

МОДЕЛЬ И МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЗМЕРОВ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ С УЧЕТОМ МНОЖЕСТВА ФАКТОРОВ

Ефименко А. А. – д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедры ЭСИКТ, Одесский национальный политехнический университет, Одесса, Украина.

Карлангач А. П. – ст. преп. кафедры ЭСИКТ, Одесский национальный политехнический университет, Одесса, Украина.

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Определение размеров печатных плат является важным этапом в процессе проектирования электронной и радиоэлектронной аппаратуры, т. к. от правильного их определения зависят как показатели качества и надежности функционирования, так и экономические, и эксплуатационные показатели. Несмотря на достаточное количество работ, посвященных этим вопросам, не существует методов, которые бы объективно учитывали все множество факторов, влияющих на размеры, и при этом были бы удобными для использования. Поэтому, на практике используется опыт разработчиков, а также известные требования и ограничения к проектируемой аппаратуре. Однако такой подход не приводит к оптимальным результатам при определении размеров печатных плат.

Целью работы является создание модели электронных модулей на основе печатных плат и метода для определения их размеров и, в частности, коэффициента заполнения с учетом множества действующих факторов и применения стандартных размеров печатных плат.

Метод. Метод определения размеров печатных плат учитывает влияние установочной площади электронных компонентов и коэффициента заполнения, который отличается тем, что установлена зависимость K_3 от размеров электронных компонентов и плотности их расположения на печатной плате, а также зависимость вводимого коэффициента пропорциональности от площади печатных плат при использовании их стандартных размеров.

Результаты. Создана модель электронных модулей на основе печатных плат и метод для определения их размеров, который позволяет с минимальными затратами определять размеры печатных плат на ранних стадиях проектирования в условиях ограниченных исходных данных, а также ограничений по типоразмерам печатных плат, устанавливаемых соответствующими стандартами и другими нормативными документами.

Выводы. В результате теоретических исследований решена важная научно-практическая проблема повышения эффективности проектирования печатных плат: получили дальнейшее развитие модель и метод определения размеров печатных плат с учетом множества факторов, определяющих их площадь и размеры. В основе метода лежит установленная зависимость между коэффициентом заполнения и установочной площадью электронных компонентов для разных значений плотности их расположения на печатной плате. Это позволяет с минимальными затратами времени определять размеры печатных плат. Также установлена взаимосвязь между площадью, необходимой для проектируемого электронного модуля и потерями, связанными с требованиями использования стандартных типоразмеров печатных плат и выраженными коэффициентом пропорциональности.

Практическая ценность полученных результатов состоит в их готовности к использованию разработчиками для определения размеров печатных плат, что продемонстрировано соответствующим примером.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: размеры печатных плат, компоновочные характеристики, электронный модуль, коэффициент заполнения.

АББРЕВИАТУРЫ

МКП – межкомпонентные промежутки;
МЭК – международная электротехническая комиссия;
ПП – печатная плата;
РЭА – радиоэлектронная аппаратура;
ЭА – электронная аппаратура;
ЭК – электронные компоненты;
ЭМС – электромагнитная совместимость.

НОМЕНКЛАТУРА

a – размеры межкомпонентных промежутков;
 k – количество типоразмеров ЭК;
 n – количество ЭК на печатной плате;
 n_i – количество ЭК i -го типоразмера;
 K_3 – коэффициент заполнения площади ПП электронными компонентами;
 $K_{МП}$ – коэффициент пропорциональности;
 $S_{ПП}$ – площадь печатной платы;

$S_{МКПi}$ – площадь межкомпонентного промежутка i -го ЭК;
 $S_{ППi}$ – площадь ПП промежуточного i -го типоразмера в пределах набора;
 $S_{ППст}$ – площадь ПП стандартного типоразмера;
 $S_{УСТ}$ – установочная площадь;
 $S_{ЭК}$ – площадь ЭК;
 S_{Σ} – площадь ЭК.

ВВЕДЕНИЕ

Для определения площади печатной платы, производными от которой являются ее размеры, используем графический метод компоновки [1], когда для его применения геометрические размеры элементов, в данном случае электронных компонентов (ЭК), представляют в виде числовых компоновочных характеристик, а именно их установочных площадей $S_{УСТi}$. Для упрощения определения $S_{УСТi}$ сложные формы ЭК, которые могут также дополняться элементами креп-

ления, охлаждения, экранирования и т. п. заменяют более простыми, как правило, прямоугольниками.

Исходя из этого, площадь ПП $S_{ПП}$ можно рассчитать, используя выражение (1):

$$S_{ПП} = \frac{\sum_{i=1}^n S_{устi}}{K_3}. \quad (1)$$

Расчет суммарной установочной площади электронных компонентов на печатный узел является обычной процедурой проектирования печатных плат (и соответственно печатных узлов) и не представляет никаких проблем. Совсем не так обстоит дело с установлением коэффициента заполнения. При всей кажущейся простоте вопроса это представляется достаточно сложной задачей, т.к. связано с учетом большого количества факторов, которые имеют свои особенности оценивания.

На самом деле не существует объективных методов определения K_3 и, обычно, используется опыт разработчиков, а также известные требования и ограничения к проектируемой аппаратуре. Однако такой подход не позволяет получить оптимальные результаты.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В основе определения размеров ПП, как было сказано выше, лежит вычисление их площади, необходимой для размещения электронных компонентов и их электрических соединений (трассировки).

К основным факторам, определяющим как площадь, так и размеры печатных плат, отнесем следующие:

- 1 – схема проектируемого узла (электронного модуля первого уровня);
- 2 – элементная база узла;
- 3 – количество размещаемых электронных компонентов на ПП;
- 4 – метод проектирования – функционально-узловой или другой;
- 5 – возможность расположения как одного, двух так и более функциональных устройств на одной печатной плате;
- 6 – функциональная емкость модуля;
- 7 – размеры стандартных ПП;
- 8 – требования ремонтпригодности, технологичности, теплового режима, ЭМС;
- 9 – назначение и область использования функционального узла: силовая электроника; НЧ-, ВЧ-, СВЧ-схемы; устройства с большим тепловыделением и повышенной прочностью.

Для создания модели электронных модулей формализуем представленные факторы.

Первый, второй и третий из них в совокупности можно выразить суммарной установочной площадью электронных компонентов модуля $\sum S_{устi}$.

Метод проектирования 4, возможность расположения определенного количества функциональных устройств на ПП 5 и функциональную емкость моду-

ля 6 в совокупности представим коэффициентом пропорциональности $K_{МП}$.

Размеры стандартных ПП 7 удобно представить их площадью – $S_{ПП}$.

Ремонтпригодность, технологичность, тепловой режим, ЭМС 8 представим коэффициентом заполнения K_3 , при этом следует иметь в виду, что чем эти показатели выше, тем меньше должен быть коэффициент заполнения.

Назначение и область использования функциональных узлов 9 определяют специфику их построения и отражаются в конструктивном исполнении, что в конечном счете выражается различными значениями коэффициентов заполнения и пропорциональности. Таким образом, с целью достижения требуемой адекватности моделей ПП эти коэффициенты следует рассматривать отдельно.

Используя имеющиеся данные, формулу (1) преобразуем к такому виду, который более полно отражает приведенные выше факторы:

$$S_{ПП} = \frac{\sum_{i=1}^n S_{устi}}{K_3} \cdot K_{МП}. \quad (2)$$

Таким образом, чтобы рассчитать площадь, а затем размеры печатной платы проектируемого электронного модуля, необходимо определить коэффициенты заполнения и пропорциональности. Метод для их определения должен быть простым в использовании и носить объективный характер.

2 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Вопросам расчета размеров и площади ПП уделяется внимание в целом ряде работ.

Так, в [2], для расчета площади печатных плат используется формула, в которой коэффициент, аналогичный коэффициенту заполнения, представлен таким, который может принимать значения от 1 до 3. Коэффициент зависит от назначения и условий эксплуатации аппаратуры, но не представлены зависимости, которые позволяли бы определять его значения для конкретных условий.

В работе [3] расчетная площадь ПП, необходимая для расположения n -го количества ЭК определяется как отношение суммарной установочной площади ЭК и коэффициенту заполнения, который представлен как $K_3 \approx 0,6-0,7$ без конкретизации его определения или условий выбора.

Аналогично представлен вопрос расчета площади ПП в [4]. Здесь также используется коэффициент заполнения ($K_3 \approx 0,6-0,7$) без формализации его применения.

Разработанный метод [5] позволяет оперативно определять зависимости коэффициента заполнения от размеров печатных плат для элементной базы, характерной электронным средствам различных направлений техники. Однако, он пригоден для частных задач поиска оптимальных размеров ПП для НК электронных средств.

Вопросам определения размеров печатных плат посвящены и другие работы [6–12]. Однако, это рассмотрение отдельных частных вопросов, не носящих системного характера определения размеров печатных плат.

В данной статье разработан метод, позволяющий определять размеры ПП с учетом множества факторов и использования стандартных размеров ПП.

3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Определим коэффициент заполнения ПП. Значение коэффициента заполнения печатной платы определяется целым рядом рассмотренных выше факторов, но определяющими являются размеры электронных компонентов и величины МКП, с которыми электронные компоненты устанавливаются на ПП и которые косвенно выражают требования ремонтпригодности, технологичности, теплового режима, ЭМС.

Величина МКП может устанавливаться разработчиком печатной платы, исходя из технических требований, в первую очередь, выполнения электрических соединений, обеспечения теплового режима и электромагнитной совместимости. На рис. 1 приведен фрагмент ПП с расположенным ЭК. Здесь ЭК представлен его площадью $S_{ЭК}$, а межкомпонентные промежутки – соответственно площадью межкомпонентных промежутков $S_{МКП}$.

В соответствии представленной модели печатного узла площадь печатной платы можно определить по формуле (1). Если допустить, что на ПП потери площади определяются сугубо межкомпонентными промежутками, то можно представить другую зависимость для определения площади печатной платы:

$$S_{ПП} = \sum_{i=1}^n (S_{УСТi} + S_{МКПi}). \quad (3)$$

Приравниваем правые части (1) и (3):

$$\frac{\sum_{i=1}^n S_{УСТi}}{K_3} = \sum_{i=1}^n (S_{УСТi} + S_{МКПi}) = \sum_{i=1}^n S_{УСТi} + \sum_{i=1}^n S_{МКПi}.$$

Отсюда получаем выражение для определения коэффициента заполнения:

$$K_3 = \frac{\sum_{i=1}^n S_{УСТi}}{\sum_{i=1}^n S_{УСТi} + \sum_{i=1}^n S_{МКПi}}. \quad (4)$$

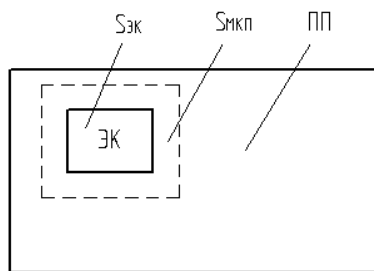


Рисунок 1 – Модель печатного узла

Таким образом, площадь ПП зависит как от размеров электронных компонентов, так и от задаваемых межкомпонентных промежутков. Используя выражение (4), можем получить искомую зависимость K_3 от размеров ЭК с учетом задаваемых МКП.

Для этого, наряду с изменением установочной площади ЭК, что характеризует размеры самих электронных компонентов, будем изменять размеры промежутков между ними. Размеры межкомпонентных промежутков a установим одинаковыми со всех сторон для всех типоразмеров ЭК, при этом их площадь $S_{МКП}$ будет разной, т.к. зависит от размеров ЭК. Таким образом, каждый электронный компонент представим в виде суммарной площади:

$$S_{\Sigma i} = S_{УСТi} + S_{МКПi}. \quad (5)$$

Для лучшего представления рассмотрим это на примере двух электронных компонентов (рис.2).

Получаем следующие площади ЭК с межкомпонентными промежутками для двух их значений размеров a :

ЭК1: $S_{УСТ1}=16 \text{ мм}^2$; $S_{\Sigma1}= 36 \text{ мм}^2$ ($a_1=1 \text{ мм}$); $S_{\Sigma1} = 64 \text{ мм}^2$ ($a_2=2 \text{ мм}$);

ЭК2: $S_{УСТ2}= 64 \text{ мм}^2$; $S_{\Sigma2}= 100 \text{ мм}^2$ ($a_1=1 \text{ мм}$); $S_{\Sigma2}= 144 \text{ мм}^2$ ($a_2=2 \text{ мм}$).

Произведем расчет K_3 по формуле (4) для печатной платы размером $100 \times 100 \text{ мм}$. С целью упрощения расчетов примем следующие допущения:

- введение МКП позволяет заполнять площадь ПП со стопроцентной плотностью, т.е. без других дополнительных потерь;
- ПП комплектуется электронными компонентами одного типоразмера.

С учетом этих допущений можем определить максимальное количество электронных компонентов, размещаемых на печатной плате:

$$n = S_{ПП} / S_{\Sigma i}, \quad (6)$$

где площадь ПП $S_{ПП} = 10000 \text{ мм}^2$.

Количество ЭК необходимо для определения их суммарной установочной площади $\sum S_{УСТi}$. Суммарная установочная площадь ЭК с межкомпонентными промежутками $S_{\Sigma i}$ при принятом допущении совпадает с площадью самой печатной платы.

Результаты расчетов сведем в табл. 1.

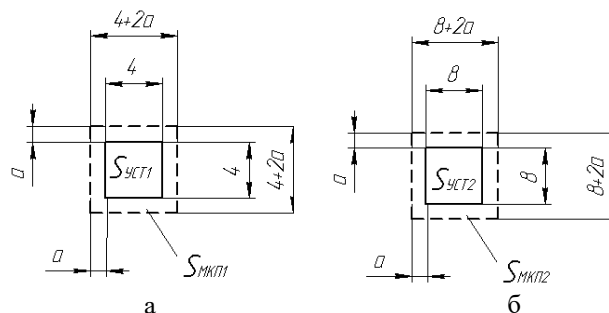


Рисунок 2 – Электронные компоненты с размерами $a - 4 \times 4 \text{ мм}$ и $b - 8 \times 8 \text{ мм}$

Таблиця 1.

Типорозмер ЭК	n для МКП		$\Sigma S_{уст}$, мм ² для МКП		K_3 для МКП	
	a_1	a_2	a_1	a_2	a_1	a_2
ЭК1	278	156	4448	2496	0,44	0,25
ЭК2	100	70	6400	4480	0,64	0,45

Из примера видно, что проявляется зависимость K_3 от размеров ЭК, которую можно использовать для достижения цели работы – формализации определения размеров печатных плат. Этой же цели служит и установление зависимости K_3 от размеров МКП для различных типоразмеров ЭК, которая также явно прослеживается.

4 ЭКСПЕРИМЕНТЫ

С целью получения зависимостей K_3 от установочной площади электронных компонентов проведем более полные исследования для таких значений переменных и ограничений:

– размеры межкомпонентных промежутков, мм: $a = \{0,5; 1; 1,5; 2; 3; 5\}$;

– размеры электронных компонентов, мм: $1 \times 1; 2 \times 2; 4 \times 4; 7 \times 7; 10 \times 10; 15 \times 15; 20 \times 20; 30 \times 30; 40 \times 40$;

– размеры ПП, мм: $100 \times 100; 100 \times 220; 144,45 \times 280; 188,9 \times 280; 500 \times 500$. Размеры печатных плат, кроме последнего, соответствуют стандарту МЭК 60297 [6, 7].

Ниже на рисунках 3–7 приведены полученные зависимости K_3 от установочной площади электронных компонентов с учетом приведенных ограничений. Здесь цифрами 1–6 обозначены зависимости, соответствующие МКП, равным 0,5 мм; 1 мм; 1,5 мм; 2 мм; 3 мм; 5 мм.

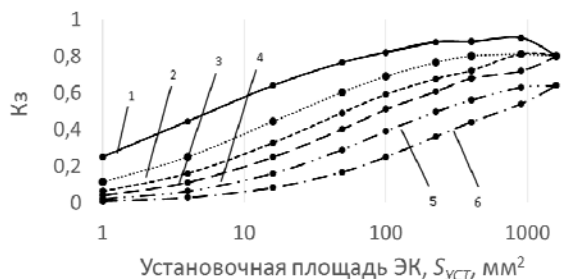


Рисунок 3 – Зависимости K_3 для ПП размером 100×100 мм

Приведенные зависимости не имеют важного практического значения по причине принятого ранее допущения о компоновке печатных плат ЭК одного типоразмера, что на практике является частным случаем, притом довольно редким. Однако они позволяют проследить тенденции изменений K_3 от установочной площади ЭК, величины МКП и размеров ПП.

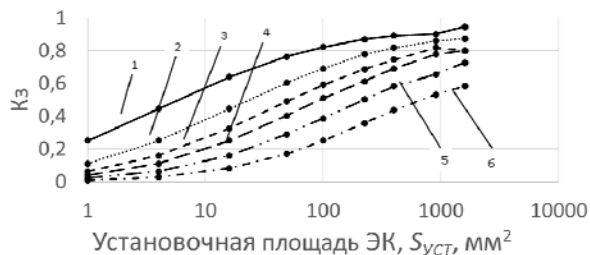


Рисунок 4 – Зависимости K_3 для ПП размером 100×220 мм

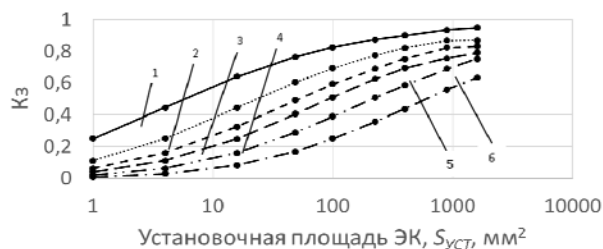


Рисунок 5 – Зависимости K_3 для ПП размером $144,45 \times 280$ мм

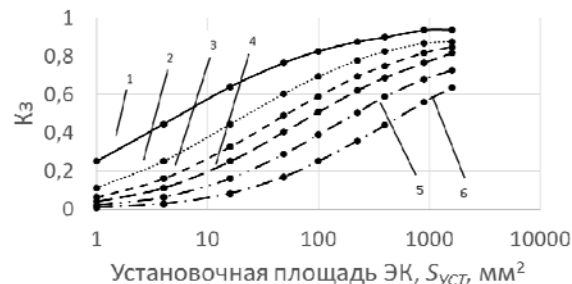


Рисунок 6 – Зависимости K_3 для ПП размером $188,9 \times 280$ мм

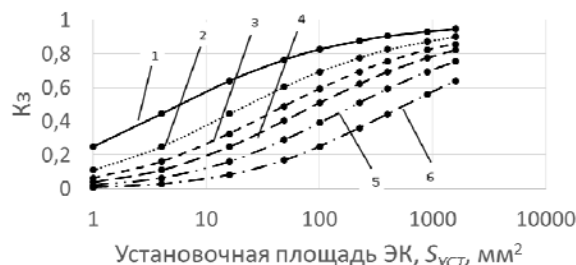


Рисунок 7 – Зависимости K_3 для ПП размером 500×500 мм

Анализируя их, можно сделать вывод, что на зависимости коэффициента заполнения от установочной площади ЭК практически не влияет размер ПП. Исключение составляет комбинация таких конструктивных исходных данных – минимальный размер ПП и максимальный типоразмер электронного компонента (рис. 3). Эта комбинация может быть крайне редкой, поэтому в дальнейшем не будем рассматривать влияние размеров ПП на зависимость K_3 от установочной площади ЭК.

В реальных условиях на ПП располагается множество типоразмеров ЭК. С практической точки зрения необходимо получить зависимости K_3 именно от установочной площади множества электронных компонентов, возможных для установки на печатных платах.

Для реализации таких зависимостей нужен другой подход.

Предлагается для реального печатного узла коэффициент заполнения определять по средним значениям установочной площади $S_{уст\text{ср}}$ и суммарной площади $S_{\Sigma\text{ср}}$ электронных компонентов. С этой целью формулу (4) с учетом зависимости (5) представим в следующем виде:

$$K_3 = \frac{S_{уст\text{ср}}}{S_{\Sigma\text{ср}}} \quad (7)$$

Для моделирования печатных плат с целью определения коэффициента заполнения будем брать множества наборов ЭК из девяти ранее приведенных типоразмеров.

Соответственно определяем входящие в эту формулу средние значения площадей:

$$S_{устр} = \frac{1}{n} (S_{уст1} \cdot n_1 + \dots + S_{устi} \cdot n_i + \dots + S_{устk} \cdot n_k) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^k (S_{устi} \cdot n_i)_j, \quad (8)$$

$$n = \sum_{j=1}^k n_{ij},$$

$$S_{\Sigma ср} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{j=1}^k (S_{\Sigma i} \cdot n_i)_j. \quad (9)$$

Определяем зависимости коэффициента заполнения от средней площади набора ЭК для каждого МКП. Для получения аналитической зависимости проводим аппроксимацию этих данных. Для этого используем полиномиальную линию тренда пакета Microsoft Office Excel.

Определим коэффициент пропорциональности. Коэффициент пропорциональности, как определено было выше, зависит от следующих факторов:

- метода проектирования. Это наиболее часто применяемый в современных условиях функционально-узловой метод или другой, который не связан требованиями функциональной законченности, но в то же время должен обеспечивать конструктивную законченность электронных модулей. Второй метод будем называть просто узловым;

- количества функциональных узлов на одной ПП;
- функциональной емкости электронного модуля на основе печатной платы.

Второй и третий факторы по сути выражают одно и то же, при этом второй фактор является таким, который легко формализуется, поэтому ограничимся только им.

Если используется просто узловой метод без соблюдения требований функциональной законченности, то даже при наличии стандартных размеров ПП их можно компоновать электронными компонентами, представляющими часть функционально законченного узла или нескольких узлов в комбинации функционально законченных и незаконченных. В этом случае можно считать, что существенных ограничений для максимально эффективного заполнения печатных

плат электронными компонентами нет и соответственно принять $K_{МП} = 1$.

Другое дело соблюдение функциональной и конструктивной законченности, т.е. когда требуется выполнять компоновку функционально законченных узлов на ПП стандартных размеров. Суть проблемы заключается в том, что практически всегда неизбежны потери площади ПП, связанные с наличием противоречия – с одной стороны, набор ЭК, определяемый схемой электрической принципиальной и перечнем элементов, с другой – стандартные размеры печатных плат. И то, и другое изменять нельзя. В результате, в общем случае, получаем неполное заполнение площади печатной платы. Как определить $K_{МП}$, выражающий эти потери?

Предлагается сделать это следующим образом: в промежутках между стандартными значениями размеров ПП [13, 14] (см. табл. 2) равномерно установить промежуточные значения размеров по группам. Под группой следует понимать набор типоразмеров ПП, для которого ближайшим большим является один и тот же стандартный типоразмер. Путем сравнения промежуточных и стандартных размеров можем получить значения коэффициента пропорциональности. Учитывая тот факт, что сравнение удобнее проводить не по размерам, а по площадям, используем следующую зависимость для определения коэффициента пропорциональности:

$$K_{МПi} = \frac{S_{ППстр}}{S_{ППi}}. \quad (10)$$

В табл. 3 и табл. 4, соответственно по стандартам МЭК 60297 и 60917, приведены исходные данные и результаты расчета коэффициента пропорциональности по формуле (10) для наборов промежуточных размеров ПП относительно некоторых стандартных типоразмеров печатных плат.

5 РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты аппроксимации и полученные зависимости коэффициента заполнения от средней площади набора ЭК для каждого МКП приведены в табл. 5 и на рис. 8 в виде кривых 1–6.

Результаты проведенных экспериментов по определению коэффициента пропорциональности для наглядности восприятия табличной информации представлены на рис. 9 и 10 (соответственно по стандартам МЭК 60297 и 60917). На них изображены зависимости коэффициента пропорциональности от площади печатных плат.

Таблица 2.

Размеры стандартных ПП по МЭК 60297, мм	55,55×100	100×100	100×160	100×220	144,45×160	144,45×220	144,45×280	188,9×160
	188,9×220	188,9×280	233,35×160	233,35×220	233,35×280	322,25×160	322,25×220	322,25×280
Размеры стандартных ПП по МЭК 60917, мм	411,15×160	411,15×220	411,15×280	500,05×220	500,05×280			
	500,05×160	115×160	115×235	115×285	265×115	265×160	265×235	265×285
	415×160	415×235	415×285	565×160	565×235	565×285		

Таблиця 3.

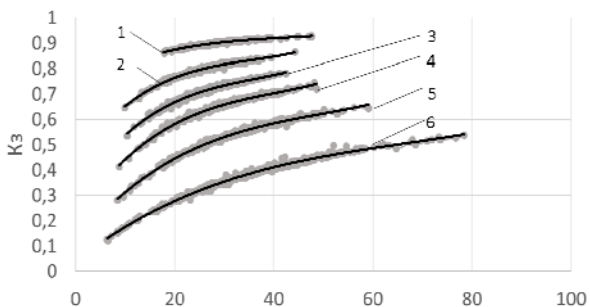
Обозначение типоразмера стандартной ПП	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Размеры стандартных ПП по МЭК 60297, мм	100 × 160	100 × 220	144,45 × 160	233,35 × 160	188,9 × 220	233,35 × 220	411,15 × 160	500,05 × 160	411,15 × 220	500,05 × 220
Площадь стандартной ПП, см ²	160	220	302,2	373,4	415,6	513,4	657,8	800,1	904,5	1100
Площадь промежуточных типоразмеров ПП и коэффициент пропорциональности (K _{мп})	160 (1)	220 (1)	302,2 (1)	373 (1)	415,6 (1)	513,4 (1)	657,8 (1)	800,1 (1)	904,5 (1)	1100 (1)
	150 (1,07)	210 (1,05)	300 (1,01)	370 (1,01)	410 (1,01)	510 (1,01)	650 (1,01)	790 (1,01)	900 (1,01)	1080 (1,02)
	140 (1,14)	200 (1,1)	290 (1,04)	360 (1,04)	400 (1,04)	500 (1,03)	640 (1,03)	780 (1,03)	890 (1,02)	1060 (1,04)
	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
	110 (1,45)	170 (1,29)	230 (1,31)	310 (1,2)	380 (1,1)	420 (1,22)	520 (1,17)	660 (1,21)	810 (1,12)	910 (1,25)

Таблиця 4.

Обозначение типоразмера стандартной ПП	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Размеры стандартных ПП по МЭК 60917, мм	115 × 160	115 × 235	115 × 285	265 × 160	265 × 235	415 × 160	265 × 285	565 × 160	415 × 235	565 × 235
Площадь стандартных ПП, см ²	184	270	327,7	420	620	664	755	904	975,2	1328
Площадь промежуточных типоразмеров ПП и коэффициент пропорциональности (K _{мп})	184 (1)	270 (1)	327,7 (1)	420 (1)	620 (1)	664 (1)	755 (1)	904 (1)	975,2 (1)	1328 (1)
	180 (1,02)	260 (1,04)	320 (1,02)	410 (1,03)	600 (1,04)	660 (1,01)	750 (1,01)	900 (1,004)	970 (1,01)	1320 (1,01)
	170 (1,08)	250 (1,08)	310 (1,06)	400 (1,06)	580 (1,07)	650 (1,02)	740 (1,02)	880 (1,03)	960 (1,02)	1300 (1,02)
	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
	130 (1,42)	190 (1,42)	280 (1,17)	330 (1,28)	430 (1,35)	630 (1,05)	670 (1,13)	760 (1,19)	910 (1,08)	1200 (1,11)

Таблиця 5.

Кривая на графике	МКП, мм	Уравнение аппроксимации
1	0,5	$y = 2 \cdot 10^{-6} \cdot x^3 - 0,0002 \cdot x^2 + 0,0117 \cdot x + 0,7225$
2	1	$y = 3 \cdot 10^{-6} \cdot x^3 - 0,0005 \cdot x^2 + 0,0215 \cdot x + 0,4878$
3	1,5	$y = 3 \cdot 10^{-6} \cdot x^3 - 0,0005 \cdot x^2 + 0,0237 \cdot x + 0,3538$
4	2	$y = 5 \cdot 10^{-6} \cdot x^3 - 0,0006 \cdot x^2 + 0,0292 \cdot x + 0,2081$
5	3	$y = 3 \cdot 10^{-6} \cdot x^3 - 0,0004 \cdot x^2 + 0,0233 \cdot x + 0,1166$
6	5	$y = 9 \cdot 10^{-7} \cdot x^3 - 0,0002 \cdot x^2 + 0,015 \cdot x + 0,0426$



Средняя установочная площадь наборов ЭК, мм²

Рисунок 8 – Графики зависимости коэффициента заполнения от средней площади ЭК (1, 2, 3, 4, 5 и 6 – кривые аппроксимации для МКП 0,5; 1; 1,5; 2; 3 и 5 мм соответственно)

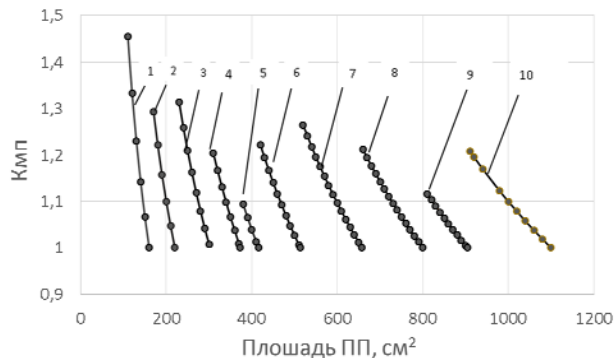


Рисунок 9 – Зависимости K_{мп} от площади ПП в диапазоне стандартных типоразмеров 1–10, соответствующих публикации МЭК 60297

В дополнение следует отметить, что объединение двух и более функционально-законченных узлов на одной печатной плате может существенно изменить ее заполняемость, как в сторону улучшения, так и ухудшения, что количественно будет определяться значением коэффициента пропорциональности.

В таком случае K_{мп} определяется аналогично, при этом объединение представляется как увеличения суммарной установочной площади электронных компонентов, соответствующей объединению узлов.

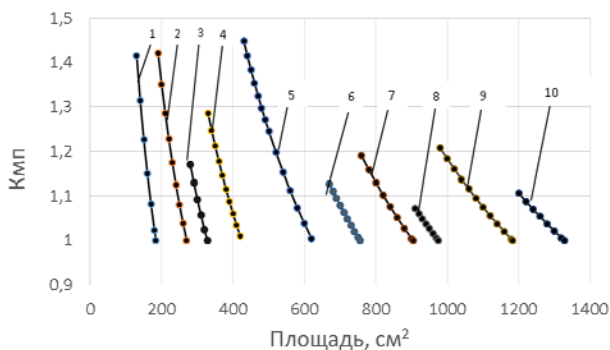


Рисунок 10 – Залежності $K_{МП}$ від площі ПП в діапазоні стандартних типорозмірів 1–10, відповідних публікації МЭК 60917

Рассмотрим пример использования предложенного метода определения размеров печатной платы.

Исходными данными является схема электрическая принципиальная электронного модуля с перечнем элементов и соответственно установочные размеры электронных компонентов $S_{уст}$.

Размеры печатной платы являются производными от площади ПП, которая определяется по формуле (2). Для этого выполняем следующие действия.

1. Определяем суммарную установочную площадь электронных компонентов. Допустим, $\Sigma S_{устi} = 290 \text{ см}^2$.

2. Определяем коэффициент заполнения по графикам на рис.8 или, более точно, по формулам в табл. 5. Для этого необходимо принять величину межкомпонентного промежутка. Допустим $a = 2 \text{ мм}$, которому соответствует уравнение 4 для определения u , выражающего K_3 . Для расчета необходимо определить значение x – среднюю установочную площадь наборов электронных компонентов $S_{устер}$ по формуле (8). Допустим, $x = 20 \text{ мм}$. В результате расчета получаем $K_3 = 0,592$.

Если нет требований по использованию стандартного размера ПП, то по формуле (1) определяем площадь печатной платы, которая равна $S_{ПП} = 489,9 \text{ см}^2$ и используется для определения размеров ПП.

3. Если есть требование по использованию стандартного размера печатной платы, то необходимо выбрать ближайшую большую площадь таковой и соответственно размеры.

В данном примере такая площадь равна $S_{ППст} = 513,4 \text{ см}^2$, которой соответствуют стандартные размеры ПП: $(233,35 \times 220) \text{ мм}$ (табл. 3).

4. Используя табл. 3, определяем значение коэффициента пропорциональности, характеризующего потери площади ПП, который в данном случае равен $K_{МП} = 1,05$.

6 ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные результаты в виде зависимостей коэффициента заполнения K_3 (табл. 5, рис. 8) позволяют определять этот коэффициент для расчета площади печатных плат с учетом плотности расположения электронных компонентов, задаваемой величиной межкомпонентных промежутков, и размеров электронных компонентов, представляемых их средней

установочной площадью. Для сравнения, в других работах коэффициент заполнения рекомендуется принимать в определенных пределах значений без обоснования и привязки к внешним факторам, что существенно влияет на показатели точности определения размеров ПП.

Полученные результаты по определению коэффициента пропорциональности $K_{МП}$ (рис. 9, 10) предложены впервые и ранее в других работах в части его учета для определения потерь площади ПП, связанной с использованием стандартных размеров печатных плат, не рассматривались. Кроме того, использование $K_{МП}$ позволяет повысить эффективность установления стандартных размеров ПП.

ВЫВОДЫ

В работе решена задача определения размеров печатных плат с учетом ряда факторов. **Научная новизна** полученных результатов состоит в следующем:

1. Получили дальнейшее развитие модель электронных модулей на основе печатных плат и метод для определения их размеров, в основе которого лежит установленная зависимость между коэффициентом заполнения K_3 и установочной площадью электронных компонентов для разных значений плотности их расположения на печатной плате, что позволяет с минимальными затратами времени и повышением достоверности результатов определять размеры ПП на ранних стадиях проектирования в условиях ограниченных исходных данных.

2. Впервые посредством коэффициента пропорциональности $K_{МП}$ установлена взаимосвязь между площадью, необходимой для проектируемого электронного модуля и потерями, связанными с выполнением требований стандартизации размеров печатных плат, что дает возможность рационально подходить к определению их размеров и обеспечению технологичности.

Практическая ценность предлагаемых решений состоит в их готовности к использованию на предприятиях, которые занимаются разработкой и производством электронной и радиоэлектронной аппаратуры, а также в учебном процессе университетов по соответствующим специальностям.

Перспективы дальнейших исследований. В рассматриваемом направлении для повышения эффективности проектирования печатных плат и узлов целесообразно продолжить исследования по таким вопросам:

1. Получение зависимостей коэффициента заполнения от средней площади электронных компонентов для других значений межкомпонентных промежутков.

2. Разработка метода, позволяющего на ранних стадиях проектирования ПП определять класс точности и количество слоев печатных плат.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность Лазареву С. за разработку программного обеспечения, с помощью которого исследованы выведенные зависимости и получены необходимые расчеты и результаты.

ЛИТЕРАТУРА / LITERATURE

1. Яншин А. А. Теоретические основы конструирования, технологии и надежности ЭВА / А. А. Яншин. – М. : Радио и связь, 1983. – 312 с.
2. Пирогова Е. В. Проектирование и технология печатных плат : учебник / Е. В. Пирогова. – М. : ФОРУМ: ИНФРА-М, 2005. – 560 с. ISBN 5-8199-0138-X. – ISBN 5-16-001999-5.
3. Основы проектирования электронных средств. Версия 1.0 [Электронный ресурс]: конспект лекций / [С. И. Трегубов, А. В. Сарафанов, А. А. Левицкий, В. Ю. Божко]. – Красноярск : ИПК СФУ, 2008. ISBN 978-5-7638-1351-7
4. Кофанов Ю. Н. Автоматизация проектирования ЭЭС. Топологическое проектирования печатных плат. Версия 1.0 [Электронный ресурс]: электрон. учеб. пособие / Ю. Н. Кофанов, А. В. Сарафанов, С. И. Трегубов. – Красноярск : ИПК СФУ, 2008. ISBN 978-5-7638-1350-0
5. Ефименко А. А. Поиск оптимальных размеров печатных плат для несущих конструкций электронных средств / А. А. Ефименко, А. П. Карлангач, С. Н. Лазарев // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2014. – № 5–6. – С. 3–9. DOI: 10.15222/ТКЕА2014.5-6.03
6. Petherbridge K. The origins and evolution of the PCB: a review / K. Petherbridge, P. Evans, D. Harrison // Circuit World. – 2005. – Vol. 31, No. 1. – P. 41–45. <https://doi.org/10.1108/03056120510553211>
7. Ефименко А. А. Анализ несущих конструкций 19-двоймовой и метрической систем для электронных средств / А. А. Ефименко, А. П. Карлангач // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2015. – № 5–6. – С. 9–13. DOI: 10.15222/ТКЕА2015.5-6.09
8. Tan Yan Recent research development in PCB layout / Tan Yan, Martin D. F. Wong // 2010 IEEE/ACM International Conference on Computer-Aided Design (ICCAD). – San Jose, CA, USA. – 7–11 Nov. 2010. DOI: 10.1109/ICCAD.2010.5654190
9. Ефименко А. А. Несущие конструкции с повышенными компоновочными характеристиками / А. А. Ефименко, А. П. Карлангач // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2016. – № 4–5. – С. 23–27. DOI: 10.15222/ТКЕА2016.4-5.23
10. Downsizing an automotive junction box based on large current-carrying printed-circuit board optimization / [Lim Hansang, Jung Do-Hwan, Kwon Geono et al.] // First Published July 21, 2016
Research Article
<https://doi.org/10.1177/0954407016657498>
11. Ефименко А. А. Проектування електронних модулів із гнучкою структурою друкованих плат / А. А. Ефименко, О. П. Карлангач, В. В. Сконечний // Вчені записки Таврійського національного університету ім. В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки. – 2018. – Том 29 (68), № 1, Частина 1. – С. 32–39.
12. Embedded passive components and PCB size – thermal effects / [Stubbs D. M., Pulko S. H., Wilkinson A. J. et al.] // Microelectronics International. – 2000. – Vol. 17, No. 2. – P. 7–10. <https://doi.org/10.1108/13565360010332372>
13. IEC 60297-3-101(2004) Mechanical structures for electronic equipment – Dimensions of mechanical structures of the 482,6 mm (19 in) series – Part 3–101: Subracks and associated plug-in units.
14. IEC 60917-2-2(1994). Modular order for the development of mechanical structures for electronic equipment practices – Part 2: Sectional specification; interface co-ordination dimensions for the 25 mm equipment practice; section 2: Detail specification; dimensions for subracks, chassis, backplanes, front panels and plug-in units.

Received 29.05.2019.
Accepted 17.02.2020.

УДК 621.38.001.66

МОДЕЛЬ І МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ РОЗМІРІВ ДРУКОВАНИХ ПЛАТ З УРАХУВАННЯМ БЕЗЛІЧІ ФАКТОРІВ

Ефименко А. А. – д-р техн. наук, доцент, завідувач кафедри ЕЗІКТ, Одеський національний політехнічний університет, Одеса, Україна.

Карлангач О. П. – ст. викл. кафедри ЕЗІКТ, Одеський національний політехнічний університет, Одеса, Україна.

АНОТАЦІЯ

Актуальність. Визначення розмірів друкованих плат є важливим етапом в процесі проектування електронної та радіоелектронної апаратури, так як від правильного їх визначення залежать як показники якості і надійності функціонування, так і економічні та експлуатаційні показники. Незважаючи на достатню кількість робіт, присвячених цим питанням, не існує методів, які б об'єктивно враховували всю безліч факторів, що впливають на розміри, і при цьому були б зручними для використання. Тому, на практиці використовується досвід розробників, а також відомі вимоги та обмеження до проектованої апаратури. Однак такий підхід не призводить до оптимальних результатів при визначенні розмірів друкованих плат.

Метою роботи є створення моделі електронних модулів на основі друкованих плат і методу для визначення їх розмірів, і, зокрема коефіцієнта заповнення, з урахуванням безлічі діючих факторів і застосування стандартних розмірів друкованих плат.

Метод. Метод визначення розмірів друкованих плат враховує вплив установлювальної площі електронних компонентів і коефіцієнта заповнення, який відрізняється тим, що встановлена залежність K_3 від розмірів електронних компонентів і площі їх розташування на друкованій платі, а також залежність вводимого коефіцієнта пропорційності від площі друкованих плат при використанні їх стандартних розмірів.

Результати. Створена модель електронних модулів на основі друкованих плат і методу для визначення їх розмірів, який дозволяє з мінімальними витратами визначати розміри друкованих плат на ранніх стадіях проектування в умовах обмежених вихідних даних, а також обмежень по типорозмірах друкованих плат, що встановлюються відповідними стандартами та іншими нормативними документами.

Висновки. В результаті теоретичних досліджень вирішена важлива науково-практична проблема підвищення ефективності проектування друкованих плат: отримали подальший розвиток модель і метод визначення розмірів друкованих плат з урахуванням безлічі факторів, що визначають їх площу і розміри. В основі методу лежить встановлена залежність між коефіцієнтом заповнення і установлювальною площею електронних компонентів для різних значень щільності їх розташування на друкованій платі. Це дозволяє з мінімальними витратами часу визначати розміри друкованих плат. Також встановлений взаємозв'язок між площею, необхідною для проектованого електронного модуля і витратами, пов'язаними з вимогами використання стандартних типорозмірів друкованих плат і вираженими коефіцієнтом пропорційності.

Практична цінність отриманих результатів полягає в їх готовності до використання розробниками для визначення розмірів друкованих плат, що продемонстровано відповідним прикладом.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: розміри друкованих плат, компоновальні характеристики, електронний модуль, коефіцієнт заповнення.

UDC 621.38.001.66

MODEL AND METHOD OF DETERMINATION PCB SIZES ACCOUNTING MANY FACTORS

Yefimenko A. A. – Dr. Sc., Associate Professor, Head of ESICT Department, Odessa National Polytechnic University, Odessa, Ukraine.

Karlangach A. P. – Senior Lecturer of ESICT Department, Odessa National Polytechnic University, Odessa, Ukraine.

ABSTRACT

Context. The determination of the size of printed circuit boards is an important step in the design process of electronic and radio-electronic equipment, since its correct determination affects on both characteristics of quality and operational reliability, as well as economic and performance characteristics. In spite of multitude works devoted to these questions, there are no methods that objectively consider all multitude factors that affect the sizes, and at the same time are convenient to use. Therefore, in practice, the experience of developers is used, as well as the well-known requirements and limitations for the designed equipment. However, this approach does not lead to optimal results when determining the dimensions of printed circuit boards.

Objective. The aim of the work is to create a model of electronic modules based on printed circuit boards and a method for determining their sizes, and in particular fill factor, taking into account multitude acting factors and the application of standard sizes of printed circuit boards.

The method for determining the size of PCBs takes into account the influence of the installation area of electronic components and the duty cycle, which is distinguished by the fact that the dependence of the short circuit on the dimensions of electronic components and their density on the printed circuit board is established, as well as the dependence of the input proportionality coefficient on the area of printed circuit boards when using their standard sizes.

Results. Created the model of electronic modules based on printed circuit boards and a method for determining their sizes, which allows with minimum costs to determine the size of printed circuit boards at an early stages of design with limited initial data, as well as restrictions on the standard sizes of printed circuit boards established by corresponding standards and other regulatory documents.

Conclusions. As a result of theoretical studies was solved an important scientific and practical problem of increasing the efficiency of printed circuit boards design: the model and method for determining the dimensions of printed circuit boards were further developed taking into account many factors determining their area and sizes. The method are based on the established dependency between the fill factor and the installation area of electronic components for different values of the density of their placement on the printed circuit board. This allows to determine the size of printed circuit boards with minimal time.

Interconnection has also been established between the area required for the designed electronic module and the losses associated with the requirements for using standard types of printed circuit boards and expressed by the coefficient of proportionality.

The practical value of the got results is in their readiness for use by developers to determine the size of printed circuit boards that is demonstrated by the corresponding example.

KEYWORDS: PCB size, layout characteristics, electronic module, fill factor.

REFERENCES

1. Yanshin A. A. Teoreticheskie osnovy konstruirovaniya, tehnologii i nadezhnosti EVA. Moscow, Radio i svyaz, 1983, 312 p.
2. Pirogova E. V. Proektirovanie i tehnologiya pechatnyh plat: Uchebnik. Moscow, FORUM, INFRA-M, 2005, 560 p. ISBN 5-8199-0138-X. – ISBN 5-16-001999-5
3. Tregubov S. I., Sarafanov A. V., Levitskiy A. A., Bozhko V. Yu. Osnovyi proektirovaniya elektronnyh sredstv. Versiya 1.0 [Elektronnyy resurs]: konspekt lektsiy. Krasnoyarsk, IPK SFU, 2008. ISBN 978-5-7638-1351-7
4. Kofanov Yu. N., Sarafanov A. V., Tregubov S. I. Avtomatizatsiya proektirovaniya RES. Topologicheskoe proektirovaniya pechatnyh plat. Versiya 1.0 [Elektronnyy resurs]: elektron. ucheb. posobie. Krasnoyarsk, IPK SFU, 2008. ISBN 978-5-7638-1350-0
5. Yefimenko A. A., Karlangach A. P., Lazarev S. N. Poisk optimalnyh razmerov pechatnyh plat dlya nesushih konstruktsiy elektronnyh sredstv, *Tehnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature*, 2014, No. 5–6, pp. 3–9. DOI: 10.15222/TKEA2014.5-6.03
6. Petherbridge K., Evans P., Harrison D. The origins and evolution of the PCB: a review, *Circuit World*, 2005, Vol. 31, No. 1, pp. 41–45. <https://doi.org/10.1108/03056120510553211>
7. Yefimenko A. A., Karlangach A. P. Analiz nesushih konstruktsiy 19-dyujimovoy i metricheskoj sistem dlya elektronnyh sredstv, *Tehnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature*, 2015, № 5–6, pp. 9–13. DOI: 10.15222/TKEA2015.5-6.09
8. Tan Yan, Martin D. F. Wong. Recent research development in PCB layout, *2010 IEEE/ACM International Conference on Computer-Aided Design (ICCAD)*. San Jose, CA, USA, 7–11 Nov. 2010. DOI: 10.1109/ICCAD.2010.5654190
9. Yefimenko A. A., Karlangach A. P. Nesushie konstruktsii s povyshennymi komponovochnymi karakteristikami, *Tehnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature*, 2016, №4–5, pp. 23 – 27. DOI: 10.15222/TKEA2016.4-5.23
10. Hansang Lim, Do-Hwan Jung, Geono Kwon, Young Jong Lee, Jun Seo Park. Downsizing an automotive junction box based on large current-carrying printed-circuit board optimization, *First Published July 21, 2016 Research Article* <https://doi.org/10.1177/0954407016657498>
11. Yefimenko A. A., Karlangach O. P., Skonechnij V. V. Proektuvannya elektronnyh moduliv iz gnuchkoyu strukturoyu drukovanih plat, *Vcheni zapiski Tavrijskogo nacionalnogo universitetu im. V.I. Vernadskogo. Seriya: Tehnichni nauki*, 2018, Tom 29 (68), No. 1, Chastina 1, pp. 32 – 39.
12. Stubbs D. M., Pulko S. H., Wilkinson A. J., Wilson B., Christiaens F., Allaert K. Embedded passive components and PCB size – thermal effects, *Microelectronics International*, 2000, Vol. 17, No. 2, P. 7–10. <https://doi.org/10.1108/13565360010332372>
13. IEC 60297-3-101(2004) Mechanical structures for electronic equipment Dimensions of mechanical structures of the 482,6 mm (19 in) series. Part 3–101: Subracks and associated plug-in units.
14. IEC 60917-2-2(1994). Modular order for the development of mechanical structures for electronic equipment practices – Part 2: Sectional specification; interface co-ordination dimensions for the 25 mm equipment practice; section 2: Detail specification; dimensions for subracks, chassis, backplanes, front panels and plug-in units.