

7 Расчет конструкторских показателей изделия

Опытно-конструкторская разработка любого устройства предполагает проведение различного рода расчета конструкторского плана, позволяющие оценить соответствие параметров заданным в техническом задании. К таким расчетам можно отнести:

- компоновочный расчет печатной платы;
- компоновочный расчет блока;
- расчет элементов печатного монтажа;
- расчет помехоустойчивости;
- расчет вибропрочности устройства;
- тепловой расчет;
- расчет надежности устройства.

7.1 Компоновочный расчет печатной платы

Исходными данными для расчета являются перечень элементов схемы электрической принципиальной, необходимые типоразмеры и установочные размеры ЭРЭ. Численные значения установочных размеров ЭРЭ приведем в таблице 7.1.

Таблица 7.1 - Установочные площади элементов универсального измерительного прибора на микроконтроллере

Элемент и его тип	Установочная площадь, мм ²	Кол	Установочная суммарная площадь, мм ²	Масса ЭРЭ, г	Суммарная масса ЭРЭ, г
1	2	3	4	5	6
КД409А	10	4	40	0,5	2
Д311	48	1	48	1	1
КД522Б	8	4	32	0,15	0,6
К10-17В-М1500-1000нФ ±10%	4	4	16	0,15	2
К10-17В-Н90-0,1мкФ ±10%	14	11	154	0,6	8,4
К10-17Б-М1500-100нФ ±10%	2,25	3	6,75	0,15	0,45
К10-17Б-М1500-510нФ ±10%	2,25	1	2,25	0,15	0,15

Продолжение таблицы 7.1

<i>K10-17B-4B-МПО-15nΦ ±10%</i>	2,5	1	2,5	0,2	1
<i>K10-17B-H90-1мкΦ ±10%</i>	12	3	36	0,6	1,8
<i>K53-1A 10мк x 16B ±10%</i>	52	4	208	1,5	6
<i>K53-1A 47мк x 16B ±10%</i>	112	1	112	2	2
<i>KT-4-23 nΦ ±10%</i>	52,7834	1	52,7834	2	2
<i>SL1602B</i>	2550	1	2550	16	16
<i>CECL 100/260</i>	7,065	1	7,065	1	1
<i>LQH32M</i>	4	1	4	1	1
<i>Кнопка PSW5</i>	49	2	98	1	2
<i>Кнопка SWT-2</i>	56,25	2	112,5	1	2
<i>LM311D</i>	19,25	1	19,25	0,5	0,5
<i>78L05</i>	78,5	1	78,5	1	1
<i>LMX1600TM</i>	24,75	1	24,75	0,6	0,6
<i>74AC132D</i>	31,5	1	31,5	0,8	0,8
<i>PIC16F873A</i>	50	1	50	2	2
<i>Перемычка SS-33</i>	75	1	75	2,5	2,5
<i>PH1-12 0.25 1206 ±5%</i>	5,355	2	10,71	0,4	0,8
<i>PH1-12 0.125 0805 ±5%</i>	2,625	30	78,75	0,2	6
<i>PH1-12 0.063 0603 ±5%</i>	1,6	11	17,6	0,12	1,32
<i>СП4-1a</i>	530,66	1	530,66	4	4
<i>РПК01 HC-49SM - 4МГц - 6BC</i>	46,35	1	46,35	1	1
<i>SIL05-1A72-71D</i>	95	1	95	2	2
<i>Вилка WF-5</i>	95	1	95	1,5	1,5
<i>Разъем MINI-FIT</i>	144	2	288	5	10
<i>Разъем K375 (DJK-02A)</i>	265	1	265	4	4
<i>Разъем BNC-7043 PLAST</i>	126	2	252	9	18
<i>BF998</i>	58,5	1	58,5	0,4	0,4
<i>IRF7314</i>	19,25	1	19,25	0,6	0,6
<i>KT3107A</i>	19,25	1	19,25	1	1
<i>BFR93A</i>	66,4424	1	66,4424	0,6	0,6

KT3102A	7,44	1	7,44	1	1
ИТОГО:			5610,801	-	109

Итак, согласно таблице 7.1 суммарная площадь всех элементов плат составляет:

$$S_{\Sigma} = 5610,801(\text{мм}^2) \quad S_{\Sigma} = 560,81 \text{ мм}^2$$

Принимаем коэффициент заполнения $k_{35}=0,5$ (т.к. используются в основном SMD элементы).

Площадь платы найдем по формуле 7.1:

$$S_{\text{ПЛАТЫ}} = \frac{S_{\Sigma}}{k_{35} \cdot m} \quad (7.1)$$

где: S_{Σ} - суммарная площадь всех элементов, мм^2 ;

$S_{\text{платы}}$ - площадь платы, мм^2 .

m – количество сторон монтажа (1,2)

Тогда коэффициент заполнения:

$$S_{\text{ПЛАТЫ}} = \frac{5610,801}{0,5 \cdot 1} = 11220 \text{ мм}^2$$

В комплект устройства входит батарейка “Крона”, которая значительно увеличивает габариты устройства. Чтобы избежать этого требуется сделать печатную плату прямоугольной с вырезом для батарейки. Такой способ позволил рационально использовать пространство в корпусе не оставив свободного места,

Площадь для батарейки $55 \times 30 = 1650$. Учитывая рассчитанную площадь, площадь батарейки, место для крепежных отверстий, места по технологическим требованиям - площадь платы и выреза для батарейки возьмем равной 13230 мм^2 .

Размер платы: $147 \times 90 \text{ мм}$

7.2 Компоновочный расчет блока

Исходными данными для этого расчета являются перечень элементов схемы электрической принципиальной, необходимые типоразмеры и установочные размеры элементов.

Численные значения установочных объемов элементов приведем в виде таблицы 7.2.

Таблица 7.2 - Установочные объёмы элементов универсального измерительного прибора на микроконтроллере

Элемент и его тип	Установочный объём, мм ³	Кол.	Установочный суммарный объём, мм ³
1	2	3	4
<i>КД409А</i>	25	4	100
<i>Д311</i>	192	1	576
<i>КД522Б</i>	16	4	64
<i>К10-17В-М1500-1000nΦ ±10%</i>	5,6	4	22,4
<i>К10-17В-Н90-0,1мкΦ ±10%</i>	19,6	11	215,6
<i>К10-17Б-М1500-100nΦ ±10%</i>	3,15	3	9,45
<i>К10-17Б-М1500-510nΦ ±10%</i>	3,15	1	3,15
<i>К10-17В-4В-МПО-15nΦ ±10%</i>	3,5	1	3,5
<i>К10-17Б-Н90-1мкΦ ±10%</i>	16,8	3	50,4
<i>К53-1А 10мк x 16В ±10%</i>	208	4	832
<i>К53-1А 47мк x 16В ±10%</i>	784	1	784
<i>КТ-4-23 nΦ ±10%</i>	369,4838	1	369,4838
<i>SL1602В</i>	22185	1	22185
<i>CECL 100/260</i>	21,195	1	21,195
<i>LQH32М</i>	2	1	2
<i>Кнопка PSM5</i>	254,8	2	509,6
<i>Кнопка SWT-2</i>	281,25	2	562,5
<i>LM311D</i>	48,125	1	48,125
<i>78L05</i>	392,5	1	392,5
<i>LMX1600ТМ</i>	49,5	1	49,5

Продолжение таблицы 7.2

74AC132D	94,5	1	94,5
PIC16F873A	200	1	200
Переключатель SS-33	450	1	450
PH1-12 0.25 1206 ±5%	2,6775	2	5,355
PH1-12 0.125 0805 ±5%	1,3125	30	39,375
PH1-12 0.063 0603 ±5%	0,8	11	8,8
СП4-1а	14858,48	1	14858,48
ППК01 HC-49SM - 4МГц - 6BC	231,75	1	231,75
SIL05-1A72-71D	741	1	741
Вилка WF-5	475	1	475
Разъем MINI-FIT	998,4	2	1996,8
Разъем K375 (DJK-02A)	2120	1	2120
Гнездо DJK-07D	630	2	1260
BF998	175,5	1	175,5
IRF7314	38,5	1	38,5
KT3107A	38,5	1	38,5
BFR93A	332,212	1	332,212
KT3102A	11,16	1	11,16
Батарейка "Крона"	22491,875	1	22491,88
Strap для "Крона"	510	1	510
ИТОГО:			72879,22

Итак, согласно таблице 7.2 суммарный установочный объем всех элементов составляет:

$$V_{\Sigma} = 72879,22 \text{ мм}^2$$

Коэффициент заполнения по объему (k_3) из конструктивных соображений принимается равным 0,2.

Ориентировочно определяем реальный объем разрабатываемой конструкции по формуле 7.2:

$$V_{реал} = \frac{V_{\Sigma}}{k_3} \quad (7.2)$$

$$V_{реал} = \frac{72879,21}{0,7} = 10410 \text{ (мм}^3\text{)};$$

Окончательные габариты корпуса: 159,5×98×24 (мм).

7.3 Расчет элементов печатного монтажа

Выбирая конструкцию печатной платы, рассчитывая параметры линий связи и подготавливая технологическое оборудование для изготовления печатных плат, мы должны определить такие параметры печатной платы, как ширина и шаг трассировки печатных проводников; диаметр контактных площадок; число проводников, которое можно провести между двумя соседними отверстиями; диаметр отверстий в плате до и после металлизации.

При расчете печатной платы необходимо учитывать и особенности производства, допуски на всевозможные отклонения параметров элементов печатного монтажа, установочные характеристики корпусов ЭРЭ.

Класс точности определяет наименьшие минимальные значения основных размеров конструктивных элементов (ширина проводника, расстояния между центрами 2-х проводников (контактных площадок), ширина гарантийного пояса металлизации контактной площадки и др.)- ГОСТ 23751-86 определяет 5 классов точности. Минимальные размеры конструктивных элементов уменьшаются с 1 по 5-й классы точности (таблица 11.2).

Таблица 7.3 — Классы точности печатных плат

Параметр	Класс точности			
	2	3	4	5
Мин. ширина проводника, t, мм	0,45	0,25	0,15	0,10
Мин. расстояние между центрами проводников. S, мм	0,45	0,25	0,15	0,10
Мин. ширина гарантийного пояса, B, мм	0,20	0,10	0,05	0,025
Отношение диаметра мин.отв. к толщине ПП (γ)	1:2,5	1:3	1:4	1:5

Расчет печатного монтажа состоит из трех этапов: расчет по постоянному и переменному току и конструктивно-технологический расчет [1].

1) Исходя из технологических возможностей производства выбирается метод изготовления и класс точности ИИ. ПП изготавливаем комбинированным позитивным методом. Точности выполнения элементов конструкции проектируемая печатная плата относится к 3-му классу точности.

Быстродействие, установочные размеры, эксплуатационные характеристики, технологические особенности, автоматизация и т.п. 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 ПП. Так же определяется диаметром отверстий. Обычно выполняется правило:

$$H > (2,5 - 5) \cdot d_0, \quad (7.2)$$

где H — толщина ПП;

d_0 — минимальный диаметр отверстий.

Толщина ПП 1,5 мм.

2) Определяем минимальную ширину печатного проводника по постоянному току для цепей питания и заземления, мм:

$$b_{\min} = \frac{I_{\max}}{j_{\text{дон}} \cdot t}, \quad (7.2)$$

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

$j_{\text{дон}}$ - допустимая плотность тока, выбирается в зависимости от метода изготовления ИИ (таблица 7.4);

t - толщина проводника, мм.

Таблица 7.4 — Допустимая плотность тока в зависимости от метода изготовления [1]

Метод изготовления	Толщина фольги, t , мм	Допустимая плотность тока, $j_{\text{дон}}$, А/мм ²	Удельное сопротивление, ρ , Ом·мм /м
Комбинированный позитивный	18	75	0,0175
	35	48	
	50	38	

$$b_{\min} = \frac{21}{48 \cdot 35} = 0,013 \text{ мм},$$

3) Определяем номинальное значение диаметров монтажных отверстий d :

$$d = d_9 + |\Delta d_{H.O}| + r, \quad (7.3)$$

где d_9 - максимальный диаметр вывода устанавливаемого ИЭТ, мм;

$\Delta d_{H.O}$ - нижнее предельное отклонение от номинального диаметра монтажного отверстия (определяется классом точности ПП и диаметром отверстия) [1], мм;

r — разница между минимальным диаметром отверстия и максимальным диаметром вывода ИЭТ, ее выбирают в пределах 0,1..0,4 мм.

Диаметры монтажных и переходных отверстий металлизированных и не металлизированных должны соответствовать **ГОСТ 10317-79**. Предпочтительные размеры монтажных отверстий выбирают из ряда 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0; 1,1; 1,2; 1,3; 1,4; 1,5; 1,6; 1,7; 1,8; 2,0 мм.

Подставив данные о диаметрах выводов элементов в формулу 7.3 получим:

$$d_A = 0,6 + 0,08 + 0,1 = 0,78 \text{ мм},$$

$$d_B = 0,8 + 0,08 + 0,1 = 0,98 \text{ мм},$$

$$d_C = 1 + 0,08 + 0,1 = 1,09 \text{ мм}.$$

4) Рассчитываем диаметр контактных площадок. Минимальный диаметр контактных площадок для ДПП и наружных слоев МПП, изготавливаемых комбинированным позитивным методом:

Фотохимический способ получения рисунка:

$$D_{\min} = D_{l\min} + 1,5 \cdot h_{\phi} + 0,03, \quad (7.4)$$

где h_{ϕ} — толщина фольги;

$D_{l\min}$ — минимальный эффективный диаметр площадки:

$$D_{l\min} = 2(b_m + d_{\max} / 2 + \delta d + \delta p), \quad (7.5)$$

где b_m — расстояние от края просверленного отверстия до края контактной площадки;

δd и δp — допуски на расположение отверстий и контактных площадок [1];

d_{\max} — максимальный диаметр просверленного отверстий, мм:

$$d_{\max} = d + \Delta d + (0,1..0,5), \quad (7.6)$$

где d — допуски на отверстие [1];

$$d_{\max(0.6)} = 0,6 + (0 - 0,13) + 0,1 = 0,57 \text{ мм};$$

$$D_{l\min(0.6)} = 2(0,35 + 0,57 / 2 + 0,08 + 0,15) = 1,1 \text{ мм}$$

$$D_{\min(0.6)} = 1,1 + 1,5 \cdot 0,035 + 0,03 = 1,183 \text{ мм}$$

$$d_{\max(0.8)} = 0,8 + (0 - 0,13) + 0,1 = 0,77 \text{ мм};$$

$$D_{l\min(0.8)} = 2(0,08 + 0,77 / 2 + 0,08 + 0,15) = 1,3 \text{ мм}$$

$$D_{\min(0.8)} = 1,3 + 1,5 \cdot 0,035 + 0,03 = 1,383 \text{ мм}$$

$$d_{\max(1,2)} = 1,2 + |0,05 - 0,18| + 0,1 = 1,17 \text{ мм};$$

$$D_{\min(1,2)} = 2(0,35 + 1,17 / 2 + 0,08 + 0,15) = 1,7 \text{ мм}$$

$$D_{\min(1,2)} = 1,7 + 1,5 \cdot 0,035 + 0,03 = 1,782 \text{ мм}$$

Максимальный диаметр контактной площадки:

$$D_{\max} = D_{\min} + (0,02..0,06), \quad (7.7)$$

$$D_{\max(0,6)} = 1,183 + 0,02 = 1,203 \text{ мм};$$

$$D_{\max(0,8)} = 1,383 + 0,02 = 1,403 \text{ мм};$$

$$D_{\max(1,2)} = 1,782 + 0,02 = 1,802 \text{ мм};$$

5) Определяет ширину проводников. Минимальная ширина проводников для ДПП и наружных слоев МПП, изготавливаемых комбинированным позитивным методом:

при фотохимическом способе получения рисунка:

$$b_{\min} = b_{\min} + 1,5h_{\phi} + 0,03, \quad (7.8)$$

где b_{\min} – минимальная эффективная ширина проводника;

$b_{\min} = 0,10 \text{ мм}$ (для плат 3-го и 4-го класса точности).

$$b_{\min} = 0,1 + 1,5 \cdot 0,035 + 0,03 = 0,183 \text{ мм}$$

Максимальная ширина проводника:

$$b_{\max} = b_{\min} + (0,02..0,06), \quad (7.9)$$

$$b_{\max} = 0,183 + 0,02 = 0,203 \text{ мм};$$

6) Определяет минимальное расстояние между элементами проводящего рисунка.

Минимальное расстояние между проводником и контактной площадкой:

$$s_{\min} = L_0 - [(D_{\max} / 2 + \delta p) + (b_{\max} / 2 + \delta l)] \quad (7.10)$$

где L_0 – расстояние между центрами рассматриваемых элементов;

δl – допуск на расположение проводников [1].

$$s_{\min(0,6)} = 1 - [(1,203 / 2 + 0,15) + (0,203 / 2 + 0,05)] = 0,097 \text{ мм},$$

$$s_{\min(0,8)} = 1,2 - [(1,403 / 2 + 0.15) + (0,203 / 2 + 0.05)] = 0,197 \text{ мм},$$

$$s_{\min(1,2)} = 1,5 - [(1,802 / 2 + 0.15) + (0,203 / 2 + 0.05)] = 0,297 \text{ мм},$$

Минимальное расстояние между двумя контактными площадкой:

$$s_{\min} = L_0 - [(D_{\max} + \delta p)], \quad (7.11)$$

$$s_{\min(0,6)} = 1,5 - [(1,203 + 0,15)] = 0,147 \text{ мм},$$

$$s_{\min(0,8)} = 1,8 - [(1,403 + 0,15)] = 0,247 \text{ мм},$$

$$s_{\min(1,2)} = 2,2 - [(1,802 + 0,15)] = 0,247 \text{ мм},$$

Минимальное расстояние между двумя проводниками:

$$s_{\min} = L_0 - [(D_{\max} + \delta)] \quad (7.12)$$

$$s_{\min(0,6)} = 1,5 - [(1,203 + 0,05)] = 0,247 \text{ мм},$$

$$s_{\min(0,8)} = 1,8 - [(1,403 + 0,05)] = 0,347 \text{ мм},$$

$$s_{\min(1,2)} = 2,2 - [(1,802 + 0,05)] = 0,347 \text{ мм},$$

7.4 Расчет механической прочности печатной платы

Для того чтобы проверить насколько хорошо защищено проектируемое устройство от механических воздействий, необходимо провести расчеты собственных частот вибраций, а затем подобрать соответствующие виброизоляторы.

Так как универсальный измерительный прибор на микроконтроллере предполагается использовать без виброизоляторов, то в этом случае платы является единственной колебательной системой.

Жесткость плат зависит от материала, формы, геометрических размеров и способа закрепления.

Печатная плата разрабатываемого прибора изготовлена из стеклотекстолита марки СФ2-35-1,5. Она имеет прямоугольную форму с вырезом (рис. 7.4.1) следующих размеров: $a \times b \times h = 147 \text{ мм} \times 90 \text{ мм} \times 1,5 \text{ мм}$

Расчет собственной частоты колебания плат позволяет подобрать основные параметры их конструкции, исключая возможности появления резонанса. При расчете платы ее представляют в виде тонкой пластины, так как отношение толщины платы к наименьшему из двух размеров меньше, чем 1:10.

При расчете платы-пластины принимают следующие упрощения:

- 1) толщина платы постоянна;
- 2) ЭРЭ на плате располагаются равномерно на ее поверхности;
- 3) изгибные деформации при колебаниях малы, по сравнению с толщиной, упругие деформации подчиняются закону Гука;
- 4) материал пластины идеально упругий, однородный и изотропный.
- 5) “нейтральный” слой при поперечных колебаниях не подвержен деформациям растяжения (сжатия);

Для данного способа закрепления платы, поправочный коэффициент, учитывающий способ закрепления равен:

$$K_{\alpha} = 22,37 \sqrt{1 + 0,61 \left(\frac{a}{b}\right)^2 + \left(\frac{a}{b}\right)^4} \quad (7.10)$$

где a - длина большей стороны,
 b - длина меньшей стороны.

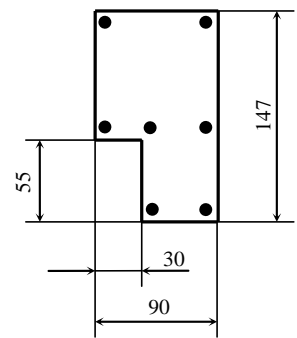


Рис 7.4.1 - Условное обозначение печатной платы

$$K_{\alpha} = 22,37 \sqrt{1 + 0,61 \left(\frac{0,147}{0,09} \right)^2 + \left(\frac{0,147}{0,09} \right)^4} = 69,83$$

Цилиндрическая жесткость платы равна:

$$D = \frac{E \cdot h^3}{12(1-\gamma)^2} \quad (7.11)$$

где E - модуль упругости материала платы $E = 3,02 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2$;

h - толщина печатной платы, $h = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$;

γ - коэффициент Пуассона для материала платы, $\mu = 0,22$.

$$D = \frac{3,02 \cdot 10^{10} \cdot (1,5 \cdot 10^{-3})^3}{12(1-0,22)^2} = 10,889$$

Распределенная по площади масса платы и ЭРЭ:

$$m'' = \rho \cdot h + \frac{m_{\text{э}}}{a \cdot b} \quad (7.12)$$

где ρ - удельная плотность материала платы, $\rho = 2,05 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$;

$m_{\text{э}}$ - масса элементов, $m_{\text{э}} = 0,109 \text{ кг}$.

$$m'' = 2,05 \cdot 10^3 \cdot 1,5 \cdot 10^{-3} + \frac{0,109}{0,147 \cdot 0,09} = 11,314 \text{ кг/м}^2,$$

Определим частоту собственных колебаний плат:

$$f_0 = \frac{K_{\alpha}}{2\pi \cdot a^2} \sqrt{\frac{D}{m''}}, \quad (7.13)$$

$$f_0 = \frac{69,83}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,147^2} \sqrt{\frac{10,889}{11,304}} = 505 \text{ Гц},$$

В результате механических воздействий, печатная плата подвержена усталостному разрушению, в особенности при возникновении механического резонанса, чаще всего усталостные отказы проявляются в виде обрыва проводников, разрушения паяных соединений, нарушения контактов в разъемах. Подобные разрушения можно предотвратить, если обеспечить разные частоты собственных колебаний платы и рамки.

При вибрациях на относительно низких частотах $f < 400 \text{ Гц}$ наиболее опасными являются амплитуды поперечных колебаний: происходит разрушение выводов в местах пайки. На сравнительно высоких частотах $f > 400 \text{ Гц}$

виброскорости вызывают в элементах усталостные явления. Для предупреждения таких отказов при функционировании электронного устройства надо выполнить условия: амплитуда изгибных колебаний не должна превышать $\leq 3 \cdot 10^{-4}$ м, а виброскорость $\leq 0,8$ м·с⁻¹.

Как упругая пластина ПП может подвергнуться усталостному разрушению при действии циклических нагрузок, в особенности при резонансе. В результате нарушаются контактные соединения в разъемах, разрушаются пленочные проводники, места пайки и т.д. Подобные отказы в работе РЭС в какой-то мере можно избежать, выполнив условие (7.14) и обеспечив тем самым достаточную усталостную долговечность платы в вибрационном поле:

$$f_0 \geq \sqrt[3]{\left(\frac{\beta \cdot g \cdot n_{b\max}}{0,003 \cdot b}\right)^2} \quad (7.14)$$

где f_0 - минимальная частота собственных колебаний платы;

$n_{b\max}$ - максимальные вибрационные перегрузки, выраженные в единицах g ;

g - ускорение свободного падения. Так как применение устройства в условиях высокогорья не предполагается, то принимаем $g = 9,81$ м/с²;

β - безразмерная постоянная, выбираемая в зависимости от частоты собственных колебаний и воздействующих ускорений.

$$f_0 \geq \sqrt[3]{\left(\frac{35 \cdot 9,81 \cdot 5}{0,003 \cdot 90}\right)^2} \approx 244 \text{ Гц}$$

Следовательно условие (7.14) выполняется: $505 \text{ Гц} > 244 \text{ Гц}$.

Амплитуда изгибных колебаний по формуле (7.15):

$$A_z = \frac{n_b}{4 \cdot f_0^2} \leq 3 \cdot 10^{-4} \quad (7.15)$$

где n_b - максимальные вибрационные перегрузки, выраженные в единицах g ;

f_0 - минимальная частота собственных колебаний платы.

$$A_z = \frac{5}{4 \cdot 505^2} = 4,901 \cdot 10^{-6} \text{ м}$$

Условия (7.14) и (7.15) выполняются ($505 \text{ Гц} > 244 \text{ Гц}$ и $4,901 \cdot 10^{-6} \text{ м} < 3 \cdot 10^{-4} \text{ м}$).

Следовательно, проектируемая печатная плата будет иметь достаточную усталостную прочность при гармонических вибрациях.

7.5 Расчет электромагнитной совместимости

В радиоэлектронных изделиях печатные проводники, электрически объединяющие те или иные элементы схемы, проходят на достаточно близком расстоянии друг от друга и имеют относительно малые размеры сечения. При большом времени переключения и малых тактовых частотах параметры печатных проводников, соединяющие входы одних элементов со входами других, не оказывают существенного воздействия на быстродействие всей схемы в целом и на помехоустойчивость элементов.

С уменьшением времени переключения (в микроэлектронных изделиях оно составляет единицы наносекунд) большое значение имеют степени влияния линий связи (сопротивления, емкости, индуктивности и т.д.) друг на друга (паразитная емкость, взаимоиндуктивность и т.д.). Постоянный ток в печатных проводниках распределяется равномерно по его сечению при условии, что материал проводника однороден и не имеет локальных посторонних включений других веществ.

Рассчитаем сопротивление проводника по формуле:

$$R = \rho \cdot l_n / (b \cdot t_n), \quad (7.16)$$

где ρ - удельное объемное электрическое сопротивление проводника,

$\rho = 0,0175$ мкОм/м – для медных проводников, полученных методом химического травления.

l_n – длина проводника, мм.

b – ширина проводника, мм.

t_n – толщина проводника, мкм

$$R = 0,0175 \cdot 45 / (0,5 \cdot 35) = 0,045 \text{ Ом}$$

Рассчитаем допустимый ток в печатном проводнике:

$$I_{max} = 10^{-3} \cdot \gamma_{дон} \cdot b \cdot t_n, \quad (7.17)$$

где $\gamma_{дон}$ – допустимая плотность тока, $\gamma_{дон} = 30$ А/мм² для проводников, полученных методом химического травления.

$$I_{max} = 10^{-3} \cdot 30 \cdot 0,5 \cdot 35 = 0,525 \text{ мА},$$

Далее найдем паразитные емкости и индуктивности печатного монтажа в наиболее критических местах печатной платы (см. рисунок 7.1).

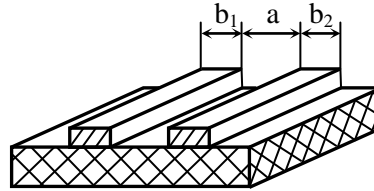


Рисунок 7.1 - Фрагмент печатной платы

Емкость, между двумя параллельными проводниками, расположенных на одной стороне платы, находится по формуле:

$$C = \frac{0.12 \xi_r l_n}{\lg \left[\frac{2a}{b + t_n} \right]} \quad (7.18)$$

где: ξ_r - диэлектрическая проницаемость среды между проводниками, расположенных на наружных поверхностях платы, покрытой лаком.

$$\xi_r = 0.5(\xi_{II} + \xi_{II}), \quad (7.19)$$

где ξ_n и ξ_n - диэлектрические проницаемости материала платы и лака (для стеклотекстолита $\xi_{II} = 6$, для лака ЭП $\xi_{II} = 4$)

$$\xi_r = 0.5(6 + 4) = 5.$$

l_n - длина участка, на котором проводники параллельны друг другу, мм ($l_n = 45$ мм);

b - ширина проводника, мм ($b = 0,5$ мм).

t_n - толщина проводника, мм ($t_n = 35$ мкм).

a - толщина диэлектрика, мм ($a = 0,5$ мм).

$$C = \frac{0,12 * 5 * 45 * 10^{-3}}{\lg \left[\frac{2 * 0,5 * 10^{-3}}{0,5 * 10^{-3} + 35 * 10^{-6}} \right]} \approx 0,1(n\Phi)$$

Собственная индуктивность печатного проводника:

$$L = 0,0002 \cdot l_n \cdot \left(\lg \frac{2 \cdot l_n}{t_n + b} + 0,2235 \frac{t_n + b}{l_n} + 0,5 \right) \quad (7.20)$$

$$L=0,0002 \cdot 45 \cdot \left(\lg \frac{2 \cdot 45}{35 \cdot 10^{-3} + 0,5} + 0,2235 \frac{35 \cdot 10^{-3} + 0,5}{45} + 0,5 \right) = 0,03 (\text{мкГн})$$

Индуктивность двух параллельных печатных проводников:

$$L=0,004 \cdot l_{\text{н}} \cdot \left(\lg \frac{a+b}{t_{\text{н}}+b} - \frac{a-b}{l_{\text{н}}} + 0,2235 \cdot \frac{t_{\text{н}}+b}{l_{\text{н}}} + 1,5 \right) \quad (7.21)$$

$$L=0,004 \cdot 45 \cdot \left(\lg \frac{0,5+0,5}{35 \cdot 10^{-3} + 0,5} - \frac{0,5-0,5}{45} + 0,2235 \cdot \frac{35 \cdot 10^{-3} + 0,5}{45} + 1,5 \right) = 0,32 (\text{мкГн})$$

7.6 Оценка теплового режима

Конструкция РЭА представляет собой систему тел с сосредоточенными источниками тепла. Получить аналитические решения в задачах теплообмена таких систем весьма сложно. Чтобы обеспечить возможность математического анализа, переходят от реальных конструкций к некоторым условным понятиям, заменяя эти конструкции тепловыми моделям.

Пространство, заполненное теплорассеивающими элементами, называют нагретой зоной. Реальное теплоотражающее пространство обычно имеет весьма неправильное расположение источников тепла.

Среднеповерхностная температура и перегрев этого пространства обозначаются соответственно Q_3 и U_3 . В тепловой модели реальная поверхность нагретой зоны заменяется изотермической поверхностью S_3 некоторого прямоугольного параллелепипеда с той же температурой и перегревом и с равномерно распределенными источниками тепла. Это - изотермическая поверхность эквивалентной нагретой зоны. Причем, если источник тепла заметно изменяется по высоте платы или условия теплообмена одной части платы резко отличаются от условий теплообмена другой части платы, то проводят более подробную разбивку.

Поверхность корпуса S_R в тепловой модели также заменяется изотермической поверхностью, имеющей среднеповерхностную температуру и перегрев Q_R и U_R . В результате введения тепловых моделей и понятия эквивалентной нагретой зоны становится возможным математическое описание процессов теплообмена РЭА и создание инженерных методик тепловых расчетов.

Расчет теплового режима РЭА проводим при следующих допущениях: конструкция разрабатываемого устройства не имеет теплонагруженных элементов и, как следствие, температурное поле распределено по плате равномерно.

Проводим расчет теплового режима устройства контроля параметров качества электрической энергии :

1. Определяем площадь поверхности корпуса:

$$S_K = 2 \cdot [L_1 \cdot L_2 + L_3 \cdot (L_1 + L_2)] \quad (7.23)$$

где L_1, L_2, L_3 - габаритные размеры блока.

$$L_1 = 159,5 \text{ мм}, L_2 = 98 \text{ мм}, L_3 = 24 \text{ мм}.$$

$$S_K = 2 \cdot [159,5 \cdot 98 + 24 \cdot (159,5 + 98)] = 44000 \text{ мм}^2 = 0,044 \text{ м}^2.$$

2. Определяем поверхность нагретой зоны:

$$S_3 = 2 \cdot [L_1 \cdot L_2 + K_3 \cdot L_3 \cdot (L_1 + L_2)], \quad (7.24)$$

где L_1, L_2, L_3 – размеры нагретой зоны;

K_3 – коэффициент заполнения. $K_3 = 0,5$.

$$S_3 = 2 \cdot [159,5 \cdot 98 + 0,5 \cdot 24 \cdot (159 + 98)] = 37000 \text{ мм}^2 = 0,037 \text{ м}^2.$$

3. Определяем удельную мощность рассеиваемую с поверхности нагретой зоны:

$$q_3 = \frac{P}{S_3}, \quad (7.25)$$

где P - мощность источников тепла, рассеиваемая в аппарате.

$$P = K_{\text{нагрузки}} \cdot P_{\text{потреб}}, \quad (7.26)$$

где $P_{\text{потреб}}$ - мощность потребляемая устройством;

$K_{\text{нагрузки}}$ - коэффициент нагрузки (0,4..0,8).

$$P = 0,5 \cdot 2,87 = 1,435.$$

$$q_3 = 1,435 / 0,03 = 38,439 \text{ Вт/м}^2.$$

4. Определяем удельную мощность, рассеиваемую поверхностью корпуса:

$$q_K = \frac{P}{S_K}, \quad (7.27)$$

$$q_K = 1,435 / 0,034 = 65,977 \text{ Вт/м}^2.$$

5. Определяем коэффициент, являющийся функцией удельной мощности корпуса:

$$Q_1 = 0,1472 \cdot q_K - 0,2962 \cdot 10^{-3} \cdot q_K^2 + 0,3127 \cdot 10^{-6} \cdot q_K^3, \quad (7.28)$$

$$Q_1 = 0,1472 \cdot 65,977 - 0,2962 \cdot 10^{-3} \cdot 65,977^2 + 0,3127 \cdot 10^{-6} \cdot 65,977^3 = 8,512.$$

6. Определяем коэффициент, являющийся функцией удельной мощности нагретой зоны:

$$Q_2 = 0,1390 \cdot q_3 - 0,1223 \cdot 10^{-3} \cdot q_3^2 + 0,0698 \cdot 10^{-6} \cdot q_3^3, \quad (7.29)$$

$$Q_2 = 0,1390 \cdot 38,439 - 0,1223 \cdot 10^{-3} \cdot 38,439^2 + 0,0698 \cdot 10^{-6} \cdot 38,439^3 = 8,994.$$

7. Находим коэффициент, зависящий от давления окружающей среды:

$$K_{H1} = 0,82 + \frac{1}{0,925 + 4,6 \cdot 10^{-5} \cdot H_1}, \quad (7.30)$$

где $H_1 = 10^5 \text{ Па}$ – давление окружающей среды.

$$K_{H1} = 0,82 + \frac{1}{0,925 + 4,6 \cdot 10^{-5} \cdot 10^5} = 1.$$

8. Определяем коэффициент, зависящий от давления внутри корпуса:

$$K_{H2} = 0,8 + \frac{1}{1,25 + 5,8 \cdot 10^{-5} \cdot H_2}, \quad (7.31)$$

где $H_2 = 10^5 \text{ Па}$ – давление внутри корпуса.

$$K_{H2} = 0,8 + \frac{1}{1,25 + 5,8 \cdot 10^{-5} \cdot 10^5} = 1.$$

9. Определяем перегрев корпуса:

$$Q_K = Q_1 \cdot K_{H1}, \quad (7.32)$$

$$Q_K = 8,512 \cdot 1 = 8,512^\circ\text{C}.$$

10. Определяем перегрев нагретой зоны:

$$Q_3 = Q_K + Q_2 - Q_1 \cdot K_{H2}, \quad (7.33)$$

$$Q_3 = 8,512 + (8,994 - 8,512) \cdot 1 = 8,994^\circ\text{C}.$$

11. Определяем температуру корпуса:

$$T_K = Q_K + T_C, \quad (7.34)$$

$$T_K = 8,512 + 40 = 48,512^\circ C.$$

где $T_C = 40^\circ C$ - верхнее значение температуры окружающей среды

14. Определяем температуру нагретой зоны:

$$T_3 = Q_3 + T_C, \quad (7.35)$$

$$T_3 = 8,994 + 40 = 48,994^\circ C.$$

Полученные результаты свидетельствуют о удачно проведенном тепловом расчете, т.к. расчетные числовые значения температур меньше предельно допустимых значений, обеспечивающих безотказную работу универсального измерительного прибора на микроконтроллере в течение заданного отрезка времени непрерывной работы.