

Таблица 2.6

Наименование коэффициента	Обозначение	Величина
Толщина предварительно осажденной меди, мм	$h_{\text{пм}}$	0,005—0,008
Толщина наращенной гальванической меди, мм	$h_{\text{г}}$	0,05—0,06
Толщина металлического резиста, мм	$h_{\text{р}}$	0,02
Погрешность расположения отверстия относительно координатной сетки, обусловленная точностью сверлильного станка, мм	$\delta_{\text{о}}$	0,02—0,10
Погрешность базирования плат на сверлильном станке, мм	$\delta_{\text{б}}$	0,01—0,03
Погрешность расположения относительно координатной сетки на фотошаблоне контактной площадки, мм	$\delta_{\text{ш}}$	0,02—0,08
Погрешность расположения относительно координатной сетки на фотошаблоне проводника, мм	$\delta_{\text{ш } t}$	0,03—0,06
Погрешность расположения печатных элементов при экспонировании на слое, мм	$\delta_{\text{э}}$	0,01—0,03
Погрешность расположения контактной площадки на слое из-за нестабильности его линейных размеров, % от толщины	$\delta_{\text{м}}$	0—0,10
Погрешность расположения базовых отверстий на заготовке, мм	$\delta_{\text{з}}$	0,01—0,03
Погрешность расположения базовых отверстий в фотошаблоне	$\delta_{\text{п}}$	0,01—0,05
Погрешность расположения контактной площадки на слое, обусловленная точностью пробивки базовых отверстий, мм	$\delta_{\text{пр}}$	0,03—0,05

Наименование коэффициента	Обозначение	Величина
Погрешность расположения контактной площадки, обусловленная точностью изготовления базовых штырей пресс-формы, мм	$\delta_{пф}$	0,02—0,05
Погрешность диаметра отверстия после сверления, мм	$\Delta d$	0,01—0,03
Погрешность изготовления окна фотошаблона, мм	$\Delta D_{ш}$	0,01—0,03
Погрешность изготовления линий фотошаблона, мм	$\Delta t_{ш}$	0,03—0,06
Погрешность диаметра контактной площадки фотокопии при экспонировании рисунка, мм	$\Delta \mathcal{E}$	0,01—0,03

Примечание  $\delta$  — погрешность расположения,  $\Delta$  — погрешность размеров.

Расчетная толщина многослойной печатной платы

$$H_{расч} = \sum H_c + (0,5 \div 0,6) \sum H_{пр}, \quad (2.2)$$

где  $H_c$  — номинальная толщина слоя, мм;  $H_{пр}$  — номинальная толщина материала прокладки из стеклоткани, мм.

**Расчет диаметра контактных площадок.** Минимальный диаметр контактной площадки определяют из условия сохранения целостности контактной площадки (отсутствие разрыва) при сверлении плат. При этом учитывают явления подтравливания и разрастания проводящего слоя, погрешности относительного расположения отверстия и контактной площадки.

Расчет минимального диаметра контактных площадок для односторонних печатных плат и внутренних слоев МПП, изготавливаемых химическим методом (рис. 2.3 и 2.4), производят по формуле

$$D'_{\min} = D'_{1\min} + 1,5h_{ф}, \quad (2.3)$$

где  $D'_{1\min}$  — минимальный эффективный диаметр контактной площадки, мм;  $h_{ф}$  — толщина фольги, мм.

Минимальный эффективный диаметр контактной площадки

$$D'_{1\min} = 2(b_m + d_{\max}/2 + \delta_{отв} + \delta'_{кп}), \quad (2.4)$$

где  $d_{\max}$  — максимальный диаметр просверленного отверстия, мм;  $\delta_{отв}$  — погрешность расположения отверстия мм;  $\delta'_{кп}$  — погрешность

расположения контактной площадки при изготовлении односторонних печатных плат и слоев МПП (способ А), мм;  $b_m$  — расстояние от края контактной площадки, мм (выбирают из табл. 2 2).

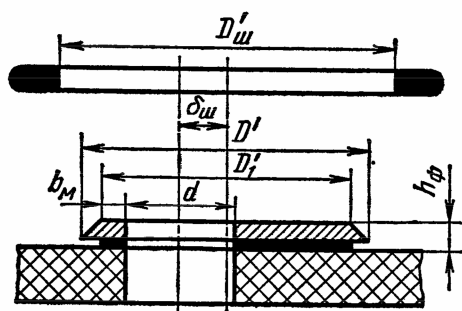


Рис. 2.3. Расположение контактной площадки на односторонней печатной плате или внутреннем слое МПП

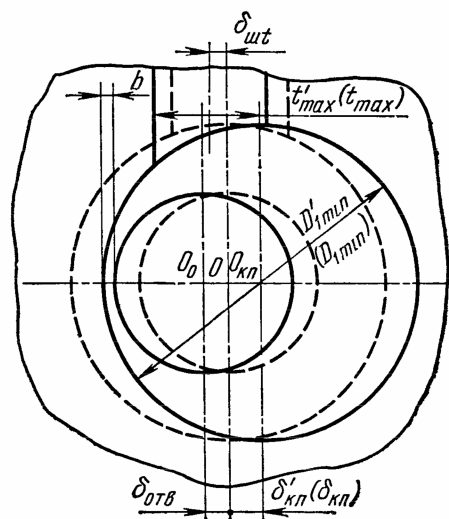


Рис. 2.4. Возможное смещение контактной площадки и проводника на слое платы

Максимальный диаметр просверленного отверстия

$$d_{\max} = d_{\text{св}} + \Delta d, \quad (2.5)$$

где  $d_{\text{св}}$  — диаметр сверла, мм;  $\Delta d$  — погрешность диаметра отверстия, обусловленная биением сверла и точностью его заточки, мм.

С учетом толщины металлизации в отверстии и некоторой усадки диэлектрической подложки фольгированного материала принимают

$$d_{\text{св}} = d_{\text{м.отв}} + (0,1 \div 0,15), \quad (2.6)$$

где  $d_{\text{м.отв}}$  — диаметр металлизированного отверстия, мм. Погрешность расположения отверстия

$$\delta_{\text{отв}} = \delta_0 + \delta_6. \quad (2.7)$$

Погрешность расположения контактной площадки при изготовлении односторонних печатных плат по способу А определяют по формуле

$$\delta'_{\text{кп}} = \delta_{\text{ш}} + \delta_9 + \frac{\delta_{\text{п}} + \delta_3}{2}, \quad (2.8)$$

при изготовлении слоев МПП по способу А — по формуле

$$\delta'_{\text{кп}} = \delta_{\text{ш}} + \delta_9 + \delta_{\text{м}} + \frac{\delta_{\text{п}} + \delta_3}{2}, \quad (2.9)$$

при изготовлении слоев МПП по способу Б — по формуле

$$\delta'_{\text{кп}} = \delta_{\text{ш}} + \delta_9 + \delta_{\text{м}} + \delta_{\text{пр}} + \delta_{\text{пф}}/2. \quad (2.10)$$

Если при изготовлении МПП по способу Б предусмотрен контроль смещения контактных отверстий после изготовления слоев

( $\delta_y$ ), то в этом случае

$$\delta'_{кп} = \delta_y + \delta_{пф}/2, \quad (2.11)$$

где  $\delta_y$  — суммарная величина ухода центра контактной площадки относительно заданных координат, мм (указывается в технологическом процессе и подлежит контролю).

Минимальный диаметр окна фотошаблона, гарантирующий получение контактной площадки размером не менее заданного формулой (2.3) с учетом возможного уменьшения диаметра за счет подсвета при экспонировании рисунка, определяют по формуле

$$D'_{ш \min} = D_{\min} + \Delta \mathcal{E}. \quad (2.12)$$

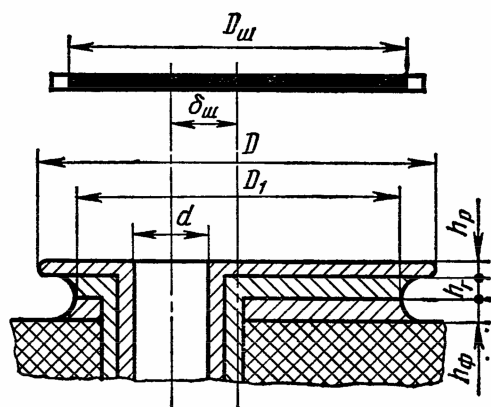
Максимальный диаметр окна фотошаблона

$$D'_{ш \max} = D'_{ш \min} + \Delta D_{ш}. \quad (2.13)$$

Тогда максимальный диаметр контактной площадки

$$D'_{\max} = D'_{ш \max} + \Delta \mathcal{E}. \quad (2.14)$$

Расчет минимального диаметра контактных площадок производят для двусторонних печатных плат и наружных слоев МПП (рис. 2.5), изготавливаемых комбинированным позитивным методом при фотохимическом способе получения рисунка, по формуле



$$D_{\min} = D_{1 \min} + 1,5 (h_{\phi} + h_{пм}) + h_p; \quad (2.15)$$

изготавливаемых комбинированным позитивным методом при сеточнографическом способе получения рисунка по формуле

$$D_{\min} = D_{1 \min} + 1,5 (h_{\phi} + h_{пм}) + (h_r + h_p); \quad (2.16)$$

Рис. 2.5 Расположение контактной площадки на двусторонней печатной плате или наружном слое МПП

(полуаддитивным) методом при фотохимическом способе получения рисунка по формуле

$$D_{\min} = D_{1 \min} + 1,5 h_{пм} + h_p; \quad (2.17)$$

изготавливаемых электрохимическим (полуаддитивным) методом при сеточнографическом способе получения рисунка по формуле

$$D_{\min} = D_{1 \min} + 1,5 h_{пм} + h_r + h_p; \quad (2.18)$$

где  $D_{1 \min}$  — минимальный эффективный диаметр контактной площадки:

$$D_{1 \min} = 2 (b_m + d_{\max}/2 + \delta_{отв} + \delta_{кп}). \quad (2.19)$$



В свою очередь, погрешность расположения контактной площадки

$$\delta_{\text{кп}} = \delta_{\text{ш}} + \delta_{\text{э}} + \frac{\delta_{\text{п}} + \delta_{\text{з}}}{2}. \quad (2.20)$$

Коэффициент 1,5 в формулах расчета минимальных диаметров контактных площадок отражает тот факт, что при струйном направлении травления боковые подтравливания несколько меньше, чем величина травления по глубине.

В формулах учитывается и величина разрачивания при осаждении гальванической меди и металлорезиста. Если металлорезистом является оплавляемый сплав олово-свинец, то разрачивание  $h_p$  устраняется последующим оплавлением ( $h_p = 0$ ).

Минимальный диаметр окна фотошаблона для контактной площадки при фотохимическом способе получения рисунка определяют по формуле

$$D_{\text{ш min}} = D_{\text{min}} - h_p; \quad (2.21)$$

при сеточнографическом способе получения рисунка — по формуле

$$D_{\text{ш min}} = D_{\text{min}} - (h_r + h_p). \quad (2.22)$$

Максимальный диаметр окна фотошаблона для контактной площадки

$$D_{\text{ш max}} = D_{\text{ш min}} + \Delta D_{\text{ш}}. \quad (2.23)$$

Максимальный диаметр контактной площадки определяют по формулам:

для двусторонних печатных плат и наружных слоев МПП, изготавливаемых электрохимическим методом при получении рисунка фотоспособом,

$$D_{\text{max}} = D_{\text{ш max}} + \Delta \mathcal{E} + h_p;$$

для двусторонних печатных плат и наружных слоев в МПП, изготавливаемых комбинированным позитивным методом при получении рисунка фотоспособом,

$$D_{\text{max}} = D_{\text{ш max}} + h_p + \Delta \mathcal{E};$$

для двусторонних печатных плат и наружных слоев МПП, изготавливаемых комбинированным позитивным методом при сеточно-графическом способе получения рисунка

$$D_{\text{max}} = D_{\text{ш max}} + h_p + \Delta \mathcal{E} + h_r.$$

**Расчет ширины проводников.** Минимальную ширину проводников определяют из условия достаточного сцепления (без отслаивания) проводника с диэлектриком и она зависит от адгезионных свойств материала основания и гальваностойкости оксидированного слоя фольги.

Расчет минимальной ширины проводников (рис. 2.6 и 2.7) для

односторонних печатных плат и внутренних слоев МПП, изготовляемых химическим методом, производят по формуле

$$t'_{п\ min} = t'_{п1\ min} + 1,5h_{\phi}, \quad (2.25)$$

где  $t'_{п1\ min}$  — минимальная эффективная ширина проводника.

Минимальную эффективную ширину проводника  $t'_{п1\ min}$  ( $t_{п1\ min}$ ) определяют экспериментально; она равна 0,18 мм (для плат 1-го

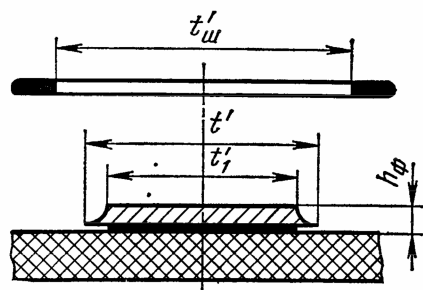


Рис 2 6 Расположение проводника на односторонней печатной плате или на внутреннем слое МПП

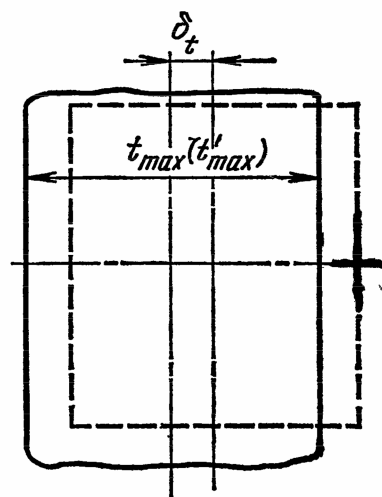


Рис 2 7 Возможное смещение проводника на слое платы

и 2-го классов). Для плат, изготовляемых электрохимическим (полуаддитивным) методом, она может быть принята равной 0,15 мм.

Минимальная и максимальная ширина линий на фотошаблоне определяется по формулам:

$$t'_{ш\ min} = t'_{п\ min} + \Delta\mathcal{E}; \quad (2.26)$$

$$t'_{ш\ max} = t'_{ш\ min} + \Delta t_{ш}. \quad (2.27)$$

Максимальная ширина проводника на слое

$$t'_{п\ max} = t'_{ш\ max} + \Delta\mathcal{E}. \quad (2.28)$$

Расчет минимальной ширины проводников для двусторонних печатных плат и наружных слоев МПП (рис. 2.8), изготовляемых комбинированным позитивным методом при фотохимическом способе получения рисунка, производят по формуле

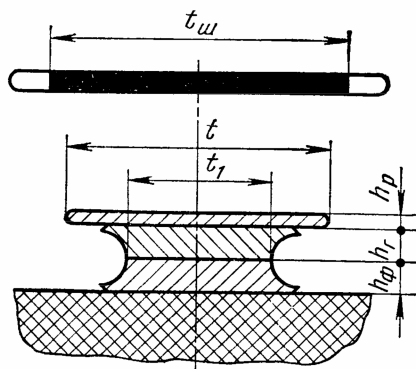


Рис. 2 8 Расположение проводника на двусторонней печатной плате или наружном слое МПП

$$t_{п\ min} = t_{п1\ min} + 1,5(h_{\phi} + h_{пм}) + h_{р}; \quad (2.29)$$

изготовляемых комбинированным позитивным методом при сеточнографическом способе получения рисунка — по формуле

$$t_{п\ min} = t_{п1\ min} + 1,5(h_{\phi} + h_{пм}) + (h_{г} + h_{р}); \quad (2.30)$$

изготовляемых электрохимическим (полуаддитивным) методом при фото-

химическом способе получения рисунка — по формуле

$$t_{п\ min} = t_{п1\ min} + 1,5h_{пм} + h_p; \quad (2.31)$$

изготавливаемых электрохимическим (полуаддитивным) методом при сеточнографическом способе получения рисунка — по формуле

$$t_{п\ min} = t_{п1\ min} + 1,5h_{пм} + h_r + h_p. \quad (2.32)$$

Если металлическим резистом является оплаваемый сплав олово-свинец, то в формулах (2.29), (2.30), (2.31), (2.32)  $h_p = 0$ .

Минимальную ширину линии на фотошаблоне при фотохимическом способе получения рисунка определяют по формуле

$$t_{ш\ min} = t_{п\ min} - h_p; \quad (2.33)$$

при сеточнографическом способе получения рисунка — по формуле

$$t_{ш\ min} = t_{п\ min} - (h_r + h_p). \quad (2.34)$$

Максимальная ширина линии на фотошаблоне

$$t_{ш\ max} = t_{ш\ min} + \Delta t_{ш}. \quad (2.35)$$

Максимальную ширину проводника находят по формулам:

для двусторонних печатных плат и наружных слоев МПП, изготавливаемых электрохимическим методом при получении рисунка фотоспособом,

$$t_{п\ max} = t_{ш\ max} + \Delta \mathcal{E} + h_p;$$

для двусторонних печатных плат и наружных слоев МПП, изготавливаемых комбинированным позитивным методом при получении рисунка фотоспособом,

$$t_{п\ max} = t_{ш\ max} + h_p + \Delta \mathcal{E};$$

для двусторонних печатных плат и наружных слоев МПП, изготавливаемых комбинированным позитивным методом при сеточнографическом способе получения рисунка

$$t_{п\ max} = t_{ш\ max} + (h_r + h_p) + \Delta \mathcal{E}.$$

(2.36)

**Расчет минимальных расстояний между элементами проводящего рисунка.** Минимальный зазор между элементами определяется заданным уровнем сопротивления изоляции при рабочем напряжении схемы или техническими требованиями на печатные платы. Фактический зазор между элементами проводящего рисунка зависит от шага элементов, их максимальных размеров и точности расположения относительно заданных координат.

Минимальное расстояние между проводником и контактной площадкой

$$s_{1\ min} = L_0 - [(D_{max}/2 + \delta_{кп}) + (t_{п\ max}/2 + \delta_{шт})], \quad (2.37)$$

где  $L_0$  — расстояние между центрами рассматриваемых элементов, мм.

Минимальное расстояние между двумя контактными площадками

$$s_{2 \min} = L_0 - (D_{\max} + 2\delta_{\text{кп}}). \quad (2.38)$$

Минимальное расстояние между двумя проводниками

$$s_{3 \min} = L_0 - (t_{\text{п max}} + 2\delta_{\text{шт}}). \quad (2.39)$$

Минимальное расстояние между проводником и контактной площадкой на фотошаблоне

$$s_{4 \min} = L_0 - [(D_{\text{ш max}}/2 + \delta_{\text{кп}}) + (t_{\text{ш max}}/2 + \delta_{\text{шт}})]. \quad (2.40)$$

Минимальное расстояние между двумя контактными площадками на фотошаблоне

$$s_{5 \min} = L_0 - (D_{\text{ш max}} + 2\delta_{\text{кп}}). \quad (2.41)$$

Минимальное расстояние между двумя проводниками на фотошаблоне

$$s_{6 \min} = L_0 - (t_{\text{ш max}} + 2\delta_{\text{шт}}). \quad (2.42)$$

**Примечание.** Формулы (2.37), (2.38), (2.39), (2.40), (2.41), (2.42) приведены для двусторонних печатных плат и наружных слоев МПП. Для расчета односторонних печатных плат и внутренних слоев в МПП в указанные формулы подставляют значения  $D'_{\max}$ ,  $t'_{\text{п max}}$ ,  $D'_{\text{ш max}}$ ,  $t'_{\text{ш max}}$ .

**Расчет минимального расстояния между элементами проводящего рисунка, необходимого для прокладки определенного количества проводников.** Минимальное расстояние для прокладки проводников между двумя контактными площадками металлизированных отверстий определяют по формуле

$$l_{1 \min} = \left( \frac{D_{1 \max} + D_{2 \max}}{2} + 2\delta_{\text{кп}} \right) + (t_{\text{п max}} + 2\delta_{\text{шт}}) n_{\text{п}} + s_{\min} (n_{\text{п}} + 1), \quad (2.43)$$

где  $D_{1 \max}$ ,  $D_{2 \max}$  — максимальные диаметры контактных площадок металлизированных отверстий, мм;  $n_{\text{п}}$  — количество проводников.

Минимальное расстояние для прокладки проводников между двумя неметаллизированными отверстиями

$$l_{2 \min} = \left( \frac{d_{1 \max} + d_{2 \max}}{2} + 2\delta_{\text{отв}} \right) + (t_{\text{п max}} + 2\delta_{\text{шт}}) n_{\text{п}} + s_{\min} (n_{\text{п}} - 1) + 2a. \quad (2.44)$$

Минимальное расстояние для прокладки проводников между контактной площадкой металлизированного отверстия и неметаллизированным отверстием определяют по формуле

$$l_{3 \min} = (D_{\max}/2 + \delta_{\text{кп}}) + (d_{\max}/2 + \delta_{\text{отв}}) + (t_{\text{п max}} + 2\delta_{\text{шт}}) n_{\text{п}} + s_{\min} n_{\text{п}} + a. \quad (2.45)$$

Минимальное расстояние для прокладки проводников между контактной площадкой металлизированного отверстия и краем платы

$$l_{4 \min} = (D_{\max}/2 + \delta_{\text{кп}}) + (t_{\text{п max}} + 2\delta_{\text{шт}}) n_{\text{п}} + s_{\min} n_{\text{п}} + a. \quad (2.46)$$

Минимальное расстояние для прокладки проводников между неметаллизированным отверстием и краем платы

$$l_{5 \min} = (d_{\max}/2 + \delta_{\text{отв}}) + (t_{\text{п max}} + 2\delta_{\text{шт}}) n_{\text{п}} + s_{\min} (n_{\text{п}} - 1) + 2a. \quad (2.47)$$

**Примечания.** 1. Формулы (2.43), (2.44), (2.45), (2.46), (2.47) приведены для двусторонних печатных плат и наружных слоев МПП. Для расчета односторонних печатных плат и внутренних слоев МПП в указанные формулы подставляют значения  $D'_{1\max}$ ,  $D'_{2\max}$  и  $t'_{\text{п max}}$ . 2.  $s_{\min}$  определяют расчетным путем или выбирают из табл. 2.2. 3. Расстояние  $a$  от края платы, выреза, неметаллизированного отверстия до элементов печатного монтажа берут равным номинальной толщине платы, а для плат толщиной менее 1 мм не менее 1 мм.

**Расчет электрических параметров печатных плат. Емкость.** Наличие изоляционного основания с большим значением диэлектрической проницаемости является причиной возникновения больших паразитных емкостей связи и собственной емкости проводника.

Величина паразитной емкости  $C_{\text{пар}}$  (пФ) между двумя проводниками

$$C_{\text{пар}} = \frac{0,12 \varepsilon l_{\text{п}}}{\ln \frac{2s}{h+t_{\text{п}}}}, \quad (2.48)$$

где  $l_{\text{п}}$  — длина взаимного перекрытия проводников, мм;  $h$  — толщина печатного проводника, мм;  $t_{\text{п}}$  — ширина печатного проводника, мм;  $s$  — ширина зазора между краями печатных проводников мм.

Расчет  $C_{\text{пар}}$  необходимо выполнять, выбирая те участки печатной платы, на которых предполагаются наибольшие значения  $C_{\text{пар}}$  (два параллельно расположенных печатных проводника с минимальным зазором между ними или с большим зазором при большой протяженности параллельных участков).

Составленная схема печатных проводников удовлетворяет заданным условиям, если максимальное из полученных расчетных значений  $C_{\text{пар}} \leq C_{\text{пар зад}}$ . В противном случае необходимо выполнить одно или несколько из перечисленных требований: увеличить расстояние между проводниками; уменьшить ширину проводников, принимая во внимание минимально допустимые значения для выбранного метода изготовления печатной платы; уменьшить длину одного из проводников.

**Индуктивность.** Индуктивность печатных проводников  $L$  (мкГн) толщиной  $h$  и шириной  $t_{\text{п}}$  рассчитывают по формуле

$$L = 2l_{\text{п}} \left( 2,3 \lg \frac{l_{\text{п}}}{h+t_{\text{п}}} + 0,2235 \frac{h+t_{\text{п}}}{l_{\text{п}}} + 0,5 \right) 10^{-2}. \quad (2.49)$$

Индуктивность двух параллельных печатных проводников одинакового сечения, шириной зазора между ними  $s$  и с противоположным направлением токов определяют по формуле

$$L = 4 l_n \left( 2,3 \lg \frac{s+t_n}{h+t_n} - \frac{s-t_n}{l_n} + 0,2235 \frac{h+t_n}{l_n} + 1,5 \right) 10^{-2}. \quad (2.50)$$

Если размеры сечений различны, то индуктивность пары проводников

$$L = L_1 + L_2 - 2M, \quad (2.51)$$

где  $M$  — взаимная индуктивность проводников, мкГн, определяемая при  $l_n \gg 10(t+s)$  выражением

$$M = 2l_n \left( 2,3 \lg \frac{2l_n}{s + \frac{t_{n1}}{2} + \frac{t_{n2}}{2}} + \frac{s + t_{n1}/2 + t_{n2}/2}{l_n} \right) 10^{-2}. \quad (2.52)$$

Взаимная индуктивность двух параллельных печатных проводников равной длины

$$M = 0,02 \left( l_n \lg \frac{\sqrt{l_n^2 + L_0^2} + l_n}{L_0} - \sqrt{l_n^2 + L_0^2} + L_0 \right), \quad (2.53)$$

где  $l_n$  — длина проводника, см;  $L_0$  — расстояние между осевыми линиями проводников, см. Для двух параллельных печатных проводников разной длины взаимная индуктивность

$$M = 0,02 \left[ 4,606 l_{n1} \lg \frac{l_{n1} + l_{n2} \sqrt{(l_{n1} + l_{n2})^2 + s^2}}{s} + \right. \\ \left. + 2,303 (l_{n1} + l_{n2}) \lg \frac{l_{n1} + l_{n2} + \sqrt{(l_{n1} + l_{n2})^2 + s^2}}{l_{n1} - l_{n2} + \sqrt{(l_{n1} - l_{n2})^2 + s^2}} + \right. \\ \left. + \sqrt{(l_{n1} - l_{n2})^2 + s^2} - \sqrt{(l_{n1} + l_{n2})^2 + s^2} \right], \quad (2.54)$$

где  $l_{n1}$  — длина первого проводника, см;  $l_{n2}$  — длина второго проводника, см;  $s$  — величина зазора между проводниками, см.

Если  $M_{\text{расч}} > M_{\text{зад}}$ , то необходимо выполнить одно или несколько из перечисленных требований: увеличить зазор  $s$  между проводниками; уменьшить длину участков печатных проводников  $l_n$ , расположенных параллельно друг другу; изменить схему печатных проводников.

Схема печатных проводников удовлетворяет заданным условиям при  $M_{\text{расч}} \leq M_{\text{зад}}$ .

Расчет взаимной индуктивности выполняют для нескольких участков схемы, в которых предполагают наибольшие значения  $M$  (параллельные участки наибольшей протяженности при минимальных зазорах между проводниками).

**Сопротивление изоляции.** Вычисление сопротивления изоляции печатных цепей, расположенных на поверхности платы, произ-

водят по формуле

$$R_s = \rho_s \frac{s}{l}, \quad (2.55)$$

где  $R_s$  — сопротивление изоляции разобщенных печатных цепей, Ом;  $\rho_s$  — удельное поверхностное сопротивление изоляционного основания, Ом;  $s$  — изоляционный зазор разобщенных цепей, см;  $l$  — длина изоляционного зазора, см.

В тех случаях, когда изоляционные зазоры непостоянны по трассе близлежащих печатных проводников, отношение  $s/l$  можно вычислить по формуле

$$\frac{1}{s/l} = \frac{1}{s_1/l_1} + \frac{1}{s_2/l_2} + \dots + \frac{1}{s_{n_0}/l_{n_0}}, \quad (2.56)$$

где индексами 1, 2, ...,  $n_0$  обозначены части отрезков с различными изоляционными расстояниями.

Если требования к материалу предусматривают оценку качества изоляции по сопротивлению на специальных электродах-гребенках, то расчет сопротивления изоляции получается более достоверным, так как в этом случае учитывают не только поверхностные, но и объемные токи утечки между печатными проводниками.

Сопротивление изоляции в этом случае находят по формуле

$$R_{из} = R_{гр} \frac{l_{гр} s}{b_{гр} l_{из}}, \quad (2.57)$$

где  $R_{из}$  — сопротивление изоляции разобщенных печатных цепей, Ом;  $l_{гр}$  — длина изоляционного зазора электрода-гребенки, см;  $b_{гр}$  — ширина изоляционного зазора электрода-гребенки, см;  $l_{из}$  — длина изоляционного зазора разобщенных печатных цепей, см;  $s$  — ширина изоляционного зазора разобщенных печатных цепей, см.

Примечание. По ГОСТ 10316—70  $l_{гр} = 600$  мм,  $b_{гр} = 1$  мм.

Сопротивление изоляции между проводниками, расположенными в объеме МПП на внутренних слоях или на прогнвоположных сторонах платы, определяется объемным и внутренним сопротивлением материала.

Объемное сопротивление рассчитывают по формуле

$$R_v = \rho_v \frac{H}{F}, \quad (2.58)$$

где  $R_v$  — сопротивление изоляции разобщенных печатных цепей по объему диэлектрика, Ом;  $\rho_v$  — удельное объемное сопротивление диэлектрика, Ом·см;  $H$  — толщина межслойной изоляции МПП или толщина двусторонней платы, см;  $F$  — площадь проекции печатных элементов одной стороны на плоскость элемента другой стороны, см<sup>2</sup>.

В ряде конструкций МПП металлизированные отверстия пронизывают внутренние слои питания, образуя участок изоляции в виде коаксиальных цилиндров (рис. 2.9). Сопротивление изоляции одного такого элемента достаточно велико и учитывать его нет необходимости. Но в тех случаях, когда МПП имеет сотни таких отверстий, их влияние на разобшение слоя питания начинает сказываться.

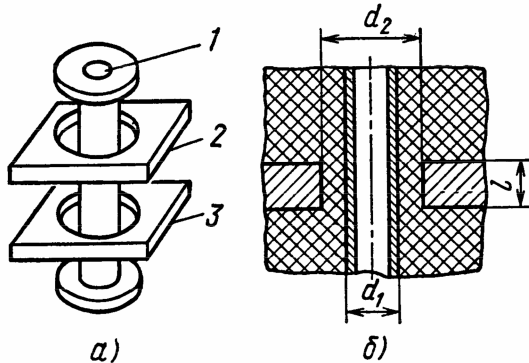


Рис. 2.9. Конструктивная схема сопротивления изоляции металлизированного отверстия от слоев питания: *a* — сквозное металлизированное отверстие, пронизывающее слои питания; *b* — схематическое изображение цилиндрической изоляции (*1* — металлизированное отверстие, *2* — слой земли, *3* — слой питания)

Расчет сопротивления изоляции коаксиальных цилиндров производят по формуле

$$R_{ц} = \frac{\rho_v}{2\pi l} \ln \frac{d_2}{d_1}, \quad (2.59)$$

где  $l$  — длина меньшего цилиндра (обычно толщина фольги внутреннего слоя), см;  $d_2$  — диаметр внешнего электрода (обычно диаметр окна перфорации слоя питания), см;  $d_1$  — диаметр внутреннего электрода (обычно диаметр отверстия под металлизацию с учетом подтравливания диэлектрика), см.

Для сложных пластиков сопротивление вдоль слоев существенно меньше объемного сопротивления поперек слоев, поэтому в формуле для расчета вместо значения  $\rho_v$  используют значение внутреннего сопротивления изоляции  $\rho_i$ .

**Мощность потерь.** Основными параметрами обуславливающими стабильность работы печатных плат, являются тангенс угла потерь  $\operatorname{tg} \delta$  и диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$ , которые больше всего подвержены изменению в процессе старения органического основания платы. Поэтому их влияние необходимо учитывать при выборе диэлектрического материала, используемого в качестве основания печатной платы.

Изменение диэлектрических свойств печатных плат (от воздействия температуры и влаги) приводит к существенным потерям, которые могут достигать 70% от расчетной мощности схемы.

Мощность потерь печатной платы  $P_{п}$ , Вт, определяют по формуле

$$P_{п} = 2\pi f C U^2 \operatorname{tg} \delta, \quad (2.60)$$

где  $f$  — частота питающего напряжения схемы, МГц;  $C$  — емкость печатной платы, мкФ;  $U$  — напряжение питания, В;  $\operatorname{tg} \delta$  — тангенс угла диэлектрических потерь материала основания платы.

Емкость печатной платы  $C$ , пФ, рассчитывают по формуле

$$C = \frac{0,009 \epsilon F}{H_{п}}, \quad (2.61)$$

где  $\epsilon$  — диэлектрическая проницаемость материала основания платы;  $F$  — суммарная площадь печатных проводников, мм<sup>2</sup>;  $H_{п}$  — толщина платы, мм.



Определяя  $C$  и  $P_n$ , подбирают материал основания печатной платы, удовлетворяющий условию обеспечения заданного значения  $P_n$ . Для этого необходимо выбрать предварительно толщину платы, составить схему печатных проводников по заданной принципиальной схеме, выбрать обоснованный метод изготовления печатной платы и произвести расчет выходной мощности функционального узла.

Если ни один из рекомендованных материалов не удовлетворяет условию  $P_{расч} \leq P_{зад}$ , то необходимо произвести расчет для другой толщины платы или изменить величину площади печатных проводников, расположив их по-иному.

**Механическая обработка печатных плат.** Получение заготовок плат из диэлектрика в зависимости от серийности выпуска изделий осуществляют либо резкой на циркулярных пилах, либо штамповкой на эксцентровых прессах.

Характеристика инструментов и принятые режимы резания приведены в табл. 2.7.

Т а б л и ц а 2.7

Материал	Инструмент	Режимы резания	
		скорость, м/мин	подача
Гетинакс	Фреза отрезная из быстрорежущей стали диаметром 200—350 мм, толщина зуба 3—5 мм, шаг зуба 5—8 мм, угол поднутрения до 1°	100—200	0,4—0,5 мм/об
Гетинакс	Фреза отрезная толщиной 2—4 мм, диаметром 100—440 мм с пластинами из твердого сплава, число зубьев 20—74	300—350	15 м/мин
Стекло-текстолит	Фреза отрезная толщиной 3—4 мм и диаметром 200 мм с пластинами из твердого сплава	240—600	0,6—0,1 мм/зуб

При резке на гильотинных ножницах параллельные ножи должны быть установлены с минимальными зазорами (не более 0,02—0,03 мм по всей длине реза).

Обработку контура фрезерованием производят в специальных приспособлениях, позволяющих одновременно обрабатывать большое количество плат, что дает более высокую точность, чем вырубка в штампах.