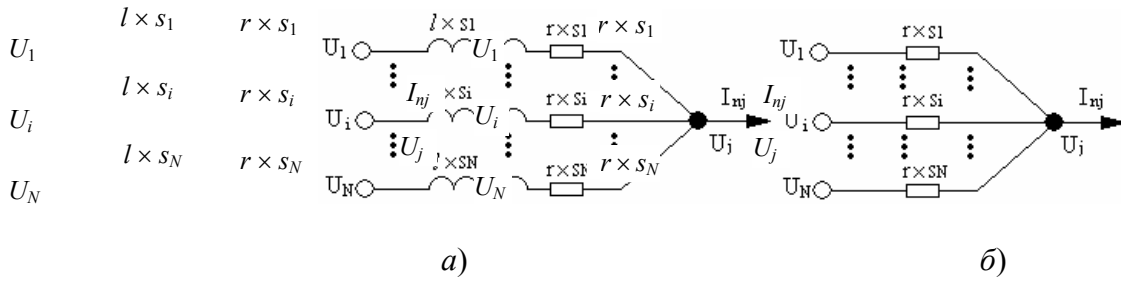
Узлами первого типа являются внутренние узлы цепи питания, в которые входят не менее трех трасс и которые не являются монтажными точками. Уравнения для статического и динамического режимов такого узла имеют соответственно вид:

$$\sum_{i=1}^N \frac{U_i^t}{s_i} - U_j^t \sum_{i=1}^N \frac{1}{s_i} = 0; \quad \sum_{i=1}^N \frac{U_i}{s_i} - U_j \sum_{i=1}^N \frac{1}{s_i} = 0. \quad (2.1)$$



**Рис. 2.3 Первый тип узла:**

*a* – схема для динамического режима; *б* – схема для статического режима;  
 $U_i(U_j)$  – потенциал *i*-го (*j*-го) узла;  $s_i$  – длина *i*-й ветви *j*-го узла;  
 $l$  – погонная индуктивность рельефных проводников;  
 $r$  – погонное сопротивление рельефных проводников



**Рис. 2.4 Второй тип узла:**

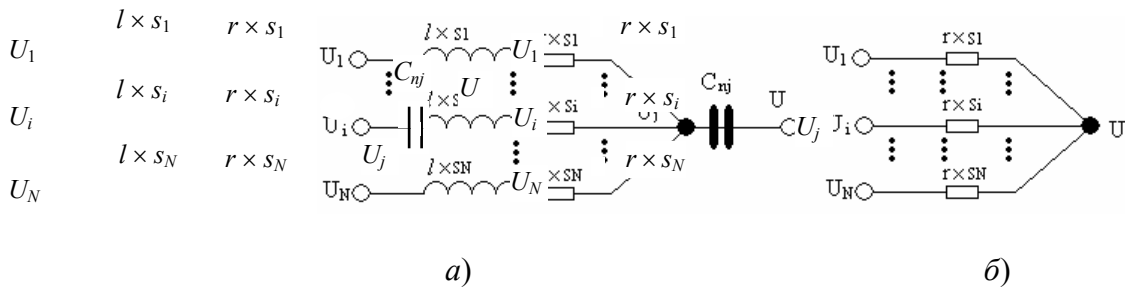
*a* – схема для динамического режима; *б* – схема для статического режима;  
 $I_{nj}$  – ток нагрузки *j*-го узла

Узлами второго типа являются монтажные точки подключения ЭРЭ. Уравнения для динамического и статического режимов такого узла имеют соответственно вид:

$$\sum_{i=1}^N \frac{U_i^t}{s_i} - U_j^t \sum_{i=1}^N \frac{1}{s_i} = I_{nj}^t \left( r + \frac{l}{\Delta t} \right) - I_{nj}^{t-\Delta t} \frac{l}{\Delta t};$$

(2.2)

$$\sum_{i=1}^N \frac{U_i}{s_i} - U_j \sum_{i=1}^N \frac{1}{s_i} = I_{nj} r.$$



**Рис. 2.5 Третий тип узла:**

*a* – схема для динамического режима; *б* – схема для статического режима;  
 $C_{nj}$  – емкость конденсатора "развязки" *j*-го узла;  
 $U$  – постоянное напряжение на второй обкладке конденсатора "развязки" *j*-го узла

**УЗЛАМИ ТРЕТЬЕГО ТИПА ЯВЛЯЮТСЯ МОНТАЖНЫЕ ТОЧКИ, К КОТОРЫМ ПОДКЛЮЧЕНЫ КОНДЕНСАТОРЫ "РАЗВЯЗКИ". УРАВНЕНИЯ ДЛЯ ДИНАМИЧЕСКОГО И СТАТИЧЕСКОГО РЕЖИМОВ ТАКОГО УЗЛА ИМЕЮТ СООТВЕТСТВЕННО ВИД:**

$$\sum_{i=1}^N \frac{U_i^t}{s_i} - U_j^t \left( \sum_{i=1}^N \frac{1}{s_i} + \frac{C_{nj}}{\Delta t} \left( r + \frac{l}{\Delta t} \right) \right) = \frac{C_{nj}}{\Delta t} \left( U_j^{t-2\Delta t} \frac{l}{\Delta t} - U_j^{t-\Delta t} \left( r + 2 \frac{l}{\Delta t} \right) \right);$$

(2.3)

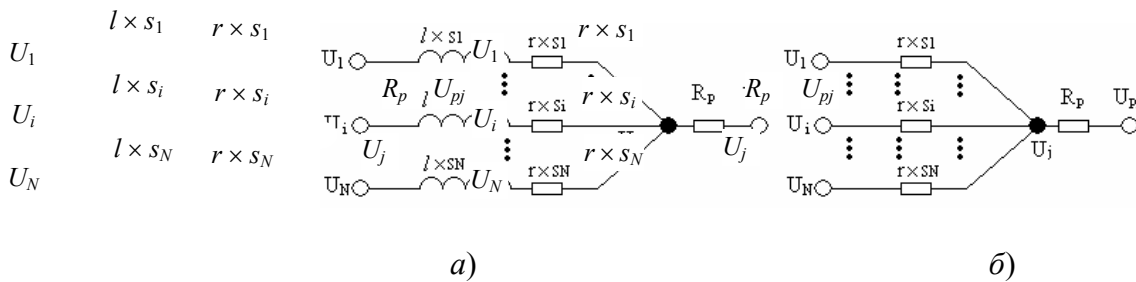
$$\sum_{i=1}^N \frac{U_i}{s_i} - U_j \sum_{i=1}^N \frac{1}{s_i} = 0. \quad (2.4)$$

Узлами четвертого типа являются монтажные точки подвода питания. Уравнения для динамического и статического режимов такого узла имеют соответственно вид:

$$\sum_{i=1}^N \frac{U_i^t}{s_i} - U_j^t \left( \sum_{i=1}^N \frac{1}{s_i} + \frac{1}{R_p} \left( r + \frac{l}{\Delta t} \right) \right) = \frac{1}{R_p} \left( \frac{l}{\Delta t} (U_{pj}^{t-\Delta t} - U_j^{t-\Delta t}) - \left( r + \frac{l}{\Delta t} \right) U_{pj}^t \right); \quad (2.5)$$

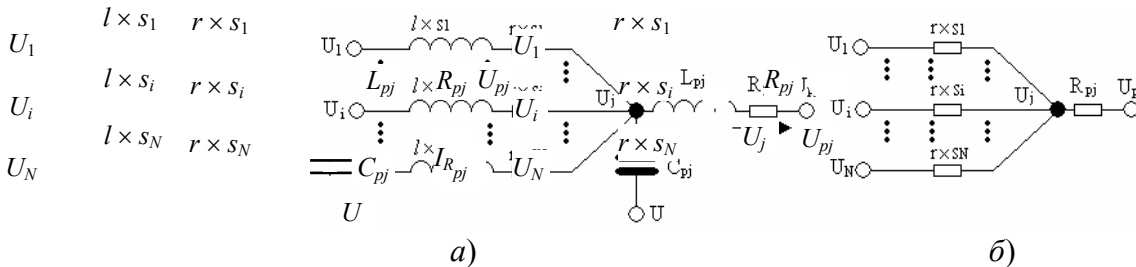
$$\sum_{i=1}^N \frac{U_i}{s_i} - U_j \left( \sum_{i=1}^N \frac{1}{s_i} + \frac{r}{R_p} \right) = -\frac{r}{R_p} U_{pj}. \quad (2.6)$$

Узлами пятого типа являются монтажные точки подвода питания при анализе влияния активных и реактивных сопротивлений.



**Рис. 2.6 Четвертый тип узла:**

*a* – схема для динамического режима; *б* – схема для статического режима;  $U_{pj}$  – подводимое напряжение питания *j*-го узла;  $R_p$  – сопротивление в ветви подвода питания (весьма малое, введенное для простоты решения уравнений)



**Рис. 2.7 Пятый тип узла:**

*a* – схема для динамического режима; *б* – схема для статического режима;  
 $C_{pj}$  – емкость в подводе питания *j*-го узла;  
 $L_{pj}$  – индуктивность подвода питания к *j*-му узлу;  
 $I_{R_{pj}}$  – ток в ветви сопротивления  $R_{pj}$  *j*-го узла;  $U$  – постоянное напряжение на второй обкладке конденсатора в подводе питания *j*-го узла

Уравнения для динамического и статического режимов такого узла имеют соответственно вид:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^N \frac{U_i^t}{s_i} - U_j^t \left( \sum_{i=1}^N \frac{1}{s_i} + \left( \frac{C_{pj}}{\Delta t} + \frac{1}{R_{pj} + \frac{L_j}{\Delta t}} \right) \left( r + \frac{l}{\Delta t} \right) \right) = \\ = \frac{C_{pj}}{\Delta t} \left( U_j^{t-2\Delta t} \frac{l}{\Delta t} - U_j^{t-\Delta t} \left( r + 2 \frac{l}{\Delta t} \right) \right) + \\ + \frac{1}{R_{pj} + \frac{L_j}{\Delta t}} \left( I_{R_{pj}}^{t-\Delta t} \left( \frac{rL_j - lR_{pj}}{\Delta t} \right) - U_{pj} \left( r + \frac{l}{\Delta t} \right) \right); \end{aligned} \quad (2.7)$$

$$\sum_{i=1}^N \frac{U_i}{s_i} - U_j^t \left( \sum_{i=1}^N \frac{1}{s_i} + \frac{r}{R_{pj}} \right) = - \frac{r}{R_{pj}} U_{pj}. \quad (2.8)$$

В уравнении (2.7) присутствует значение  $I_{R_{pj}}^{t-\Delta t}$ , которое вычисляется как

$$I_{R_{pj}}^{t-\Delta t} = \begin{cases} \frac{U_j^{t-\Delta t} - U_{pj} + I_{R_{pj}}^{t-2\Delta t}}{R_{pj} + \frac{L_{pj}}{\Delta t}} \Rightarrow t > 1; \\ \frac{U_j^0 - U_{pj}}{R_{pj}} \Rightarrow t = 1. \end{cases} \quad (2.9)$$

В уравнениях (2.1) – (2.8)  $N$  – число трасс, соединяющихся в узлах "сетки" цепи питания. Нетрудно видеть, что число уравнений вида (2.1) – (2.8) будет равно числу узлов "сетки" цепи питания. Эти уравнения образуют систему линейных алгебраических уравнений для каждого момента времени  $t$ . Следует отметить, что выражения (2.9) не являются уравнениями, входящими в систему уравнений, а только позволяют вычислить правую часть в уравнениях вида (2.7), если  $j$  считать номером уравнения в системе (номером неизвестной), то такая система уравнений имеет следующие свойства:

- 1 Левая часть системы имеет симметричную матрицу коэффициентов при неизвестных.
- 2 Матрица левой части – сильно разреженная (для РП при двух проводящих слоях и ортогональной системе проведения трасс каждое уравнение имеет не более девяти ненулевых коэффициентов).
- 3 Матрица левой части имеет ненулевую главную диагональ.
- 4 Диагональные элементы матрицы левой части по модулю не меньше суммы остальных элементов соответствующих строк.

Свойство 1 [2] позволяет почти в два раза уменьшить объем памяти для хранения элементов матрицы (можно хранить только элементы, находящиеся на главной диагонали и выше ее).

Свойство 2 при использовании списковой структуры позволяет хранить только элементы матрицы, не равные нулю, и существенно сохранить время вычисления треугольной матрицы при прямом проходе [3] (имеется возможность не проводить умножение на элементы матрицы, равные нулю, и сложение для произведений, равных нулю). При этом кубичная временная сложность алгоритма для общего случая получения треугольной матрицы практически становится квадратичной.

Свойства 3 и 4 позволяют не выполнять поиск главного элемента в каждом уравнении. Такие элементы в исходной системе уравнений гарантированно оказываются на главной диагонали.

**ДЛЯ РЕШЕНИЯ СИСТЕМЫ ЛИНЕЙНЫХ АЛГЕБРАИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ УДОБНО ПРИМЕНЯТЬ МЕТОД КРАУТА [3] С МОДИФИКАЦИЕЙ, ИСПОЛЬЗУЮЩЕЙ СВОЙСТВО РАЗРЕЖЕННОСТИ МАТРИЦЫ.**

### 2.3 ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТОЧНОСТИ РЕШЕНИЯ СИСТЕМЫ РАЗНОСТНЫХ УРАВНЕНИЙ

**ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ОПИСАННОЙ ВЫШЕ МОДЕЛИ ДИНАМИЧЕСКОГО РЕЖИМА ЦЕПИ ПИТАНИЯ ПОЯВЛЯЕТСЯ ПОГРЕШНОСТЬ МЕТОДА, ОБУСЛОВЛЕННАЯ ПРИМЕНЕНИЕМ СИСТЕМЫ РАЗНОСТНЫХ УРАВНЕНИЙ ВМЕСТО СИСТЕМЫ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ.**

Погрешности такого рода могут быть снижены при уменьшении величины  $\Delta t$ . Однако это приводит к увеличению времени решения на всем временном интервале анализа, поэтому целесообразно найти такое максимальное значение  $\Delta t$ , при котором погрешность метода приводила бы к погрешности  $\Delta U_j(\Delta t)$  каждого  $U_j$ , в каждый момент времени не превышающий заданной величины  $\Delta U_0$ .

При выводе уравнений для динамического режима был использован интерполяционный подход с интерполяционной формулой, приведенной в работе [4],  $y_{m+1} - y_m = h \frac{dy_{m+1}}{dx}$ , для которой на с. 337 той же работы дана оценка погрешности, следуя которой для интервала времени  $\Delta t$  можно записать:

$$\Delta U_j^{(1)}(\Delta t) = U_j^{(p)}(t_1, \Delta t) - U_j^{(d)}(t_1) = k_j(t_1)(\Delta t)^2,$$

где  $U_j^{(p)}(t_1, \Delta t)$  – напряжение  $j$ -го узла в момент времени  $t_1 = t_0 + \Delta t$ , полученное при решении системы разностных уравнений типа (2.1) – (2.8);  $U_j^{(d)}(t_1)$  – истинное напряжение  $j$ -го узла ( $U_j(t_1)$ ) в момент времени  $t_1 = t_0 + \Delta t$ , полученное при решении дифференциальных уравнений, описывающих модели для динамического режима;  $k_j(t_1)$  – константа для  $j$ -го узла в момент времени  $t_1$  (пропорциональная второй производной  $U_j^{(d)}$  в точке  $t_1$  и не зависящая от  $\Delta t$ ).

Такая оценка для  $\Delta t$  при переходе от  $t_{N-1}$  к  $t_N$  будет иметь вид

$$\Delta U_j^{(N)}(\Delta t) = \Delta u_j^{(N)}(\Delta t) + k_j(t_N)(\Delta t)^2, \quad (2.10)$$

где  $\Delta u_j^{(N)}(\Delta t)$  – переходная ошибка, вызванная вычислением значений  $U_j^{(p)}(t_N, \Delta t)$  по исходным значениям  $U_j^{(p)}(t_{N-1}, \Delta t)$ , а не по значениям  $U_j^{(d)}(t_{N-1})$ .

В предположении устойчивости решения исходной системы уравнений (2.1) – (2.8) можно записать:

$$\Delta u_j^{(N)}(\Delta t) = M^{(N)}(U_j^{(p)}(t_N, \Delta t) - U_j^{(d)}(t_N)), \quad (2.11)$$

где  $M^{(N)}$  – множитель переноса для момента времени  $t_N$  (при устойчивых решениях  $|M^{(N)}| \leq 1$ ).

Для упрощения последующих выражений заменим в (2.11)  $N - 1$  на  $N$  и используем  $M^{(N)} = 1$  из (2.10). В результате получим пессимистическую оценку

$$\Delta u_j^{(N)}(\Delta t) = (\Delta t)^2 \sum_{i=1}^N k_j(t_i). \quad (2.12)$$

Из (2.10) и (2.12) для момента времени  $t_N (t_N = t_0 + N\Delta t)$  находим

$$U_j^{(p)}(t_N, \Delta t) - U_j^{(d)}(t_N) = \Delta u_j^{(N)}(\Delta t) + (\Delta t)^2 \sum_{i=1}^N k_j(t_i) = 2(\Delta t)^2 K_j(N, \Delta t), \quad (2.13)$$

где  $K_j(N, \Delta t)$  зависит от вторых производных  $U_j^{(d)}$  в точках  $t_1, t_2, \dots, t_N$ .

Можно показать, что с точностью до третьего члена разложения в ряд Тейлора функции  $k_j(t_i)$  справедливо

$$K_j\left(N, \frac{\Delta t}{n}\right) = nK_j(N, \Delta t) - \frac{\Delta t(n-1)}{2} D(N, \Delta t), \quad (2.14)$$

где  $K_j\left(N, \frac{\Delta t}{n}\right)$  является величиной  $K_j(N, \Delta t)$  для  $\frac{\Delta t}{n}$  и момента времени  $t_N = t_0 + N\Delta t = t_0 + N_n \frac{\Delta t}{n}$ ;

$$D_j(N, \Delta t) = \frac{dK_j(N, \Delta t)}{dt}. \quad (2.15)$$

Из выражений (2.13) – (2.15) и условия

$$-\Delta U_0 \leq U_j^{(p)}\left(t_N, \frac{\Delta t}{n}\right) - U_j^{(d)}(t_N) \leq \Delta U_0 \quad (2.16)$$

можно получить  $n_j(t_n)$  – оценку делителя исходного шага  $\Delta t$ , обеспечивающего выполнение (2.16)] для  $j$ -го узла и момента времени  $t_N$ :

$$n_j(t_N) = \max \left\{ \begin{array}{l} -\frac{b}{\Delta U_0} + \sqrt{\left(\frac{b}{\Delta U_0}\right)^2 - \frac{2c}{\Delta U_0}}; \\ \frac{b}{\Delta U_0} + \sqrt{\left(\frac{b}{\Delta U_0}\right)^2 - \frac{2c}{\Delta U_0}}, \end{array} \right. \quad (2.17)$$

где  $b = -2,5U_j^{(p)}(t_N, \Delta t) + 16U_j^{(p)}\left(t_N, \frac{\Delta t}{2}\right) - 13,5U_j^{(p)}\left(t_N, \frac{\Delta t}{3}\right); \quad (2.18)$

$$c = 3U_j^{(p)}(t_N, \Delta t) - 12U_j^{(p)}\left(t_N, \frac{\Delta t}{2}\right) + 9U_j^{(p)}\left(t_N, \frac{\Delta t}{3}\right). \quad (2.19)$$

Нетрудно видеть, что для обеспечения условия (2.16) для всех узлов цепи и всех моментов времени  $t_N$  динамического режима достаточно принять значение  $n$  в соответствии с выражением

$$n = [\max_{j \in J, t_N \in T} n_j(t_N)], \quad (2.20)$$

где  $[\ ]$  – округление в ближайшую сторону до ближайшего целого;  $J$  – множество всех узлов цепи;  $T$  – интервал времени, на котором производится анализ динамического режима.

Для определения величины  $n$ , согласно (2.17) – (2.18), требуется три "расчета" динамического режима (при  $\Delta t$ ,  $\Delta t / 2$  и  $\Delta t / 3$ ), а при  $n > 3$  – еще и дополнительный "расчет" динамического режима при  $\Delta t / 3$ , а во втором – при  $\Delta t / n$ .

Таким образом, изложенный подход позволяет с заданной точностью  $\Delta U_0$  получать решения системы уравнений вида (2.1) – (2.8) при трех или четырех последовательных решениях системы для всех моментов времени динамического режима и исходной дискретности  $\Delta t$ . Следует отметить, что в данном случае при анализе динамического режима число решений ( $N_p$ ) уравнений вида (2.1) – (2.8) может быть

$$N_p = 6 \frac{T}{\Delta t} + 3 \quad (\text{при } n \leq 3) \quad (2.21)$$

либо

$$N_p = (n + 6) \frac{T}{\Delta t} + 4 \quad (\text{при } n > 3), \quad (2.22)$$

где  $T$  – интервал времени анализа динамического режима;  $\Delta t$  – исходная дискретность времени разностных уравнений;  $n$  – делитель исходной дискретности времени  $\Delta t$  разностных уравнений для обеспечения погрешности вычисления не более  $\Delta U_0$ .

## 2.4 СОКРАЩЕНИЕ ВРЕМЕНИ РЕШЕНИЯ ЛИНЕЙНОЙ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ

В выражениях (2.21), (2.22) значения  $N_p$  для реальных РП могут оказаться достаточно большими. Поэтому весьма актуальна задача сокращения времени решения системы линейных уравнений вида (2.1) – (2.8).

Если первыми в системе уравнений записать уравнения, соответствующие внутренним узлам цепи питания, то такую систему можно представить в матричной форме  $\mathbf{A} \times \mathbf{X} = \mathbf{B}$  в виде двух частей

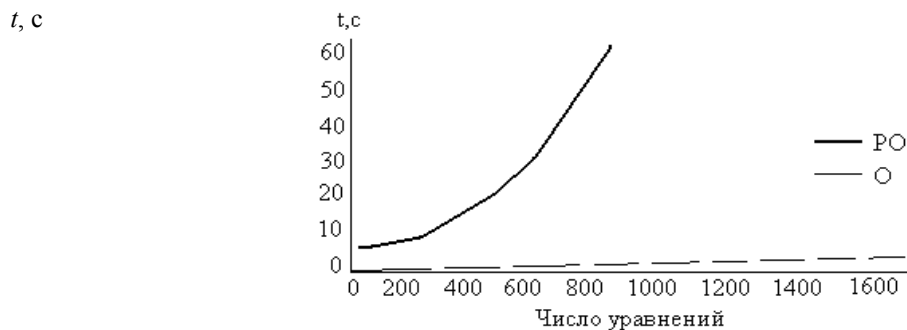
$$\begin{cases} \mathbf{A}^1 \times \mathbf{X}^1 = [\mathbf{0}]; \\ \mathbf{A}^2 \times \mathbf{X}^2 = \mathbf{B}^2, \end{cases} \quad (2.22)$$

где  $\mathbf{A}^1$  – верхняя часть матрицы  $\mathbf{A}$  левой части, которая соответствует внутренним узлам цепи питания;  $\mathbf{X}^1$  – вектор-столбец напряжений внутренних узлов цепи питания;  $[\mathbf{0}]$  – нулевой вектор-столбец правых частей уравнений внутренних узлов цепи питания;  $\mathbf{A}^2$  – нижняя часть матрицы  $\mathbf{A}$  левой части, которая соответствует уравнениям монтажных точек цепи питания;  $\mathbf{X}^2$  – вектор-столбец напряжений монтажных точек цепи питания;  $\mathbf{B}^2$  – вектор-столбец правых частей уравнений монтажных точек цепи питания.

Из (2.1) – (2.8) видно, что матрицы  $\mathbf{A}^1$  уравнений динамического режима не отличаются от матриц уравнений статического режима, а матрица  $\mathbf{A}^2$  уравнений динамического режима отличается от матрицы уравнений статического режима только величиной элементов главной диагонали. Аналогично отличаются матрицы  $\mathbf{A}^2$  уравнений динамического режима при различных значениях  $\Delta t$ . Кроме того, вектор-столбец  $\mathbf{B}^2$  для каждого решения индивидуален.

Используя то, что во всех методах решения систем линейных уравнений сначала проводится "прямой проход" (сверху – вниз), а затем – "обратный проход" (снизу – вверх), можно заметить, что прямой проход по матрице  $\mathbf{A}^1$  может проводиться только один раз (во время анализа статического режима). Прямой проход по матрице  $\mathbf{A}^2$  при неизменном значении  $\Delta t$  также можно проводить только один раз. Для метода Краута, использующего LU-разложение, это приводит к единственному выполнению LU-разложения и многократному обратному проходу с использованием треугольных матриц  $\mathbf{L}$  и  $\mathbf{U}$ . На рис. 2.8 приведены экспериментальные зависимости времени решения системы линейных уравнений методом Краута от числа уравнений при прямом и обратном проходах (PO) и только при обратном проходе (O) для IBM PC-AT 386/40 МГц.

Необходимость расчета только  $U_j$  точек подключения ЭРЭ и подвода питания позволяет обратный проход во всех решениях проводить только по уравнениям  $\mathbf{A}^2 \times \mathbf{X}^2 = \mathbf{B}^2$  (для метода Краута – по соответствующим  $\mathbf{A}^2$  нижним частям треугольных матриц  $\mathbf{L}$  и  $\mathbf{U}$ ). Кроме того, можно показать, что максимальные погрешности решений для неизвестных, соответствующих внутренним узлам цепи питания, не превосходят погрешностей в узлах подключения ЭРЭ и подвода питания для



**Рис. 2.8** Экспериментальные зависимости времени решения системы линейных уравнений методом Краута от числа уравнений

того же момента времени. Это обеспечивает возможность определения значения  $n$  (делителя исходной дискретности времени разностных уравнений для обеспечения погрешности вычисления не более  $\Delta U_0$ ) в выражениях (2.17) – (2.20) не по всем узлам цепи питания, а только по узлам, соответствующим монтажным точкам.

Описанные приемы дают весьма существенное сокращение общего времени решения систем линейных уравнений вида (2.1) – (2.8), поскольку для РП с большим потреблением тока в цепях питания число внутренних узлов может быть несколько тысяч, в то время, как число монтажных точек для одной цепи питания редко превышает 200.

## 2.5 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИСХОДНОЙ ДИСКРЕТНОСТИ ВРЕМЕНИ РАЗНОСТНЫХ УРАВНЕНИЙ



Выбор моментов времени для решения разностных уравнений может существенно влиять на правильность решения задачи анализа цепей питания в динамическом режиме. Так, если моменты времени выбраны с большим интервалом времени  $\Delta t$ , то даже при достаточно точных значениях  $U_j$ , вычисленных для моментов времени  $t_i$  и  $t_i + \Delta t / n$ , между этими моментами времени могут оказаться значения  $U_j$ , недопустимые для нормального функционирования ЭРЭ. Причем это не будет обнаружено из-за выбора большого значения  $\Delta t$ . Выбор неоправданно малых  $\Delta t$  может привести к неприемлемо большому времени расчета динамического режима.

При выборе значения исходной дискретности времени  $\Delta t$  необходимо учитывать следующие факторы, каждый из которых может создавать ограничение на величину  $\Delta t$ .

*Фактор внешних воздействий на цепь питания* – это изменяющиеся значения  $U_{pj}$  и  $I_{nj}$ , которые вызывают переходные процессы в цепи питания. Поскольку такие воздействия задаются в дискретные моменты времени с дискретностью  $\Delta t_w$ , то фактически имеет место кусочно-линейная аппроксимация любого внешнего воздействия с постоянным шагом  $\Delta t_w$ . Тогда для обеспечения полноты использования информации о внешних воздействиях шаг  $\Delta t_w$  должен быть верхней границей задания  $\Delta t$ .

*Фактор постоянных параметров цепи питания* – это то, что определяет реакцию на внешние воздействия. Поскольку в модели цепи питания для динамического режима отсутствуют нелинейные и активные элементы, то возникновение генерации на собственных частотах цепи значений  $U_j(t)$  исключено. Поэтому  $U_j(t)$  каждого узла цепи только "обрабатывает" внешние воздействия, реагируя на них импульсом с последующим периодическим или аperiodическим ("почти экспоненциальным") затуханием. В этом случае бывает важно определить максимальное (минимальное) значение  $U_j(t)$  в таком импульсе и его "ширину" на уровне заданного значения  $U_{\text{имп}}$  по отношению к установившемуся значению переходного процесса. Следует отметить, что такой импульс может быть "сдвинут" по времени от внешнего воздействия, породившего его. Однако, несмотря на всю кажущуюся сложность, учет данного фактора при выборе  $\Delta t$  возможен при учете третьего фактора.

*Фактор длительности "опасных" сигналов* – это минимальная длительность  $T_{\text{min}}$  упомянутых выше импульсов, при которой нарушается правильное функционирование ЭРЭ схемы, подключенных к данной цепи питания. Для учета этого фактора достаточно задать  $\Delta t \leq T_{\text{min}} / 2$ . Однако, поскольку для обеспечения точности решений обязательное решение системы разностных уравнений проводится для  $\Delta t$ ,  $\Delta t / 2$  и  $\Delta t / 3$ , то можно "ослабить" ограничение на начальное значение  $\Delta t$ :

$$\Delta t \leq 3T_{\text{min}} / 2.$$

Таким образом,  $\Delta t$  следует выбирать таким образом, чтобы

$$\begin{cases} \Delta t \leq \Delta t_w; \\ \Delta t \leq 3T_{\text{min}} / 2. \end{cases}$$

Других требований к  $\Delta t$  не предъявляется.

## 2.6 ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОСТОЯННОЙ ДИСКРЕТНОСТИ ВРЕМЕНИ ПРИ РАСЧЕТЕ ДИНАМИЧЕСКОГО РЕЖИМА

Использование постоянной величины  $\Delta t$  ( $\Delta t = \text{const}$ ) в рассмотренном способе анализа цепей питания РП является альтернативой применению общепризнанных эффективными для анализа переходных процессов в цепях способов, использующих переменные значения  $\Delta t$  ( $\Delta t = \text{var}$ ), вычисляемые для каждого очередного момента времени.

Основным фактором, создающим преимущества использования  $\Delta t = \text{const}$  при анализе цепей питания, является зависимость значений элементов матрицы  $\mathbf{A}^2$  от  $\Delta t$  и независимость этих значений от изменяющихся величин  $I_{nj}$  и  $U_{pj}$ . При этом появляется возможность при расчете динамического режима для каждого момента времени (кроме  $t = 0$ ) получать решения только "обратным проходом" по уравнениям  $\mathbf{A}^2 \times \mathbf{X}^2 = \mathbf{B}^2$ .

При использовании предложенного способа расчета динамического режима с  $\Delta t = \text{const}$  общее время расчета  $T_c$  можно записать как

$$T_c = \begin{cases} 3t_1 + 2 \frac{T}{\Delta t_m} t_2 \Rightarrow n \leq 3; \\ 4t_1 + \left(\frac{n+6}{n}\right) \frac{T}{\Delta t_m} t_2 \Rightarrow n > 3, \end{cases} \quad (2.23)$$

где  $t_1$  – время "прямого и обратного проходов" при решении уравнений  $\mathbf{A}^2 \times \mathbf{X}^2 = \mathbf{B}^2$  с учетом вычисления элементов  $\mathbf{B}^2$ ;  $T$  – интервал времени анализа динамического режима;  $\Delta t_m$  – максимальное значение  $\Delta t$ , обеспечивающее заданную точность решения уравнений.

Нетрудно показать, что пессимистическая оценка для (2.23) получается при  $n = 4$  и имеет вид

$$T_c = 4t_1 + 2,5 \frac{T}{\Delta t_m} t_2, \quad (2.24)$$

а оптимистическую оценку можно получить при достаточно большом  $n$  (например,  $n = 100$ ) в виде

$$T_c = 4t_1 + 0,94 \frac{T}{\Delta t_m} t_2. \quad (2.25)$$

При использовании  $\Delta t = \text{var}$  оценку времени расчета  $T_v$  динамического режима можно записать как

$$T_v = k_p \left( \frac{T}{\Delta t_{\text{cp}}} + 1 \right) t_1, \quad (2.26)$$

где  $\Delta t_{\text{cp}}$  – среднее значение  $\Delta t$  на интервале времени  $T_0$ ;  $k_p$  – отношение общего числа итераций к числу принятых шагов (из табл. 3.7 [6] и табл. 4.2 [7] интервал значений  $k_p$  получается 1,93...3,12 даже при использовании порядков методов интегрирования от 2 до 6).

Тогда оптимистическая оценка  $T_v$  (при  $k_p = 1,93$ ) имеет вид

$$T_v = 1,93 \left( \frac{T}{\Delta t_{\text{cp}}} + 1 \right) t_1, \quad (2.27)$$

а пессимистическая (при  $k_p = 3,12$ )

$$T_v = 3,12 \left( \frac{T}{\Delta t_{\text{cp}}} + 1 \right) t_1. \quad (2.28)$$

Условием преимущества использования способа расчета с  $\Delta t = \text{const}$  будет

$$T_v > T_c. \quad (2.29)$$

Из (2.24) – (2.28) для оптимистической оценки (2.29) получаем:

$$\frac{3,12T - 0,88\Delta t_{\text{cp}}}{\Delta t_{\text{cp}}} t_1 > 0,94 \frac{T}{\Delta t_m} t_2, \quad (2.30)$$

а для пессимистической:

$$\frac{1,93T - 2,07\Delta t_{cp}}{\Delta t_{cp}} t_1 > 2,5 \frac{T}{\Delta t_m} t_2. \quad (2.31)$$

Полагая  $\Delta t_{cp} \approx 0,1T$ , что является оптимистичным для  $\Delta t = var$ , заменяя в (2.30)  $3,12T - 0,88\Delta t_{cp}$  на  $3,1T$ , а в (2.31)  $1,93T - 2,07\Delta t_{cp}$  на  $1,8T$ , получаем соответственно

$$\frac{\Delta t_{cp}}{\Delta t_m} < 3,3 \frac{t_1}{t_2} \quad \text{и} \quad \frac{\Delta t_{cp}}{\Delta t_m} < 0,72 \frac{t_1}{t_2}. \quad (2.32)$$

Отношение  $t_1 / t_2$  является функцией  $K$  числа узлов подключения ЭРЭ и подвода питания в цепи. Полученная интерполяцией такая функция имеет вид

$$t_1 / t_2 = 14,2 + 0,038K + 1,08 \cdot 10^{-5} K. \quad (2.33)$$

Из (2.32) и (2.33) получается соответственно

$$\left( \frac{\Delta t_{cp}}{\Delta t_m} \right)_{\max} < 46,86 + 0,125K + 3,56 \cdot 10^{-5} K;$$

$$\left( \frac{\Delta t_{cp}}{\Delta t_m} \right)_{\min} < 10,22 + 0,027K + 0,778 \cdot 10^{-5} K.$$

Для реальных РП на интервале значений  $K = 50 \dots 500$  значения оценок ограничений по  $\left( \frac{\Delta t_{cp}}{\Delta t_m} \right)_{\max}$  и  $\left( \frac{\Delta t_{cp}}{\Delta t_m} \right)_{\min}$  эффективного использования  $\Delta t = const$  приведены в табл. 2.1.

Рассмотрим факторы, определяющие значение  $\Delta t_{cp} / \Delta t_m$  при анализе цепей питания реальных РП.

Для  $\Delta t = const$  величина  $\Delta t_m$  определялась с учетом накопленной погрешности на всем интервале  $T$ . Поэтому можно считать, что минимальное значение  $\Delta t$  при  $\Delta t = var$  будет приблизительно равно  $\Delta t_m$ .

Спецификой цепей питания (особенно импульсных схем) является быстрое увеличение (или уменьшение) потребляемого тока отдельных нагрузок, которое распространяется с различными задержками на все узлы цепи. Поэтому почти в каждый момент времени внутри интервала  $T$  найдется узел цепи, в котором в этот момент времени происходит существенное изменение напряжения. Отмечено, что минимальные  $\Delta t$  при расчетах с  $\Delta t = var$  получаются именно при значительных

## 2.1 Значения оценок ограничений эффективного использования

K	Нижние оценки $m$ эффективности при $\Delta t = const$	
	$(\Delta t_{cp} / \Delta t_m)_{\min}$	$(\Delta t_{cp} / \Delta t_m)_{\max}$
50	11,59	53,19
100	13,0	59,68
200	15,94	73,14
300	19,04	87,24
400	22,3	101,98
500	25,72	117,36

изменениях сигналов хотя бы в одной точке цепи, описанной уравнением из решаемой системы. На основании изложенного можно считать, что  $\Delta t_{cp}$  для цепей питания не сильно отличается от  $\Delta t_m$ . Но из таблицы видно, что даже если  $\Delta t_{cp} / \Delta t_m < 11,5$ , то для реальных РП преимущество по быстродействию

при расчете с  $\Delta t = \text{const}$  гарантировано даже при  $K = 50$ . При увеличении же  $K$ , а именно тогда существенным является сокращение времени расчета, пессимистическая оценка  $\Delta t_{\text{cp}} / \Delta t_m$  увеличивается до 25,72 (при  $K = 500$ ), а оптимистическая доходит до 117,36.

Это позволяет с большой степенью вероятности утверждать, что использование предложенного способа расчета динамических режимов цепей питания (особенно импульсных схем) с  $\Delta t = \text{const}$  и при больших значениях  $K$  имеет существенное преимущество перед использованием способов расчета с  $\Delta t = \text{var}$ .

## 2.7 НАПРАВЛЕНИЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СПОСОБОВ АНАЛИЗА ЦЕПЕЙ ПИТАНИЯ

Рассмотренный подход к решению задачи анализа цепей питания имеет три недостатка, которые могут существенно влиять на точность получаемых результатов.

*Первым недостатком* является предположение "жесткой фиксации" потенциала цепи обратного прохождения тока. Устранение этого недостатка может быть проведено по крайней мере двумя способами.

Первым способом является переход от анализа каждой цепи питания к анализу одновременно всех гальванически связанных цепей питания на РП. Этот способ предусматривает переход от уравнений типа (2.1) – (2.8) для одной цепи к подобным, но несколько иным уравнениям, составленным для всех гальванически связанных цепей питания, присутствующих на конкретной РП. Достоинством этого способа является полное устранение указанной методической ошибки. Недостатками являются существенное увеличение числа уравнений в системе и, следовательно, существенное увеличение времени решения таких уравнений.

Вторым способом является учет данного недостатка при задании параметров схем узлов. Можно предположить, что существуют "жестко фиксированный" потенциал, значение которого расположено между потенциалами различных цепей питания, относительно которого записываются уравнения вида (2.1) – (2.8).

*Вторым недостатком* является предположение отсутствия взаимной индукции между рельефными проводниками и, как следствие этого, неучет конфигурации ветвей цепи при задании их индуктивностей.

Данный недостаток является методическим. Несколько уменьшить его проявление можно, предусмотрев в некоторых конструкциях РП приклеенное металлическое основание, существенно уменьшающее вклад взаимоиндукции в индуктивность внешней цепи. Однако при отсутствии такого основания этот вклад может превышать 70 %. Для РП без приклеенного металлического основания способом компенсации данной методической погрешности является завышение значения погонной индуктивности в 2 – 4 раза. Это приводит к "пессимистической" оценке  $\max(\Delta U_{\text{cp}} + \Delta U_{\text{дин}})$  узлов цепи, но предотвращает получение неверной "оптимистической" оценки.

*Третьим недостатком* является сложность получения истинных точных временных диаграмм нагрузок по питанию для большинства ЭРЭ в динамическом режиме. Этот недостаток приводит к анализу динамического режима по "худшему случаю". Приходится задавать реальные по времени, но максимальные по амплитуде импульсы  $U_{nj}$ . Более того, поскольку весьма сложно прогнозировать моменты времени возникновения таких импульсов, то обычно появление этих импульсов задают в один и тот же момент времени для всех ЭРЭ. Это приводит иногда к весьма "пессимистической" оценке потенциалов узлов цепи в динамическом режиме. Однако при отсутствии более точной информации о "динамике нагрузок" принципиально невозможно получить реальный результат для расчета динамического режима. Следует отметить, что для динамического режима погрешности, обусловленные третьим недостатком, существенно "перекрывают" погрешности, вызванные первым и вторым недостатками.

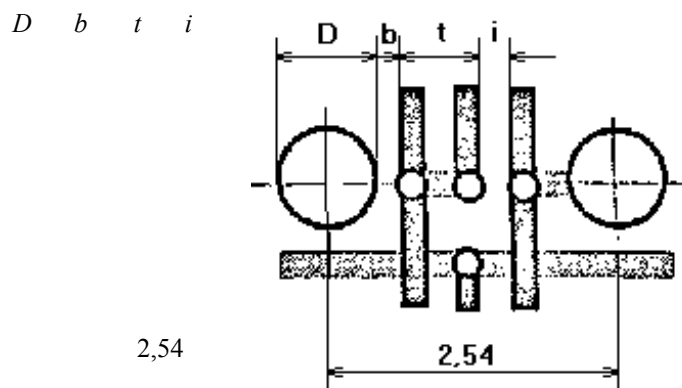
### 3.1 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕМЕНТОВ РПП

**ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕМЕНТОВ РПП ЗАВИСЯТ ОТ ЦЕЛОГО РЯДА ФАКТОРОВ, В БОЛЬШЕЙ ИЛИ МЕНЬШЕЙ СТЕПЕНИ ВЛИЯЮЩИХ НА ИЗМЕНЕНИЕ РАСЧЕТНЫХ ВЕЛИЧИН: РЕЖИМА РАБОТЫ СХЕМЫ, ПРИМЕНЯЕМОГО МАТЕРИАЛА, ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ, ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И Т.Д.**

Основной отличительной особенностью РПП, определяющей ее электрические, механические и эксплуатационные характеристики, является способ нанесения проводящего рисунка на диэлектрик.

Разработанные технологии индивидуального и серийного производства позволяют наращивать проводящий слой одновременно и на трассах проводников и в межслойных отверстиях. В результате образуется монолитная, металлическая пространственная решетка, исключая отслаивание и резко увеличивающая прочность монтажа. Фрагмент такой решетки с ортогональным монтажом представлен на рис. 3.1.

В табл. 3.1 даны некоторые соотношения между параметрами элементов РПП и параметрами трасс рисунка монтажа.



**Рис. 3.1 Фрагмент решетки с ортогональным монтажом:**  
*b* – ширина проводника; *D* – диаметр монтажного отверстия;  
*d* – диаметр межслойного отверстия ( $b > d$ );  
*i* – расстояние между проводниками;  
*n* – число проводников между монтажными отверстиями;  
*t* – шаг проводников ( $t = b + i$ )

3.1 Соотношения между параметрами элементов РПП и параметрами трасс рисунка монтажа

<i>t</i> , мм	<i>b</i> , мм	<i>i</i> , мм	<i>D</i> , мм	<i>d</i> , мм	<i>n</i>
0,5	0,22	0,28	0,8	0,18	3
0,5	0,22	0,28	0,3	0,18	4
0,4	0,18	0,22	0,8	0,15	4
0,4	0,18	0,22	0,2	0,15	5
0,32	0,15	0,17	0,8	0,13	5
0,32	0,15	0,17	0,23	0,13	6
0,25	0,12	0,13	0,8	0,11	6
0,20	0,10	0,10	0,8	0,10	7

При проектировании РПП необходимо учитывать электрические параметры рельефных плат.

К этим параметрам относятся:

- омическое сопротивление постоянному и переменному току;
- емкость проводников;
- индуктивность и взаимная индуктивность трасс;
- волновое сопротивление.

В настоящее время аналитически достаточно точно может быть рассчитано только омическое сопротивление проводников РПП. Расчет остальных параметров: емкости, индуктивности, взаимной индуктивности трасс и волнового сопротивления – связан с трудностями, обусловленными нестандартной конфигурацией сечения проводников трасс и краевыми эффектами. Поэтому определение электрических параметров производилось на образцах РПП.

Исследуемые РПП изготавливались из стеклотекстолита толщиной 0,47 мм. Длина проводников – 200 мм, сечение проводников представлено на рис. 3.2. При этом измерялись погонные значения омического сопротивления, емкости и индуктивности в зависимости от расстояния между проводниками и положением их относительно плоского экрана, выполненного из алюминиевого сплава.

Параметры сечения проводника для всех этапов измерений соответствовали следующим величинам (они выбраны, исходя из наиболее часто встречающихся материалов и конфигурации проводников).

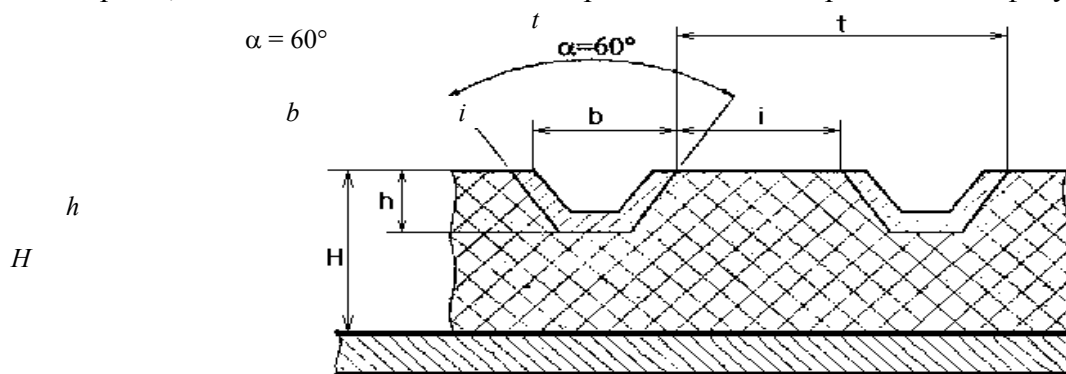


Рис. 3.2 Сечение проводников

Материал проводника – гальванически осажденная медь (Cu).

Толщина проводящего слоя меди  $A = 0,02$  мм.

Ширина проводника  $b = 0,2$  мм выбрана средней из 0,18...0,22 мм.

Покрытие проводника производится припоем – сплавом олово–висмут SnBi<sub>4</sub> толщиной  $S = 0,002$  мм.

Заглубление проводника в диэлектрик  $h = 0,15$  мм

Угол стенок канавки заглубления  $\alpha = 60^\circ$ .

### 3.2 РАСЧЕТ ОМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

Поперечное сечение проводника состоит из двух частей: гальванически осажденной меди и припоя, например, SnBi.

Омическое сопротивление проводника определяется по формуле:

$$R = (R_{\text{пр}} R_{\text{м}}) / (R_{\text{пр}} + R_{\text{м}}), \quad (3.1)$$

где  $R_{\text{м}}$  – сопротивление меди, Ом;  $R_{\text{пр}}$  – сопротивление припоя, Ом.

Сопротивления припоя и меди рассчитываются по формулам:

$$\begin{aligned} R_{\text{пр}} &= \rho_{\text{пр}} l / S_{\text{пр}}; \\ R_{\text{м}} &= \rho_{\text{м}} l / S_{\text{м}}, \end{aligned} \quad (3.2)$$

где  $l$  – длина проводника, м;  $\rho_{\text{пр}}$  – удельное сопротивление припоя, равное  $0,15 \text{ Ом} \cdot \text{мм/м}$ ;  $\rho_{\text{м}}$  – удельное сопротивление гальванически осажденной меди, равное  $0,05 \text{ Ом} \cdot \text{мм/м}$ ;  $S_{\text{пр}}$  – сечение припоя, мм;  $S_{\text{м}}$  – сечение меди, мм.

### 3.2 Результаты расчета погонного сопротивления проводников

$\Delta$ , мм	$S_{\text{м}} \cdot 10^{-2}$ , мм	$S_{\text{пр}} \cdot 10^{-2}$ , мм	$R_{\text{м}}$ , Ом	$R_{\text{пр}}$ , Ом	$R$ , Ом
0,02	0,68	1,02	7,35	14,7	4,9
0,035	1,08	0,62	4,63	24,2	3,88
0,05	1,39	0,31	3,60	48,4	3,35

Результаты расчета погонного сопротивления проводников для разных значений толщины  $\Delta = 0,02 \dots 0,05$  мм, при  $b = 0,2$  мм,  $h = 0,15$  мм, приведены в табл. 3.2.

### 3.3 РАСЧЕТ ЕМКОСТИ МЕЖДУ ПРОВОДНИКАМИ

Емкость между проводниками рассчитывается по формуле

$$C = C_{\text{пог}} l, \quad (3.3)$$

где  $C$  – емкость между проводниками, пФ;  $C_{\text{пог}}$  – погонная емкость между проводниками, пФ;  $l$  – длина проводника, см.

На рис. 3.3 – 3.6 представлены расположения проводников относительно экрана.

Значения  $C_{\text{пог}}$  в зависимости от расположения проводников относительно экрана и расстояния между проводниками приведены в табл. 3.3 – 3.6.

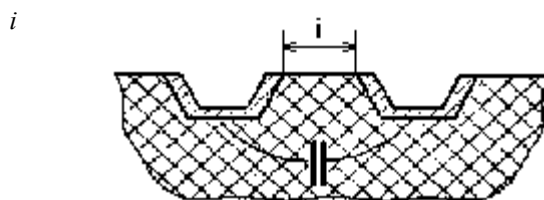


Рис. 3.3

Таблица 3.3

$i$ , мм	0,5	1	1,5	2	3	5	7	10	15	20
$C_{\text{пог}}$ , пФ/см	0,95	0,44	0,30	0,24	0,17	0,12	0,1	0,08	0,06	0,05

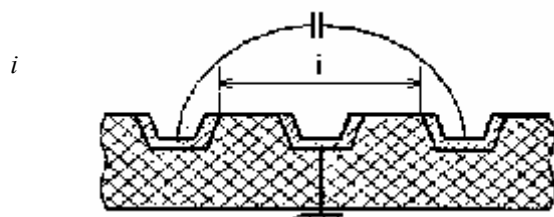


Рис. 3.4

Таблица 3.4

$i$ , мм	1	1,5	2	3	5	7	10	15	20
$C_{\text{пог}}$ , пФ/с м	0,13	0,09 5	0,08 5	0,06 5	0,05	0,04	0,03 3	0,02 7	0,02 2

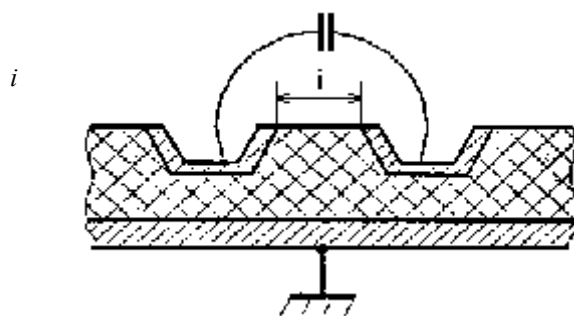


Рис. 3.5

Таблица 3.5

$i$ , мм	0, 5	1	1,5	2	3	5	7	10	15
$C_{\text{пог}}$ , пФ/с м	0,6 8	0,1 7	0,07 5	0,0 4	0,01 8	0,00 6	0,003 4	0,001 5	0,0007 5

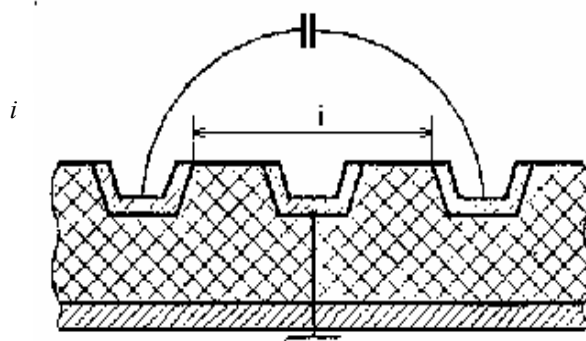


Рис. 3.6

Таблица 3.6

$i$ , мм	1	1,5	2	3	5	7	10	15
$C_{\text{пог}}$ , пФ/с м	0,023	0,018	0,014	0,009	0,005	0,003	0,001	0,000 7

Емкость  $C$  проводника относительно экрана рассчитывается по формуле



$$C = C_{\text{пог}} l, \quad (3.4)$$

где  $C$  – емкость между проводниками, пФ;  $C_{\text{пог}}$  – погонная емкость между проводниками, пФ;  $l$  – длина проводника, см.

На рис. 3.7 и 3.8 представлены расположения проводников относительно экрана.

Значения  $C_{\text{пог}}$  в зависимости от расположения и расстояния проводника относительно экрана приведены в табл. 3.7 и 3.8.

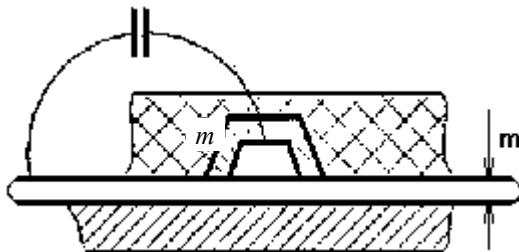


Рис. 3.7

Таблица 3.7

$i, \text{ мм}$	0,04	0,06	0,08	0,1	0,12	0,15	0,2	0,3	0,4	0,6
$C_{\text{пог}}, \text{ пФ/с м}$	0,93	0,88	0,86	0,83	0,81	0,79	$\frac{0,7}{7}$	0,73	0,69	$\frac{0,6}{6}$

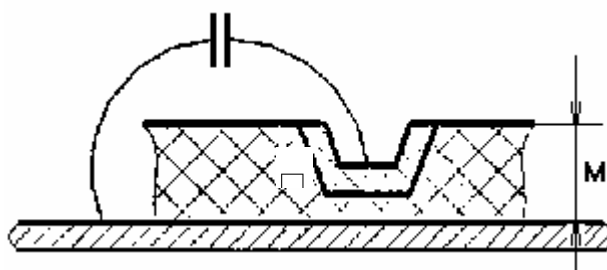


Рис. 3.8

Таблица 3.8

$i, \text{ мм}$	$\frac{0,4}{5}$	0,5	$\frac{0,5}{5}$	0,6	$\frac{0,6}{5}$	0,7	0,8	0,9	1,0
$C_{\text{пог}}, \text{ пФ/с м}$	$\frac{0,9}{7}$	$\frac{0,8}{6}$	$\frac{0,8}{2}$	$\frac{0,7}{6}$	$\frac{0,7}{2}$	$\frac{0,6}{8}$	$\frac{0,6}{3}$	$\frac{0,5}{9}$	$\frac{0,5}{6}$

### 3.4 РАСЧЕТ ИНДУКТИВНОСТИ

Индуктивность  $L$  проводника РПП определяется по формуле

$$L = L_{\text{пог}} l, \quad (3.5)$$

где  $L$  – индуктивность контура, нГн;  $L_{\text{пог}}$  – погонная индуктивность контура, нГн;  $l$  – длина контура, см.

На рис. 3.9 – 3.12 представлены расположения проводников относительно экрана.

Значения  $L_{\text{пог}}$  в зависимости от расположения и расстояния проводников относительно экрана приведена в табл. 3.9 – 3.12.

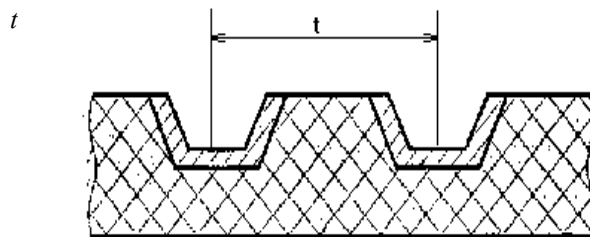


Рис. 3.9

Таблица 3.9

$i$ , мм	0,5	1	1,5	2	2,5	3	4	5	7	10
$L_{\text{пог}}$ , нГн/с м	6,2	8,8	10,2	11,3	12,1	12,8	13,9	14,7	15,8	17,1

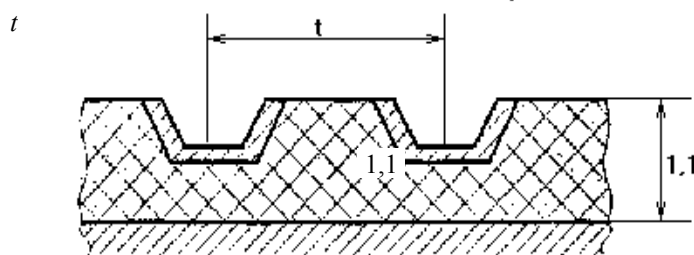


Рис. 3.10

Таблица 3.10

$i$ , мм	0,5	1	1,5	2	2,5	3	4	5	7	10
$L_{\text{пог}}$ , нГн/с м	6,2	8,1	9,1	9,7	10,2	10,5	10,9	11,1	11,2	10,2

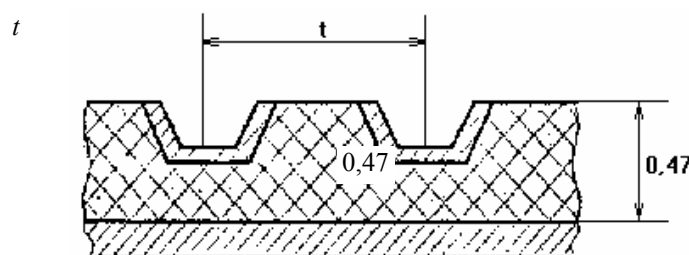


Рис. 3.11

Таблица 3.11

$i$ , мм	0,5	1	1,5	2	2,5	3	4	5	7	10
$L_{\text{пог}}$ , нГн/с м	6,2	8,1	8,7	9,1	9,2	9,2	9,3	9,4	9,5	9,7

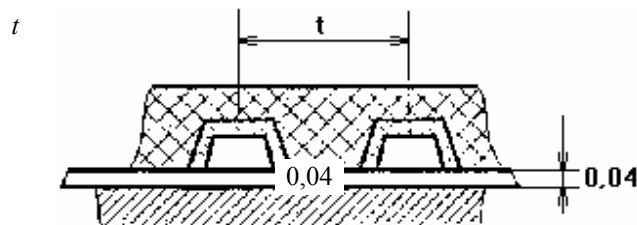


Рис. 3.12

Таблица 3.12

$i$ , мм	0,5	1	1,5	2	2,5	3	4	5	7	10
$L_{\text{пог}}$ , нГн/с м	5,2	6,5	7,4	7,6	7,7	7,7	7,7	7,7	7,7	7,7

Индуктивность  $L$  контура, состоящего из рельефного проводника и экрана, рассчитывается по формуле

$$L = L_{\text{пог}} l, \quad (3.6)$$

где  $L$  – индуктивность контура, нГн;  $L_{\text{пог}}$  – погонная индуктивность контура, нГн;  $l$  – длина проводника, см.

На рис. 3.13 и 3.14 представлены расположения проводников относительно экрана.

Значения  $L_{\text{пог}}$  в зависимости от расположения и расстояния проводника относительно экрана приведены в табл. 3.13 и 3.14.

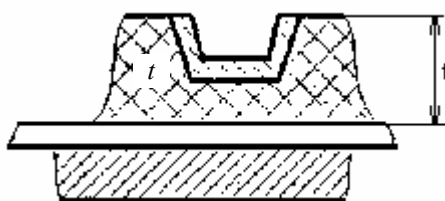


Рис. 3.13

Таблица 3.13

$i$ , мм	0,45	0,06	0,08	0,1	0,12	0,15	0,2	0,3	0,4	0,6
$L_{\text{пог}}$ , нГн/с	4,0	4,2	4,3	4,4	4,5	4,65	4,8 5	5,3	5,7	6,2

М										
---	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

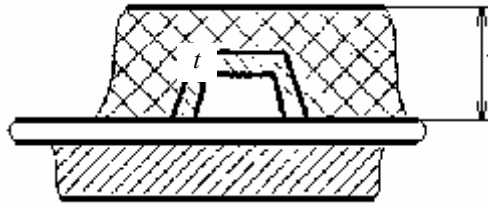


Рис. 3.14

Таблица 3.14

$i$ , мм	0,45	0,06	0,08	0,1	0,12	0,15	0,2	0,3	0,4	0,6
$L_{\text{пог}}$ , нГн/с	4,0	4,2	4,3	4,4	4,5	4,65	4,8	5,3	5,7	6,2
М							5			

### 3.5 ВОЛНОВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ

Величина волнового сопротивления  $Z_0$  линии, образованной двумя печатными проводниками (двухпроводная линия) в печатных платах, зависит преимущественно от двух факторов.

- 1 От расстояния  $i$  между проводниками.
- 2 От расстояния  $H$ , мм между проводниками и экранирующим слоем.

На рис. 3.15 и 3.16 представлены расположения проводников относительно экрана.

Величина  $Z_0$  определялась путем подбора нагрузочного сопротивления  $R$  на выходе цепи, образованной логическим проводником и питающим слоем, образующих прямой и обратный провода, при котором входное сопротивление является чисто активным. Результаты измерений представлены в табл. 3.15 и 3.16.

Зависимость волнового сопротивления  $Z_0$  линии, образованной одним печатным проводником и экраном, отстоящим от проводника на  $H$ , мм, представлена в табл. 3.15.

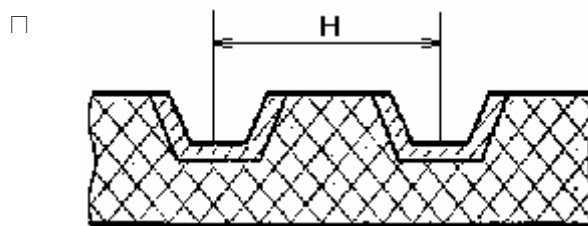


Рис. 3.15

Таблица 3.15

$H$ , мм	0,5	1	1,5	2	3	5	7	10	15	20
$Z_0$	11 5	18 2	21 5	23 8	26 8	30 2	32 5	35 0	38 0	40 0

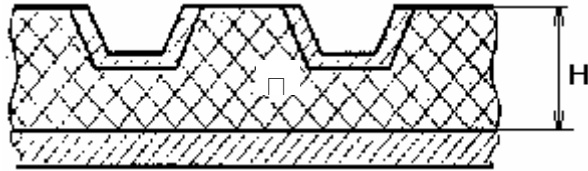


Рис. 3.16

Таблица 3.16

$H$ , мм	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1
$Z_0$	72	76	79	83	86	89	94	100	103	107

Таблица 3.17

$H$ , мм	0,04	0,06	0,08	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
$Z_0$	72	76	79	83	86	89	94	100	103

В табл. 3.17 представлена зависимость волнового сопротивления от расстояния проводника от экрана при малых значениях  $H$  и диэлектрике – триацетатной пленке толщиной от 0,04 до 0,5 мм.

## 4 ПРОЕКТИРОВАНИЕ ДВУХСТОРОННИХ РПП

### ПРОЕКТИРОВАНИЕ ДВУХСТОРОННЕЙ РЕЛЬЕФНОЙ ПЛАТЫ (ДРП) МОЖЕТ ОСУЩЕСТВЛЯТЬСЯ НА ПЕРСОНАЛЬНЫХ ЭВМ С ПРИМЕНЕНИЕМ СТАНДАРТНЫХ СИСТЕМ ПРОЕКТИРОВАНИЯ (P-CAD) .

Достоинства ДРП: САПР обеспечивает 100%-ную трассировку в двух слоях сложных схем с максимально возможной плотностью размещения элементов, габариты и функциональные возможности которых эквиваленты современным 5 – 14-слойным многослойным печатным платам (МПП) В ряде случаев схемы реализуются в меньших габаритах, недостижимых для МПП.

Таким образом, рельефные печатные платы, обладая свойствами многослойных и двухсторонних печатных плат, благодаря своим конструктивным и технологическим особенностям не только исключают их основные недостатки, но и создают дополнительные преимущества и новые возможности для разработчиков радиоэлектронной аппаратуры.

#### 4.1 ВЫБОР ГАБАРИТНЫХ РАЗМЕРОВ И ФОРМЫ ПЛАТЫ

##### ВЫБОР ГАБАРИТНЫХ РАЗМЕРОВ И ФОРМЫ ПЛАТЫ ОСУЩЕСТВЛЯЕТСЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПРИОРИТЕТНОСТИ ТРЕБОВАНИЙ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫХ К ПЛАТЕ:

- размещение заданного состава элементов на плате заданных размеров;
- определение минимальных размеров платы при заданном составе элементов;
- определение максимального количества элементов при заданных размерах платы.

При выборе размеров и формы платы следует учитывать следующие факторы:

- трассировочная способность платы тем больше, чем ближе форма платы к квадрату;
- если на плате устанавливается разъем, то сторона платы, на которой он установлен, делается больше с учетом количества проводников, которые выходят на разъем;
- увеличение количества проводников, направленных в сторону разъема, может обеспечиваться ориентированной установкой элементов на плате;
- вырезы и отверстия в плате, прерывающие сквозные трассы, существенно снижают трассировочную способность;
- максимальная толщина платы выбирается в зависимости от выбранного шага трассировки, т.е. минимального расстояния между центрами переходных отверстий.

## 4.2 РАЗМЕЩЕНИЕ РАЗЪЕМОВ

**КАК УЖЕ ГОВОРИЛОСЬ ВЫШЕ, РАЗМЕЩАТЬ РАЗЪЕМ НА ПЛАТЕ СЛЕДУЕТ ВДОЛЬ БОЛЬШЕЙ СТОРОНЫ ПЛАТЫ ИЛИ ВДОЛЬ ТОЙ СТОРОНЫ, ПЕРПЕНДИКУЛЯРНО КОТОРОЙ БОЛЬШЕ СКВОЗНЫХ ТРАСС.**

Металлизированные отверстия под штыревые выводы разъемов должны размещаться в узлах основной сетки платы.

При двух- и трехрядных разъемах между отверстиями должно проходить соответственно минимум один и два проводника.

К каждому отверстию разъема должно быть предусмотрено минимум два возможных подхода.

Если шаг расположения отверстий разъема не совпадает или не кратен шагу основной координатной сетки, выбранной исходя из конструкций элементов, проектируют металлический разъем. Отверстия металлического разъема имеют минимальный диаметр (переходное отверстие) и могут располагаться в один или несколько рядов.

Если металлический разъем располагается в несколько рядов, условия размещения отверстий такие же, как для многорядных разъемов.

Минимальное расстояние между центрами отверстий однорядного металлического разъема – два шага основной или вспомогательной координатной сетки.

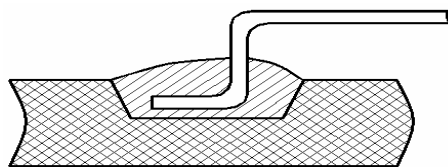
## 4.3 ВЫБОР СПОСОБА УСТАНОВКИ ЭЛЕМЕНТОВ

**СПОСОБ УСТАНОВКИ ЭЛЕМЕНТОВ ЗАВИСИТ ОТ КОНСТРУКЦИИ И ПЛОТНОСТИ ИХ РАСПОЛОЖЕНИЯ НА ПЛАТЕ.**

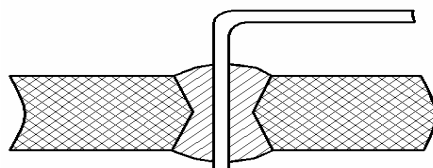
Наибольшую плотность монтажа обеспечивают варианты установки в глухие отверстия.

На рис. 4.1 – 4.7 изображены варианты установки элементов различной конструкции.

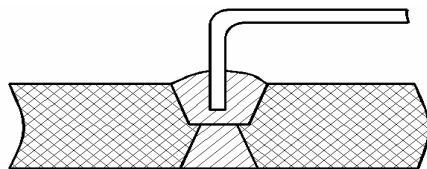
Рекомендуемые варианты приведены в прил. 1 – 20 [5].



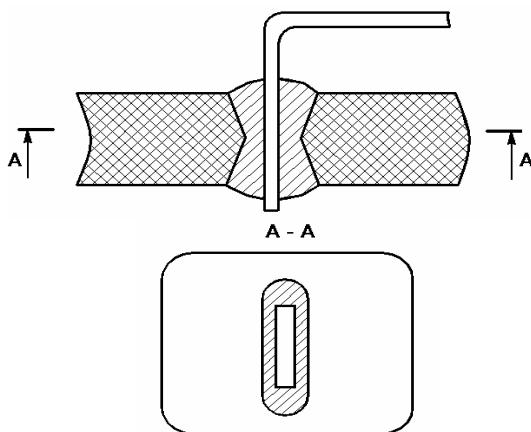
**Рис. 4.1 Пайка плоского (планарного) вывода в ламель**



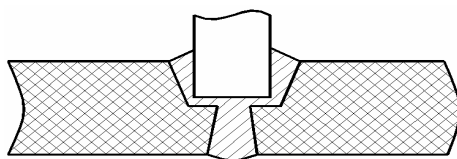
**Рис. 4.2 Пайка плоского (планарного) вывода в сквозное круглое монтажное отверстие**



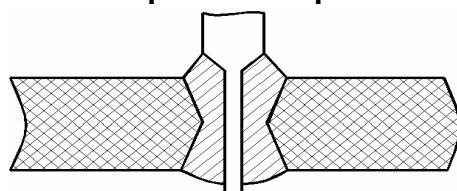
**Рис. 4.3 Пайка плоского (планарного) вывода в глухое круглое монтажное отверстие**



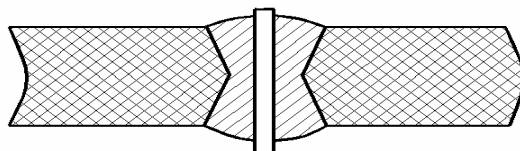
**Рис. 4.4 Пайка плоского (планарного) вывода в сквозное O-образное отверстие**



**Рис. 4.5 Пайка плоского (планарного) вывода в сквозное O-образное отверстие**



**Рис. 4.6 Пайка плоского штыревого вывода в сквозное круглое монтажное отверстие**



**Рис. 4.7 Пайка круглого штыревого вывода в сквозное круглое монтажное отверстие**

#### 4.4 РАЗМЕЩЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ

Размещение элементов на плате должно удовлетворять требования разработчика схемы с точки зрения взаимного влияния схем друг на друга и минимальных длин связи.

С точки зрения трассируемости при размещении разнотипных элементов необходимо учитывать следующие моменты:

- с целью экономии свободных трасс при размещении разнотипных элементов следует стремиться располагать на одной линии как можно больше монтажных отверстий или ламелей;
- с той же целью целесообразно однотипные элементы объединять в отдельные ряды.

#### 4.5 ВЫБОР КООРДИНАТНОЙ СЕТКИ И ШАГА ПРОВОДНИКОВ

**ОСНОВНОЙ ШАГ КООРДИНАТНОЙ СЕТКИ В ДРП ПРИНИМАЕТСЯ РАВНЫМ 1,25 ММ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЫ С ШАГОМ ВЫВОДОВ 1,25 И 2,5 ММ И 1,0 ММ ПРИ ШАГЕ ВЫВОДОВ ЭЛЕМЕНТОВ 1,0 ММ.**

При использовании на одной плате элементов с шагом выводов 1,25 и 1,0 мм для одного из типов элементов проектируется металлический разъем. Поэтому применение элементной базы с разным шагом выводов нежелательно.

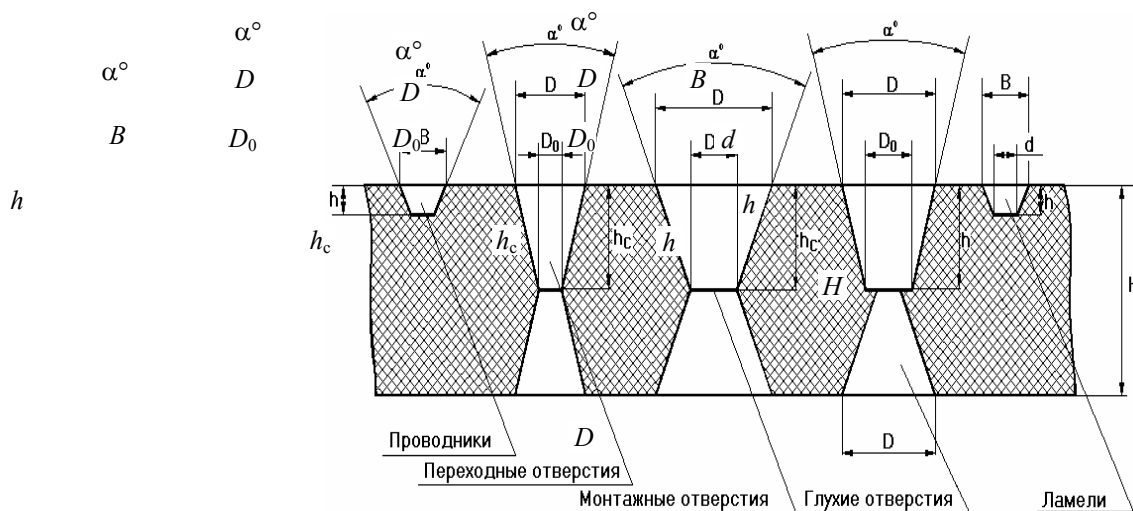
**ФРЕЗЕРОВАНИЕ РЕЛЬЕФНОГО РИСУНКА И СВЕРЛЕНИЕ ОТВЕРСТИЙ ДРП ИЗ СТЕКЛОТЕКСТОЛИТА МАРКИ СТАМ ПРОИЗВОДИТСЯ НА СТАНКАХ С ЧПУ. ТОЛЩИНА МАТЕРИАЛА ВЫБИРАЕТСЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ШАГА ТРАССИРОВКИ.**

**РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ РЕЛЬЕФНОГО РИСУНКА ПРОИЗВОДИТСЯ ПО ФОРМУЛАМ:**

$$D = D_0 + \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} h \quad - \text{ для отверстий};$$

$$B = B_0 + \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} h \quad - \text{ для проводников и отверстий};$$

Фрагмент ДРП приведен на рис. 4.8, где показаны все возможные элементы рельефного рисунка. В табл. 4.1 – 4.3 даны значения основных параметров рельефного рисунка.



**Рис. 4.8** Возможные элементы рельефного рисунка

#### 4.1 Основные параметры проводников

Шаг трассировки $S$ , мм	Ширина проводника $B$ , мм	Глубина проводника $h$ , мм	Угол конуса проводника $\alpha$ , град	Толщина заготовки $H$ , мм
0,3	0,15	0,1	32	0,5...0,8
0,4	0,2	0,12	32	0,8...1,0
0,5	0,25	0,15	40	1,0...1,2
0,625	0,3	0,15	40	1,2...1,5



#### 4.2 Основные параметры переходных отверстий

Шаг трассировки $S$ , мм	Толщина заготовки ДРП $H$ , мм	Диаметр переходного отверстия на поверхности заготовки $D$ , мм	Диаметр переходного отверстия $D_0$ , мм	Угол конуса переходного отверстия $\alpha$ , град
0,3	0,5...0,8	0,16	0,11	6
0,4	0,8	0,22	0,13	12
	0,1	0,22	0,16	6
0,5	0,8	0,25	0,16	12
	0,1	0,25	0,13	12
	1,2	0,3	0,18	12
	1,5	0,3	0,15	12
0,625	0,8	0,3	0,2	12
	0,1	0,3	0,19	12
	1,2	0,3	0,18	12
	1,5	0,35	0,13	12

#### 4.3 Основные параметры монтажных отверстий

Диаметр монтажного отверстия $D_0$ , мм	Диаметр монтажного отверстия на поверхности заготовки $D$ , мм				Угол конуса монтажного отверстия $\alpha$ , град
	$H = 0,7$	$H = 1,0$	$H = 1,2$	$H = 1,5$	
0,5	0,65	0,71	0,75	0,82	24
0,6	0,75	0,81	0,85	0,92	
0,7	0,85	0,91	0,95	1,02	
0,8	0,95	1,01	1,05	1,12	
0,9	1,05	1,11	1,15	1,22	
1,0	1,15	1,21	1,25	1,32	
1,1	1,25	1,31	1,35	1,42	
1,2	1,35	1,41	1,45	1,52	
1,3	1,45	1,51	1,55	1,62	
1,4	1,55	1,61	1,65	1,72	
1,5	1,65	1,71	1,75	1,82	

Диаметр монтажного отверстия рассчитывается по формуле:

$$D_0 = d_K + (t_M + t_3),$$

где  $d_K$  – диаметр описанной окружности вывода изделия электронной техники (ИЭТ);  $t_M$  – толщина металлизации;  $t_3$  – минимальный зазор между выводом ИЭТ и металлизированным монтажным отверстием.

Значения  $D_0$  приведены в табл. 4.3 для  $t_M = 0,025$  мм и  $t_3 = 0,1$  мм.

## 4.6 ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ФОРМОВКЕ ВЫВОДОВ И УСТАНОВКЕ ИЭТ НА РПП

1.1 Варианты формовки и установки распространяются на типы ИЭТ, указанные в табл. 1, 2, 3 и 4 [5].

1.2 Каждому типоразмеру ИЭТ присвоен порядковый номер ИЭТ, который не подлежит изменению. При исключении ИЭТ из сборника его порядковый номер не может быть использован для вновь вводимых ИЭТ.

1.3 Обозначение типоразмеров варианта формовки и установки всех ИЭТ, устанавливаемых на рельефные печатные платы, состоит из номера варианта формовки, номера элемента, цифр, определяющих установочный размер ИЭТ  $l$ , цифр, определяющих размер глубины формовки выводов  $h$ , варианта установки. Пример обозначения типоразмера варианта, формовки и установки ИС в корпусе 429.42-1.



1.4 Требования к формовке выводов и установке ИЭТ должны быть приведены в конструкторской документации ссылкой на настоящий сборник в соответствии с одним из приведенных примеров.

1.4.1 Пример ссылки в спецификации сборочного чертежа с указанием варианта формовки и установки ИС в корпусе 4118.24-1, имеющей позиционные обозначения: DD1, DD2, DD5.

Таблица

По з.	Обозначение	Наименование	Ко л.	Примечание
	1.008.1625.26 .1.	4118.24-1 ГОСТ 17467–83 ОСТ 11.073.042–75	3	DD1, DD2, DD5

1.4.2 Примеры ссылки в сборочном чертеже с указанием варианта формовки выводов и установки ИС в корпусах 4118.24-1 и НО8.24-1В, имеющих позиционное обозначение DD1, DD2, DD5, DA3, DA9 или номера позиций 1, 3, 5, 6, 8.

а) Формовку выводов и установку ИЭТ производить по ...

DD1, DD2, DD5...1.008.1625.26.1

DA3, DA9...1.052.1600.08.2

б) Формовку выводов и установку ИЭТ производить по ...

поз. 1, 3, 5...1.008.1625.26.1

поз. 6, 8...1.052.1600.08.2

1.4.3 При проектировании сборочных единиц на рельефных печатных платах с помощью ЭВМ варианты формовок и установок ИЭТ рекомендуется указывать в спецификациях чертежа.

1.5 В маркировке штампов для формовки выводов ИЭТ рекомендуется указывать вариант формовки и установочный размер.

1.6 Дополнительные требования, предъявляемые к формовке выводов, учитывающие требования технических условий на ИЭТ, но не предусмотренные настоящим сборником, должны быть приведены в технической документации на изделие.

- 1.7 Корпуса ИЭТ на схемах изображены условно.
- 1.8 Буквенные обозначения размеров и их определения приведены в прил. 1.
- 1.9 Расчетная формула, определяющая минимальный, установочный размер  $I$ , приведена в прил. 2.
- 1.10 Перечень документов приведен в прил. 3.
- 2.1 Формовка выводов и установка ИЭТ должна производиться в соответствии с требованием НСЖК 750879.001ТУ, конструкторской и технологической документации, утвержденной в установленном порядке.
- 2.2 Подготовку ИЭТ, сборку и монтаж узлов на рельефных печатных платах следует производить в соответствии с требованиями технологической документации, утвержденной в установленном порядке.
- 2.3 Для вариантов формовки выводов ИЭТ приняты следующие постоянные размеры:
- расстояние от корпуса ИЭТ до центра радиуса изгиба выводов  $a$ , мм, не менее 1,0;
  - радиус изгиба выводов ИЭТ  $R$ , мм, не менее 0,4.
- 2.4 Габаритные размеры корпусов ИЭТ, указанные в таблицах и чертежах платы, даны для справок. Радиусы изгиба выводов ИЭТ в п. 2.3 и чертежах, указаны для инструмента. Другие исполнительные размеры, приведенные в п. 2.3, 2.5, таблицах и чертежах должны обеспечиваться инструментом.
- 2.5 Неуказанные предельные отклонения размеров должны быть:
- отверстий – по Н12;
  - валов – по h12;
  - остальных – по  $\pm IT12/2$ .
- 2.6 Формовку выводов следует производить при помощи оборудования или технологической оснастки, обеспечивающих фиксацию и прижим выводов в месте выхода вывода из корпуса, а также исключающих недопустимые механические нагрузки в местах крепления вывода и нарушения герметичности корпуса.
- 2.7 ИЭТ следует размещать на рельефной печатной плате параллельно сторонам платы. Рекомендуется ИЭТ располагать на рельефной печатной плате ключом однонаправленно. Предпочтительное расположение на рельефной печатной плате – рядами.
- 2.8 Расстояние между корпусом ИЭТ и краем рельефной печатной платы должно быть не менее 1 мм.
- 2.9 Каждый вывод ИЭТ должен устанавливаться в отдельное монтажное отверстие рельефной печатной платы.
- 2.10 Обозначение типов корпусов микросхем по ГОСТ 17467–88.
- 2.11 Габаритные размеры корпусов по ОСТ 11.073.042–75 и ОСТ 1.073.924–81.
- 2.12 Формовку выводов ИЭТ на рельефной печатной плате следует производить в соответствии с вариантами, приведенными в табл. 1 – 3 и чертежах 1 – 4 [5].
- 2.13 В технически обоснованных случаях с целью обеспечения трассировки проводников без навесных перемычек допускается увеличивать размер  $l$  на величину, кратную шагу координатной сетки рельефной печатной платы.
- 2.14 Установочный размер формовки выводов ИЭТ должен быть выполнен симметрично относительно корпуса, отклонение от симметричности – не более допуска на размер корпуса ИЭТ плюс допуск на установочный размер.
- 2.15 Установку ИЭТ на рельефной печатной плате следует производить в соответствии с вариантами, приведенным в табл. 4.4, исходя из весовых, габаритных и конструктивных данных:
- а) с зазором с последующей пайкой выводов и покрытием лаком УР-231 в три слоя;
  - б) без зазора с приклейкой клеем, например, ПДИ-ЗАКТ или другим не ухудшающим параметров ИЭТ с последующей пайкой выводов и покрытием лаком УР-231 в три слоя.
- Вариант установки ИЭТ на рельефной печатной плате выбирает конструктор в соответствии с требованиями технических условий на ИЭТ и условиями эксплуатации аппаратуры.
- 2.16 Печатные проводники на чертежах вариантов установки условно не показываются. При формовке выводов и установке ИЭТ на РПП с отклонениями от настоящего сборника и технических условий на ИЭТ вариант формовки и установки должен быть согласован с центральным бюро по применению ИЭТ.

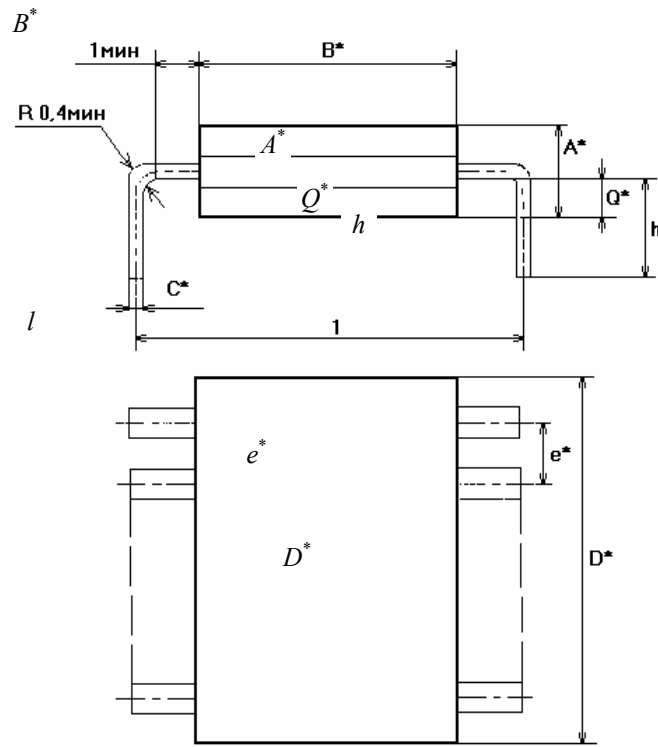
## ВАРИАНТЫ ФОРМОВОК ИЭТ [5]

### Вариант 1 (рис. 4.9, табл. 4.4) Микросхемы в корпусах подтипа 41

$d_{\min} = 1 \text{ мм}$   $d$

$R_{\min} = 0,4C$

$C^*$



\* Размеры для справок.

\* Размеры для справок

Рис. 4.9

**Вариант 2 (рис. 4.10, табл. 4.5)**  
**Микросхемы в корпусах подтипа *H***

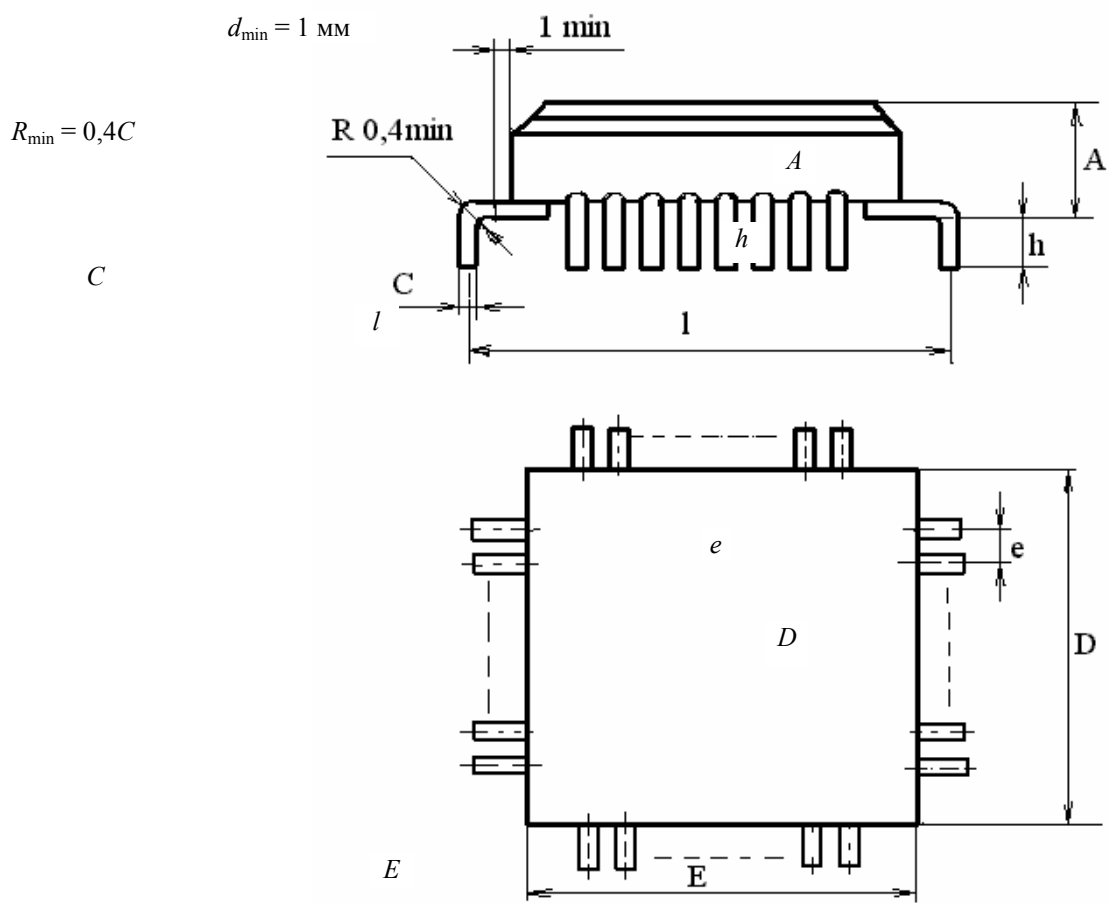
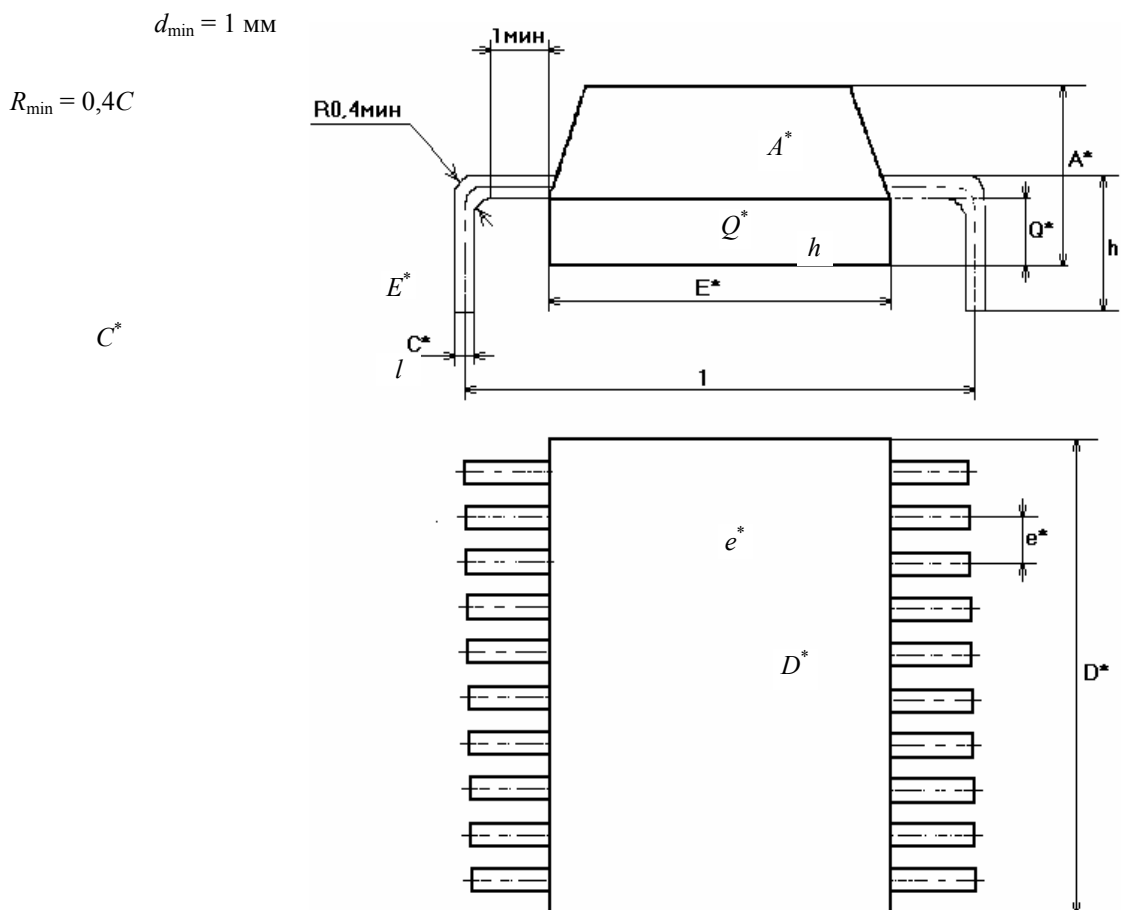


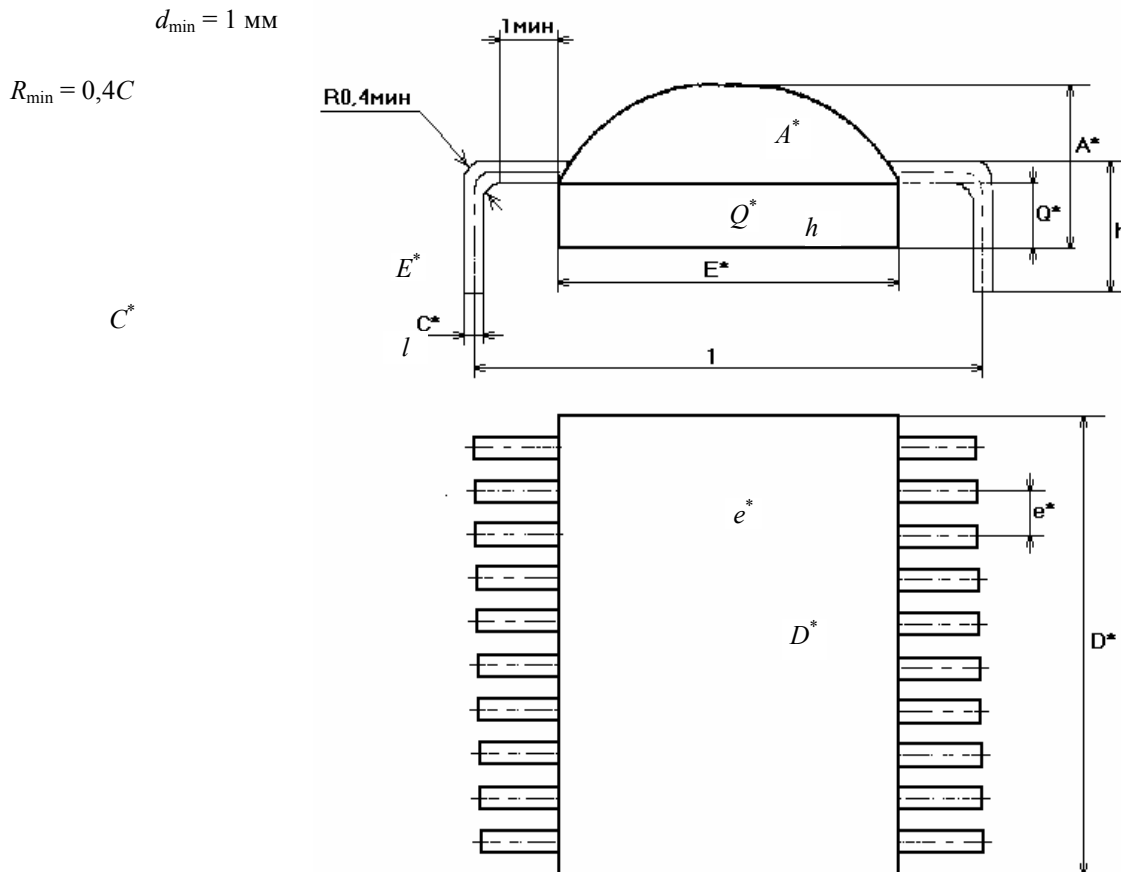
Рис. 4.10

Вариант 3 (рис. 4.11, 4.12)  
Блоки Б18



\* Размеры для справок.

Рис. 4.11



\* Размеры для справок.

Рис. 4.12

## 5 ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ РПП

### 5.1 РАСЧЕТ И ВЫБОР ГРАВЕРНОГО РЕЗЦА

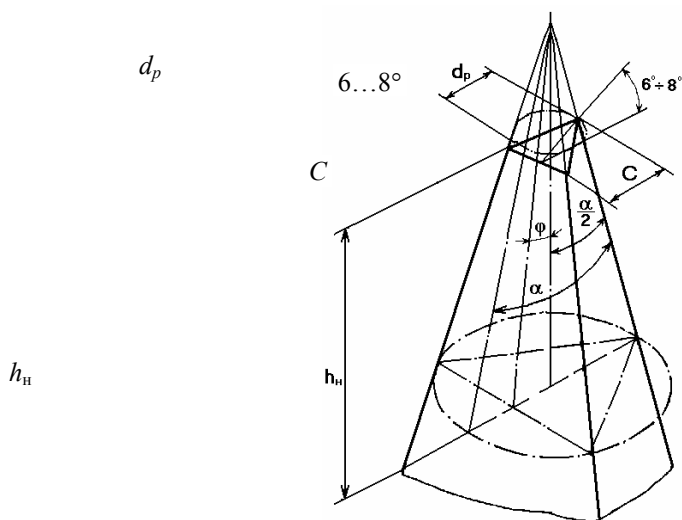
Одной из основных технологических операций, выполняемых при изготовлении РПП, является сверление соединительных и монтажных отверстий и фрезеровка рисунка. В большинстве случаев для этих операций используется один и тот же инструмент – граверный резец, который служит основным инструментом, определяющим качество производимых рельефных печатных плат.

*Предупреждение. Используемые при изготовлении РПП граверные резцы не пригодны для изготовления двухсторонних и многослойных печатных плат, выполняемых из фольгированных материалов.*



Граверный резец, выполняемый по авторскому свидетельству № 81680, содержит режущую часть в виде усеченной пирамиды. Основные геометрические параметры режущей части приведены на рис. 5.1.

Резец изготавливается из твердого сплава марки ВК-ОМ или ВК-6М. С целью экономии твердого сплава и для удобства работы режущую часть граверного резца помещают в технологическую оправку 3,0 мм.



**Рис. 5.1 Граверный резец:**

$C$  – притупление;  $6...8^\circ$  – угол притупления;  $d_p$  – минимальный диаметр конуса;  $\varphi$  – угол заточки;  $\alpha$  – угол конуса;  $h_n$  – глубина настройки

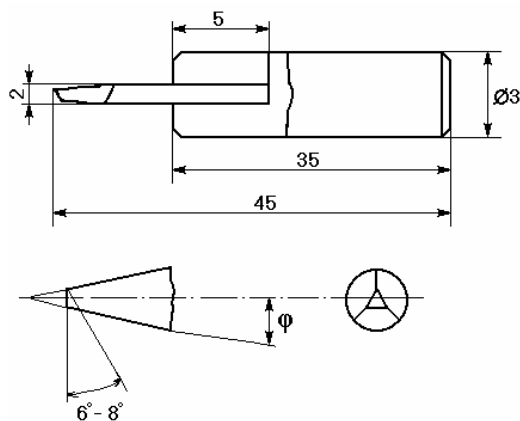
**Примечание.** В некоторых типах сверлильно-фрезерных станков могут применяться оправки  $d = 3,18$  или  $d = 2,0$  мм. В последнем случае режущая часть резца имеет диаметр 1,0 мм.

Конструкция граверного резца с технологической оправкой приведена на рис. 5.2 и 5.3.

Примечания:

- 1) **МАТЕРИАЛ: КРУГ (5-3-Б-Т ГОСТ 1-1955-77) (У8А ГОСТ 1-135-74).**
- 2) HRC 40...45.

Расчет геометрических параметров граверного резца производится исходя из параметров рельефного рисунка платы, приведенных на рис. 5.4. В табл. 5.1 – 5.5 приведены рекомендуемые значения параметров граверных резцов для фрезерования рисунка и сверления отверстий в зависимости от шага трассировки, толщины платы и размеров выводов элементной базы.



**Рис. 5.2 Конструкция граверного резца с технологической оправкой**

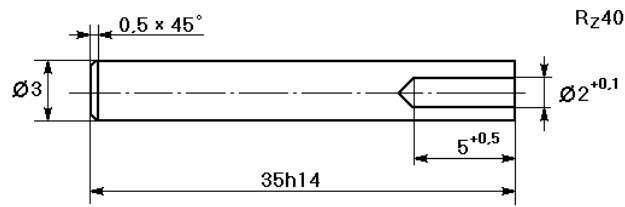


Рис. 5.3 Конструкция технологической оправки

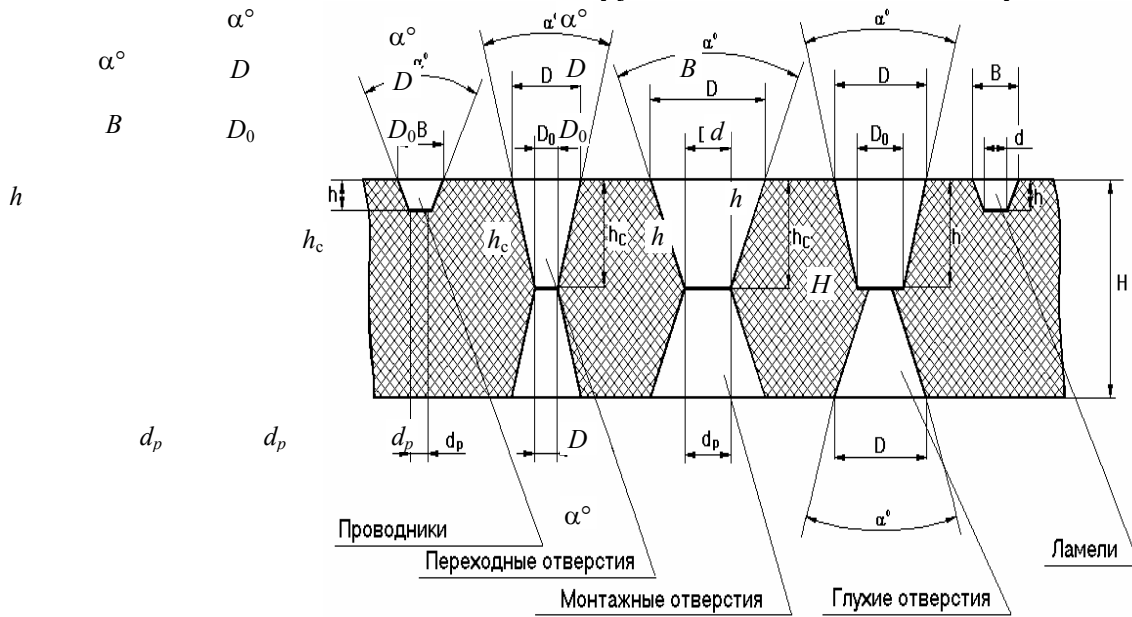


Рис. 5.4 Параметры рельефного рисунка для расчета граверного резца

### 5.1 Параметры граверных резцов для фрезерования рисунка

Шаг трассировки $S$ , мм	Ширина проводника $B$ , мм	Угол заточки, $\phi$ , град	Притупление резца $C$ , мм	Глубина проводника $h$ , мм
0,3	0,15	8	0,07	0,1
0,4	0,2	8	0,09	0,12
0,5	0,25	10	0,12	0,12
0,625	0,3	10	0,14	0,16

### 5.2 Параметры резца для сверления переходных отверстий

Шаг трассировки $S$ , мм	Ширина проводника $B$ , мм	Угол заточки $\phi$ , град	Притупление резца $C$ , мм	Глубина проводника $h$ , мм
0,3	0,5...0,8	1,5	0,07	0,45
0,4	0,8	3	0,09	0,45
	1,0	1,5	0,11	0,55
0,5	0,8	3	0,11	0,45
	1,0		0,09	0,55
	1,5		0,09	0,8
0,625	0,8	3	0,14	0,45
	1,0		0,13	0,55
	1,5		0,1	0,8

### 5.3 Параметры резца для сверления монтажных отверстий

Диаметр монтажно-го отверстия $D_0$ , мм	Диаметр монтажного отверстия на поверхности заготовки $D$ , мм				Угол конуса монтажного отверстия, $\varphi$ , град	Притупление резца $C^{+0,01}$ , мм
	$H = 0,7$	$H = 1,0$	$H = 1,2$	$H = 1,5$		
0,5	0,65	0,71	0,75	0,82	24	0,33
0,6	0,75	0,81	0,85	0,92		0,41
0,7	0,85	0,91	0,95	1,02		0,48
0,8	0,95	1,01	1,05	1,12		0,56
0,9	1,05	1,11	1,15	1,22		0,63
1,0	1,15	1,21	1,25	1,32		0,71
1,1	1,25	1,31	1,35	1,42		0,78
1,2	1,35	1,41	1,45	1,52		0,86
1,3	1,45	1,51	1,55	1,62		0,93
1,4	1,55	1,61	1,65	1,75		1,0
1,5	1,65	1,71	1,75	1,85		1,08

#### 5.4 Параметры резца для сверления глухих отверстий

Шаг трассировки $S$ , мм	Диаметр отверстия $D$ , мм	Угол конуса отверстия $\varphi$ , град	Притупление резца $C$ , мм	Глубина сверления отверстия $h_c$ , мм
0,3	0,65	6	0,36	0,4
0,4	0,8		0,47	
0,5				
0,625				

#### 5.5 Параметры резца для фрезерования ламелей

Шаг трассировки $S$ , мм	Диаметр отверстия $D$ , мм	Угол конуса отверстия $\varphi$ , град	Притупление резца $C$ , мм	Глубина сверления отверстия $h_c$ , мм
0,3	0,65	6	0,43	0,2
0,4	0,8		0,54	
0,5				
0,625				

Примечания: 1) Глубина сверления  $h_c = H_{\text{заг}} / 2 + (0,05 - 1)$ , мм.

2) Диаметр монтажного отверстия  $D$  на поверхности платы обеспечивается изменением глубины сверления.

## Список литературы

---

- 1 **Гель П.П., Иванов-Есинович Н.К.** Конструирование и микроминиатюризация радиоэлектронной аппаратуры. Л.: Энергоатомиздат, 1984. 536 с.
- 2 **Ненашев А.П.** Конструирование радиоэлектронных средств. М.: Высшая школа, 1990. 432 с.
- 3 **Пудовкин А.П., Малков Н.А.** Проектирование РЭС: Учебное пособие. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2001. 160 с.
- 4 **Пудовкин А.П., Муромцев Ю.Л., Малков Н.А.** Проектирование многослойных печатных плат: Учебное пособие. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2000. 88 с.
- 5 **НСЖК750879.001ТУ.** Рельефные печатные платы. Конструкция. Технология.
- 6 **Кокотов В.З.** Способ анализа цепей питания рельефных плат // Информационные технологии. 1999. № 9. С. 22 – 27.

## Приложения

---

### Приложение 1

#### БУКВЕННЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

- $E$  – ширина ИЭТ (без учета выводов);  
 $B$  – длина ИЭТ (без учета выводов);  
 $A$  – расстояние от установочной плоскости до верхней точки ИЭТ;  
 $e$  – шаг позиции выводов;  
 $Q$  – расстояние от установочной плоскости до нижней поверхности выводов в месте выхода из корпуса;

$C$  – толщина вывода;

$l$  – установочный размер;

$d$  – расстояние от корпуса ИЭТ до центра радиуса изгиба вывода;

$R$  – радиус изгиба вывода;

$h$  – размер глубины формовки вывода ИЭТ.

## Приложение 2

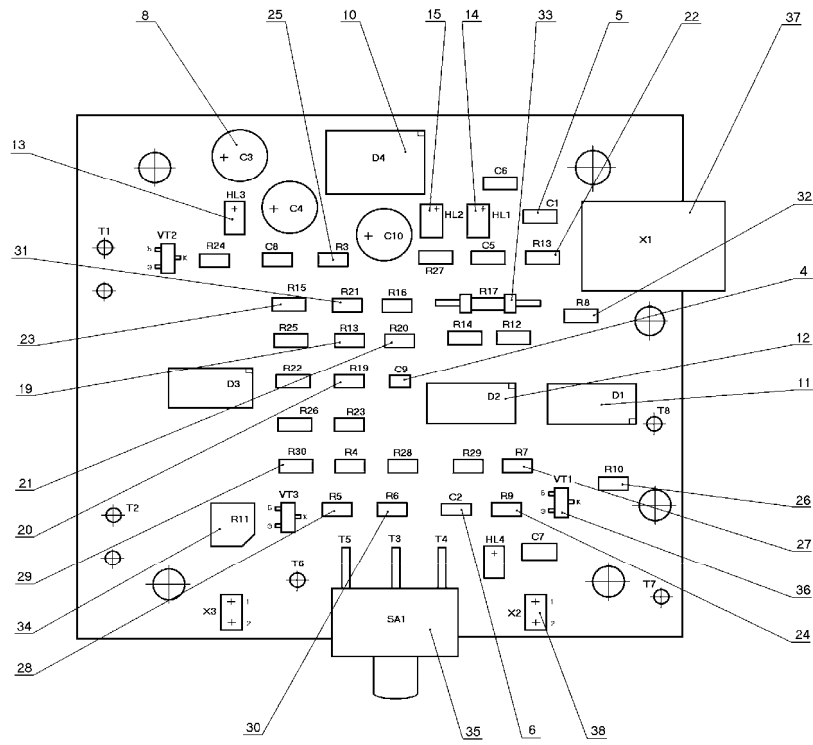
### **РАСЧЕТНАЯ ФОРМУЛА** **минимального установочного размера для интегральных** **микросхем в корпусах подтипа 41, типа Н и блоков Б18, Б19**

$$l_{\min} = E_{\max} + 2d_{\min} + 2R + C .$$

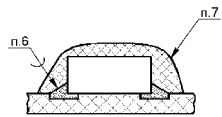
Если расчетное значение размера  $l_{\min}$  не соответствует шагу координатной сетки, то его следует увеличить до ближайшего значения размера, кратного шагу координатной сетки.

## Приложение 3

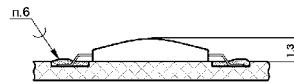
### **ПРИМЕР ВЫПОЛНЕНИЯ СБОРОЧНОГО ЧЕРТЕЖА РПП**



Установка конденсаторов поз. 4, 6

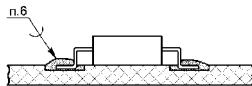


Установка конденсаторов поз. 17, 18

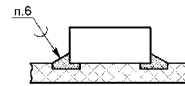


Установка блоков поз. 17, 18

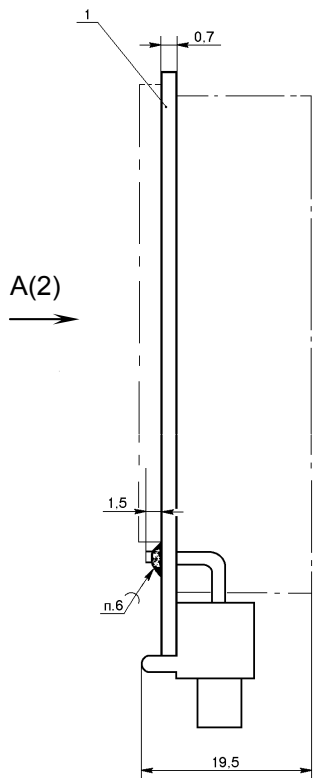
Установка микросхем поз. 11, 12



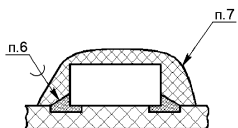
Установка микросхем поз. 11, 12; резисторов поз. 19, 32



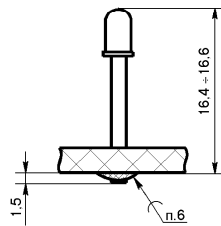
Установка резисторов поз. 19, 32



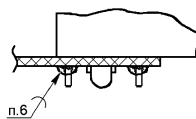
Установка резисторов поз. 34



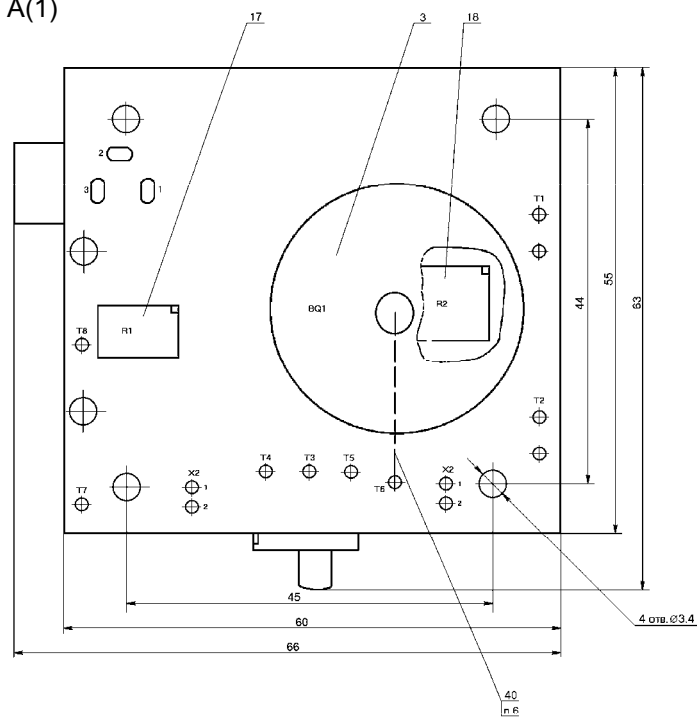
Установка светодиодов поз. 13...15



Установка разъемов питания поз. 37



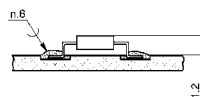
A(1)



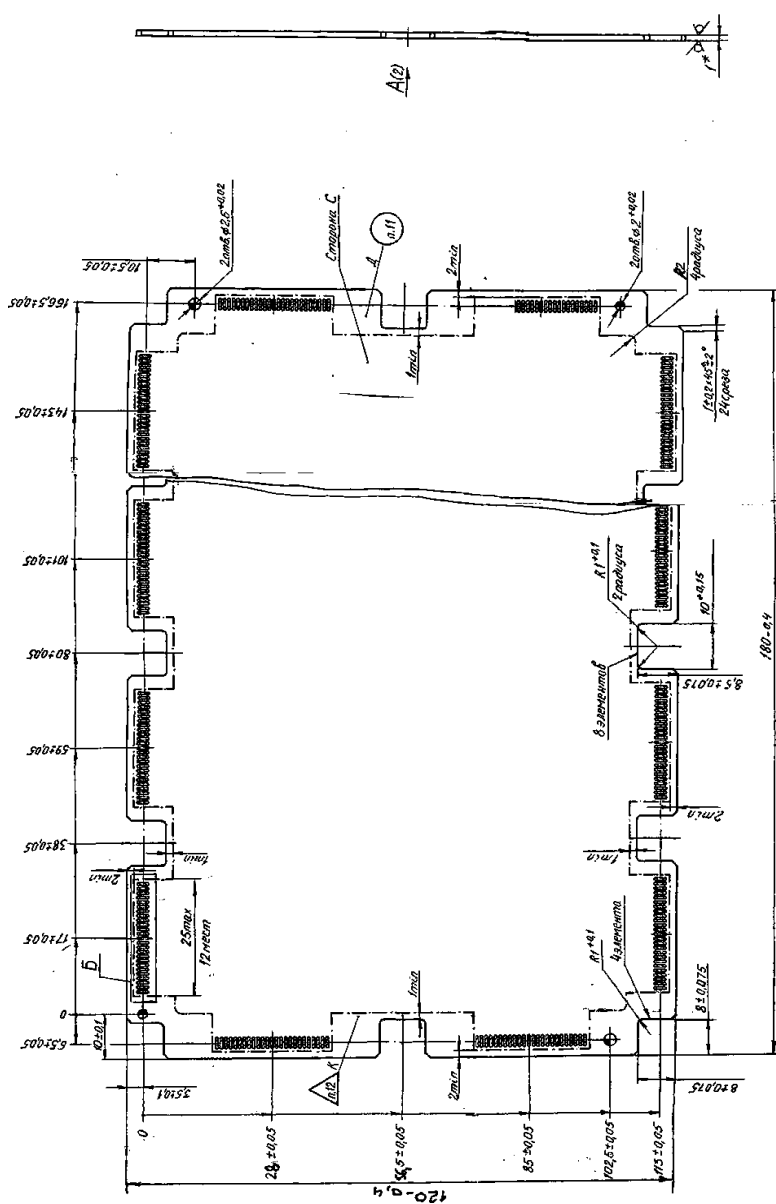
Установка звонка поз. 3



Установка транзистора поз. 36



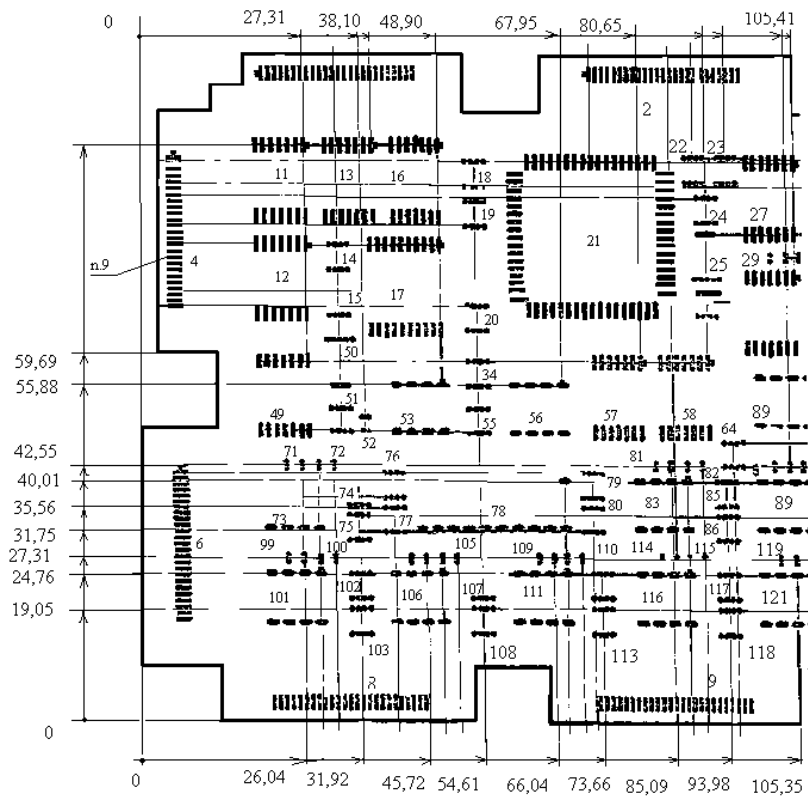
- 1 Размеры для справок.
- 2 Удлиненный вывод светодиодов поз. 13...15 соответствует аноду (-).
- 3 Первые выводы микросхем показаны условно.
- 4 Установку элементов производить по ГОСТ 29137-91.  
Поз. 10 – вариант 021.07.0401.00.00;  
поз. 33 – вариант 010.02.0201.00.00.
- 5 Позиционные обозначения и номера элементов показаны условно и маркировке не подлежат.
- 6 Требования к электромонтажу по ОСТ 11.010.004.79.
- 7 Припой ПОС61 ГОСТ 21931-76.
- 8 Полисил ЭК ТУ 2257-001-40233984-98.
- 9 После установки элементов плату покрыть лаком УР-231 02 ТУ6-21-14-90.
- 10 Звонок поз. 3 устанавливать после лакировки.
- 11 Контактные площадки отверстий Т1...Т8, контактные площадки под установку звонка поз. 3 и штырей поз. 38, светодиоды поз. 13...15 от покрытия лаком защитить.
- 12 Распаку привода поз. 40 на звонок поз. 3 производить со стороны обратной маркировки.

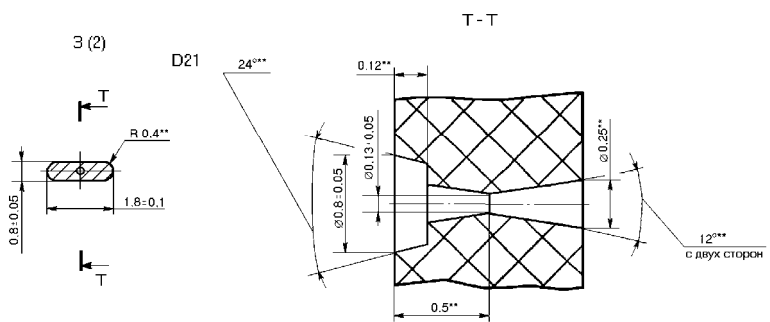
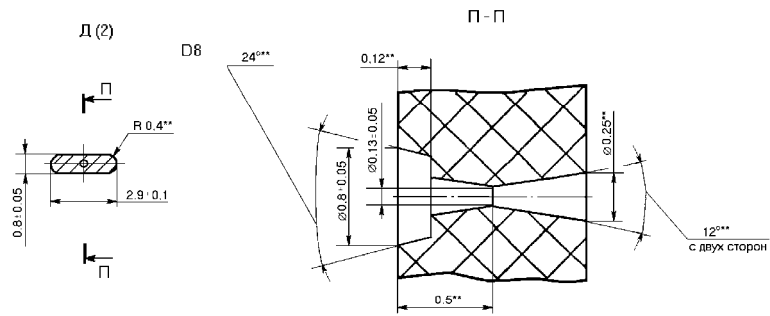
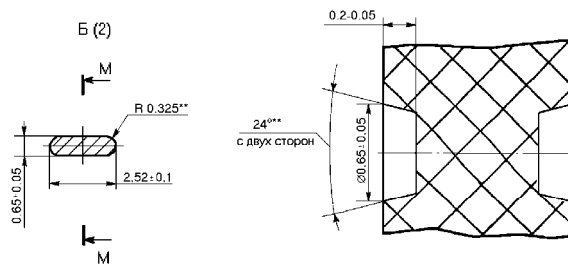


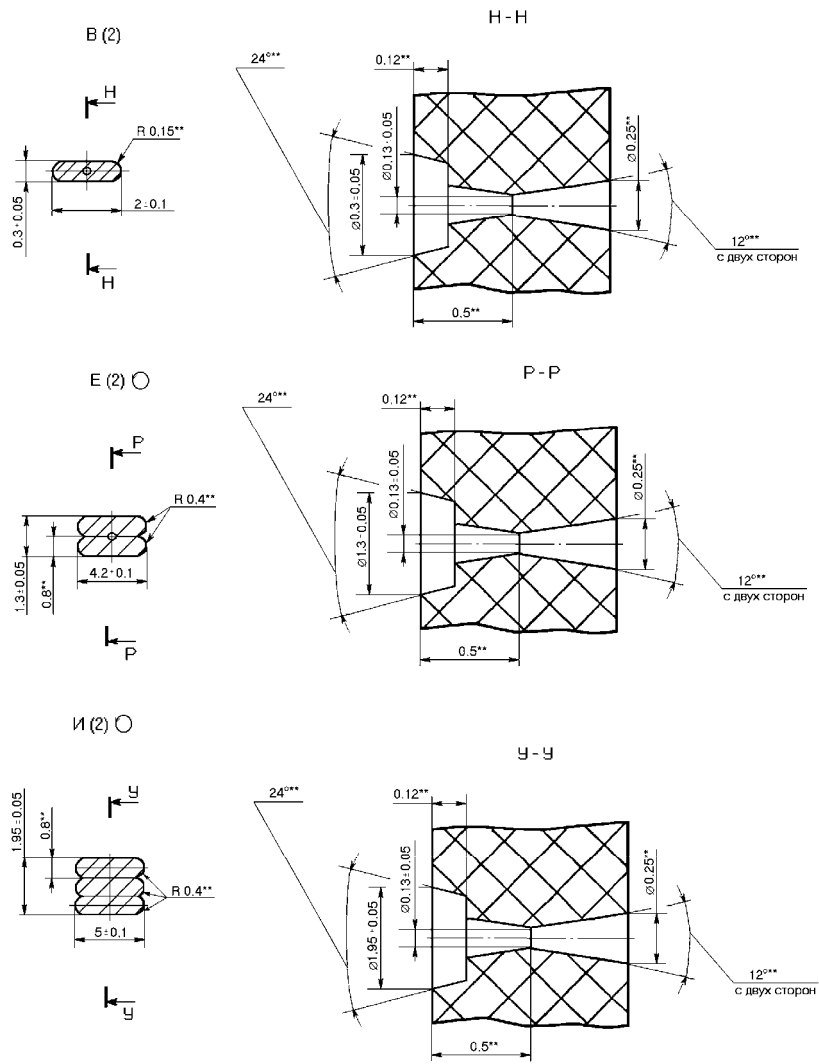


A(1)  
Вид без проводников

A  
Вид без проводников







ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ РАЗМЕРЫ  
 КОНТАКТНЫХ ПЛОЩАДОК ПОД  
 ЕДИНИТЕЛИ

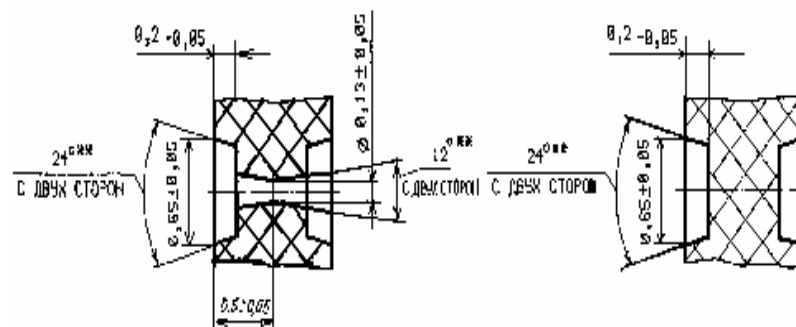
ЧИСЛОВЫЕ РАЗМЕРЫ  
 КОНТАКТНЫХ ПЛОЩАДОК ПОД  
 СОЕДИНИТЕЛИ  
 (1:0.1)

ВАРИАНТ 1

ВАРИАНТ

ВАРИАНТ 2

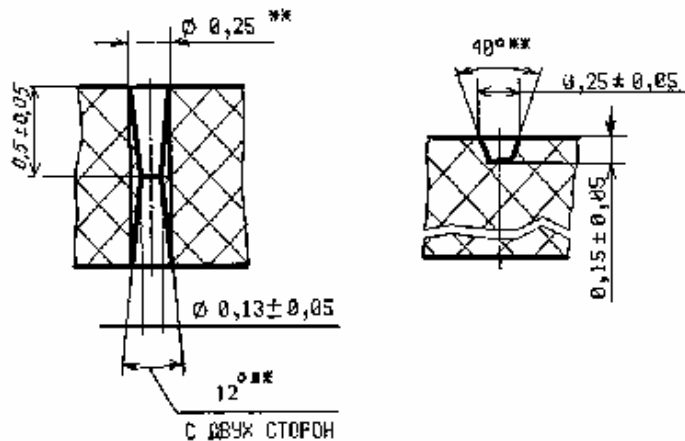
ВАРИАНТ 2



ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ РАЗМЕРЫ ПЕРЕХОДНЫХ ОТВЕРСТИЙ (10 : 1)

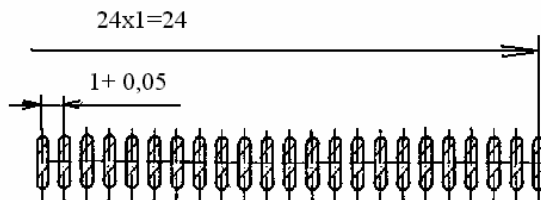
ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ РАЗМЕРЫ ПРОВОДНИКОВ (10 : 1)

ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ РАЗМЕРЫ ПРОВОДНИКОВ (10:1)

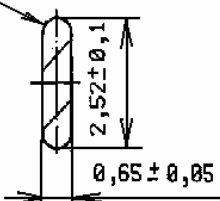


Б (5 : 1) 24 элемента




Б (5:1) 24 ЭЛЕМЕНТА



R 0,325 \*\* Б (10:1)



Условное обозначение отверстия	Диаметр отверстия, мм	Наличие металлизации в отверстии	Количество отверстий
○	$\varnothing 0,13 / \varnothing 0,25 \times 12^\circ$ с двух сторон	Есть	
○	$\varnothing 0,7 / \varnothing 0,91 \times 24^\circ$ с двух сторон	Есть	
◐	$\varnothing 0,8 / \varnothing 1,0 \times 24^\circ$ с двух сторон	Есть	
◑	$1,21 \times 24^\circ$ с двух сторон	Есть	
◒	$\varnothing 1,1 / \varnothing 1,31 \times 24^\circ$ с двух сторон	Есть	

	См. чертеж	Есть	
	3	Нет	2
	3,1	Нет	6

### Технические требования

- 1 Плату изготовить методом металлизации рельефа, полученного фрезерованием.
- 2 \*Размеры для справок.
- 3 \*\*Размеры, обеспечиваемые инструментом.

#### 4 ЭЛЕМЕНТЫ ПРОВОДЯЩЕГО РИСУНКА РАЗМЕЩАТЬ ВНУТРИ ЗОНЫ, ОГРАНИЧЕННОЙ ШТРИХПУНКТИРНОЙ ЛИНИЕЙ. ЗАПРЕЩАЕТСЯ РАЗМЕЩАТЬ ПРОВОДНИКИ ПО ШТРИХПУНКТИРНОЙ ЛИНИИ. ШАГ ТРАССИРОВКИ 0,5 ММ.

5 Минимально допустимое расстояние между элементами проводящего рисунка платы – 0,1 мм. Позиционный допуск размещения осей элементов проводящего рисунка 0,05 мм в диаметральном выражении. Допуск соосности отверстий на стороне – 0,05 мм.

6 Геометрические размеры проводников, переходных отверстий, контактных площадок под соединители – по чертежу.

7 Установочные размеры под ЭРЭ и микросхемы и геометрические размеры монтажных отверстий в соответствии с библиотекой ЭРЭ и микросхем.

8 Проводящий рисунок выполнить по документам на носителях данных. См. таблицу.

9 Покрытие проводящего рисунка платы М25, контактных площадок и отверстий под выводы при соединительных элементах – ПОСВ-20-34-46 по ОСТ 107.460092.004.01-86.

10 Покрытие платы с двух сторон – эмаль защитная УФ; отверждения типа ЭП-91В ОАЮ.504.030ТУ; толщина покрытия не менее 50 мкм.

11 Маркировать краской ТНПФ-01 черной. Лак ЭП-730, УХЛ2. Шрифт 3-ПРЗ ГОСТ 26.020-80.

12 Клеймить краской ТНПФ-01 черной. Лак ЭП-730.

Таблица 4.4

Но- мер ИЭ Т	Тип	$E_{ма}$ х, мм	$A_{ма}$ х, мм	$D_{ма}$ х, мм	$e$ , мм	$Q$ , мм		$C_{ма}$ х, мм	$l$ , мм		$h$ , мм		Вари- ант уста- новки
						Но- ми- наль- ное от- кло- не- ние	Пре- дель- ное от- кло- не- ние		Но- ми- наль- ное от- кло- не- ние	Пре- дель- ное от- кло- не- ние	Но- ми- наль- ное от- кло- не- ние	Пре- дель- ное от- кло- не- ние	
001	401.14-4	6,5	2,3	10, 0	1,2 5	0,8	– 0,1 8	0,1 8	10, 0	±0, 2	1,6	±0, 2	1,2
002	401.14-5	6,7	1,9 7	10, 0	1,2 5	0,6 7	– 0,3 3	0,1 8	10, 0		1,4		1,2

003	401.16-6	9,5	2,5	12	1,2 5	1,1 7	- 0,3	0,3	12, 5		1,8		1,2
004	402.16-18	9,4 5	2,5	12	1,2 5	-	0,2 3	0,2 3	12, 5		1,8		1,2
005	402.16-21 402.16-21.01 402.16-21.03 402.16-23 402.16-23.01 402.16-25 402.16-25.01 402.16-25.03	9,4 5	2,5	11, 65	1,2 5	1,1	±0, 2	0,2	12, 5		1,8		1,2
006	402.16-32 402.16-32.01 402.16-32.03 402.16-32.04 402.16-32.05 402.16-33 402.16-33.01 402.16-33.03	9,4 5	2,5	11, 65	1,2 5	1,1		0,2	12, 5		1,8		1,2

007	427.18-2	12	3,2	12, 5	1,2 5	–	–	0,2	15, 0	±0, 2	0,8	±0, 2	1,2	
008	4118.24-1	12, 2	3,2	15, 6	1,2 5	1,8	– 0,5	0,2	16, 25		2,6		1,2	
	4118.24-2													
	4118.24-3													
009	4331.24-3	18, 35	3,2	15, 3	1,2 5	1,8	– 0,5	0,2	21, 25		2,6		1,2	
010	4119.28- 1,2	12, 75	3,0 3	18, 25	1,2 5	1,6 6	– 0,4 3	0,2	17, 5		2,4		1,2	
011	4119.28- 3.01	12, 75	3,3	18, 25	1,2 5	–	–	0,2	17, 5		0,8		1,2	
012	4122.40-1	12, 75	3,0	25, 75	1,2 5	1,6 6	– 0,4 5	0,2 2	17, 5		2,4		1,2	
013	4112.40- 3.01	12, 75	3,3	25, 75	1,2 5	–	–	0,2	17, 5		0,8		1,2	
014	429.42-1	16, 74	3,2	26, 65	1,2 5	1,5	+0, 5	0,2	21, 25		2,4		1,2	
	429.42-3													
	429.42-5													– 0,4
	429.42-7													
015	4151.42-1	16, 74	3,2	26, 62	1,2 5	1,5	+0, 5	0,2	21, 25		2,4		1,2	
	4151.42-2													– 0,4
016	4138.42-3	16, 74	3,2	26, 62	1,2 5	1,5	–	0,2	21, 25		2,4		1,2	
017	4134.48-2	16, 41 5	3,2	30, 41	1,2 5	1,8	– 0,5	0,2	21, 25		2,6		1,2	
	4134.48-4													
018	4135.64-1	19, 96	3,2	40, 7	1,2 5	1,8	– 0,5	0,2	25	2,6	1,2			

Таблица 4.5

Номер ИЭТ	Тип	$E_{\max}$ , мм	$A_{\max}$ , мм	$D_{\max}$ , мм	$e$ , мм	$C_{\max}$ , мм	$l$ , мм		$h$ , мм		Вариант установки
							Но- ми- наль- ное от- кло- не- ние	Пре- дель- ное от- кло- не- ние	Но- ми- наль- ное от- кло- не- ние	Пре- дель- ное от- кло- не- ние	

050	H02.14-1B H02.14-2B H02.14-3B H02.16-1B H02.16-2B	6,78	6,78	3,0	1	0,1 8	10, 0	±0, 2	0,8	±0, 2	3,4
051	H04.16-2B	7,68	8,08	3,0	1	0,2	11		0,8		3,4
052	H08.24-1B	12,31 5	12,31 5	3,0	1	0,2	16		0,8		3,4
053	H09.18-1B	9,68	9,68	3,0	1	0,2	13		0,8		3,4
054	H14.42-1B	12,31 5	12,31 5	3,0	1	0,2	16		0,8		3,4
055	H18.61-1B	12,31 5	12,31 5	3,0	1	0,2	22		0,8		3,4

## 5.2 РЕЛЬЕФНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

Типовая карта изготовления РПП на нефольгированном диэлектрике "СТАМ" методом рельефной технологии

Наименование и содержание операции	Оборудование	Особые указания
005 Контрольная Произвести входной контроль диэлектрика, химикатов и всех материалов, применяемых для изготовления РПП на соответствие ТУ и ГОСТам по сертификатам	—	Методы и средства контроля оговорены в стандартах и ТУ на исходный материал
010 Заготовительная 1 Проверить марку толщину материала. 2 Разрезать на заготовки.	Штангенциркуль, линейка (метал.) Ножницы кривошипные листовые	В работу принимать материал, прошедший входной контроль по ГОСТу или ТУ. Ограждение должно быть блокирова-



3 Проверить размер заготовки	Штангенциркуль, линейка (метал.)	но спусковым устройством. Проверку производить выборочно, не менее чем на пяти заготовках от партии
015 Контрольная Проверить внешний вид и размеры заготовок	– " –	Производить выборочно на 3...5 % заготовок от партии, но не менее чем на 5 шт. Поверхность заготовки должна соответствовать ТУ на исходный материал
020 Штамповочная <b>1 Пробить базовые отверстия за 1 ход пресса.</b> 2 Контроль исполнителя	Пресс КД-2126, штамп	Ограждение – элемент штампа. Производить выборочно на 3...5 % заготовок от партии, но не менее чем на 3 шт.
<b>025 Подготовка поверхности (матирование) заготовки</b> Произвести матирование заготовки последовательно с двух сторон	Шкурка шлифовальная, водостойкая. Устройство зачистное с вибрационным шлифованием (ручное)	Замену шкурки производить по мере истирания
030 Сверлильная, шлифовальная <b>1 ФРЕЗЕРОВАТЬ НА 1-Й СТОРОНЕ ПЛАТЫ: А) ЛАМЕЛИ; Б) ПРОВОДНИКИ.</b> 2 Сверлить на 1-й стороне трафарет платы отверстия, подлежащие металлизации. 3 Повторить операции на 2-й стороне платы. 4 Очистить загрязнение РПП от пыли и стружки.	Станок фрезерный с программным управлением Резцы твердосплавные  – " –  Пылесос бытовой	Перед выполнением операции резцы обезжирить методом погружения. При смене резцов уровень касания определяется для каждого резца и каждой заготовки
035 Контроль качества выполнения	Микроскоп МБС-3 или МПВ-2, лупа 2 – 4 <sup>x</sup>	Проверку производить выборочно, не менее чем на пяти заготовках от партии
040 Гидроабразивная зачистка Произвести зачистку ламелей проводников, отверстий и всей поверхности платы РПП	Порошок абразивный марок 24А или 63С, зернистость М-40. Вода водопроводная	Давление воздуха в форсунках 53,9...68,6 Н/см <sup>2</sup> . Скорость конвейера 0,20...0,35 м/мин. Количество качаний форсунок в минуту не менее 50 циклов
045 Вакуумное напыление меди Загрузить платы в установку и произвести напыление меди	Медь марки МОО или МО	Нанесенный слой под вакуумом меди 3...5 мкм.

*Продолжение табл.*

Наименование и содержание операции	Оборудование	Особые указания
050 Гальваническое меднение <b>1 Обезжирить</b>  <b>2 Промыть горячей водой</b> 3 Промыть проточной водой 4 Активировать (декапировать)  5 Промыть проточной холодной водой 6 Гальваническое меднение	Тринатрий фосфат СМС, сода кальцинированная 40...60 °С (1...2 мин)  Кислота серная (10...15 с) <b>10...20 °С (1...2 МИН)</b> Медь сернокислая, кислота серная, натрий хлористый, добавка ЛТИ, аноды медные АМФ холоднокатаные	Переходы 1 – 3 выполнять в случае превышения допустимого времени разрыва между операциями 045 и 050 – – – – Допускается использовать электролит без добавок ЛТИ, БЭСМ и ОС-20 с добавкой спирта. Толщина слоя меди должна составлять 25...40 мкм. Толщину меди в отверстиях и качество металлизации контролировать по металлическим шлифам
055 Подчистка схемы	Стол ретушера, нож ретушера, игла швейная, лупа, микроскоп МПБ-2	Прочистить замыкание между элементами проводящего рисунка до минимума зазоров согласно КД
060 Формирование защитного рельефа с применением эмали НЦ-008 <b>1 Нанести 1-й слой на всю поверхность с двух сторон.</b> 2 Нанести 2-й слой	Эмаль НЦ-008 белая  Рапель или металлическая пластина, штатив	Эмаль развести до вязкости, когда начнет проходить через отверстия. Эмаль должна быть более густой чем для первого раза
065 Зачистная <b>1 Удаление краски и меди с горизонтальной поверхности РПП.</b> 2 Очистить поверхность от пыли и стружек	Шлифование (ручное)  Пылесос бытовой	Зачистить до материала основания  –
070 Травильная Стравить медь с горизонтальной поверхности РПП	Медь хлорная, аммиак водяной, аммоний хлористый	Травление проводить на самом быстром режиме конвейера. Небольшие остатки меди после травления допускается подчистить скальпелем
075 Удаление защитного рельефа Снятие краски с проводящего рисунка	Кювета винипластов, щетка из натуральной щетины	Операцию 070 допускается не проводить если для этого есть определенные причины
080 Нанесение защитного электроизоляционного покрытия (консервирующего) <b>1 НАНЕСТИ НА 1-Ю СТОРОНУ.</b>	Рапель ситнография. Защитная масляная композиция. Штатив – " –	Роль сита в сеткографическом станке выполняет металлическая сетка толщиной нитей 0,05 мм – –

2 Нанести на 2-ю сторону. 3 Регулировать	Кисть художественная № 2 – 3. Защитная масочная композиция	–
085 Фрезерная <b>1 СНЯТЬ МАСОЧНОЕ ПОКРЫТИЕ С ЛАМЕЛЕЙ НА ГЛУБИНУ ПОКРЫТИЯ МАСКОЙ НА 1-Й И 2-Й СТОРОНЕ РПП.</b> 2 Очистить поверхность РПП. 3 Уложить плату в тару	Станок фрезерный с программным управлением, резцы твердосплавные Пылесос бытовой Тара (цеховая)	– – –
090 Контрольная Проверить качество удаления масочного покрытия из ламелей	Микроскоп МБС-3 или МПБ-2, лупа	Ламели должны быть полностью очищены от масочного покрытия, отдельные точечные остатки подчистить иголкой

*Продолжение табл.*

Наименование и содержание операции	Оборудование	Особые указания
095 Облуживание сплавом ПОСВ-20-34-46 1 Активировать 2 Промыть 3 Нанести флюс 4 Прогреть заготовки в слое глицерина над припоем 5 Лужение	<b>Щипцы. Ванна винипластовая, кислота соляная</b> Ванна с душевым устройством Кислота соляная, глицерин Глицерин 150...180 °С  Припой ПОСВ-20-34-46	– – Приготовление производить в соответствии с прил. 69 [5] При наличии отдельной ванны с глицерином прогревание делать там –
100 Фрезерная (обработка контура)  <b>1 ФРЕЗЕРОВАТЬ КОНТУР ПЛАТЫ ПО ПРОГРАММЕ.</b> 2 Уложить плату в тару	<b>Станок фрезерно-гравировальный с программным управлением для изготовления ПП</b> –  Специальная тара (цех.)	– – –
105 Слесарная (доработка контура) <b>1 Обрезать плату с двух сторон, имеющих фиксирующие отверстия.</b> 2 Зачистить заусенцы. 3 Проверить габаритные размеры платы	Установка для обрезки плат по контуру с алмазным кругом Напильник Штангенциркуль, линейка (метал.) измерительная	– – –

<p>110 Маркировочная</p> <p><b>1 НАНЕСТИ ЗНАКИ МАРКИРОВКИ.</b></p> <p>2 Сушить.</p> <p>3 Покрывать маркировку лаком.</p> <p><b>4 СУШКА.</b></p> <p>5 Проверка качества</p>	<p><b>Стол маркировочный с вентиляцией, штатив, цеховые приспособления</b></p> <p>Ручка с пером, краска черная</p> <p>Шкаф сушильный</p> <p>Кисть № 4, лак ЭП-730, полиэтиленполиамин</p> <p>Шкаф сушильный</p> <p>Стол контроля, лупа</p>	<p>РПП маркируют в соответствии с требованиями КД методом проводящего рисунка. Краской маркируют дату изготовления и номер партии</p> <p>При необходимости краску следует разбавлять уайт-спиртом</p> <p>Допускается сушка на воздухе не менее 1 ч при наличии вытяжки</p> <p>—</p> <p>—</p> <p>—</p>
<p>115 Контрольная</p> <p>Проверить плату на соответствие чертежу</p>	<p>Стол контроля, микроскоп МБС-9, лупа измерительная ЛИ4-10, термометр, линейка поверочная, штангенциркуль</p>	<p>—</p>
<p>120 Упаковочная</p>	<p>Стол для упаковки, бумага конденсаторная или кабельная, мешки полиэтиленовые</p>	<p>Размер листов должен быть равен размеру плат с целью защиты их от повреждения при трении. Упаковку снимают не более чем за 48 ч до сборки и пайки. Перед упаковкой на РПП наносят консервирующее покрытие. По согласованию с предприятием-потребителем (цехом) допускается консервирующее покрытие не наносить. Упаковка должна исключать попадания пыли, влаги и других загрязнений на поверхность РПП и механические повреждения при транспортировке</p>