

К. т. н. Б. А. ЕЛИЗАРОВ, к. т. н. А. В. МАКСИМОВ,  
к. т. н. В. И. ШЕЛЕСТ, к. т. н. Ю. Н. ШИРЯЕВ

Дата поступления в редакцию  
04.03 2004 г.

Россия, г. С.-Петербург, НПО «Прибор»; г. Пермь, НПО «Такт»  
E-mail: privor@mail.rcom.ru, takt@pi.ccl.ru

Оппонент д. т. н. Л. С. ЛУТЧЕНКОВ  
(НПП "ЭлектроРадиоАвтоматика", г. С.-Петербург)

## ОЦЕНКА ЭЛЕКТРОМОНТАЖНЫХ ПАРАМЕТРОВ КОММУТАЦИОННЫХ ПЛАТ НА РАННИХ ЭТАПАХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ РЭС

*Полученные зависимости позволяют рассчитывать параметры коммутационных (печатных) плат при размещении на них разногабаритных изделий электронной техники.*

Среди величин, влияющих на показатели качества радиоэлектронных средств (РЭС), одной из наиболее весомых является площадь коммутационных плат (КП), которая требуется для эффективного размещения заданного состава изделий электронной техники (ИЭТ) на КП. При этом состав ИЭТ на КП определяется принципиальной электрической схемой функционального устройства, размещаемого на КП. Однако на ранних этапах проектирования РЭС в распоряжении конструкторов еще нет готовых электрических принципиальных схем будущих функциональных устройств. Специалисты схемотехнических подразделений могут сообщить лишь наиболее общую информацию о разбиении структурной схемы разрабатываемого РЭС на функциональные устройства, а также о возможных типах и числе ИЭТ, требуемых для реализации конкретных функциональных устройств.

Между тем решение задачи определения требуемых площадей КП именно на ранних этапах проработки будущей конструкции РЭС позволило бы с минимальными затратами решить следующие вопросы:

— оценить объем как вновь создаваемого РЭС в целом, так и объемы функциональных устройств в его составе;

— оперативно проследить изменение геометрических параметров создаваемого РЭС в зависимости от выбранной элементной базы;

— оперативно проанализировать изменение объема РЭС и площадей КП в зависимости от схемы разбиения РЭС на функциональные устройства;

— сделать достоверные выводы об эффективности каждого предлагаемого варианта схемы разбиения РЭС на функциональные устройства и целесообразности применения выбранной элементной базы.

Это позволит еще на ранних этапах проектирования РЭС уверенно дать необходимую информацию для дальнейшей детальной проработки принимаемого технического решения по синтезу разрабатываемого РЭС как конструкторам, так и схемотехникам. Этот вопрос имеет ключевое значение, т. к. ввиду сложности и длительности этапов создания новой техники раз-

работчики оказываются вынужденными следовать в русле тех технических решений, которые они приняли на начальных этапах проектирования.

Площадь КП, требуемая для размещения заданного состава ИЭТ, зависит от множества факторов, отражающих качество выполнения требований полной трассировки электрических цепей, нормального теплового режима и электромагнитной совместимости ИЭТ, методов конструирования и изготовления, механической прочности и многих других. Требуемая площадь КП определяется площадями, занимаемыми корпусами ИЭТ, и дополнительными площадями вокруг них, которые необходимы для выполнения перечисленных выше требований. При этом основным требованием является обеспечение возможности полной трассировки межсоединений, поскольку оно может быть реализовано только на этапе определения требуемой площади КП, в том числе с широко применяемым печатным электромонтажом. Другие требования (например, нормального теплового режима, электромагнитной совместимости, механической прочности) частично, а в некоторых случаях и полностью, могут быть удовлетворены на последующих этапах проектирования дополнительными техническими решениями, в частности, с помощью установки радиаторов, электромагнитных экранов, введения развязывающих ячеек и фильтрующих цепей, использования конструктивных элементов, повышающих жесткость КП.

Предлагаемые в опубликованных работах (например, [1—3]) методы решения этой задачи построены, в основном, на исследовании гипотетических электрических схем максимальной сложности. В [4] приведены статистические зависимости для определения числа трасс печатных проводников, прокладываемых в межэлементных каналах для случаев, когда вся поверхность КП заполнена ИЭТ в однотипных корпусах (однако этот частный случай характерен, в основном, для цифровых РЭС). Эти обстоятельства делают упомянутые варианты решения поставленной задачи недостаточно удобными для практического применения.

С практической точки зрения, больший интерес представляли бы зависимости, позволяющие оценивать эффективную площадь размещения на КП разнотипных ИЭТ, т. к. именно этот вариант чаще всего встречается в реальных задачах, стоящих перед разработчиками РЭС. (Под эффективной площадью раз-

мещения ИЭТ понимается площадь, которая необходима для размещения конкретного ИЭТ и для осуществления трассировки его связей с другими ИЭТ, расположенными на КП. Определение эффективной площади, таким образом, является ключевым моментом для оценки площади КП, необходимой для размещения на ней заданного набора ИЭТ.) Поиску таких зависимостей и посвящена настоящая работа.

Геометрические модели размещения ИЭТ со штыревыми и планарными выводами на монтажном поле КП с печатным электромотажом приведены на рисунке. Здесь введены следующие обозначения:  $H_m$  и  $L_m$  — ширина и длина ИЭТ, соответственно;  $H_r$  и  $L_r$  — ширина и длина эффективной площади на КП, требуемой для размещения ИЭТ и осуществления трассировки его электромотажных соединений;  $t$  — ширина печатных проводников на КП и  $s$  — расстояние между ними.

На значение эффективной площади размещения ИЭТ на КП влияет множество факторов (число выводов устанавливаемых ИЭТ, степень связности между ними, искусство разработчика при размещении и трассировке ИЭТ и др.), учесть которые в строгой аналитической форме и в полном объеме заранее невозможно. Поэтому с целью получения аналитических соотношений для расчета эффективной площади, занимаемой ИЭТ на КП, использовались статистические методы. При этом основой для расчета эффективной площади являлись габаритные размеры корпуса ИЭТ и статистическое значение приращения площади размещения ИЭТ на КП ( $DL$ ).

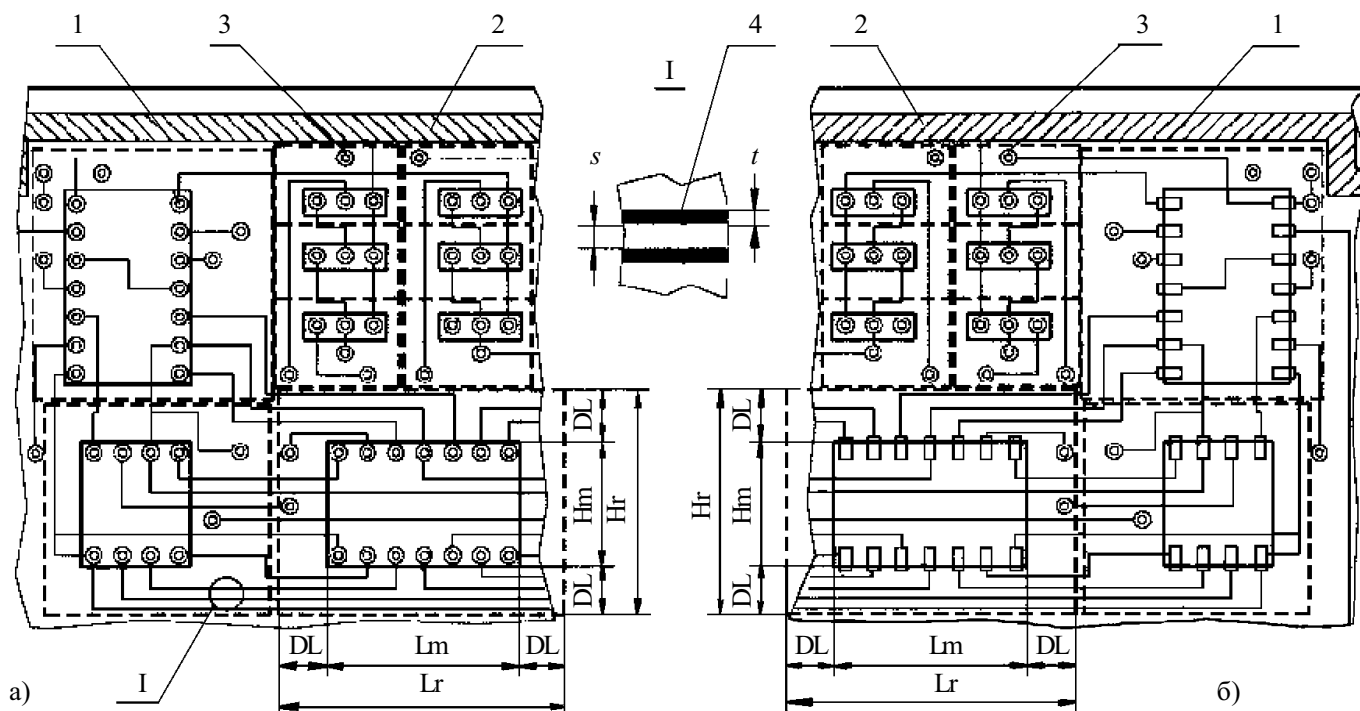
Также было установлено, что к числу факторов, которые в наибольшей степени влияют на значение  $DL$  (по сравнению с физическими габаритами корпуса ИЭТ), относятся следующие: число задействованных выводов ИЭТ ( $K$ ); расстояние между внутренними кра-

ями контактных площадок для выводов ИЭТ ( $h$ ); среднее число выводов ( $K_m$ ), приходящихся на каждый ИЭТ с учетом всего набора ИЭТ, устанавливаемых на КП. Влияние числа задействованных выводов ИЭТ на эффективную площадь его размещения очевидно. Величина  $h$  начинает сказываться, когда его значение достаточно для прокладки хотя бы одной трассы. Среднее число выводов, приходящихся на каждое ИЭТ, учитывает степень связности между ними, и чем оно выше, тем больше площади должно быть использовано на проведение трасс между ИЭТ.

С целью получения статистических зависимостей между параметрами ИЭТ и требуемой на их размещение эффективной площади были исследованы КП функциональных устройств различных классов современных РЭС, построенных на наиболее широко применяемых зарубежных и отечественных микросхемах в корпусах DIP, SO, 2102, 2103, 402, 405, 4105, 4112, H208 и других. В результате были получены таблицы значений  $DL$  в зависимости от  $K$ ,  $h$ ,  $K_m$ ,  $t$ ,  $s$  и числа коммутационных слоев КП ( $ns$ ,  $ns > 1$ ).

При этом из более 2000 подвергнутых анализу функциональных устройств с применением методов наименьших квадратов и факторного планирования эксперимента исследовано 1600 функционально и конструктивно законченных устройств разного класса, отобранных из общего числа по следующим прогрессивным признакам:

- максимальное заполнение площади КП ИЭТ;
- высокая сложность трассировки электрических цепей;
- разнотипность корпусов размещаемых на КП ИЭТ;
- равномерность размещения ИЭТ по площади КП;
- различные классы плотности проводящего рисунка и типоразмеры КП — (115...265×160...235 мм).



Элементы КП при размещении ИЭТ со штыревыми (а) и планарными (б) выводами:  
 1 — контактные площадки; 2 — шины; 3 — переходные отверстия; 4 — печатные проводники

Для получения выражений, фиксирующих аналитические зависимости между DL и средним числом задействованных выводов ИЭТ  $K$ , взятые из упомянутых выше статистических таблиц, исследовались полиномиальные модели следующего вида:

$$\overline{DL} = (a_0 + a_1 \times K) / (2 \times ns); \quad (1)$$

$$\overline{DL} = (a_0 + a_1 \times K + a_2 \times K^2) / (2 \times ns), \quad (2)$$

где  $\overline{DL}$  — среднестатистическое значение приращения площади размещения ИЭТ на КП;

$a_0, \dots, a_2$  — коэффициенты полиномов.

В результате вычисления коэффициентов  $a_0, \dots, a_2$  по методу наименьших квадратов и оценки выборочных среднеквадратических отклонений  $\delta_{DL}$  для аппроксимирующих опытные данные полиномов (1) и (2) установлено следующее.

1. Коэффициенты  $a_0, a_0'$  и  $a_1, a_1'$  имеют попарно практически равные значения (максимальное относительное расхождение составляет не более 10%) для наборов ИЭТ с одинаковыми  $h$  и  $K_m$  и разные значения для корпусов с отличающимися  $h$  и  $K_m$ .

2. Значения коэффициентов  $a_0, a_0'$  и  $a_1, a_1'$  уменьшаются по мере возрастания  $h$  и увеличиваются по мере возрастания  $K_m$ .

3. Коэффициент  $a_2$  имеет значение более низкого порядка в сравнении с  $a_1'$ , что при возможных значениях  $K$  для существующих и, вероятно, для перспективных ИЭТ практически приближает квадратичную зависимость к линейной.

4. Значения среднеквадратических отклонений  $\delta_{DL}$ , определенных для полинома (2), незначительно меньше (расхождение не более 3%) среднеквадратических отклонений, вычисленных для полинома (1).

5. Статистическая проверка гипотезы о равенстве дисперсий по критерию Кохрена для различных отклонений значений DL от среднего значения при заданных наборах ИЭТ на КП показала, что результаты опыта можно считать однородными и воспроизводимыми с доверительной вероятностью не менее 0,9.

Обобщение выявленных факторов позволяет принять полиномиальную модель вида (1) как практически приемлемую для исследуемой выборки наборов ИЭТ на КП при установлении аналитических зависимостей между величиной приращения площади размещения ИЭТ и средним числом задействованных выводов ИЭТ  $K$ .

Кроме этого, проведенные исследования позволяют сделать вывод о существенной зависимости  $\overline{DL}$  от  $h$  и  $K_m$ . Зависимость от  $h$  объясняется перераспределением трасс печатного электро монтажа между межэлементной и внутриэлементной площадью КП при наличии такого  $h$ , значение которого позволяет проложить хотя бы одну трассу для проводника, причем наряду с шириной проводников следует учитывать минимально допустимое расстояние между ними. Зависимость от среднего числа выводов, приходящихся на каждый ИЭТ с учетом всего набора ИЭТ, устанавливаемых на КП, объясняется увеличением числа более длинных трасс, необходимых для осуществления большего числа электро монтажных соединений.

На основании сопоставительного анализа полученных значений коэффициентов  $a_0, a_1$ , размеров  $h$  и величины  $K_m$  для исследованных наборов ИЭТ, размещенных на КП, получена аналитическая зависимость вида

$$\overline{DL} = [(a_1 \times K + b_1 \times K_m + a_0) / (2 \times ns)] \times (t + s) - c_1 \times h \times ns. \quad (3)$$

Здесь статистические оценки новых коэффициентов принимают следующие значения:  $a_1 = 3,45$ ;  $b_1 = 0,32$ ;  $a_0 = 9,7$ ;  $c_1 = 0,19 \text{ мм}^{-1}$ . При этом  $t, s, h$  имеют размерность в мм.

В целях установления общего характера зависимости (3) для различных КП была выдвинута и проверена гипотеза о нормальном законе распределения отклонений эффективной площади размещения ИЭТ на КП ( $Se$ ), взятой из экспериментальных данных, от своего среднестатистического значения  $\overline{Se}$ , которое определяется по следующей формуле:

$$\overline{Se} = (Lm + \overline{DL}) \times (Hm + \overline{DL}). \quad (4)$$

Здесь  $Lm$  и  $Hm$  — соответственно длина и ширина корпуса ИЭТ при известных  $K, K_m, h, t$  и  $s$ .

При сравнении теоретических и экспериментальных зависимостей установлено, что наименьшая вероятность истинности выдвинутой гипотезы составляет 0,87. На этом основании можно принять гипотезу о нормальном законе распределения отклонений экспериментальных значений  $Se$  от рассчитанных по формуле (4).

Проведенные вероятностные расчеты на основе принятой гипотезы показали равенство нулю математических ожиданий отклонений  $(Se - \overline{Se})$ :  $M(Se - \overline{Se}) = 0$ . Это подтверждает среднестатистический характер значения эффективной площади размещения ИЭТ на КП, рассчитанного по формуле (4) с помощью формулы (3) при заданных  $K, K_m, h, t$  и  $s$ . Доверительные интервалы для коэффициентов полинома (3) приведены в **таблице**.

Коэффициенты полинома	Доверительная вероятность $P_\alpha$		
	$P_\alpha=0,9$	$P_\alpha=0,95$	$P_\alpha=0,99$
$a_1=3,45$	$\pm 0,007$	$\pm 0,009$	$\pm 0,011$
$b_1=0,32$	$\pm 0,005$	$\pm 0,006$	$\pm 0,008$
$a_0=9,7$	$\pm 0,06$	$\pm 0,08$	$\pm 0,11$
$c_1=0,19 \text{ мм}^{-1}$	$\pm 0,003$	$\pm 0,005$	$\pm 0,007$

Выражения (3) и (4) удобны для практической оценки площади КП, необходимой для размещения на ней заданного набора ИЭТ с гарантией осуществления 100%-ной трассировки электрических цепей.

В целях проверки адекватности зависимостей, определенных методом наименьших квадратов, и полученных оценок их коэффициентов был использован современный статистический метод факторного планирования эксперимента. При этом из имеющейся выборки полностью рандомизированным способом взяты выборки меньших и равных между собой размеров для всех исследуемых типов КП. В связи с тем, что установлено влияние только трех факторов ( $K, K_m$  и  $h$ ), исследованию подвергалась математическая модель в виде полинома

$$\overline{DL} = [(a_1 \times K + a_2 \times K_m + a_0) / (2 \times ns)] \times (t + s) - a_3 \times h \times ns, \quad (5)$$

где  $K, K_m$  и  $h$  варьировались на двух уровнях каждый.

Полный факторный эксперимент типа  $2^q$  (где  $q=3$  — число независимых факторов) проводился для различных сочетаний  $K$ ,  $K_m$  и  $h$  при одинаковых выборках опытных значений  $DL$ .

В результате вычисления статистических оценок коэффициентов полинома (5)  $a_0, a_1, a_2, a_3$  и статистических проверок (на воспроизводимость результатов опытов — проверка гипотезы о равенстве дисперсий по критерию Кохрена, на значимость полученных оценок коэффициентов  $a_0, a_1, a_2, a_3$  по t-критерию Стьюдента и на адекватность математической модели по критерию Фишера —  $F_t = 0,83 < 1$ ) подтверждена зависимость вида (3). При этом значения соответствующих коэффициентов отличаются от ранее определенных в пределах 12%.

Установленная количественная связь между эффективной площадью размещения ИЭТ на КП и параметрами  $K, K_m, h, t$  и  $s$ , выраженная в формуле (3), может быть практически использована для оценки площадей КП и, соответственно, объема РЭС. Наиболее эффективно применение полученной зависимости в алгоритмах автоматизированного синтеза типоразмеров КП разрабатываемых РЭС.

Следует отметить, что на типоразмер КП оказывает влияние не только суммарная эффективная площадь всех размещаемых ИЭТ, но и конфигурация самой КП. Поэтому в процедуре определения типоразмера КП под заданный набор ИЭТ следует использовать алгоритм, реализующий задачу размещения разногабаритных элементов с частично изменяемой формой. При этом габариты такого элемента по любому из размеров не должны быть меньше размеров корпуса ИЭТ, размещаемого в этом элементе.

Кроме того, для оценки стоимости изготовления синтезированного типоразмерного ряда КП можно применить зависимости, описанные в [5]. Это может

послужить основой для технико-экономического обоснования принимаемого технического решения по синтезу разрабатываемых РЭС.

\*\*\*

Таким образом, использование полученных зависимостей дает возможность еще на ранних этапах проектирования РЭС оценить площади коммутационных плат функциональных устройств в составе перспективных РЭС в зависимости от элементной базы и технологии изготовления КП. Это позволит получить представление о габаритных размерах проектируемых РЭС, сделать выводы о качестве принимаемого технического решения и, при необходимости, внести коррективы еще на начальной стадии проектирования РЭС, а также получить необходимую информацию для дальнейшей работы как конструкторам, так и схемотехникам.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Компоновка и конструкции микросерийной аппаратуры / П. И. Овсищев, И. И. Лившиц, А. К. Орчинский и др.— М.: Радио и связь, 1982.
2. Асликян Э. С., Басергян П. Л., Карапетян А. М. Синтез конструктивных параметров ТЭЗ по вероятностной модели монтажной связности // Вопросы радиоэлектроники. Сер. ЭВТ.— 1981.— Вып. 6.— С. 57—62.
3. Ломаков Г. И., Муравьев А. Г. К вопросу размещения микросхем на печатной плате логического модуля // Электронная техника. Сер. Микросерийные устройства.— 1983.— Вып. 4.— С. 27—28.
4. Лутченков Л. С. Автоматизированное проектирование несущих конструкций радиоэлектронных средств.— М.: Радио и связь, 1991.
5. Шерин К. Ю. Синтез типоразмерных рядов базовых несущих конструкций радиоэлектронных средств АСУ.— СПб.: СПб.ГУТ им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, 2000.



#### Украинский проспект электроники

<http://tkec.wallst.ru/elektroniks.html>

### Открытое акционерное общество “Научно-производственное предприятие “Сатурн” (ОАО “НПП “Сатурн”)

Киев-148, ГСП 03680, проспект 50-летия Октября, 2-Б,  
тел.(38-044) 477-90-18, факс (38-044) 477-62-08.

E-mail: [chmil@jssaturn.kiev.ua](mailto:chmil@jssaturn.kiev.ua), [jssaturn@adamant.net](mailto:jssaturn@adamant.net). Web-сайт: [www.jssaturn.com](http://www.jssaturn.com).

#### Основные направления деятельности предприятия

*Сверхмаломощные приемные системы и устройства СВЧ*

*Медицинская техника на основе СВЧ-технологии*

*Полупроводниковые приборы на основе арсенидгаллиевой технологии*

*Криоэлектронные приемно-преобразовательные радиосистемы СВЧ*

*Радиометрия дм-, см- и мм-диапазонов*

*Элементы СВЧ-трактов, включая технологию изготовления ГИС*

