

Министерство образования Республики Беларусь  
Учреждение образования  
«Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники»

Факультет компьютерного проектирования

Кафедра электронной техники и технологии

**С. И. Мадвейко, А. А. Костюкевич**

## **КОНСТРУИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ. ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**

*Рекомендовано УМО по образованию в области  
информатики и радиоэлектроники в качестве пособия  
для специальностей*

*1-36 04 01 «Программно-управляемые электронно-оптические системы»,  
1-39 02 03 «Медицинская электроника»*

Минск БГУИР 2020

УДК 621.396.6-027.31(076.5)

ББК 32.844-02я73

М13

**Р е ц е н з е н т ы:**

кафедра интеллектуальных и мехатронных систем  
Белорусского национального технического университета  
(протокол №5 от 30.12.2019);

профессор кафедры технологий и организации технического сервиса  
учреждения образования «Белорусский государственный аграрный  
технический университет» доктор физико-математических наук,  
профессор Н. К. Толочко

**Мадвейко, С. И.**

М13      Конструирование и технология электронных устройств. Лабораторный практикум : пособие / С. И. Мадвейко, А. А. Костюкевич. – Минск : БГУИР, 2020. – 66 с. : ил.

ISBN 978-985-543-575-5.

Содержит лабораторные работы по исследованию тепловых характеристик блоков электронных устройств при естественной вентиляции, механических воздействий на конструкции электронных устройств, электромагнитной совместимости узлов электронных устройств, основных параметров печатных плат.

Предназначено для закрепления и углубления теоретических знаний, приобретения практических навыков проведения инженерных расчетов тепловых режимов электронных устройств, защиты конструкций электронных устройств от механических воздействий, электромагнитной совместимости узлов электронных устройств и параметров конструктивных элементов печатных плат, работы с лабораторным оборудованием и измерительными приборами.

**УДК 621.396.6-027.31(076.5)**

**ББК 32.844-02я73**

**ISBN 978-985-543-575-5**

© Мадвейко С. И., Костюкевич А. А., 2020

© УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», 2020

## СОДЕРЖАНИЕ

### **Лабораторная работа №1**

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК БЛОКОВ  
ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ ПРИ ЕСТЕСТВЕННОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ .....4

### **Лабораторная работа №2**

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ  
НА КОНСТРУКЦИИ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ.....19

### **Лабораторная работа №3**

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ  
УЗЛОВ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ .....35

### **Лабораторная работа №4**

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ.....48

Библиотека БГУИР

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК БЛОКОВ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ ПРИ ЕСТЕСТВЕННОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ

**Цель работы:** изучить характеристики тепловых режимов блоков электронных устройств (ЭУ), приобрести навыки проведения инженерных расчетов тепловых режимов блоков ЭУ, исследовать влияние условий эксплуатации на характеристики тепловых режимов блоков ЭУ.

### 1.1 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

В процессе эксплуатации ЭУ подвергается воздействиям температур различных источников, которыми являются не только окружающая среда, но и сама эксплуатируемая техника. Любой реальный блок ЭУ с точки зрения теплофизики представляет собой систему многих тел с источниками тепловой энергии, сложным образом распределенными в пространстве конкретного блока. Выделение тепловой энергии производят активные элементы схемы в результате потребления электроэнергии. Величина выделяемой в виде тепла энергии зависит от номинальной мощности всех активных и частично пассивных элементов блока и его КПД. В целом баланс потребляемой энергии можно представить в виде уравнения

$$P = P_{\text{полез}} + P_{\text{нагрев}} + P_{\text{рассеив}}, \quad (1.1)$$

где  $P$  – мощность, подводимая к изделию от источника питания;

$P_{\text{полез}}$  – полезная мощность;

$P_{\text{нагрев}}$  – мощность, затрачиваемая на нагрев элементов;

$P_{\text{рассеив}}$  – мощность, рассеиваемая в окружающем пространстве.

В результате рассеивания тепловой энергии в блоке устанавливается неоднородное, неравномерно распределенное температурное или тепловое поле. Это пространственно-временное распределение температурного поля  $T(x, y, z, \tau)$  является тепловым режимом блока. Основной характеристикой теплового режима блока является температура

$$T = T(x, y, z, \tau), \quad (1.2)$$

а также перегрев

$$\vartheta = T_i - T_c, \quad (1.3)$$

где  $T_i$  – температура в  $i$ -й точке внутри блока;

$T_c$  – температура окружающей среды.

Расчеты ведут для того, чтобы сопоставить вычисленные температурные характеристики теплового режима с предельно допустимыми температурами, на которые рассчитаны комплектующие элементы ЭУ. При выполнении условия

$$T(x, y, z, \tau) \leq T_{\max \text{ доп}} \quad (1.4)$$

где  $T_{\max \text{ доп}}$  – максимальная допустимая температура эксплуатации элемента, тепловой режим считается нормальным.

Для различных элементов ЭУ  $T_{\max \text{ доп}}$  различны, следовательно, расчет ведут по наименее теплостойким элементам, т. е. по минимальному значению  $T_{\max \text{ доп}}$ .

Современные изделия ЭУ имеют тенденцию к увеличению плотности компоновки, т. е. к выбору минимальных элементов, следовательно, уменьшаются внешние габаритные размеры, а значит, увеличивается выделение объемной плотности неиспользованной энергии, что приводит к напряженности теплового поля. Таким образом, при разработке надо предусматривать отвод тепла, охлаждение, термокомпенсацию и т. д., иначе в ЭУ будет уменьшаться надежность.

### 1.1.1 Тепловые модели ЭУ

Анализ тепловых полей ЭУ путем математического описания – задача очень сложная. Практикой выработаны методы, когда анализ и решения задачи выполняются приближенными методами с большим количеством ограничений, условностей, допущений по отношению к реальному объекту. На определенном этапе проектирования это достигается путем замены реального блока его тепловой моделью, которая реализуется математически и адекватна изучаемому объекту.

На рисунке 1.1 схематично представлена конструкция блока ЭУ: корпус, шасси (плата) с крупными радиоэлементами и среда внутри блока, что и является тепловой моделью блока. Плату или шасси с элементами в тепловой модели называют *нагретой зоной*. Недостаток такого схематичного изображения нагретой зоны состоит в том, что сложно рассчитать площадь поверхности, охватывающей зону нагрева.

Для упрощения расчета площади поверхности нагретой зоны в тепловой модели ее представляют простейшей геометрической фигурой – прямоугольным параллелепипедом с определенными геометрическими параметрами ( $l_1 \times l_2 \times h_3$ ) (рисунок 1.2). Получаем более грубую, но удобную для расчета тепловую модель в виде системы двух тел: 1 – оболочка корпуса; 2 – нагретая зона в форме прямоугольного параллелепипеда.

Параметры нагретой зоны можно условно разделить на *геометрические* и *температурно-энергетические*.

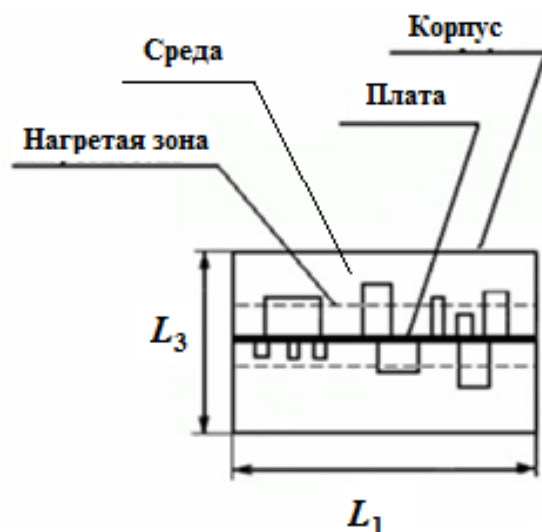


Рисунок 1.1 – Конструкция блока ЭУ

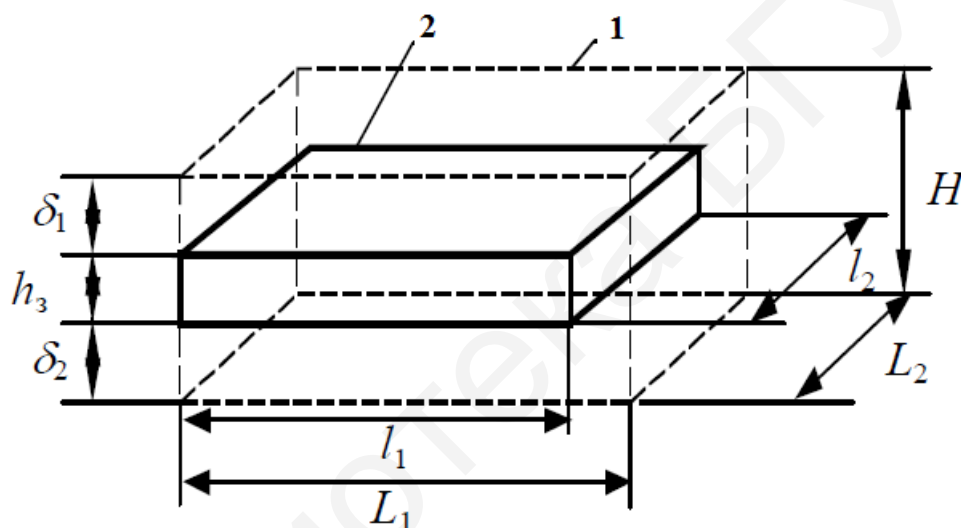


Рисунок 1.2 – Тепловая модель блока ЭУ

Геометрические параметры тепловой модели принято соотносить с габаритными размерами блока. Так, горизонтальные параметры соответствуют горизонтальным размерам корпуса, т. е.  $l_1 = L_1$ ,  $l_2 = L_2$ , а  $h_3$  – высота параллелепипеда (нагретой зоны). Для определения  $h_3$  вводят понятие коэффициента заполнения по объему:

$$K_3 = \frac{V_3}{V_{\text{блока}}} = \frac{\sum V_{\text{дет}} + V_{\text{шасси}}}{V_{\text{блока}}} = \frac{l_1 l_2 h_3}{L_1 L_2 H'} \quad (1.5)$$

где  $V_3$  – объем нагретой зоны;

$V_{\text{блока}}$  – объем блока;

$\sum V_{\text{дет}}$  – суммарный объем деталей блока;

$V_{\text{шасси}}$  – объем шасси блока;

$H$  – высота блока.

Откуда получаем

$$h_3 = K_3 H. \quad (1.6)$$

Следовательно, площадь поверхности нагретой зоны

$$S_3 = 2(l_1 l_2) + 2h_3(l_1 + l_2) = 2[(l_1 l_2) + K_3 H(l_1 + l_2)]. \quad (1.7)$$

Температурно-энергетическими характеристиками блока являются:

1) мощность тепловыделения:

$$P = \sum_{i=1}^n P_i, \quad (1.8)$$

где  $P_i$  – мощность тепловой энергии, выделяемой  $i$ -м электрорадиоэлементом (ЭРЭ);

$n$  – количество ЭРЭ в блоке ЭУ.

2) среднеповерхностная температура нагретой зоны –  $\bar{t}_3$ , так как поверхность нагретой зоны считают изотермической;

3) среднеповерхностная температура корпуса блока  $\bar{t}_K$ ;

4) среднеобъемная температура среды между ними (воздуха) –  $\bar{t}_B$ .

Цель расчета теплового режима на первом этапе – определение интегральных тепловых характеристик:  $\bar{t}_K$ ,  $\bar{t}_3$  и  $\bar{t}_B$ .

Таким образом, тепловой режим блока ЭУ характеризуют зависимостью  $T = f(\bar{t}_K, \bar{t}_3, \bar{t}_B)$ .

Тепловые модели подразделяются на две группы. При разработке моделей первой группы следует руководствоваться принципом иерархии: начинать тепловое моделирование надо с последнего, более крупного уровня, на котором учитываются мощности всех источников, внешнее и полное внутреннее тепловое воздействие. Следует также учесть характеристики общей системы охлаждения приборного корпуса, взаимное влияние модулей и элементов. Только после этого можно рассматривать теплообмен на других, более мелких уровнях блока.

В тепловых моделях второй группы нагретая зона представляется в виде однородного анизотропного тела. Такой подход обоснован тем, что некоторые ЭУ (например, типовые элементы замены) содержат большое количество одинаковых элементов (микросхем, модулей). Так как эти элементы стандартны по размерам, способу монтажа, то их можно рассматривать как элементарную конструктивную ячейку, которая повторяется на плате в трех измерениях, и тогда типовой элемент замены можно рассматривать как квазиоднородное тело. Эта система обладает дальним порядком. В такой модели прослеживается аналогия с твердым кристаллическим телом, свойства которого характеризуются тепло-

проводностью и теплоемкостью. Основными характеристиками модели являются эффективная теплопроводность и эффективная теплоемкость, которые удобно искать для элементарной ячейки (т. е. микромодулей).

### 1.1.2 Тепловой режим блока ЭУ в герметичном корпусе с крупными деталями на шасси

Рассмотрим тепловой режим блока в *герметичном корпусе*. Тепловая модель представлена на рисунке 1.3.

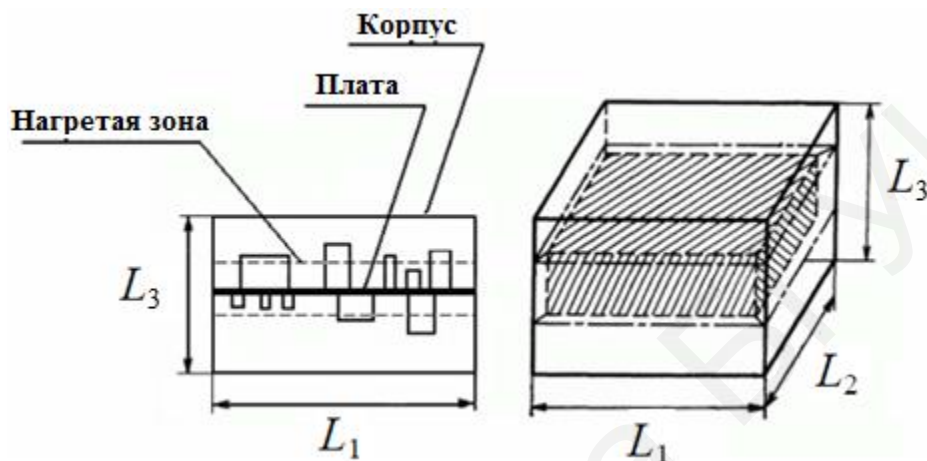


Рисунок 1.3 – Тепловая модель блока ЭУ в герметичном корпусе

Рассмотрим теплообмен блока с окружающей неограниченной средой. Данный теплообмен проходит в два этапа:

- внутренний теплообмен;
- внешний теплообмен.

Проанализируем оба этапа для реального блока.

Первый этап (внутренний теплообмен) – это передача тепловой энергии от нагретых электрорадиоэлементов к стенкам корпуса блока:

1 Конвективный обмен. Если шасси блока – горизонталь, то конвективное движение воздуха развивается только в верхней части блока – над шасси, т. е. в объеме воздушной прослойки, ограниченной крышкой корпуса блока и поверхностью верхних ЭРЭ, расположенных на шасси. Под шасси конвекция практически отсутствует, так как более нагретые поверхности расположены выше более холодной поверхности дна корпуса.

2 Лучистый теплообмен. Представляет передачу тепла к внутренним стенкам корпуса через воздух, который практически прозрачен для лучистой энергии. В этом теплообмене участвуют только периферийные поверхности элементов, так как излучение центральных деталей и шасси не достигает стенок корпуса блока из-за их расположения в глубине зоны и экранирования соседними телами.



3 Кондуктивный теплообмен. На основании опытов и практики установлено, что кондуктивные связи шасси с корпусом блока слабо влияют на тепловой режим нагретой зоны аппарата.

Второй этап (внешний теплообмен) – это передача тепловой энергии от корпуса блока в окружающую среду конвекцией и излучением.

Таким образом,

$$P = \sum_{i=1}^n P_i = P_{3.к}^{\text{внутр}} = P_{к.с}^{\text{внеш}} = P_{к}^{\text{внеш}} + P_{л}^{\text{внеш}}. \quad (1.9)$$

где  $P_i$  – мощность тепловой энергии, выделяемой  $i$ -м ЭРЭ;

$n$  – количество ЭРЭ в блоке ЭУ;

$P_{3.к}^{\text{внутр}}$  – мощность тепловой энергии, передаваемой от нагретых ЭРЭ к стенкам корпуса блока;

$P_{к.с}^{\text{внеш}}$  – мощность тепловой энергии, передаваемой от корпуса блока в окружающую среду конвекцией и излучением;

$P_{к}^{\text{внеш}}$  – мощность тепловой энергии, передаваемой от корпуса блока в окружающую среду конвекцией;

$P_{л}^{\text{внеш}}$  – мощность тепловой энергии, передаваемой от корпуса блока в окружающую среду излучением.

Тепловой режим ЭУ в герметичном корпусе рассчитывается в следующем порядке:

1) площадь поверхности корпуса блока:

$$S_{к} = 2[L_1L_2 + (L_1 + L_2)L_3], \quad (1.10)$$

где  $L_1$  и  $L_2$  – горизонтальные размеры корпуса блока, м;

$L_3$  – вертикальный размер, м;

2) условная поверхность нагретой зоны:

$$S_3 = 2[L_1L_2 + (L_1 + L_2)L_3K_3]; \quad (1.11)$$

3) удельная мощность корпуса блока:

$$q_{к} = \frac{P}{S_{к}}, \quad (1.12)$$

где  $P$  – мощность, рассеиваемая в блоке;

4) удельная мощность нагретой зоны:

$$q_3 = \frac{P}{S_3}; \quad (1.13)$$

5) коэффициент  $\Theta_1$ , зависящий от удельной мощности корпуса:

$$\Theta_1 = 0,1472q_K - 0,2962 \cdot 10^{-3}q_K^2 + 0,3127 \cdot 10^{-6} \cdot q_K^3; \quad (1.14)$$

6) коэффициент  $\Theta_2$ , зависящий от удельной мощности зоны:

$$\Theta_2 = 0,1390q_3 - 0,1223 \cdot 10^{-3}q_3^2 + 0,0698 \cdot 10^{-6}q_3^3; \quad (1.15)$$

7) коэффициент  $K_{H_1}$ , зависящий от давления вне корпуса  $H_1$ , Па:

$$K_{H_1} = 0,82 + \frac{1}{0,925 + 4,6 \cdot 10^{-6}H_1}; \quad (1.16)$$

8) коэффициент  $K_{H_2}$ , зависящий от давления в корпусе  $H_2$ , Па :

$$K_{H_2} = 0,82 + \frac{1}{1,25 + 3,8 \cdot 10^{-5}H_2}; \quad (1.17)$$

9) перегрев корпуса блока:

$$\Theta_K = \Theta_1 K_{H_1}; \quad (1.18)$$

10) перегрев нагретой зоны:

$$\Theta_3 = \Theta_K + (\Theta_2 - \Theta_1)K_{H_2}; \quad (1.19)$$

11) средний перегрев воздуха в блоке:

$$\Theta_B = 0,5(\Theta_K + \Theta_3); \quad (1.20)$$

12) удельная мощность элемента:

$$q_{эл} = \frac{P_{эл}}{S_{эл}}; \quad (1.21)$$

13) перегрев поверхности элемента:

$$\Theta_{эл} = \Theta_3 \left( 0,75 + 0,25 \frac{q_{эл}}{q_3} \right); \quad (1.22)$$

14) перегрев среды около элемента:

$$\Theta_{\text{э.с}} = \Theta_{\text{В}} \left( 0,75 + 0,25 \frac{q_{\text{эл}}}{q_3} \right); \quad (1.23)$$

15) температура корпуса:

$$T_{\text{К}} = \Theta_{\text{К}} + T_{\text{С}}; \quad (1.24)$$

16) температура нагретой зоны:

$$T_{\text{З}} = \Theta_{\text{З}} + T_{\text{С}}; \quad (1.25)$$

17) температура воздуха в корпусе:

$$T_{\text{В}} = \Theta_{\text{В}} + T_{\text{С}}; \quad (1.26)$$

18) температура поверхности элемента:

$$T_{\text{эл}} = \Theta_{\text{эл}} + T_{\text{С}}; \quad (1.27)$$

19) температура среды, окружающей элемент:

$$T_{\text{э.с}} = \Theta_{\text{э.с}} + T_{\text{С}}. \quad (1.28)$$

### 1.1.3 Тепловой режим ЭУ в перфорированном корпусе при естественной вентиляции

Для снижения теплового режима ЭУ широко применяется метод *перфорирования корпуса и шасси*. Тепловая модель блока в перфорированном корпусе имеет вид, представленный на рисунке 1.4.

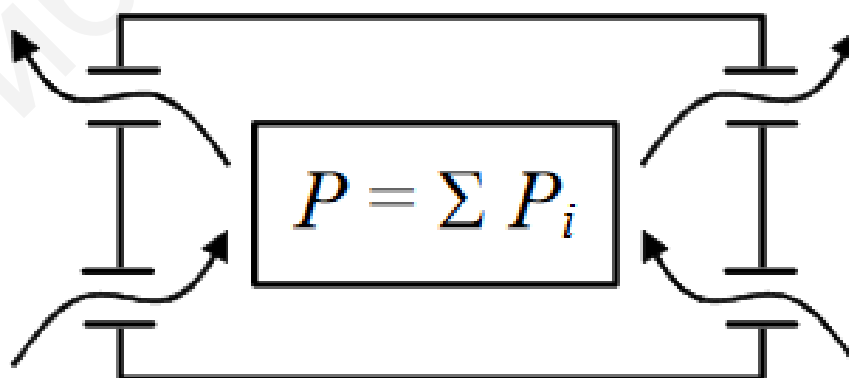


Рисунок 1.4 – Тепловая модель блока ЭУ в перфорированном корпусе

Внутри блока поступает воздух, движение которого вызвано разностью температур и давлений внутри и снаружи корпуса. Возникает его самотяга.

Теплообмен в таком блоке подразделяется на *внутренний* и *внешний*.

*Теплообмен внутри блока.* Тепловая энергия  $P$ , выделяемая нагретой зоной, передается путем ее излучения внутренним стенкам корпуса, а также через отверстия в корпусе внешней среде, чем в дальнейшем будем пренебрегать, и путем конвекции воздуху, протекающему внутри корпуса, от нагретой зоны и внутренних поверхностей корпуса. Тепловая энергия  $Q$  (или ее эквивалент  $W$ ), полученная конвективно воздухом, через перфорированные отверстия выносятся в окружающую среду.

*Внешний теплообмен.* От корпуса ЭУ тепловая энергия, величина которой  $P_K = P - Q$ , излучением и конвекцией передается в окружающую среду.

Тепловой режим ЭУ в перфорированном корпусе рассчитывается в следующем порядке:

1) площадь поверхности корпуса блока, площадь условной поверхности нагретой зоны, удельная мощность нагретой зоны, коэффициенты  $\Theta_1$ ,  $\Theta_2$ ,  $K_{H_1}$ ,  $K_{H_2}$  определяются по формулам (1.10)–(1.17);

2) суммарная площадь перфорированных отверстий:

$$S_{\Pi} = \sum_{i=1}^n S_i; \quad (1.29)$$

3) коэффициент перфорации:

$$\Pi = \frac{S_{\Pi}}{2L_1L_2}; \quad (1.30)$$

4) функция коэффициента перфорации:

$$K_{\Pi} = 0,29 + \frac{1}{1,41 + 4,95 \Pi}; \quad (1.31)$$

5) перегрев корпуса:

$$\Theta_K = 0,93 \theta_1 K_{H_1} K_{H_2}; \quad (1.32)$$

6) перегрев нагретой зоны:

$$\Theta_3 = 0,93 K_{\Pi} \left[ \Theta_1 K_{H_1} + \left( \frac{\Theta_2}{0,93} - \Theta_1 \right) K_{H_2} \right]; \quad (1.33)$$

7) средний перегрев воздуха в корпусе:

$$\Theta_B = 0,6 \Theta_3; \quad (1.34)$$

8) удельная мощность элемента, перегрев поверхности элемента, перегрев среды около элемента, температура корпуса, температура нагретой зоны, температура воздуха в корпусе, температура поверхности элемента, температура среды, окружающей элемент, определяются по формулам (1.21)–(1.28).

#### 1.1.4 Тепловой режим блока ЭУ при общей принудительной вентиляции

Тепловая модель блока ЭУ с *принудительной вентиляцией* сходна с моделью перфорированного блока (рисунок 1.5).

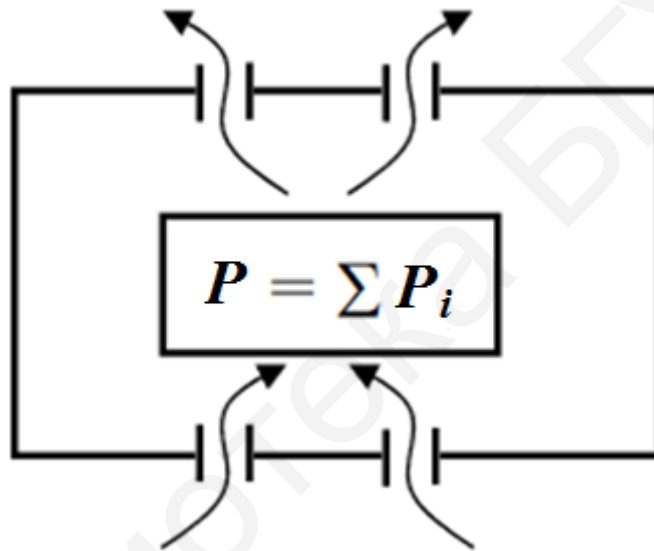


Рисунок 1.5 – Тепловая модель РЭС с принудительной вентиляцией

ЭУ такого типа может быть с вертикально и горизонтально расположенным шасси. Особенностью теплообмена при принудительной вентиляции является то, что интенсивность теплообмена при излучении энергии между нагретой зоной, корпусом блока и окружающей средой в данных условиях продува ничтожно мала.

Тепловой режим ЭУ с принудительной вентиляцией рассчитывается в следующем порядке:

1) средний перегрев воздуха в блоке:

$$\Theta_B = 5 \cdot 10^{-4} \frac{P}{G}, \quad (1.35)$$

где  $G$  – массовый расход среды, кг.

2) площадь поперечного сечения корпуса в направлении продува сечения блока:

$$S = L_1 L_2 ; \quad (1.36)$$

3) коэффициент, зависящий от массового расхода среды:

$$m_1 = 0,001G^{-0,5}; \quad (1.37)$$

4) коэффициент, зависящий от поперечного сечения к направлению продува:

$$m_2 = (L_1 L_2)^{-0,406}; \quad (1.38)$$

5) коэффициент, зависящий от высоты блока в направлении продува:

$$m_3 = L_3^{-1,059}; \quad (1.39)$$

6) коэффициент, зависящий от коэффициента заполнения по объему:

$$m_4 = K_3^{-0,42} \sqrt{1 - K_3^{\frac{2}{3}}}; \quad (1.40)$$

7) перегрев нагретой зоны с принудительным охлаждением:

$$\Theta_3 = \Theta_B + P m_1 m_2 m_3; \quad (1.41)$$

8) условная поверхность нагретой зоны:

$$S_3 = 2[L_1 \cdot L_2 + (L_1 + L_2)L_3 K_3]; \quad (1.42)$$

9) удельная мощность нагретой зоны:

$$q_3 = \frac{P}{S_3}; \quad (1.43)$$

10) удельная мощность элемента:

$$q_{эл} = \frac{P_{эл}}{S_{эл}}; \quad (1.44)$$

11) перегрев поверхности  $i$ -го элемента:

$$\Theta_{эл} = \Theta_3 \left( 0,75 + 0,25 \frac{q_{эл}}{q_3} \right) \left( \frac{L}{L_3} + 0,5 \right), \quad (1.45)$$

где  $L$  – высота элемента;

12) перегрев среды, окружающей  $i$ -й элемент:

$$\Theta_{эс} = \Theta_B \left( 0,75 + 0,25 \frac{q_{эл}}{q_3} \right) \left( \frac{L}{L_3} + 0,5 \right); \quad (1.46)$$

13) температура нагретой зоны:

$$T_3 = \Theta_3 + T_C; \quad (1.47)$$

14) температура воздуха в корпусе:

$$T_B = \Theta_B + T_C; \quad (1.48)$$

15) температура воздуха на выходе из корпуса:

$$T = 2\Theta_B + T_C; \quad (1.49)$$

16) температура поверхности элемента:

$$T_{эл} = \Theta_{эл} + T_C; \quad (1.50)$$

17) температура среды, окружающей элемент:

$$T_{эс} = \Theta_{эс} + T_C. \quad (1.51)$$

## 1.2 МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ РАСЧЕТОВ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММЫ TERMO

1 Запустить исполняемый файл **Termo.exe**.

2 В диалоговом окне **Расчет тепловых режимов РЭА** выбрать необходимый тип корпуса, ввести в соответствующие поля фамилию, имя, отчество студента и номер группы и нажать кнопку **Рассчитать**.

3 В выпадающем диалоговом окне в пошаговом режиме задать исходные данные в соответствии с вариантом индивидуального задания и произвести расчет требуемых характеристик теплового режима блока. После выполнения последнего шага закрыть диалоговое окно.

4 В диалоговом окне **Расчет тепловых режимов РЭА** нажать кнопку **Отчет**. В результате в окне браузера будет выведен отчет с исходными данными и результатами расчета.

5 Для проведения повторных расчетов с другими исходными данными необходимо в окне **Расчет тепловых режимов РЭА** нажать кнопку **Рассчитать** и повторить действия в соответствии с пп. 3 и 4.

6 Для проведения расчетов другим студентом необходимо повторить действия в соответствии с пп. 1–4.

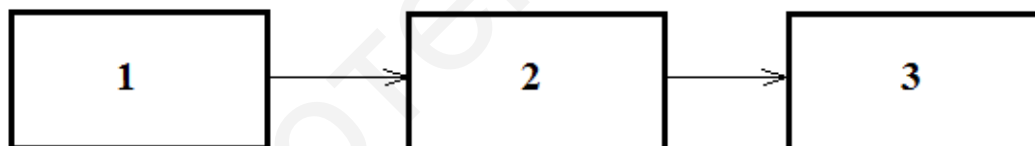
**Примечания:**

1 При вводе дробных значений исходных данных целую часть от дробной необходимо отделять точкой, вводимой при английской раскладке клавиатуры.

2 Повторные отчеты с исходными данными и результатами расчета будут выводиться в отдельные окна браузера.

### 1.3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА БЛОКА ЭЛЕКТРОННОГО УСТРОЙСТВА

Для исследования тепловых режимов блоков ЭУ используется лабораторный стенд, структурная схема которого показана на рисунке 1.6. Стенд позволяет независимо измерять температуру сразу в трех точках внутри корпуса блока: температуру наиболее теплонагруженного элемента, температуру нагретой зоны и температуру воздуха внутри корпуса.



1 – источник питания; 2 – макет блока ЭУ;  
3 – измеритель температуры

Рисунок 1.6 – Структурная схема лабораторного стенда

Источник питания позволяет плавно регулировать выходное напряжение и тем самым изменять выделяемую в блоке тепловую мощность. Макет блока представлен в виде прямоугольного параллелепипеда с двумя съемными противоположными боковыми стенками. С помощью различных наборов пластин имеется возможность сформировать корпус герметичного или перфорированного блока. Комбинируя наборы, можно изменять также степень перфорации. Внутри макета блока расположена плата с тепловыделяющими элементами. Температура в контрольных точках измеряется с помощью трех термоэлектрических датчиков температуры. Электрические сигналы с датчиков подаются на цифровой измеритель температуры.



Исследование теплового режима блока ЭУ выполняется в следующем порядке:

1 В соответствии с индивидуальным заданием с помощью наборов пластин сформировать корпус герметичного или перфорированного (с заданной степенью перфорации) блока.

2 Зафиксировать показания датчиков температуры, которые должны быть одинаковы. Это значение принимается за значение температуры окружающей среды.

3 В соответствии с индивидуальным заданием выставить с помощью регулятора источника питания значение выходного напряжения.

4 Фиксировать показания датчиков температуры каждые 10 мин с момента подачи напряжения на макет блока. Измерения производить до установления стационарного теплового режима блока.

#### **1.4 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ**

1 Получить у преподавателя вариант индивидуального задания на выполнение лабораторной работы.

2 В соответствии с вариантом индивидуального задания провести экспериментальное исследование тепловых характеристик блока ЭУ.

3 В соответствии с вариантом индивидуального задания провести расчет тепловых характеристик блока ЭУ с помощью программы **Termo**.

4 Сравнить результаты экспериментальных исследований и расчета.

5 Оформить отчет по лабораторной работе.

#### **1.5 СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА**

1 Цель лабораторной работы.

2 Краткие теоретические сведения.

3 Графики полученных зависимостей.

4 Выводы по работе.

#### **1.6 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ**

1 В чем заключается понятие теплового режима блока?

2 Что представляет собой нагретая зона?

3 Опишите геометрические параметры нагретой зоны.

4 Опишите температурно-энергетические параметры нагретой зоны.

5 Объясните принцип иерархии при разработке тепловых моделей.

6 Назовите виды теплообмена в герметичном корпусе.

7 Опишите процесс теплообмена в перфорированном корпусе.

8 Опишите процесс теплообмена в корпусе с принудительной вентиляцией.

9 Назовите исходные данные для расчета теплового режима блока.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Образцов, Н. С. Теплообмен в РЭА : конспект лекций по курсу «Конструирование радиоэлектронных устройств» / Н. С. Образцов, А. М. Ткачук, Э. П. Куракина. – Минск : БГУИР, 2003. – 54 с.

2 Дульнев, Г. Н. Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре / Г. Н. Дульнев. – М. : Высш. шк., 1984. – 248 с.

3 Баканов, Г. Ф. Основы конструирования и технологии радиоэлектронных средств : учеб. пособие / Г. Ф. Баканов, С. С. Соколов, И. Г. Мироненко. – 2-е изд., испр. и доп. – М. : Академия, 2014. – 368 с.

4 Конструирование и технология электронных систем. Курсовое проектирование : учеб-метод. пособие / А. А. Костюкевич [и др.]. – Минск : БГУИР, 2012. – 119 с.

Библиотека БГУИР

## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА КОНСТРУКЦИИ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

**Цель работы:** изучить виды механических воздействий и их характеристики, способы защиты ЭУ от механических воздействий, исследовать влияние конструктивных параметров на частоту собственных колебаний печатных плат.

### 2.1 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

#### 2.1.1 Общие сведения о механических воздействиях

Наиболее употребительной является следующая классификация механических воздействий:

- вибрации;
- удары;
- линейные нагрузки;
- акустические шумы;
- комплексные воздействия.

Вибрации в свою очередь могут быть гармоническими, негармоническими, периодическими, случайными (рисунок 2.1).

Ударные нагрузки могут воздействовать на аппаратуру не только при ее эксплуатации на подвижных объектах, но и при транспортировании и погрузочно-разгрузочных работах.

Линейные нагрузки возникают при разгоне и торможении транспортных средств, изменении направления движения.

Акустические шумы проявляются при работе мощных двигателей (особенно реактивных), а также из-за аэродинамических эффектов при движении самолетов или ракет в достаточно плотных слоях атмосферы.

Комплексные воздействия являются комбинацией первых четырех выше-названных. Это, например, может быть одновременное воздействие на аппаратуру вибраций и ударов, вибраций и линейных нагрузок и т. д. Подобные воздействия наиболее часто встречаются в реальных условиях эксплуатации, но их и наиболее трудно воспроизводить в лабораторных условиях при испытаниях аппаратуры.

#### 2.1.2 Параметры гармонических вибраций

Гармонические вибрации редко встречаются на подвижных объектах в чистом виде, однако их широко используют при анализе отклика конструкции на механическое воздействие и проведении испытаний аппаратуры, и, кроме того, любой сложный периодический колебательный процесс можно представить в виде суммы более простых – гармонических.

Гармонические вибрации характеризуются *амплитудой, периодом колебаний* или *частотой*. Кроме того, для характеристики гармонического вибрационного процесса используются понятия *виброскорости* и *виброускорения*.



Рисунок 2.1 – Разновидности вибрации

Гармоническая вибрация описывается выражением

$$y = A \sin \omega t = A \sin 2\pi f t, \quad (2.1)$$

где  $y$  – смещение колеблющегося объекта;

$A$  – амплитуда вибрации;

$t$  – текущее время;

$f = \omega / 2\pi$  – частота.

Виброскорость можно определить как первую производную по времени от вибросмещения  $y$ :

$$y' = A \omega \cos \omega t = A 2\pi f \cos 2\pi f t. \quad (2.2)$$

Амплитуда виброскорости:

$$V = A \omega = A 2\pi f. \quad (2.3)$$

Виброускорение определяется как первая производная от виброскорости или вторая производная от вибросмещения:

$$y'' = -A\omega \sin \omega t = -A(2\pi f) \sin 2\pi f t. \quad (2.4)$$

Амплитуда виброускорения:

$$W = A\omega^2 = A(2\pi f)^2. \quad (2.5)$$

В технической литературе и инженерной практике виброускорение часто выражают в единицах ускорения свободного падения –  $g$ .

Для перехода от традиционной единицы измерения величины ускорения ( $W$ ) к единице ускорения свободного падения ( $g$ ) с учетом выражения (2.5) может быть получена формула

$$j = \frac{W}{\bar{g}} \approx 4Af^2, \bar{g}. \quad (2.6)$$

### 2.1.3 Защита конструкции электронных устройств от вибрации

При решении задач по защите конструкций ЭУ от механических нагрузок пользуются понятиями *прочность* и *устойчивость*. *Прочность* к воздействию механических нагрузок – это способность изделий выполнять свои функции и сохранять свои параметры в пределах норм, установленных в технической документации, *после воздействия* механических нагрузок.

*Устойчивость* к воздействию механических нагрузок – это способность изделий выполнять свои функции и сохранять свои параметры в пределах норм, установленных в технической документации, *во время воздействия* механических нагрузок.

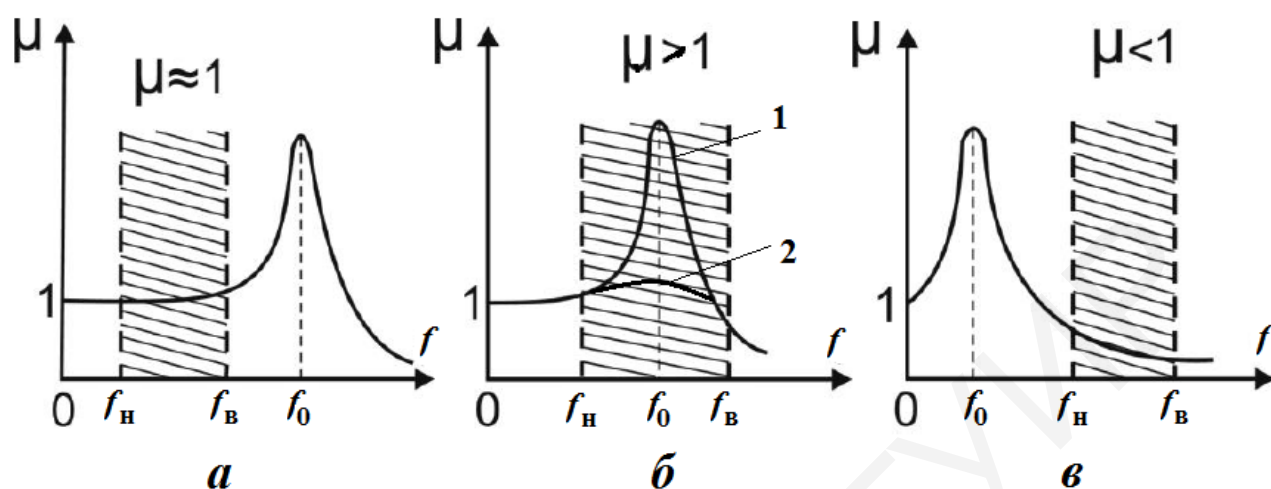
К изделиям, предназначенным для функционирования в условиях воздействия механических нагрузок, предъявляют требования по прочности и устойчивости, к изделиям, не предназначенным для функционирования в условиях воздействия механических нагрузок, – только по прочности.

Как следует из приведенных выше определений, обеспечение устойчивости является более сложной технической задачей, чем обеспечение прочности.

Способы защиты конструкций ЭУ от вибраций удобно классифицировать и наглядно представить, если использовать зависимость коэффициента динамичности  $\mu$  от частоты  $f$ . Используя эту зависимость, можно выделить три разновидности способов виброзащиты (рисунок 2.2).

На рисунке 2.2 представлено соотношение собственной резонансной частоты защищаемого конструктивного элемента  $f_0$  относительно диапазона частот воздействующих вибраций от  $f_n$  до  $f_v$ . Как следует из рисунка 2.2, *a*, вывод резонансной частоты  $f_0$  элемента за пределы диапазона частот воздействующих вибраций в более высокочастотную область позволяет в диапазоне частот воздействующих вибраций обеспечить значение коэффициента динамичности  $\mu \approx 1$ . Это означает, что резонансное возбуждение колебаний защищаемого

элемента происходить не будет. Смещение значения  $f_0$  в более высокочастотную область можно обеспечить увеличением жесткости конструктивных элементов.



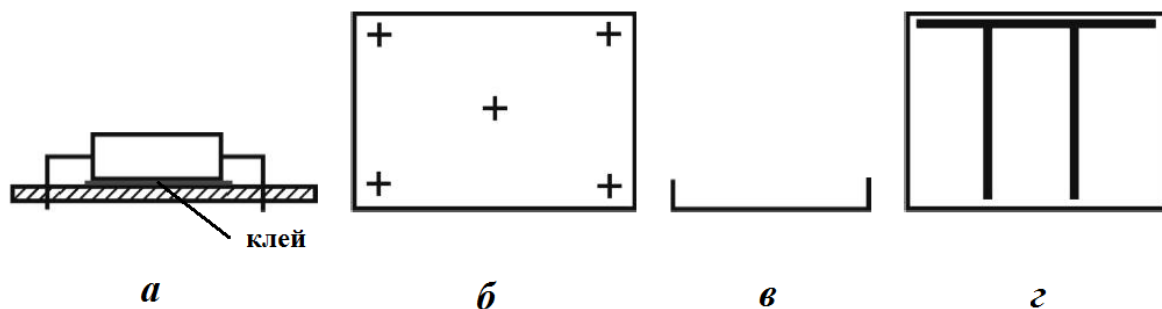
*a* – увеличение жесткости конструктивных элементов (увеличение  $f_0$ );  
*б* – использование конструктивных элементов с увеличенной степенью демпфирования; *в* – использование виброизоляторов

Рисунок 2.2 – Способы виброзащиты

На рисунке 2.2, б показано изменение хода зависимости  $\mu$  от  $f$  при использовании конструктивных элементов, обладающих повышенной степенью демпфирования (кривая 2). Большую степень демпфирования колебаний можно обеспечить, например, используя платы с вибропоглощающим покрытием, слоистые конструкции либо заливку демпфирующими материалами (например, компаундом) поверхности платы с элементами.

Применение демпфирующих покрытий и слоистых конструкций позволяет снизить значения коэффициентов динамичности таких конструктивных элементов, как печатные платы, с нескольких десятков до нескольких единиц, причем в области их резонансных колебаний. К недостаткам этого способа виброзащиты следует отнести ухудшение ремонтоспособности ЭУ, зависимость характеристик покрытий и заливок от температуры, возникновение больших внутренних напряжений в компаунде при его полимеризации, изменение свойств покрытий и заливок с течением времени. Кроме того, величина рассеяния энергии механических колебаний полимерными материалами зависит от частоты, амплитуды и формы колебаний, состава компонентов, вида напряженного состояния. Эти обстоятельства усложняют аналитическую оценку эффективности виброзащиты.

Примеры конструктивного исполнения элементов аппаратуры, обладающих повышенной жесткостью, представлены на рисунке 2.3.



*а* – применение дополнительных точек или площадок крепления с помощью клея; *б* – применение дополнительных точек крепления; *в* – применение отбортовок и профилирования (для пластин из металла); *г* – применение ребер жесткости

Рисунок 2.3 – Конструктивные решения, позволяющие увеличить жесткость элементов аппаратуры

Наиболее эффективным способом виброзащиты является виброизоляция, так как только в этом случае удастся получить значения коэффициента динамичности  $\mu < 1$  в диапазоне частот воздействующих вибраций (см. рисунок 2.2, *в*). Подобный способ виброзащиты может быть использован как для блоков, так и для отдельных чувствительных к вибрациям элементов аппаратуры. Виброизоляция обеспечивается тем, что между защищаемым аппаратом или его элементом и вибрирующей поверхностью устанавливаются специальные элементы – виброизоляторы. Некоторые схемы монтажа блоков на виброизоляторах представлены на рисунке 2.4.

Выбор схемы расположения амортизаторов зависит главным образом от расположения аппаратуры на носителе и условий динамического воздействия. Наибольшее применение находит рациональный монтаж амортизаторов, при котором центр масс (ЦМ) и центр жесткости (ЦЖ), т. е. точки приложения равнодействующих сил реакций амортизаторов, совпадают или лежат на одной вертикали. Широкое распространение получил вариант расположения амортизаторов, представленный на рисунке 2.4, *а*. Такое расположение удобно с позиций общей компоновки блоков на объекте. Однако в данном случае невозможно добиться совпадения центра тяжести с центром масс и получить рациональную систему. Варианты, изображенные на рисунке 2.4, *б* и *в*, позволяют получить рациональную систему, однако такое расположение амортизаторов не всегда удобно при размещении на объекте. Для конструктивной реализации таких систем требуются дополнительные узлы крепления в виде кронштейнов и стоек. Система с наклонным расположением амортизаторов (рисунок 2.4, *г*) находит применение в транспортной, корабельной и бортовой аппаратуре. Размещение амортизаторов по варианту рисунка 2.4, *д* используется в стоечной аппаратуре, когда высота блока ЭУ значительно больше глубины и ширины. В этом

случае установка дополнительных виброизоляторов на боковой поверхности блоков позволяет ослабить колебания вокруг горизонтальных осей  $x$  и  $y$ . Если амортизаторы устанавливаются несимметрично относительно ЦМ блока (рисунок 2.4,  $e$ ), то необходимо, чтобы жесткость каждого амортизатора вдоль оси  $z$  была пропорциональна его доле нагрузки.

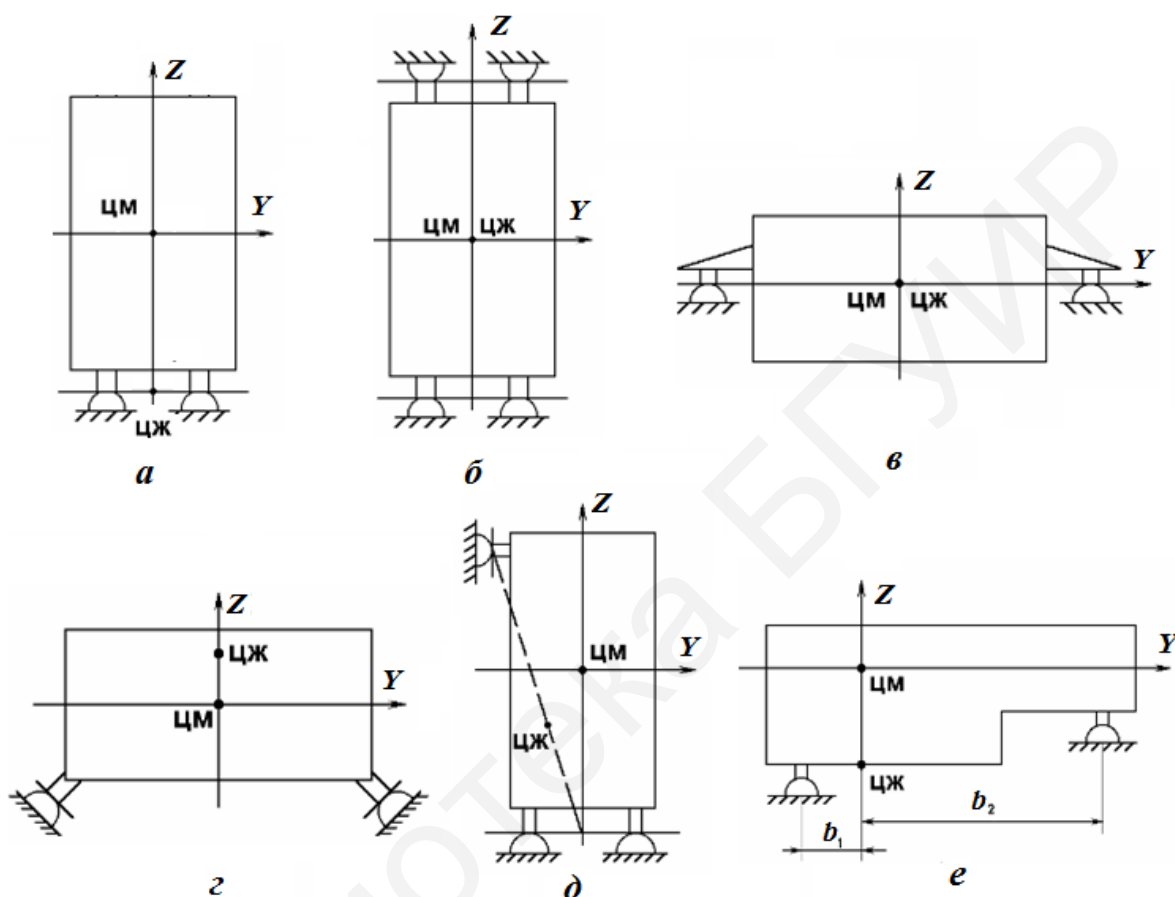


Рисунок 2.4 – Схемы монтажа блоков аппаратуры на виброизоляторах

Установка блоков на виброизоляторах обеспечивает значение их собственных частот  $f_0 \approx 10...25$  Гц. В этом случае, начиная с частот 30–40 Гц, обеспечивается эффективная защита блока от вибраций ( $\mu < 1$ ) и чем выше частота воздействующей вибрации, тем эффективнее виброзащита.

Используемые в настоящее время виброизоляторы можно разделить на четыре основных вида:

- 1) резинометаллические;
- 2) пружинные с воздушным демпфированием;
- 3) пружинные с фрикционным демпфированием;
- 4) пружинно-полимерные.

Примеры конструктивного исполнения указанных типов амортизаторов показаны на рисунке 2.5.



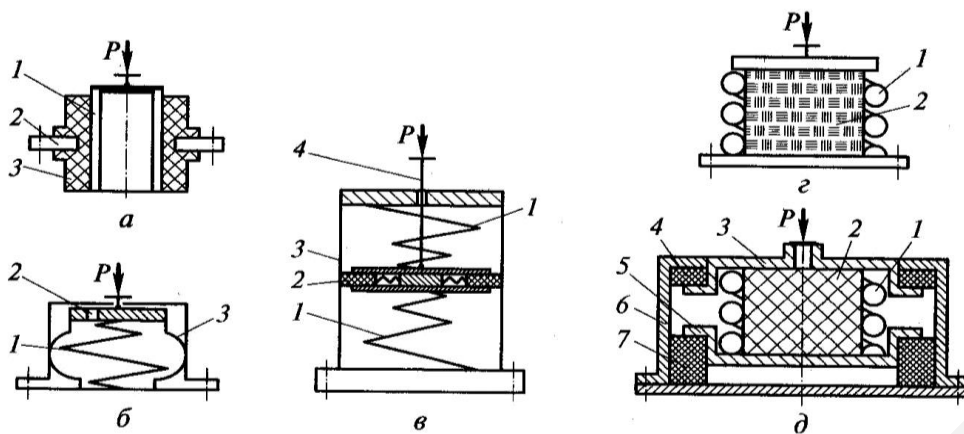


Рисунок 2.5 – Конструкции амортизаторов

**Резинометаллические** амортизаторы (рисунок 2.5, а) состоят из элементов 1 и 2 металлической арматуры и фасонного резинового упругого и демпфирующего элемента 3, соединенного с ними с помощью вулканизации. Амортизаторы этого типа просты, компактны, технологичны и дешевы, обладают большой нагрузочной способностью и возможностью произвольной их ориентировки относительно основания. Однако они имеют довольно узкий диапазон рабочих температур и ограниченный срок службы из-за старения резины и ослабления в процессе эксплуатации сцепления металла с резиной. Кроме того, их недопустимо использовать в агрессивной среде, содержащей пары бензина, масла и т. д.

В амортизаторе **пружинном с воздушным демпфированием** (рисунок 2.5, б) упругим элементом является фасонная пружина 1 (коническая или экспоненциальная), имеющая нелинейную статическую характеристику  $P(z)$ . Эффект демпфирования возникает вследствие потерь энергии в потоке воздуха, протекающего через калиброванное отверстие 2 в резиновой оболочке 3. Данный амортизатор обладает свойством равночастотности, т. е. независимостью частоты собственных колебаний от нагрузки, однако его демпфирующие свойства зависят от температуры и меняются вследствие старения резины.

В амортизаторах **пружинных с фрикционным демпфированием** (рисунок 2.5, в) упругий элемент состоит из двух последовательно соединенных конических пружин 1. Эффект демпфирования возникает за счет сил сухого трения между корпусом 3 и подпружиненной пластмассовой диафрагмой 2, связанной со штоком 4, на который опирается защищаемое изделие. Амортизатор имеет хорошие эксплуатационные характеристики, однако при малых амплитудах колебаний не обеспечивает виброзащиту, так как для начала движения диафрагме необходимо преодолеть силу трения.

**Пружинно-полимерный** амортизатор (рисунок 2.5, д) состоит из цилиндрической пружины 1, навитой на полимерный демпфер 2, размещенный в обоймах 3 и 5, опирающихся на верхнюю 4 и нижнюю 7 полимерные прокладки. Конструкция размещена в корпусе 6. Для обеспечения устойчивой работы

амортизатора в горизонтальной плоскости в качестве упругого элемента используют коническую или экспоненциальную пружину. Эти амортизаторы имеют широкий частотный диапазон защиты, но их параметры сильно зависят от температуры и влажности окружающей среды. Расширение температурного диапазона устойчивой работы такого амортизатора достигается использованием многослойных структур демпфирующих элементов, каждый слой которых рассчитан на эффективное демпфирование колебаний в определенном интервале температур.

Оценку эффективности виброизоляции в первом приближении можно сделать следующим образом:

1 Определить значение собственной резонансной частоты блока на виброизоляторах:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_{\Sigma}}{m}}, \quad (2.7)$$

где  $K_{\Sigma}$  – суммарная жесткость системы виброизоляции;  
 $m$  – масса блока.

2 Определить значение амплитуды вынужденных колебаний блока либо значение коэффициента динамичности блока на виброизоляторах в диапазоне частот воздействующих вибраций:

$$A = \frac{A_0}{\left|1 - \left(\frac{f}{f_0}\right)^2\right|} \quad \text{или} \quad \mu = \frac{1}{\left|1 - \left(\frac{f}{f_0}\right)^2\right|}, \quad (2.8)$$

где  $A_0$  – амплитуда колебаний основания в месте монтажа блока;

$f$  – текущее значение частоты вибрации;

$f_0$  – собственная резонансная частота блока на виброизоляторах.

3 По известным значениям амплитуды колебаний блока и частоты вибрации определить значение возникающего ускорения и сравнить его с допустимым:

$$j = 4 A f^2 \leq j_{\text{доп}}. \quad (2.9)$$

#### **2.1.4 Защита ЭУ от ударов, линейных нагрузок и акустических шумов**

Реакция элементов и блоков ЭУ на ударные нагрузки определяется не только величиной амплитуды ускорения воздействующего ударного импульса, но и соотношением длительности ударного импульса и периода собственных колебаний объекта (рисунок 2.6).

Большая величина отклика будет наблюдаться у конструктивных элементов, полупериод собственных колебаний которых сравним с длительностью ударного импульса или меньше ее. Другими словами, чем короче ударный про-

цесс, тем меньшее число конструктивных элементов ЭУ в максимальной степени будет реагировать на такое воздействие.

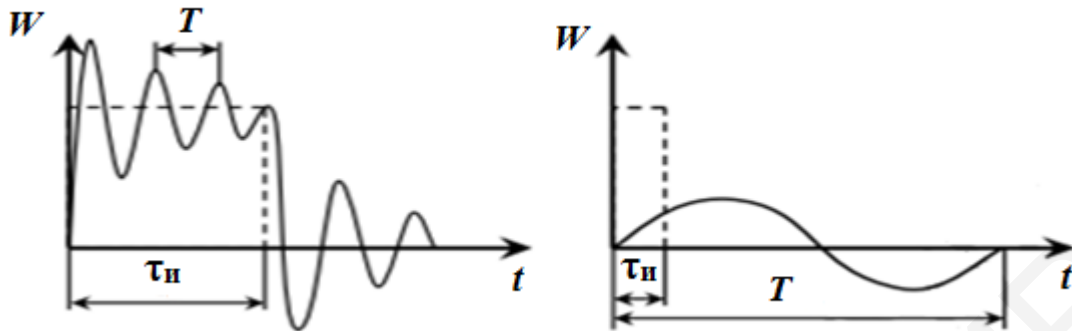


Рисунок 2.6 – Реакция конструктивного элемента или блока ЭУ при различных соотношениях длительности ударного импульса  $\tau_n$  и периода собственных колебаний объекта  $T$

Этот вывод позволяет рекомендовать к использованию системы виброизоляции для защиты блоков ЭУ и от ударных нагрузок, так как установка блоков на виброизоляторы приводит к увеличению значения  $T$  (значение  $f_0$  блока на виброизоляторах мало). При проектировании подобных систем виброизоляции следует иметь в виду то обстоятельство, что установка блока на слишком «мягкие», низкочастотные виброизоляторы может привести при ударной нагрузке к их деформации до упора и к потере эффективности такой защиты. Поэтому для защиты от ударных нагрузок рекомендуется использовать более жесткие, высокочастотные виброизоляторы, обеспечивающие при номинальной их нагрузке значения собственных частот систем виброизоляции в пределах 25... 30 Гц.

Оценить эффективность защиты блока на виброизоляторах от ударных нагрузок можно, определив следующие показатели:

1) частоту собственных колебаний блока:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{K_{\Sigma}}{m}}, \quad (2.10)$$

где  $K_{\Sigma}$  – суммарная жесткость системы виброизоляции;

$m$  – масса блока;

2) условную частоту воздействующего ударного процесса:

$$\omega = \pi/\tau, \quad (2.11)$$

где  $\tau$  – длительность ударного импульса;

3) отношение частот:

$$\gamma = \omega/\omega_0; \quad (2.12)$$

4) коэффициент передачи удара (для полусинусоидального ударного импульса):

$$K_{уд} = \frac{2\gamma}{\gamma^2-1} \cos ; \quad (2.13)$$

5) ускорение блока в момент удара:

$$j_{max} = j_{осн} \cdot K_{уд}; \quad (2.14)$$

б) максимальное значение смещения блока при ударе:

$$A_{max} = \frac{j_{max}}{\omega_0^2}. \quad (2.15)$$

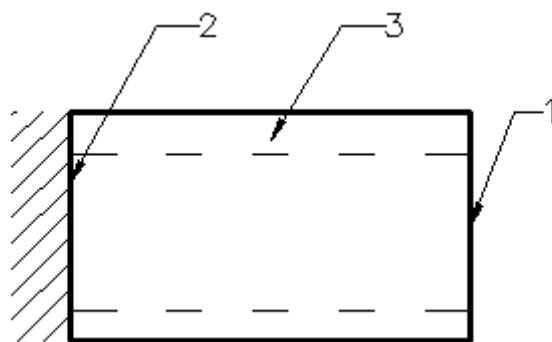
Защита от линейных нагрузок, которые характеризуются воздействием на ЭУ и ее элементы инерционных сил, изменяющихся достаточно медленно с течением времени, сводится к увеличению прочностных свойств конструктивных элементов и их жесткости. Эти мероприятия, которые можно оценить методами технической механики при воздействии на объекты статических сил, предотвращают разрушение конструкций и недопустимые отклонения их частей от статического положения, что может привести к коротким замыканиям, соприкосновениям элементов и т. д.

Защита ЭУ от акустических шумов обеспечивается конструкционным демпфированием (вибропоглощающие покрытия и слоистые конструкции для печатных плат) и использованием звукоизолирующих перегородок.

### 2.1.5 Определение частоты собственных колебаний печатных плат

При расчете динамических характеристик ячеек ЭУ их часто представляют в виде пластин постоянной толщины, состоящих из упругого однородного и изотропного материала. К таким пластинам можно отнести печатные платы, основания шасси и другие плоские конструкции постоянной толщины.

Крепление пластин к опоре может быть жестким или подвижным (рисунок 2.7). При жестком креплении нет угловых и линейных перемещений. Шарнирная опора исключает линейное перемещение, но при этом возможен поворот по опертой стороне.



1 – свободный край; 2 – жестко защемленный край;  
3 – свободно опертый край

Рисунок 2.7 – Условное обозначение способов крепления пластин

Для всех возможных способов закрепления печатной платы собственная частота вибрации определяется по формуле

$$f_0 = \frac{K_\alpha}{2\pi a^2} \sqrt{\frac{Dab}{m}}, \quad (2.16)$$

где  $K_\alpha$  – коэффициент, зависящий от способа крепления печатной платы;

$a$  – длина платы, м;

$D$  – цилиндрическая жесткость платы, Н·м;

$b$  – ширина платы, м;

$m$  – масса платы с установленными элементами, кг.

Цилиндрическая жесткость платы определяется по формуле

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}, \quad (2.17)$$

где  $E$  – модуль упругости материала платы, Н/м<sup>2</sup>;

$\mu$  – коэффициент Пуассона для материала платы;

$h$  – толщина платы, м.

Характеристики материалов, применяемых в электронных устройствах, приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Характеристики материалов, применяемых в ЭУ

Материал	Модуль упругости, $E \cdot 10^{10}$ Н/м <sup>2</sup>	Коэффициент Пуассона, $\mu$	Плотность $\rho \cdot 10^3$ кг/м <sup>3</sup>
СТЭФ (1,33 мм)	3,2	0,279	2,47
МТЭ (1,22 мм)	3,5	0,214	1,98
НФД (0,92 мм)	3,45	0,238	2,32
СФ	3,02	0,22	2,05
Сталь	22	0,3	7,8
Алюминий	7,3	0,3	2,7

Коэффициент  $K_\alpha$ , зависящий от способа закрепления сторон пластины, определяется по общей формуле

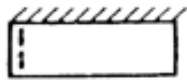
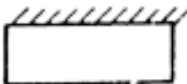
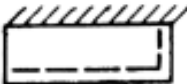
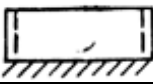
$$K_\alpha = k \left( \alpha + \beta \frac{a^2}{b^2} + \gamma \frac{a^4}{b^4} \right)^{1/2}. \quad (2.18)$$

Значения коэффициентов  $k$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Коэффициенты  $k$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$

Номер эскиза	Эскиз закрепления	Коэффициенты			
		$k$	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$
1	2	3	4	5	6
1		9,87	1	2	1
2		9,87	1	2,33	2,44
3		15,42	1	0,95	0,41
4		9,87	1	2,57	5,14
5		22,37	1	0,48	0,19
6		15,42	1	1,11	1
7		22,37	1	0,57	0,47
8		15,42	1	1,19	2,1
9		3,52	1	0	0
10		15,42	1	0	0
11		15,42	0	0	1
12		15,42	1	0,29	0,05

Продолжение таблицы 2.2

1	2	3	4	5	6
13		3,52	0	1,58	1
14		22,37	0	0,1	1
15		15,42	0	0,34	0
16		9,87	1,26	0,6	1

### 2.1.6 Методика проведения расчетов с помощью компьютерной программы «Расчет собственной частоты ПП»

1 Запустить исполняемый файл **Главная.html**.

2 В диалоговом окне задать числовые исходные данные, материал печатной платы и способ закрепления печатной платы в соответствии с вариантом индивидуального задания и произвести расчет частоты собственных колебаний печатной платы, нажав кнопку **Произвести расчет**.

3 Для проведения повторных расчетов с другими исходными данными необходимо перезапустить файл **Главная.html** и повторить действия в соответствии с пунктом 2.

## 2.2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЗОНАНСНОЙ ЧАСТОТЫ ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЫ

Для определения собственной резонансной частоты печатной платы используется лабораторный стенд, в состав которого входят низкочастотный генератор синусоидальных колебаний, электродинамический вибростенд, цифровой осциллограф, набор исследуемых плат. Схема измерений приведена на рисунке 2.8. Стенд позволяет определять собственную резонансную частоту печатной платы в диапазоне частот 50...4000 Гц. Поиск резонансной частоты проводят путем плавного изменения частоты колебаний платформы вибростенда при поддержании постоянной амплитуды колебаний.

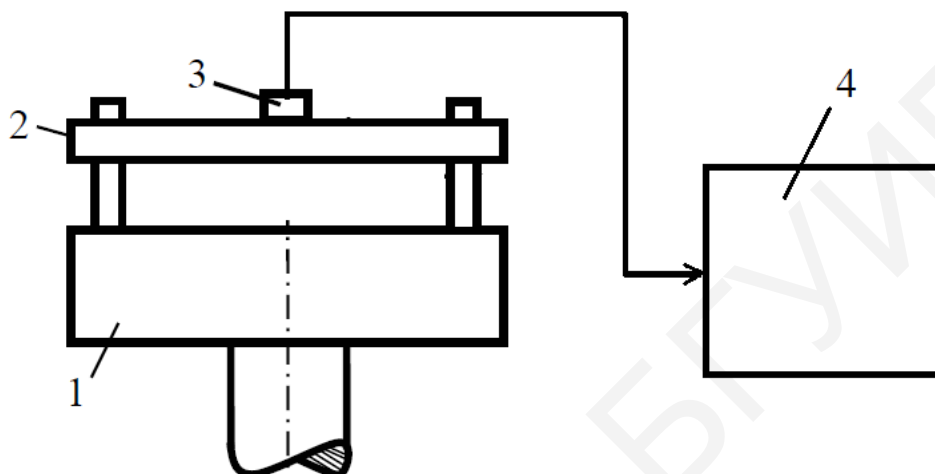
Резонансную частоту определяют по максимальному увеличению амплитуды колебаний платы по сравнению с амплитудой колебаний платформы вибростенда.

Исследование выполняется в следующем порядке:

- 1 На платформу вибростенда установить испытуемый образец платы.
- 2 На образце в центре закрепить вибродатчик.

3 Плавно изменяя частоту колебаний платформы вибростенда в диапазоне частот 40...400 Гц, измерить частоту и амплитуду напряжения вибродатчика по цифровому осциллографу. Частоту и амплитуду напряжения вибродатчика фиксируют через 10 Гц.

4 Построить амплитудно-частотную характеристику печатной платы. Собственную резонансную частоту печатной платы определить по максимальному увеличению амплитуды напряжения вибродатчика.



1 – платформа вибростенда; 2 – плата; 3 – вибродатчик;  
4 – цифровой осциллограф

Рисунок 2.8 – Структурная схема лабораторного стенда

### 2.3 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1 Получить у преподавателя вариант индивидуального задания на выполнение лабораторной работы.

2 В соответствии с вариантом индивидуального задания провести экспериментальное исследование частоты собственных колебаний печатной платы.

3 Провести расчет частоты собственных колебаний исследованных образцов печатных плат с помощью программы «Расчет собственной частоты ПП». Сравнить полученные результаты с экспериментальными.

4 В соответствии с вариантом индивидуального задания с помощью программы «Расчет собственной частоты ПП» провести исследование влияния заданных параметров на частоту собственных колебаний печатной платы.

5 По полученным данным построить графические зависимости.

6 Оформить отчет по лабораторной работе.



## 2.4 ИНДИВИДУАЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ

1 Исследовать влияние длины печатной платы в пределах от 50 до 200 мм с шагом 25 мм при постоянной ширине на частоту собственных колебаний печатной платы при жестком закреплении по двум противоположным длинным сторонам. Исходные данные представлены в таблице 2.3.

2 Исследовать влияние длины печатной платы в пределах от 50 до 200 мм с шагом 25 мм при постоянной ширине на частоту собственных колебаний печатной платы при жестком закреплении по двум противоположным коротким сторонам и свободно опертым длинным сторонам. Исходные данные представлены в таблице 2.3.

3 Исследовать влияние ширины печатной платы в пределах от 50 до 150 мм с шагом 25 мм при постоянной длине на частоту собственных колебаний печатной платы при жестком закреплении по одной короткой стороне и свободно опертым остальным сторонам. Исходные данные представлены в таблице 2.3.

4 Исследовать влияние ширины печатной платы в пределах от 50 до 150 мм с шагом 25 мм при постоянной длине на частоту собственных колебаний печатной платы при жестком закреплении по трем сторонам и свободно опертой длинной стороне. Исходные данные представлены в таблице 2.3.

5 Исследовать влияние модуля упругости материала печатной платы на частоту собственных колебаний печатной платы при жестком закреплении по трем сторонам и свободно опертой короткой стороне. Исходные данные представлены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Варианты индивидуальных заданий

Вариант	1	2	3	4	5
Ширина платы $a$ , мм	30	40	–	–	50
Длина платы $b$ , мм	–	–	200	250	100
Толщина платы $h$ , мм	1,5	2	1,5	2	1
Масса платы с установленными элементами, кг	1	2	1	2	1
Материал платы	СТЭФ	СФ	НФД	МТЭ	–

## 2.5 СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

- 1 Цель лабораторной работы.
- 2 Краткие теоретические сведения.
- 3 Графики полученных зависимостей.
- 4 Выводы по работе.

## 2.6 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

- 1 Приведите классификацию механических воздействий на ЭУ.
- 2 Приведите классификацию вибрационных воздействий на ЭУ.
- 3 Приведите параметры вибрационных воздействий на ЭУ
- 4 Что такое *прочность* к воздействию механических нагрузок?
- 5 Что такое *устойчивость* к воздействию механических нагрузок?
- 6 Каковы способы защиты конструкций ЭУ от вибраций?
- 7 Что представляет собой виброизолятор?
- 8 Какие виды виброизоляторов применяются для виброзащиты блоков ЭУ?
- 9 Изложите методику оценки виброизоляции конструкции ЭУ.
- 10 Каковы способы защиты конструкций ЭУ от ударных нагрузок?
- 11 Каковы способы защиты конструкций ЭУ от линейных нагрузок?
- 12 Каковы способы защиты конструкций ЭУ от акустических шумов?

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Основы конструирования и технологии радиоэлектронных средств. Лабораторный практикум : учеб. пособие / Г. М. Алдонин [и др.]. – Красноярск : ИПЦ СФУ, 2011. – 75 с.
- 2 Шимкович, А. А. Конструирование несущих конструкции РЭС и защита их от дестабилизирующих факторов. В 2 ч. Ч. 1 : Конструирование радиоэлектронных устройств : учеб. пособие / А. А. Шимкович. – Минск : БГУИР, 1999. – 166 с.
- 3 Шимкович, А. А. Проектирование несущих конструкций электронных устройств : учеб. пособие / А. А. Шимкович. – Минск : Адукацыя і выхаванне, 2003. – 308 с.
- 4 Конструирование и технология электронных систем. Курсовое проектирование : учеб-метод. пособие / А. А. Костюкевич [и др.]. – Минск : БГУИР, 2012. – 119 с.
- 5 Каленкович, Н. И. Проектирование РЭС с учетом механических воздействий : учеб. пособие / Н. И. Каленкович. – Минск : БГУИР, 1999. – 60 с.
- 6 Муромцев, Д. Ю. Конструирование узлов и устройств электронных средств : учеб. пособие / Д. Ю. Муромцев, И. В. Тюрин, О. А. Белоусов. – СПб. : Лань, 2019. – 547 с.
- 7 ГОСТ 20.57.406–81. Комплексная система контроля качества. Изделия электронной техники, квантовой электроники и электротехнические. Методы испытаний. – Введ. 1982–01–01. – М. : Изд-во стандартов, 2003.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ УЗЛОВ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

**Цель работы:** исследовать электромагнитную совместимость и помехозащищенность проводных линий, используемых в электронных устройствах.

### 3.1 КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

#### 3.1.1 Электромагнитная совместимость электронных устройств

Под внутренней электромагнитной совместимостью (ЭМС) понимается свойство ЭУ и его частей (ячеек, блоков, шкафов, пультов) функционировать без ухудшения качественных показателей при заданной внутри ЭУ или его частей электромагнитной обстановке. Обеспечение внутренней электромагнитной совместимости становится все более актуальной задачей ввиду непрерывного уменьшения энергии сигналов цифровых устройств ЭУ и роста взаимного влияния элементов из-за увеличения плотности компоновки и сложности устройств. В цепях с аналоговыми сигналами помехи искажают полезный сигнал, и говорят о допустимом уровне искажений. Для цифровых и импульсных схем допустимый уровень помехи определяется порогом срабатывания элемента, на вход которого она поступает, помеха не должна опрокидывать триггер, запускать ждущий мультивибратор и т. д. Во всех случаях оценивают отношение сигнал/помеха.

Источники внешних помех для электронной аппаратуры достаточно разнообразны: радиотехнические связанные и локационные комплексы, рентгеновские установки, мощные вещательные станции, силовое электрооборудование, сетевые провода, трансформаторы и т. п. Электронная аппаратура подвергается действию не только техногенных, но и естественных электромагнитных помех. Естественные помехи обусловлены природными физическими процессами в виде электромагнитных излучений, электростатических помех вследствие электризации элементов конструкций, мощных электромагнитных импульсов. Электромагнитный импульс от близкого разряда молнии способен не только создать мощную помеху в широкой полосе частот, но и разрушить чувствительные цепи электронной аппаратуры.

Среди помех техногенного происхождения обычно выделяют две группы электромагнитных помех: первая – помехи, излучаемые радиопередающими устройствами в рабочей полосе частот и вне этой полосы; вторая – промышленные помехи, сопутствующие работе электротехнических и электронных устройств: электродвигателей, линий электропередач, контактной сети, электросварочных аппаратов, системы зажигания в двигателях внутреннего сгорания, средств вычислительной техники и т. п. Промышленные помехи, как

правило, имеют импульсный характер и могут проявляться в широком диапазоне частот – от десятков герцев до единиц гигагерцев.

Наиболее уязвимыми частями ЭУ для электромагнитных помех являются проводные линии ввиду их протяженности. Помехи могут улавливаться и непосредственно электрорадиоэлементами, входящими в состав устройства.

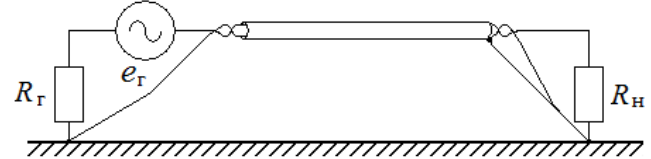

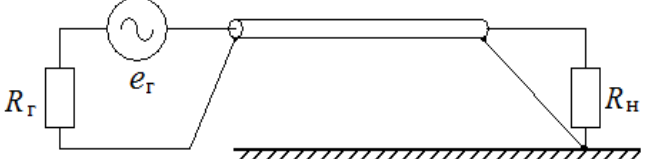
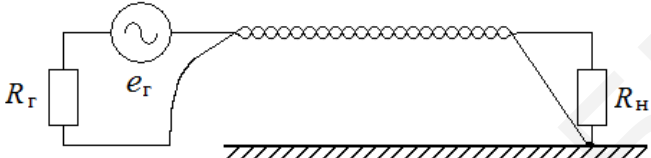
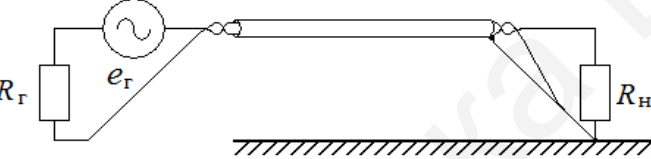
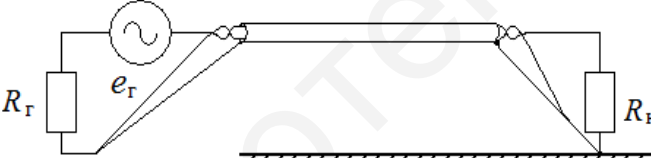
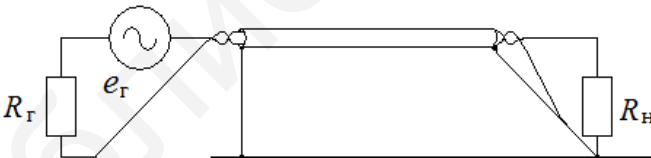
Естественный прием борьбы с магнитными помехами – экранирование проводов линий связи, которое заключается в локализации электромагнитной энергии в определенной части пространства. Поглощая и отражая поток электромагнитной энергии, экран отводит его от защищаемой области. Эффективность экранирования определяется как отношение магнитных (или электрических) составляющих поля в защищаемой области в отсутствии экрана к соответствующим величинам при наличии экрана.

В таблице 3.1 приведены различные схемы экранирования, свивки проводов и соответствующие им примерные уровни подавления помех.

Таблица 3.1 – Схемы соединения экрана и сигнальных проводов

Номер схемы	Схема соединения экрана и сигнальных проводов ( $R_r < 1 \text{ кОм}$ , $R_n < 1 \text{ МОм}$ )	Подавление помехи, дБ
1	2	3
1		0
2		0
3		27 (6...27)
4		0
5		0
6		13

Продолжение таблицы 3.1

1	2	3
7		13
8		28 (6...28)
9		80 (49...80)
10		55 (12...79)
11		70 (65...70)
12		77 (71...77)
13		83

Приведенные данные относятся к частотам примерно от 20 до 100 кГц. Подавление указано в децибелах (взято отношение помехи в незащищенном проводе к уровню помех в данной схеме). Элементы  $e_r$  и  $R_r$  на схемах относятся к источнику сигнала,  $R_n$  – сопротивление нагрузки, подключенной к выходному концу линии.

В схемах 1...8 таблицы 3.1 цепи заземлены с двух сторон. Возвратные токи источников сигнала проходят через шину земли полностью или частично, поэтому площадь контура, пересекаемого магнитным полем, велика. В схемах 9...13 проводник возвратного тока источника сигнала расположен близко к сигнальному проводу, поэтому подавление магнитных наводок здесь принципиально выше. В схемах 1 и 2 таблицы 3.1 магнитного экранирования нет, так

как контур, пересекаемый магнитным потоком, не изменился по сравнению с простым проводником. Заземление экрана с одной стороны обеспечивает экранирование только электрического поля. Заземление экрана с двух сторон (схема 3) дает сравнительно малый эффект, поскольку значительная часть возвратного тока проходит по шине земли. Кроме того, экран образует с шиной земли контур, в котором в свою очередь появляется магнитная наводка. В схемах 4 и 5 таблицы 3.1 магнитного экранирования нет, так как контур, пересекаемый магнитным потоком, не изменился по сравнению с простым проводником. Витая пара, заземленная с обоих концов (схема 6), обеспечивает некоторое подавление магнитной наводки, зависящее от распределения тока между возвратным проводом пары и шиной земли. Добавление экрана дает эффект только при заземлении экрана с обоих концов (схемы 7 и 8).

Среди схем с незаземленным источником сигнала наилучшей является схема 9, в которой площадь контура минимальна благодаря соосности экрана и центрального сигнального провода. Несколько хуже подавление в витой паре (схема 10) из-за влияния электрических полей и неправильной геометрии, что видно из сравнения со схемой 11. Схема 13 уступает другим, так как в ней магнитные наводки в контуре экран – земля могут проникать в сигнальную цепь. Для улучшения экранирования на низких частотах сопротивление экранирующей оплетки должно быть как можно меньше, при этом наилучшей схемой экранирования является схема 12, в которой сопротивление экрана играет меньшую роль. Экраны во всех случаях следует изолировать, чтобы не допустить их случайного замыкания. Дополнительное заземление или частичное замыкание оболочки может ухудшить экранирующий эффект, так как при этом часть обратного тока будет протекать, минуя экран. Для защиты линий со слабыми сигналами в высокочастотном магнитном поле используются кабели парной скрутки с двойной экранировкой. Внешний экран заземляется у концов кабеля (при длине кабеля не более 0,2 длины волны), а внутренний – у источника сигнала.

На рисунке 3.1 показан механизм воздействия магнитного поля на витую пару. В результате такого воздействия в соседних витках наводятся равные, но противоположного направления токи, которые компенсируют друг друга.

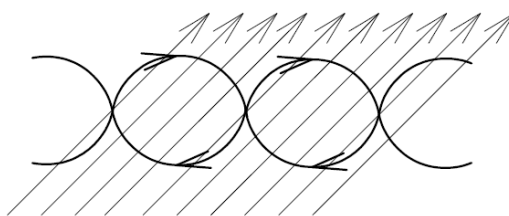


Рисунок 3.1 – Механизм воздействия магнитного поля на витую пару

Приведенные в таблице 3.1 схемы экранирования позволяют существенно снизить не только магнитную, но и электрическую «наводку». Однако здесь требуется правильно выбирать место подключения экрана: при присоединении

экрана к точке схемы, в которой не обеспечивается постоянный нулевой потенциал, помеха может попадать в сигнальные цепи через большую емкость «сигнальный провод – экран» интенсивнее, чем в случае отсутствия экрана.

Частотные возможности той или иной схемы экранирования зависят от конструктивных параметров линии передачи и влияния на нее источника сигнала и нагрузки. Экранированные кабели парной скрутки обеспечивают хорошую защиту от электромагнитных помех вплоть до частоты 100 кГц и удовлетворительно функционируют до 10 МГц. Сигналы прямого и обратного тока распространяются по внутренним проводникам, а токи помех текут только в экране. Предельная рабочая частота витой пары проводников определяется равномерностью и величиной шага скрутки. С ростом частоты сигнала ухудшается помехозащищенность и увеличиваются отражения от неоднородностей линии. Коаксиальные кабели обеспечивают удовлетворительную помехозащищенность, вплоть до 100 МГц. На частотах выше 1 МГц благодаря скин-эффекту коаксиальный кабель начинает действовать как триаксиальный: обратные токи сигнала текут по внутренней стороне экрана, а помех – по внешней. На более низких частотах для защиты слабых сигналов применяются специальные триаксиальные кабели.

### 3.1.2 Эффективность экранов из тонколистовых металлов

Экран представляет собой металлическую перегородку, разделяющую две области пространства. Он предназначен для регулирования распространения электрических и магнитных полей от одной из этих областей в другую.

Характеристики поля определяются источником, средой, окружающей его, и расстоянием от источника до точки наблюдения. Вблизи источника свойства поля определяются в основном характеристиками источника, вдали – зависят от среды, в которой распространяется поле. Пространство, окружающее источник, можно разделить на две области. Рядом с источником расположено ближнее, или индуктивное, поле, на расстоянии более  $\lambda/2\pi$  – дальнее поле, или поле излучения (рисунок 3.2).

Отношение напряженности электрического поля  $E$  к напряженности магнитного поля  $H$  представляет собой полное волновое сопротивление. В дальнем поле это отношение равно полному характеристическому сопротивлению среды (для вакуума  $E/H = Z_0 = 377 \text{ Ом}$ ).

В ближнем поле величина этого отношения зависит от параметров источника и расстояния от него до рассматриваемой точки. Если в источнике генерируется большой ток и низкое напряжение ( $E/H < 377 \text{ Ом}$ ), ближнее поле является в основном магнитным, если малый ток и большое напряжение ( $E/H > 377 \text{ Ом}$ ), то в ближнем поле преобладает электрическая составляющая.

На частоте до 1 МГц почти все наводки внутри электронного оборудования определяются условиями ближнего поля, поскольку ближнее поле на этих частотах простирается на расстояние до 45 м и более. На частоте 30 кГц поле является ближним на расстоянии 1,5 км от источника. Отсюда следует, что

проблему помех внутри любого оборудования нужно рассматривать как проблему ближнего поля, если только не является очевидным, что они относятся к проблемам дальнего поля.

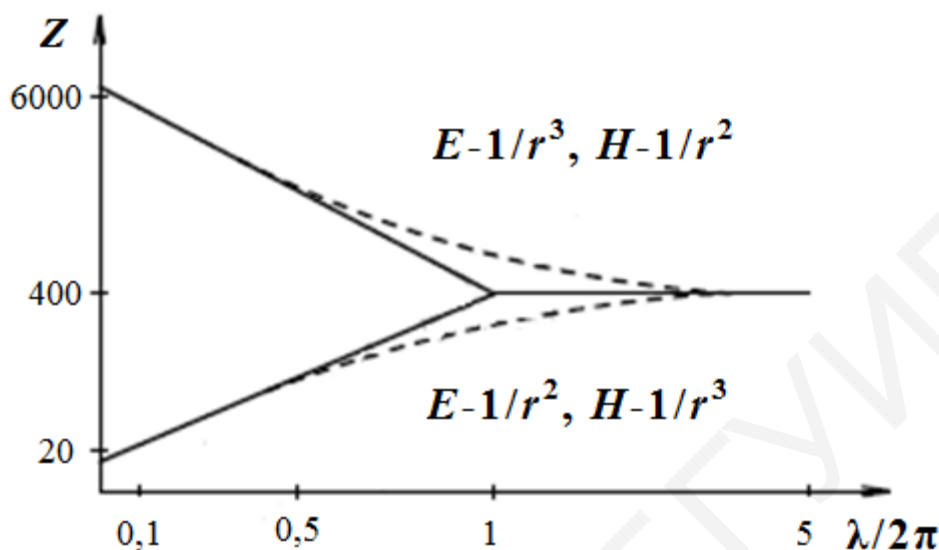


Рисунок 3.2 – Зависимость полного волнового сопротивления от расстояния до источника для случая, когда поле является электрическим или магнитным

В ближнем поле электрическое и магнитное поле следует рассматривать отдельно, поскольку отношение их напряженностей не является постоянным.

Эффективность экранирования можно определить как создаваемое экраном уменьшение магнитного и (или) электрического поля. Обычно коэффициенты экранирования выражаются в децибелах, что позволяет суммировать их для различного рода эффектов или экранов, ослабляющих поле для получения общего коэффициента экранирования:

$$K_э = 20 \lg(E_0 / E_1) \text{ [дБ]},$$

$$K_э = 20 \lg(H_0 / H_1) \text{ [дБ]},$$

где  $E_0$  ( $H_0$ ) – напряженность падающей волны;

$E_1$  ( $H_1$ ) – напряженность прошедшей волны непосредственно на выходе экрана.

Эффективность экранирования зависит от следующих факторов: частоты, конфигурации экрана, положения внутри экрана точки, в которой производится измерение, вида ослабляемого поля, направления его распространения и поляризации.

Общая эффективность экранирования плоским листом проводящего материала равна сумме потерь на отражение  $K_{отр}$ , потерь на поглощение  $K_{пог}$  и



корректирующего коэффициента  $K_{\text{мн.отр}}$ , учитывающего многократное отражение.

$$K_{\Sigma} = K_{\text{пог}} + K_{\text{отр}} + K_{\text{мн.отр}}. \quad (3.1)$$

Все члены уравнения должны быть выражены в децибелах. При потерях на поглощение  $K_{\text{пог}}$  свыше 10 дБ  $K_{\text{мн.отр}}$  можно пренебречь.

$$K_{\text{пог}} = 0,13t\sqrt{f\mu\sigma_{\text{отн}}}, \quad (3.2)$$

$$K_{\text{мн.отр}} = 20 \lg(1 - e^{-2t/\delta}),$$

где  $\delta$  – глубина скин-слоя  $\delta = \left(\frac{0,66}{\sqrt{f\mu\sigma_{\text{отн}}}}\right)$ ;

$\mu$  – относительная магнитная проницаемость;

$\sigma_{\text{отн}}$  – относительная электрическая удельная проводимость.

Глубина скин-слоя – это расстояние, которое должна пройти волна до того, как будет ослаблена в  $e$  раз, или до 37 % своего первоначального значения.

Потери на отражение определяются отношением полного сопротивления среды  $Z_{\omega}$  к сопротивлению экрана  $Z_{\Sigma}$  и не зависят от его толщины:

$$K_{\text{отр}} = 20 \lg \frac{|Z_{\omega}|}{4|Z_{\Sigma}|}. \quad (3.3)$$

В случае плоской волны (в дальнем поле) волновое сопротивление  $Z_{\omega}$  равно характеристическому сопротивлению вакуума (377 Ом).

Модуль  $Z_{\Sigma}$  можно определить по формуле

$$|Z_{\Sigma}| = 3,68 \cdot 10^{-7} \sqrt{\frac{\mu f}{\sigma_{\text{отн}}}}. \quad (3.4)$$

Подставим выражение для  $|Z_{\Sigma}|$  в формулу (3.3), получим

$$K_{\text{отр}} = 168 - 10 \lg \frac{\mu f}{\sigma_{\text{отн}}}. \quad (3.5)$$

В ближнем поле отношение напряженностей электрического и магнитного полей уже не зависит от характеристического сопротивления среды, а определяется в основном параметрами источника (антенны). Волновое сопротивление, создаваемое точечным источником электрического поля, можно аппроксимировать при условии  $r \ll \lambda/2\pi$  следующим уравнением:

$$|Z_{\omega}|_{\text{эл}} = \frac{1}{2\pi f \epsilon_a r}, \quad (3.6)$$

где  $r$  – расстояние от источника до экрана;

$\epsilon_a$  – диэлектрическая проницаемость.

Потери на отражение можно определить, подставив  $Z_{\omega}$  в уравнение (3.3):

$$(K_{\text{отр}})_{\text{эл}} = 20 \lg \frac{1}{8\pi f \epsilon_a r} = 20 \lg \frac{4 \cdot 5 \cdot 10^9}{fr |Z_3|}. \quad (3.7)$$

Волновое сопротивление, обусловленное наличием точечного источника магнитного поля, можно аппроксимировать в предположении, что  $r \ll \lambda/2\pi$ , следующим уравнением:

$$|Z_{\omega}|_{\text{маг}} = 2 \pi f \epsilon_a r. \quad (3.8)$$

Потери на отражение можно определить, подставив  $|Z_{\omega}|_{\text{маг}}$  в уравнение (3.3):

$$(K_{\text{отр}})_{\text{маг}} = 20 \lg \frac{2\pi f \epsilon_a r}{4|Z_3|} = 20 \lg \frac{1.97 \cdot 10^{-6} fr}{|Z_3|}. \quad (3.9)$$

В таблице 3.2 приведены характерные значения относительной магнитной проницаемости  $\mu$  и относительной удельной проводимости  $\sigma_{\text{отн}}$ .

Таблица 3.2 – Относительная удельная проводимость и относительная магнитная проницаемость различных материалов

Материал	Относительная удельная проводимость $\mu$	Относительная магнитная проницаемость $\sigma_{\text{отн}}$
Серебро	1,05	1
Медь отожженная	1,00	1
Золото	0,70	1
Алюминий	0,61	1
Латунь	0,26	1
Никель	0,20	1
Бронза	0,18	1
Олово	0,15	1
Сталь (марка SAE1045)	0,10	1000
Свинец	0,08	1
Монель	0,04	1
Нержавеющая сталь (марка 430)	0,02	500

**Пример расчета:** Определить эффективность экранирования экрана из латуни толщиной 0,7 мм, отстоящего на 25 см от источника электрического поля частотой 1 МГц.

**Решение:** Найдем модуль  $Z_3$  по формуле (3.4):

$$|Z_3| = 3,68 \cdot 10^{-7} \sqrt{\frac{\mu f}{\sigma_{\text{отн}}}} = 3,68 \cdot 10^{-7} \sqrt{\frac{1 \cdot 10^6}{0,26}} = 7,21 \cdot 10^{-4} [\text{Ом}].$$

Сравним длину волны с расстоянием до источника  $\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{10^6} = 3 \cdot 10^2$  [м], т. е. в данном случае происходит взаимодействие в ближнем поле, тогда потери на отражения рассчитываются по формуле (3.7):

$$(K_{\text{отр}})_{\text{эл}} = 20 \lg \frac{4,5 \cdot 10^9}{f r |Z_3|} = 20 \lg \frac{4,5 \cdot 10^9}{10^6 \cdot 0,25 \cdot 7,21 \cdot 10^{-5}} = 168.$$

Определим коэффициент потерь на поглощение, используя формулу (3.2):

$$K_{\text{пог}} = 0,131 t \sqrt{f \mu \cdot \sigma_{\text{отн}}} = 0,131 \cdot 0,7 \sqrt{10^6 \cdot 1 \cdot 0,26} = 47.$$

Потери на поглощение больше 10 дБ, следовательно, эффектом многократного отражения можно пренебречь. Окончательно получим

$$K_э = K_{\text{пог}} + K_{\text{отр}} = 168 + 47 = 215 \text{ [дБ]}.$$

Потери на поглощение связаны с тем, что при прохождении электромагнитной волны в среде индуцируются токи, вызывающие омические потери, и, следовательно, нагрев вещества.

С точки зрения практики  $K_{\text{мн.орг}}$  можно не учитывать при определении экранирования электрических полей и плоских волн.

Для повышения эффективности экранирования используют многослойные экраны.

Рекомендации по применению многослойных экранов:

1 Применяются для обеспечения линейного режима работы магнитных экранов.

2 Внутренние слои следует выполнять из магнитных материалов, наилучшие сочетания дают медь – сталь, медь – сталь – медь, так как эффективность экранирования увеличивается за счет высокой отражающей способности меди и поглощающей стали.

3 Эффективность экранирования увеличивается за счет использования воздушных зазоров и диэлектрических прокладок только в том случае, если их толщина превышает толщину металлических слоев.

Многослойные экраны сложны и громоздки и применяются, когда исчерпаны другие возможности.

На практике большинство экранов не являются сплошными. Они должны иметь крышки для доступа к схеме, дверцы, отверстия для монтажа проводов, переключателей и измерительных приборов, вентиляции, а также механические соединения и швы. Все это значительно снижает эффективность экрана.

## 3.2 ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА

При выполнении лабораторной работы используются лабораторный стенд, исследуемые образцы проводных электрических линий, измерительные приборы: осциллограф С1-55, милливольтметр ВЗ-56, генератор помех Г4-102, генератор сигналов ГЗ-110.

Лабораторный стенд выполнен в металлическом корпусе, на передней панели которого расположены гнезда для подключения измерительных приборов (осциллографа или милливольтметра), а также органы управления. Подключение измерительных приборов к стенду показано на рисунке 3.3. Схема лабораторного стенда представлена на рисунке 3.4.

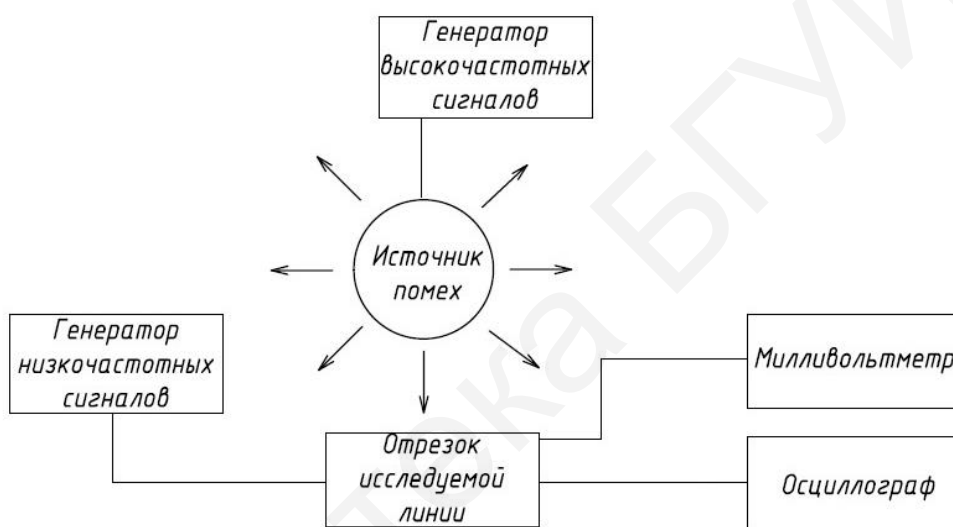


Рисунок 3.3 – Схема подключения измерительных приборов к лабораторному стенду

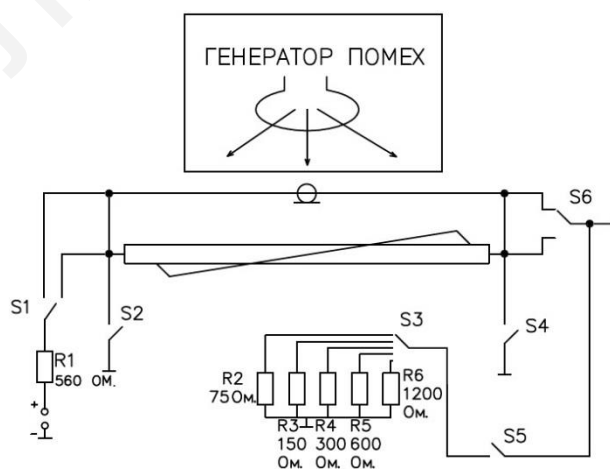


Рисунок 3.4 – Лабораторный стенд

Переключатели S1, S6 служат для выбора исследуемого участка линии (между витой парой и коаксиальным кабелем), переключатели S2, S4 – для заземления исследуемого участка линии, переключатель S5 – для включения нагрузки в цепь к выходу, переключатель S3 – для выбора номинальной мощности нагрузки.

Напряжение, наведенное в проводной линии генератором помехи, регистрируется измерительными приборами.

### 3.3 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1 Изучить теорию и практические методы, используемые для обеспечения электромагнитной совместимости ЭУ.

2 Изучить принцип работы лабораторного стенда и приборов.

3 Включить приборы и источник питания стенда.

4 Подключить выходные гнезда к входу осциллографа.

5 Присоединить эквивалент выходного сопротивления генератора к входу отрезка исследуемой линии тумблером, расположенным на передней панели лабораторного стенда ( $R_n = 600 \text{ Ом}$ ).

6 Настроить осциллограф таким образом, чтобы на его экране уверенно наблюдалось напряжение помехи примерно на 1,5 мВ (при отсутствии специального генератора помехи наблюдается «наводка» от любого стороннего источника, например, от мощной местной радиовещательной станции, работающего силового оборудования и т. п.).

7 Измерить уровень помех  $U_n$  и уровень помех с выключенным источником помех  $U_{п.з}$ . Все измеренные значения наведенного напряжения  $U_n$  и  $U_{п.з}$  перевести в децибелы:

$$K_{\text{осл.пом}} = 201g \frac{U_n}{U_{п.з}} \text{ [дБ]}.$$

Результаты измерений занести в таблицу 3.3.

8 Оценить  $K_{\text{осл.пом}}$  в зависимости от расстояния до источника помех. Результаты измерений занести в таблицу 3.4.

9 Рассчитать и экспериментально исследовать эффективность экранирования с использованием экрана из алюминия толщиной 0,3 мм, отстоящего на 5...20 см (с шагом 3 см) от источника электрического поля частотой 100 кГц и 1 МГц.

### 3.4 СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1 Цель работы.

2 Краткие теоретические сведения.

3 Схема проведения эксперимента.

4 Экспериментальные результаты: расчеты, таблицы с результатами, графики.

5 Выводы по работе.

Таблица 3.3 – Результаты измерений

Вид линии	$U_{\text{п}}$	$U_{\text{п.з}}$	$K_{\text{осл.пом}}$
Коаксиальный кабель без заземления (схема №1, таблица 3.1)			
Коаксиальный кабель заземленный с одной стороны (схема №2, таблица 3.1)			
Коаксиальный кабель заземленный с двух сторон (схема №3, таблица 3.1)			
Витая пара, без заземления (схема №4, таблица 3.1)			
Витая пара, заземленная с одной стороны (схема №5, таблица 3.1)			
Витая пара, заземленная с двух сторон (схема №6, таблица 3.1)			

Таблица 3.4 – Результаты исследования величины  $K_{\text{осл.пом}}$

Вид линии	Величина $K_{\text{осл.пом}}$ при расстоянии			
	3 см	5 см	10 см	15 см
Коаксиальный кабель				
Витая пара				
Коаксиальный кабель без заземления				
Витая пара без заземления				

### 3.5 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1 Чем обусловлена на современном этапе развития науки и техники актуальность задачи обеспечения внутренней ЭМС?

2 Чем определяется для цифровых и импульсных схем допустимый уровень помехи?

3 Какими конструкторско-технологическими методами можно уменьшить электромагнитные помехи?

4 Какие существуют источники внешних помех для ЭУ?

5 Что и каким образом оказывает влияние на утечки магнитного поля?

6 Объясните механизм воздействия магнитного поля на витую пару.

7 Опишите методы обеспечения ЭМС в электронных устройствах.

8 Чем определяется общая эффективность экранирования плоским листом проводящего материала?

9 Приведите примеры наиболее эффективных схем подключения экрана и сигнальных проводов.

10 Какие материалы применяются для экранирования узлов ЭУ?

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Князев, А. Д. Конструирование радиоэлектронной и электронно-вычислительной аппаратуры с учетом электромагнитной совместимости / А. Д. Князев, Л. Н. Кечнев, Б. В. Петров. – М. : Радио и связь, 1989. – 222 с.

2 Апович, А. Ф. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств : учеб. пособие / А. Ф. Апович. – Минск : Бестпринт, 2003. – 308 с.

3 Апович, А. Ф. Проектирование радиотехнических систем : учеб. пособие / А. Ф. Апович. – Минск : Выш. шк. 1988. – 221 с.

4 Баканов, Г. Ф. Основы конструирования и технологии радиоэлектронных средств / Г. Ф. Баканов, С. С. Соколов, В. Ю. Суходольский ; под ред. И. Г. Мироненко. – М. : Изд. центр «Академия», 2007. – 368 с.

5 ГОСТ 23611–79. Совместимость радиоэлектронных средств электромагнитная. Термины и определения. – Введ. 1980–07–01. – М. : Стандартинформ, 2005.

6 Основы конструирования и технологии радиоэлектронных средств». Лабораторный практикум : учеб. пособие / Г. М. Алдонин [и др.]. – Красноярск : ИПЦ СФУ, 2011. – 75 с.

7 Алдонин, Г. М. Основы конструирования и технологии производства радиоэлектронных средств. Лабораторный практикум [Электронный ресурс] / Г. М. Алдонин, С. П. Желудько. – 2012. – Режим доступа : <http://elib.sfu-kras.ru/handle/2311/60662>.

8 Муромцев, Д. Ю. Конструирование узлов и устройств электронных средств : учеб. пособие / Д. Ю. Муромцев, И. В. Тюрин, О. А. Белоусов. – СПб. : Лань, 2019. – 547 с.

9 Кереселидзе, Е. В. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств : учеб.-метод. пособие / Е. В. Кереселидзе. – Минск : БГУИР, 2005. – 102 с.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

**Цель работы:** изучить последовательность процесса разработки конструкции печатных плат (ПП), провести расчет элементов печатного рисунка ПП, исследовать основные электрические характеристики конструктивных элементов ПП.

### 4.1 КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Для межконтактных соединений в конструкциях электронных устройств на первом иерархическом уровне (ячеистый монтаж) применяется в основном печатный монтаж (с помощью печатных плат). Применение печатных плат создает предпосылки для механизации и автоматизации процессов сборки ЭУ, повышает их надежность, обеспечивает повторяемость параметров монтажа (емкость, индуктивность) от образца к образцу.

Печатные платы – это элементы конструкции, которые состоят из плоских проводников, контактных площадок и металлизированных отверстий, размещенных на диэлектрическом основании и обеспечивающих соединение элементов электрической цепи. Они получили широкое распространение в производстве ЭУ.

По конструктивному исполнению различают: односторонние (ОПП), двусторонние (ДПП), многослойные (МПП) и гибкие (ГПП) печатные платы.

ГОСТ 23752–79 определяет требования к конструкции и внешнему виду ПП, к устойчивости при климатических и механических воздействиях и т. д.

Основные технические требования к печатным платам:

1 Габаритные размеры печатной платы не превышают установленных значений для следующих типов: особо малогабаритных – 60×90 мм; малогабаритных – 120×180 мм; крупногабаритных – 240×360 мм. Толщина печатной платы выбирается из следующего ряда значений: 0,8; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0 мм. Допустимые отклонения по толщине не должны превышать: при толщине до 1 мм – ±0,15 мм; до 2 мм – ±0,20 мм; до 3 мм – ±0,30 мм.

2 Плотность монтажа определяется шириной проводников и расстоянием между ними. В соответствии с ГОСТ 23751–86 для печатных плат установлено пять классов точности монтажа.

3 Трассировку рисунка схемы проводят по координатной сетке с шагом 2,5, 1,25, 0,625 мм, а также 0,5 мм по ГОСТ 10317–79. Минимальные диаметры отверстий, располагаемых в узлах координатной сетки, зависят от диаметра вывода навесного элемента, наличия металлизации и толщины платы.

4 Плотность тока в печатных проводниках наружных слоев плат не должна превышать 20 А/мм<sup>2</sup>.



5 Сопротивление изоляции зависит от материала диэлектрического основания и характера электрических цепей, для стеклотекстолита оно должно быть не менее  $10^4$  МОм.

6 Плотность сцепления печатных проводников с основанием – не менее 15 МПа.

7 Допустимый уровень рабочего напряжения зависит от расстояния между проводниками: для 2...4-го классов  $U_{\text{раб}}$  – до 50 В, для 1-го класса  $U_{\text{раб}}$  – до 100 В.

8 Контактные площадки должны смачиваться припоем за 3...5 с и выдерживать не менее трех перепаек.

В соответствии с ГОСТ 10317–79 рекомендуется использовать платы прямоугольной формы, размеры каждой стороны печатной платы должны быть кратными 2,5, 5 или 10 при длине соответственно до 100, до 350 и свыше 350 мм. Не рекомендуется превышение максимального размера любой из сторон свыше 470 мм, соотношение сторон – не более 3:1. Данные ограничения обусловлены в основном возможностями технологического оборудования по изготовлению печатных плат. При необходимости возможно отклонение габаритов, соотношения сторон и формы ПП от рекомендуемых.

ГОСТ 23751–86 устанавливает основные конструктивные параметры ПП (размеры печатных проводников, зазоров, контактных площадок, отверстий и т. п.), электрические параметры и т. д.

При выборе толщины печатных плат учитывают метод изготовления и предъявляемые к ним механические требования.

При проектировании ПП применяют следующие способы конструирования: ручной, полуавтоматический, автоматический. Автоматический метод конструирования ПП с использованием специализированных пакетов автоматизированного проектирования в настоящее время является основным.

### **Последовательность разработки и расчета конструкции ПП:**

- 1 Анализ ТЗ и выбор группы жесткости.
- 2 Выбор типа ПП.
- 3 Выбор класса точности ПП.
- 4 Выбор размеров и конфигурации ПП. Компонентный расчет.
- 5 Выбор материалов ПП.
- 6 Расчет элементов печатного рисунка.
- 7 Выбор и размещение элементов печатного рисунка.
- 8 Трассировка печатных проводников.
- 9 Маркировка и контроль.
- 10 Оформление КД.

### 4.1.1 Анализ ТЗ и выбор группы жесткости

На данном этапе определяют условия эксплуатации, хранения и транспортировки РЭС, условия сборки узлов, требования по ремонтпригодности, технологичности, стоимости и т. д.

Затем определяют группу жесткости по климатическим факторам. В соответствии с ГОСТ 23752–79 выделяют четыре группы жесткости (таблица 4.1).

Таблица 4.1 – Группы жесткости печатных плат

Воздействующий фактор	Группа жесткости			
	1	2	3	4
Температура окружающей среды, °С	–25...+55	–40...+85	–60...+100	–60...+120
Относительная влажность, %	75	93	98	98
Давление, кПа (мм рт. ст.)	101(760)	53,6(400)	53,6(400)	0,67(5)

### 4.1.2 Выбор типа ПП

В зависимости от сложности схемы, реализуемой на ПП, а также возможностей технологического оборудования и экономических критериев выбирают тип ПП: ОПП, ДПП или МПП. При этом следует учитывать, что трудоемкость изготовления ПП приблизительно оценивается пропорцией ОПП:ДПП:МПП = 1:4:20. В современных РЭС наиболее часто используют ДПП и МПП.

### 4.1.3 Выбор класса точности ПП

Класс точности определяет наименьшие минимальные значения основных размеров конструктивных элементов (ширина проводника, расстояния между центрами двух проводников (контактных площадок), ширина гарантийного пояска металлизации контактной площадки и др.). ГОСТ 23751–86 определяет пять классов точности. Минимальные размеры конструктивных элементов уменьшаются со 2-го по 5-й классы точности (таблица 4.2).

При использовании технологии поверхностного монтажа, а также интегральных микросхем (ИМС) высокой степени интеграции необходимо разрабатывать ПП 3-го и 4-го классов точности.

Таблица 4.2 – Классы точности печатных плат

Параметр	Класс точности			
	2	3	4	5
Минимальная ширина проводника, $t$ , мм	0,45	0,25	0,15	0,10
Минимальное расстояние между центрами проводников, $S$ , мм	0,45	0,25	0,15	0,10
Минимальная ширина гарантийного пояска, $B$ , мм	0,20	0,10	0,05	0,025
Отношение диаметра минимального отверстия к толщине ПП, $\gamma$	1:2,5	1:3	1:4	1:5

#### 4.1.4 Выбор размеров и конфигурации ПП

Предварительный выбор размеров и конфигурации ПП выполняется на стадии компоновочного расчета.

Размеры и конфигурация ПП определяются конструктивными параметрами блоков ЭА более высокой иерархии. При выборе размеров ПП необходимо придерживаться следующего принципа: максимальное количество связей выполнять с помощью печатного монтажа и даже внутри корпусов ИМС и т. п.

Быстродействие, установочные размеры, эксплуатационные характеристики, технологические особенности, автоматизация и т. п. также влияют на выбор размеров и конфигурации ПП. Необходимо выбирать размеры и конфигурацию ПП по ГОСТ 10317–79.

Толщину ПП определяют в зависимости от механических нагрузок на нее и диаметра отверстий.

Обычно выполняется правило

$$H > (2,5 \dots 5) \cdot d_0, \quad (4.1)$$

где  $H$  – толщина ПП;

$d_0$  – минимальный диаметр отверстий.

Для ОПП и ДПП толщина определяется по формуле

$$H = H_M + n \cdot h_\phi, \quad (4.2)$$

где  $H_M$  – толщина материала основания;

$n$  – количество слоев ПП;

$h_\phi$  – толщина фольги.

Для МПП

$$H = \sum_{i=1}^n H_c + (0,6 \dots 0,9) \sum_{j=1}^{n-1} H_{пр} + 2h_{п}, \quad (4.3)$$

где  $H_c$ ,  $H_{пр}$  – номинальная толщина материала слоя и прокладки соответственно;

$h_{п}$  – толщина нанесенных на плату покрытий.

#### 4.1.5 Выбор материалов ПП

Физико-механические свойства материалов должны удовлетворять установленным техническими условиями (ТУ) и обеспечивать качественное изготовление ПП в соответствии с типовыми технологическими процессами (ТП). Для изготовления плат применяют слоистые пластики, в том числе фольгированные диэлектрики, плакированные электролитической медной фольгой тол-

щиной 5, 20, 35, 50, 70 и 105 мкм с чистотой меди не менее 99,5 %, шероховатостью поверхности не менее 0,4...0,5 мкм, которые поставляются в виде листов размером 500×700 мм и толщиной 0,06...3 мм.

В качестве основы в слоистых пластиках используют стеклотекстолиты – спрессованные слои стеклоткани, пропитанные эпоксифенольной смолой, и другие материалы (таблица 4.3). Они отличаются широким диапазоном рабочих температур, низким (0,2...0,8 %) водопоглощением, высокими значениями объемного и поверхностного сопротивлений, стойкостью к короблению. Смолы определяют практически все электрические и механические характеристики материала (предел прочности, влагопоглощение, сопротивление изоляции, электрическая прочность, диэлектрическая проницаемость, потери и т. п.). Выбор материала ПП также зависит от технологии ее изготовления.

Таблица 4.3 – Основные материалы для изготовления печатных плат

Материал	Марка	Толщина		Область применения
		фольги, мкм	материала, мм	
Стеклотекстолит				
Травящийся	ФТС-1(2)	18; 35	0,08...0,5	МПП, ДПП
С адгезионным слоем	СТЭК	–	1,0...1,5	ДПП
Фольгированный диэлектрик (ламинаты и препреги)				
Ламинат	GFN PND 39	18; 35	0,8...3	ДПП
Ламинат	СЕМ-1, СЕМ-3	18; 35	0,8...3	ДПП
Ламинат	FR-1, FR-2	18; 35	0,8...3	ДПП
Ламинат	FR-4 LamPlex	18; 35	0,8...3	ДПП
Ламинат	FR-5	18; 35	0,8...3	ДПП
Тонкий	ФДТ-1	50	0,5	МПП
Для МПП	ФДМ-1(2)	35	0,2...0,35	МПП
Стеклоткань прокладочная	СП-1-0,0025	–	0,0025	МПП
	СП-2-0,1	–	0,1	МПП

Далее приведены характеристики некоторых диэлектриков.

Общие характеристики ламинатов FR4:

- класс огнестойкости – 94V-0;
- весь материал поставляется с ультрафиолетовой блокировкой;
- возможная толщина фольги – от 18 до 105 мкм;
- стандартный размер листа – 1041×1245 мм (по заказу могут поставляться листы других размеров).

СЕМ-1 – ламинат на основе композиции целлюлозной бумаги и стеклоткани с эпоксидной смолой. Применяется при производстве плат, в которых не требуются высокие свойства стеклотекстолита FR4.

КВ 2150 GC (FR-2) – фольгированный гетинакс (основа из целлюлозной бумаги, пропитанной фенольной смолой), широко применяется при изготовлении печатных плат для бытовой электроники, аудио- и видеотехники, в автомо-

билестроении. Данному материалу характерны все свойства FR2, повышенные показатели жаро- и влагоустойчивости. Не содержит галогенов и сурьмы.

Для защиты контактных площадок и концевых ламелей ПП от внешних воздействий в настоящее время используют различные конструктивные покрытия (таблица 4.4).

Таблица 4.4 – Толщина различных финишных покрытий

Тип покрытия	Толщина, мкм
ПОС-61 оплавлением (маска по ПОС)	10–15 (допускаются наплывы)
ПОС-63 методом HAL (Hot Air Leveling – выравнивание горячим воздухом) (маска по меди)	12–18 (не допускаются наплывы)
Hard Gold	2,5–5 (Ni) / 0,025–0,4 (Au)
Immersion Gold	2,5–5 (Ni) / 0,076–0,25 (Au)
Gold Fingers	2,5–5 (Ni) / 0,127–0,76 (Au)
Ni	2,54–7,6

В технических требованиях к печатной плате указываются обозначения только конструктивных покрытий, например Хим.М.М24 О-С(61) 10–15 опл. При использовании в качестве покрытия драгметаллов необходимо указывать массу покрытия.

Сверху на ПП для защиты проводников от замыканий при пайке наносят слой диэлектрической защиты (лак, эмаль, пленочные резисты и т. п.) (таблица 4.5).

Таблица 4.5 – Защитные паяльные маски

Тип покрытия, производитель	Характеристики, область применения
TAMURA FINEDEL DSR-2200TT 19G (Япония)	Жидкая двухкомпонентная фоточувствительная защитная паяльная маска зеленого цвета. Устойчива к растворителям и очистителям
FSR 8000-8G UNION SOLTEK GROUP (Тайвань)	Маска обладает высокими адгезионными свойствами, низким запахом, технологична, устойчива к процессам электролитической металлизации (никелирование, золочение), горячего лужения (HAL). Покрытие глянцевое
FSR 8000-11G UNION SOLTEK GROUP (Тайвань)	Маски данной серии образуют матовое покрытие с ярко выраженными антибликовыми свойствами. Маска устойчива к процессам электролитической металлизации (никелирование, золочение), горячего лужения (HAL)
FSR 8000-10W UNION SOLTEK GROUP (Тайвань)	Маска белого цвета. Пригодна как в качестве защитного паяльного резиста, так и для нанесения маркировки при производстве единичных и мелкосерийных партий печатных плат. Устойчива к процессам никелирования, золочения, горячего лужения (HAL)
Полиуретановый лак URETHAN clear (аналог лака УР-231)	Специально разработан для печатных плат, электронных компонентов и электротехники. Используется как прочное защитное покрытие. Лак однокомпонентный, полностью готовый к употреблению

#### 4.1.6 Расчет элементов печатного рисунка

Расчет печатного монтажа состоит из трех этапов: расчет по постоянному и переменному току и конструктивно-технологический расчет. Далее приводится рекомендуемый порядок расчета.

1 Исходя из технологических возможностей производства выбрать метод изготовления и класс точности ПП.

2 Определить минимальную ширину печатного проводника  $b_{\min}$ , мм, по постоянному току для цепей питания и заземления:

$$b_{\min} = \frac{I_{\max}}{j_m \cdot t}, \quad (4.4)$$

где  $I_{\max}$  – максимальный постоянный ток через проводник (определяется из анализа электрической схемы), А;

$j_m$  – допустимая плотность тока (выбирается в зависимости от метода изготовления ПП) (таблица 4.6);

$t$  – толщина проводника, мм.

Таблица 4.6 – Допустимая плотность тока в зависимости от метода изготовления

Метод изготовления	Толщина фольги, $t$ , мкм	Допустимая плотность тока $j_d$ , А/мм <sup>2</sup>	Удельное сопротивление, $\rho$ , Ом·мм <sup>2</sup> /м
Химический: внутренние слои МПП	20, 35, 50	15	0,050
наружные слои ОПП, ДПП	20, 35, 50	20	–
Комбинированный	18	75	0,0175
	35	48	
	50	38	
Электрохимический	–	25	0,050

3 Определить минимальную ширину проводника,  $b_{\min 2}$ , мм, исходя из допустимого падения напряжения на нем:

$$b_{\min 2} = \frac{I_{\max} \cdot \rho \cdot l}{U_{\text{доп}} \cdot t}, \quad (4.5)$$

где  $\rho$  – удельное объемное сопротивление материала;

$l$  – максимальная длина проводника, м;

$U_{\text{доп}}$  – допустимое падение напряжения (определяется из анализа электрической схемы), В.

Допустимое падение напряжения на проводниках не должно превышать 5 % от питающего напряжения микросхем и быть не более показателя запаса помехоустойчивости микросхем.

4 Определить номинальное значение диаметров монтажных отверстий  $d$ :

$$d = d_{\text{Э}} + |\Delta d_{\text{н.о}}| + r, \quad (4.6)$$

где  $d_{\text{Э}}$  – максимальный диаметр вывода или диагональ толщины устанавливаемого ЭРЭ (выбирается из справочника), мм;

$\Delta d_{\text{н.о}}$  – нижнее предельное отклонение от номинального диаметра монтажного отверстия (определяется классом точности ПП и диаметром отверстия), мм;

$r$  – разница между минимальным диаметром отверстия и максимальным диаметром вывода ЭРЭ, ее выбирают в пределах 0,1...0,4 мм.

Рассчитанные значения  $d$  сводят к предпочтительному ряду отверстий: 0,7; 0,9; 1,1; 1,3; 1,5 мм и т. д.

5 Рассчитать диаметр контактных площадок. Минимальный диаметр контактных площадок для ОПП и внутренних слоев МПП, изготовленных химическим методом:

$$D_{\text{min}} = D_{1\text{min}} + 1,5h_{\text{ф}}, \quad (4.7)$$

где  $h_{\text{ф}}$  – толщина фольги;

$D_{1\text{min}}$  – минимальный эффективный диаметр площадки:

$$D_{1\text{min}} = 2 \left( b_{\text{М}} + \frac{d_{\text{max}}}{2} + \delta d + \delta p \right), \quad (4.8)$$

где  $b_{\text{М}}$  – расстояние от края просверленного отверстия до края контактной площадки;

$\delta d$  и  $\delta p$  – допуски на расположение отверстий и контактных площадок соответственно;

$d_{\text{max}}$  – максимальный диаметр просверленного отверстия, мм:

$$d_{\text{max}} = d + \Delta d + (0,1 \dots 0,15), \quad (4.9)$$

где  $\Delta d$  – допуск на отверстие.

Значения допусков для различных классов точности ПП представлены в таблице 4.7.

Таблица 4.7 – Допуски на расположение отверстий и контактных площадок

Параметры	Класс точности ПП			
	2	3	4	5
Допуск на отверстие $\Delta d$ , мм, без металлизации: $d < 1$ мм $d > 1$ мм	$\pm 0,10$ $\pm 0,15$	$\pm 0,05$ $\pm 0,10$	$\pm 0,05$ $\pm 0,10$	$\pm 0,025$ $\pm 0,10$
Допуск на отверстие $\Delta d$ , мм, с металлизацией и оплавлением: $d < 1$ мм $d > 1$ мм	$+0,05 \dots$ $0,18$ $+0,10 \dots$ $0,23$	$+0,00 \dots$ $0,13$ $+0,05 \dots$ $0,18$	$+0,00 \dots$ $0,13$ $+0,05 \dots$ $0,18$	$+0,00 \dots$ $0,13$ $+0,05 \dots$ $0,18$
Допуск на ширину проводника $\Delta b$ , мм: без покрытия с покрытием	$\pm 0,10$ $+0,15 \dots$ $0,10$	$\pm 0,05$ $\pm 0,10$	$\pm 0,03$ $\pm 0,05$	$+0 \dots 0,03$ $\pm 0,03$
Допуск на расположение отверстий $\delta d$ , мм: при размере платы менее 180 мм при размере платы от 180 до 360 мм при размере платы более 360 мм	0,15 0,20 0,25	0,08 0,10 0,15	0,05 0,08 0,10	0,05 0,08 0,10
Допуск на расположение контактных площадок $\delta r$ , мм, на ОПП и ДПП: при размере платы менее 180 мм при размере платы от 180 до 360 мм при размере платы более 360 мм	0,25 0,30 0,35	0,15 0,20 0,25	0,10 0,15 0,20	0,05 0,08 0,15
Допуск на подтравливание диэлектрика МПП $\Delta d_{тр}$ , мм	0,03	0,03	0,03	0,03
Допуск на расположение контактных площадок $\delta r$ , мм, на МПП (внутренний слой): при размере платы менее 180 мм при размере платы от 180 до 360 мм при размере платы более 360 мм	0,30 0,35 0,40	0,20 0,25 0,30	0,15 0,15 0,25	0,10 0,10 0,20
Допуск на расположение проводников $\delta l$ , мм: на ОПП и ДПП на МПП (внутренний слой)	0,10 0,15	0,05 0,10	0,03 0,08	0,02 0,05
Расстояние от края просверленного отверстия до края контактной площадки, $b_M$ , мм	0,045	0,035	0,025	0,015

Минимальный диаметр контактных площадок для ДПП и наружных слоев МПП, изготавливаемых комбинированным позитивным методом, равен:

- при фотохимическом способе получения рисунка:

$$D_{\min} = D_{1\min} + 1,5h_{\phi} + 0,03; \quad (4.10)$$

- при сеточно-графическом способе получения рисунка:

$$D_{\min} = D_{1\min} + 1,5h_{\phi} + 0,08. \quad (4.11)$$



Для ДПП и наружных слоев МПП, изготавливаемых электрохимическим методом, минимальный диаметр контактных площадок равен:

- при фотохимическом способе получения рисунка:

$$D_{\min} = D_{1\min} + 0,03; \quad (4.12)$$

- при сеточно-графическом способе получения рисунка:

$$D_{\min} = D_{1\min} + 0,08. \quad (4.13)$$

Максимальный диаметр контактной площадки равен

$$D_{\max} = D_{\min} + (0,2 \dots 0,6). \quad (4.14)$$

*Расчет диаметров отверстий и контактных площадок проводится для каждого типоразмера ЭРЭ.*

6 Определить ширину проводников. Минимальная ширина проводников для ОПП и внутренних слоев МПП, изготавливаемых химическим методом:

$$b_{\min} = b_{1\min} + 1,5h_{\phi}, \quad (4.15)$$

где  $b_{1\min}$  – минимальная эффективная ширина проводника ( $b_{1\min} = 0,15$  мм для плат 1-го и 2-го класса точности,  $b_{1\min} = 0,10$  мм для плат 3-го и 4-го класса точности).

Минимальная ширина проводников для ДПП и наружных слоев МПП, изготавливаемых комбинированным позитивным методом, равна:

- при фотохимическом способе получения рисунка:

$$b_{\min} = b_{1\min} + 1,5h_{\phi} + 0,03; \quad (4.16)$$

- при сеточно-графическом способе получения рисунка:

$$b_{\min} = b_{1\min} + 1,5h_{\phi} + 0,08. \quad (4.17)$$

Для ДПП и наружных слоев МПП, изготавливаемых электрохимическим методом, минимальная ширина проводников равна:

- при фотохимическом способе получения рисунка:

$$b_{\min} = b_{1\min} + 0,03; \quad (4.18)$$

- при сеточно-графическом способе получения рисунка:

$$b_{\min} = b_{1\min} + 0,08. \quad (4.19)$$

Максимальная ширина проводников:

$$b_{\max} = b_{\min} + (0,02 \dots 0,06). \quad (4.20)$$

7 Определить минимальное расстояние между элементами проводящего рисунка.

Минимальное расстояние между проводником и контактной площадкой:

$$S_0 = L_0 - \left[ \left( \frac{D_{\max}}{2} + \delta p \right) + \left( \frac{b_{\max}}{2} + \delta l \right) \right], \quad (4.21)$$

где  $L_0$  – расстояние между центрами рассматриваемых элементов;

$\delta l$  – допуск на расположение проводников.

Минимальное расстояние между двумя контактными площадками:

$$S_{\min 1} = L_0 - [(D_{\max} + \delta p)]. \quad (4.22)$$

Минимальное расстояние между двумя проводниками:

$$S_{\min 2} = L_0 - [(D_{\max} + \delta l)]. \quad (4.23)$$

8 Величину паразитной емкости между двумя проводниками,  $C_{\text{пров}}$ , пФ, рассчитать по формуле

$$C_{\text{пров}} = \frac{0,12 \varepsilon l_n}{\ln \frac{2S}{h + t_n}}, \quad (4.24)$$

где  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость материала основания печатной платы;

$l_n$  – длина взаимного перекрытия проводников, мм;

$S$  – ширина зазора между краями печатных проводников, мм;

$h$  – ширина печатного проводника, мм.

9 Индуктивность печатных проводников  $L$ , мкГн, рассчитать по формуле

$$L = 2l_n \left( 2,3 \frac{l_n}{h + t_n} + 0,2235 \frac{h + t_n}{l_n} + 0,5 \right) 10^{-2}. \quad (4.25)$$

10 Вычислить сопротивление изоляции печатных цепей, расположенных на поверхности платы:

$$R_S = \rho_S \frac{S}{l}, \quad (4.26)$$

где  $R_s$  – сопротивление изоляции разобщенных печатных цепей, Ом;  
 $\rho_s$  – удельное поверхностное сопротивление материала основания, Ом/м;  
 $S$  – изоляционный зазор разобщенных цепей, мм;  
 $l$  – длина изоляционного зазора, м.

Основными параметрами, обуславливающими стабильность работы печатных плат, являются тангенс угла потерь  $\text{tg}\delta$  и диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$ , которые больше всего подвержены изменению в процессе старения органического основания платы. Изменение диэлектрических свойств печатной платы (от воздействия температуры и влаги) приводит к существенным потерям, которые могут достигать 70 % от расчетной мощности схемы. Поэтому необходимо произвести расчет мощности потерь печатной платы  $P_I$ , Вт:

$$P_I = 2\pi f C U^2 \text{tg}\delta, \quad (4.27)$$

где  $f$  – частота питающего напряжения схемы, МГц;  
 $C$  – емкость печатной платы, мкФ;  
 $U$  – напряжение питания, В;  
 $\text{tg}\delta$  – тангенс угла диэлектрических потерь материала основания платы.  
Емкость печатной платы вычисляют по формуле, пФ:

$$C_{\text{пп}} = \frac{0,009\epsilon F}{H}, \quad (4.28)$$

где  $F$  – суммарная площадь печатных проводников, мм<sup>2</sup>;  
 $H$  – толщина платы, мм.

После проведения расчетов делают вывод о том, отвечают ли параметры печатного монтажа требованиям, предъявляемым к платам заданного класса точности.

#### 4.1.7 Выбор и размещение элементов печатного рисунка

Размещение отверстий и других элементов печатного рисунка производят относительно базы координат координатной сетки в соответствии с принятым при разработке печатного узла расположением навесных элементов и их выводов. Основной шаг линий, используемый в координатной сетке, равен 2,5 мм; допускаются вспомогательные шаги – 1,25; 0,625 и 0,5 мм (зависят от используемой элементной базы).

Центры отверстий и контактных площадок располагают в узлах сетки. Центры монтажных отверстий под неформуемые выводы многовыводных ЭРЭ, межцентровые расстояния которых не кратны шагу координатной сетки, следует располагать таким образом, чтобы в узле координатной сетки находился по крайней мере центр одного из монтажных отверстий.

Количество типоразмеров любых отверстий на печатной плате из соображений технологичности и стоимости ПП обычно ограничивают тремя-четырьмя.

Контактные площадки имеют прямоугольную, круглую или близкую к ним форму (круглые предпочтительнее).

Печатные проводники следует выполнять постоянной, как можно большей ширины и располагать равномерно, насколько возможно большем расстоянии от соседних элементов. Проводники обычно находятся параллельно линиям координатной сетки или под углом  $45^\circ$  к ним. На соседних проводящих слоях платы проводники располагаются во взаимно перпендикулярных направлениях для уменьшения перекрестных помех. Печатные проводники шириной более 3 мм выполняют с вырезами, по правилам выполнения экранов.

Концевые печатные контакты (ламели) разъемного соединителя прямого сочленения располагаются на краю ПП. На торце печатной платы со стороны печатных контактов снимают фаску  $0,3 \times 45^\circ$ . Все печатные контакты на плате должны иметь износостойчивое покрытие.

#### 4.1.8 Трассировка печатных проводников

При создании печатных плат для электронных узлов РЭС обычно используется координатный способ разводки печатных проводников, предусматривающий ортогональные направления проводников на разных сторонах (смежных слоях) платы.

Для выполнения диагональных соединений и предотвращения нежелательного пересечения проводника с ранее проведенными проводниками в конструкцию ПП вводятся специальные переходные отверстия, переводящие проводники на противоположную сторону ПП, на которой трасса продолжается (может быть использовано и монтажное отверстие).

Ортогональное направление трасс позволяет свести к минимуму взаимное влияние проводников, расположенных на разных слоях, и упрощает процесс разводки проводников. Возможно также изменение направления трассы под углом  $45$  или  $90^\circ$  к первоначальному направлению, а также первоначальные сдвиги относительно выбранного направления. Желательно, однако, чтобы трассы не имели форму лесенки, а по возможности приближались к прямой.

В настоящее время для трассировки ПП используют системы автоматизированного проектирования (САПР) с различными пакетами прикладных программ (OrCAD, P-CAD, Altium Designer и т. п.).

#### 4.1.9 Маркировка и контроль

Маркировка печатных плат состоит из *основной* (наносимой обязательно) и *дополнительной*.

Маркировка выполняется краской, устойчивой к воздействию нейтральных растворителей, или способом, которым создан проводящий рисунок.

**Основная** маркировка должна содержать:

- обозначение печатной платы или ее условный шифр;
- дату изготовления;
- буквенно-цифровое обозначение слоя многослойной печатной платы (МПП).

**Дополнительной** маркировкой по необходимости могут быть нанесены на ПП: позиционное обозначение навесных ЭРЭ; изображение контуров навесных ЭРЭ; цифровое обозначение первого вывода ЭРЭ, контрольных точек; обозначение положительного вывода полярного ЭРЭ (знак «+») и др.

Место расположения и данные по маркировке должны быть указаны на чертеже ПП в соответствии с ГОСТ 2.314–68.

*Примечание* – В учебных чертежах необходимо указывать как основную, так и дополнительную маркировку.

#### 4.1.10 Оформление конструкторской документации

Оформление конструкторской документации (КД) на печатные платы должно производиться в соответствии с ГОСТ 2.109–73 и ГОСТ 2.417–78. Чертеж ОПП или ДПП должен содержать основные проекции платы с печатными проводниками и другими элементами (отверстиями, контактными площадками и т. п.).

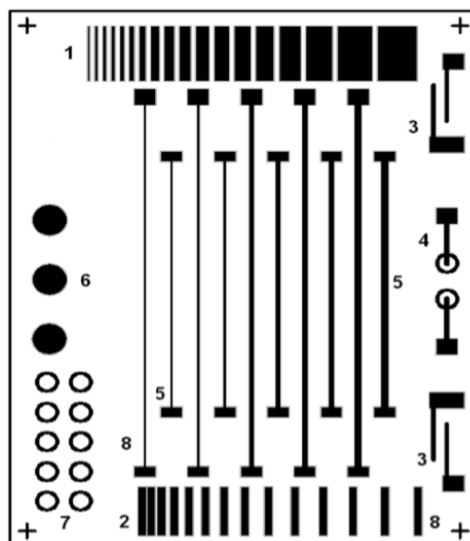
**Сборочный чертеж МПП** должен содержать данные по сборке и контролю МПП, причем чертежи слоев МПП рекомендуется изображать на отдельных листах. На чертеже слоя проставляют габаритные размеры. Допускается на слои МПП чертежи не выпускать, при этом в зависимости от характера производства слои МПП могут учитываться как детали или как материал.

### 4.2 МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЫ

1 На тестовой плате (рисунок 4.1) произвести измерения минимальной ширины проводника 1, минимального расстояния между проводниками 2 и диаметра контактной площадки 6 с помощью микроскопа МБС-2.

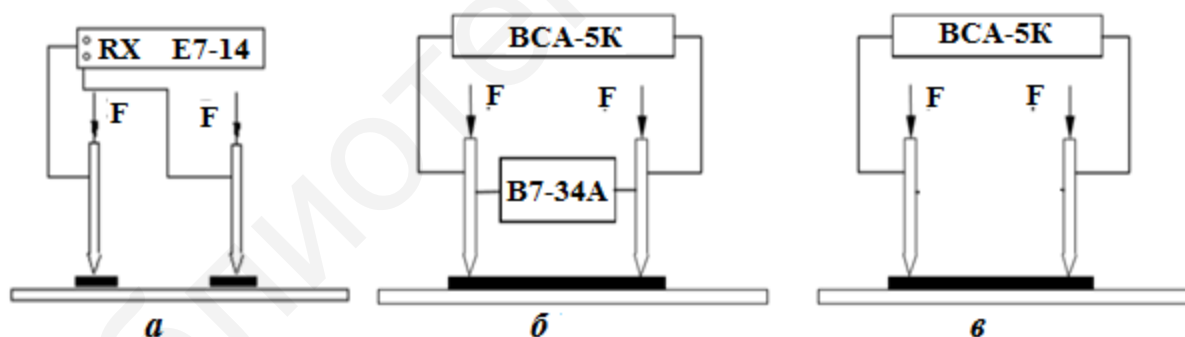
2 Измерить сопротивление изоляции между проводниками 3 и 4:

- собрать схему измерения (рисунок 4.2, а);
- установить измерительные щупы на контактные площадки исследуемых проводников;
- включить прибор Е7-14, для чего сетевой переключатель перевести в положение «Вкл»;
- после установки прибора в рабочий режим нажать на его передней панели кнопки **В**, **Усреднение 10** и автоматический предел измерения;
- запустить прибор нажатием кнопки **Запуск** в автоматическом либо ручном режиме;
- полученные значения сопротивления занести в таблицу 4.8.



1 – минимальная ширина проводника; 2 – минимальное расстояние между проводниками; 3 – сопротивление изоляции поверхностное; 4 – сопротивление изоляции объемное; 5 – токонесущая способность проводников; 6 – диаметр и усилие отрыва контактной площадки; 7 – количество перепаек; 8 – удельное электрическое сопротивление

Рисунок 4.1 – Тестовая печатная плата с контрольными элементами для определения параметров



*a* – сопротивления изоляции между проводниками; *б* – падения напряжения на проводнике; *в* – токонесущей способности

Рисунок 4.2 – Схемы измерения

Таблица 4.8 – Результаты измерений

Исследуемый параметр	Ширина проводника $S$ , мм				
	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
1 Электрическое сопротивление, Ом/м					
2 Токонесущая способность, А/мм <sup>2</sup>					
3 Сопротивление изоляции, МОм					

3 Определить удельное электрическое сопротивление проводников:

- собрать схему измерения в соответствии с рисунком 4.2, б;
- включить вольтметр путем перевода сетевого переключателя в положение «Вкл»;
- на лицевой панели вольтметра нажать кнопки **АВП**, **U** и **T0**;
- измерительный щуп установить на контактные площадки проводника 8 с наибольшей шириной;
- вывести ручку регулировки напряжения источника тока ВСА-5К в крайнее левое положение и включить его ручкой «Режим работы» в положение 1;
- вращая ручку регулировки напряжения вправо, выставить ток 1 А;
- измерить величину падения напряжения на проводнике с помощью вольтметра В7-34А;
- выключить выпрямитель и переставить измерительные щупы на контактные площадки следующего проводника;
- повторить измерения для остальных проводников (в процессе измерений следить, чтобы на передней панели вольтметра была включена кнопка **U**);
- рассчитать удельное электрическое сопротивление проводников по формуле

$$\rho = R \cdot \frac{S}{L}, \quad (4.29)$$

где  $R$  – электрическое сопротивление, рассчитанное по закону Ома;

$S$  – площадь сечения проводника;

$L$  – длина проводника.

4 Определить максимальную токонесущую способность проводников:

- собрать схему измерения в соответствии с рисунком 4.2, в;
- измерительные щупы установить на контактные площадки проводника 5 с наибольшей шириной;
- вывести ручку регулировки напряжения в крайнее левое положение;
- включить выпрямитель ручкой «Режим работы» в положение 1;
- поворачивая ручку регулировки напряжения вправо, заметить на амперметре значение тока, при котором произойдет выгорание проводника;
- вывести ручку регулировки напряжения в крайнее левое положение;
- выключить выпрямитель и переставить измерительные штанги приспособления на контактные площадки следующего проводника;
- повторить измерения для остальных проводников и полученные данные занести в таблицу 4.8.

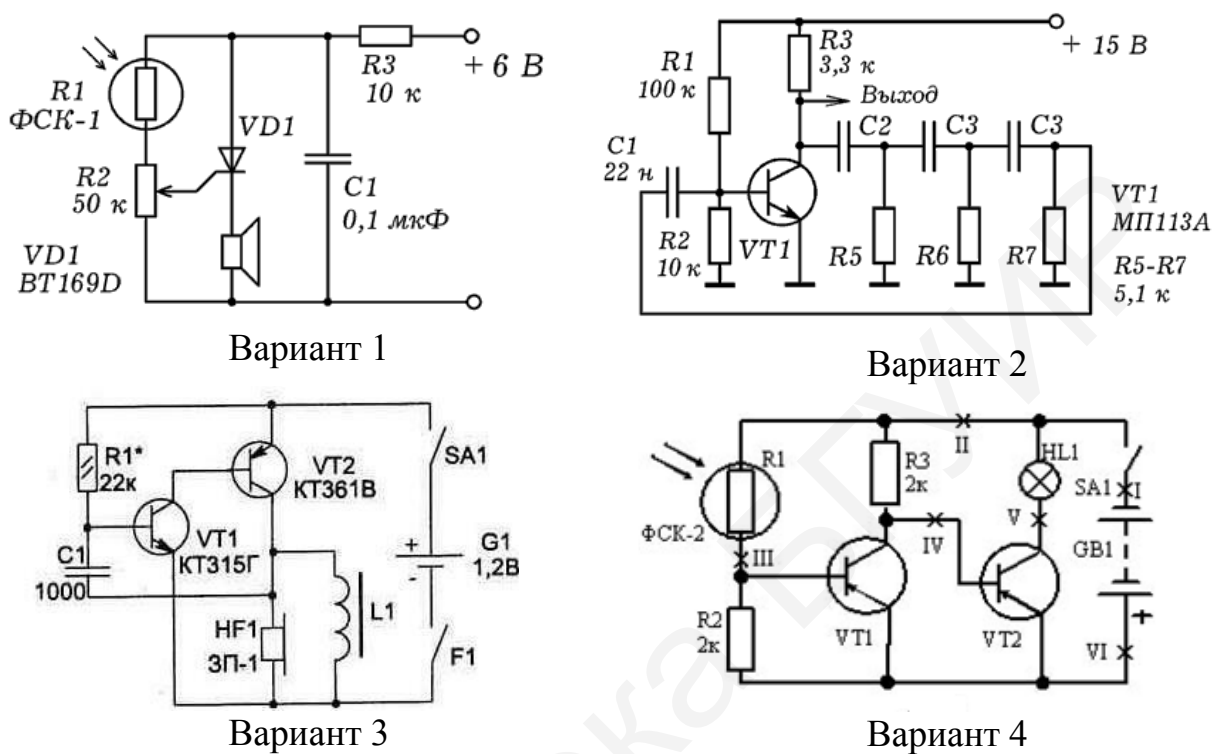
### 4.3 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

1 Получить у преподавателя вариант задания для выполнения лабораторной работы (рисунок 4.3);

2 Согласно пункту 4.1.5 провести выбор и анализ материалов ПП;

3 Согласно пункту 4.1.6 провести расчет элементов ПП, результаты занести в таблицу 4.9;

4 Провести исследование основных электрических параметров ПП согласно разделу 4.2.



Риснок 4.3 – Схемы электрические принципиальные (варианты заданий)

Таблица 4.9 – Результаты расчетов

$b_{\min}$	$b_{1\min}$	$d$	$D_{\min}$	$D_{\max}$	$b_{\min}$	$b_{\max}$	$S_0$	$S_1$	$S_2$	$C_{\text{пар}}$	$L$	$R_S$	$P_{\Pi}$	$C$

#### 4.4 СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

- 1 Титульный лист.
- 2 Цель работы.
- 3 Краткие теоретические сведения.
- 4 Результаты выполнения лабораторной работы (расчеты, таблицы, иллюстративный материал).
- 5 Выводы.

#### 4.5 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

- 1 Сформулируйте определение термина «печатная плата».
- 2 Назовите типы ПП.
- 3 Назовите конструктивные элементы ПП.



- 4 Перечислите основные технические требования к ПП.
- 5 Назовите последовательность разработки и расчета конструкции печатной платы.
- 6 Проведите анализ ТЗ и выбор группы жесткости.
- 7 Приведите методику выбора класса точности ПП.
- 8 Материалы ПП. Методика выбора материалов ПП.
- 9 Изложите методику расчета толщины печатной платы в зависимости от ее конструктивного исполнения (вида).
- 10 Назовите этапы расчета печатной платы.
- 11 Назовите правила размещения печатного рисунка на плате.
- 12 Назовите виды маркировок и их содержание.

## **СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

- 1 Конструирование радиоэлектронных средств : учебник / В. Б. Пестряков [и др.] ; под ред. В. Б. Пестрякова. – М. : Радио и связь, 1992. – 432 с.
- 2 Ненашев, А. П. Конструирование радиоэлектронных средств : учебник / А. П. Ненашев. – М. : Высш. шк., 1990. – 432 с.
- 3 Муромцев, Д. Ю. Конструирование узлов и устройств электронных средств : учеб. пособие / Д. Ю. Муромцев, И. В. Тюрин, О. А. Белоусов. – Ростов н/Д : Феникс, 2013. – 540 с.
- 4 Конструкторско-технологическое проектирование электронной аппаратуры : учебник / К. И. Билибин [и др.] ; под общ. ред. В. А. Шахнова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. – 568 с.
- 5 Печатные платы. Справочник. В 2 кн. / под ред. К. Ф. Кумбза. – М. : Техносфера, 2011. – Кн. 1 – 1011 с. ; Кн. 2 – 1016 с.
- 6 Конструирование радиоэлектронных устройств: учеб.-метод. пособие / Н. С. Образцов [и др.]. – Минск : БГУИР, 2007. – 71 с.
- 7 Радиоэлектронная аппаратура и основы ее конструкторского проектирования : учеб.-метод. пособие / Н. И. Каленкович [и др. ] ; под ред. С. М. Боровикова. – Минск : БГУИР, 2009. – 187 с.
- 8 Конструирование и технология электронных систем. Курсовое проектирование : учеб.-метод. пособие / А. А. Костюкевич [и др.]. – Минск : БГУИР, 2012. – 119 с.
- 9 ГОСТ 23751–86. Платы печатные. Основные параметры конструкции. – Введ. 1978–07–01. – М. : Изд-во стандартов, 1986.
- 10 ГОСТ 23752–79. Платы печатные. Общие технические требования. – Введ. 1980–07–01. – М. : Изд-во стандартов, 1979.

*Учебное издание*

**Мадвейко Сергей Игоревич**  
**Костюкевич Анатолий Александрович**

**КОНСТРУИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ  
УСТРОЙСТВ. ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**

ПОСОБИЕ

Редактор *М. А. Зайцева*  
Корректор *Е. Н. Батурчик*  
Компьютерная правка, оригинал-макет *В. М. Задоя*

Подписано в печать 18.09.2020 Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».  
Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. 4,07. Уч.-изд. л. 4,0. Тираж 30 экз. Заказ 64.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования  
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий №1/238 от 24.03.2014,  
№2/113 от 07.04.2014, №3/615 от 07.04.2014.  
Ул. П. Бровки, 6, 220013, г. Минск