

К. т. н. А. А. ЕФИМЕНКО, А. В. ГОЛУБЕВ,
к. т. н. А. С. КОНДРАШОВ

Украина, Одесский национальный политехнический университет
Россия, г. С.-Петербург, Центр прикладной математики и механики СПб, отд. РАН
E-mail: kptra@rtf.ospu.odessa.ua

Дата поступления в редакцию
16.01 2002 г.

Оппоненты д. т. н. Л. С. ЛУТЧЕНКОВ
(Межотрасл. центр по БНК, г. С.-Петербург),
д. ф.-м. н. Ю. М. ШИРШОВ
(ИФПП НАНУ, г. Киев)

СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ТРУДОЗАТРАТ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОММУТАЦИОННЫХ ПЛАТ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

Полученные статистические зависимости трудоёмкости изготовления коммутационных плат могут найти применение в алгоритмах автоматизированного синтеза их типоразмерных рядов.

Среди параметров, влияющих на показатели качества базовых несущих конструкций (БНК), одним из наиболее весомых является величина трудозатрат на производство коммутационных плат (КП) печатного монтажа. В наиболее распространенной схеме построения БНК коммутационные платы одновременно служат как для электрического соединения изделий электронной техники (ИЭТ), электросоединителей, так и в качестве несущей конструкции для них. Трудоемкость изготовления КП составляет значительную часть общей трудоёмкости изготовления модулей первого уровня и БНК в целом. Поэтому задача нахождения зависимости трудоёмкости изготовления КП от ее конструктивных параметров является важной с точки зрения синтеза таких перспективных БНК, которые обеспечивали бы рациональный компромисс между требованиями максимальной функциональной емкости, выполнения требований полной трассировки электрических цепей, нормального теплового режима, электромагнитной совместимости, механической прочности и минимизации себестоимости изготовления. Учет последнего требования весьма актуален с точки зрения практической реализации БНК, т. к. чаще всего следует стремиться разработать БНК не просто с максимально возможной функциональной емкостью, но и при экономически целесообразном уровне затрат на изготовление с учетом возможностей производства. В противном случае полученное решение по синтезу перспективных БНК может оказаться нереализуемым на практике.

Трудоёмкость изготовления КП зависит от множества параметров: площади КП, числа монтажных и переходных отверстий, класса точности, числа слоев элементов печатного рисунка, материала КП, особенностей элементной базы, технологического уровня производства и других. Комплексное исследование и учет воздействия всех этих факторов осуществить довольно трудно вследствие ряда причин, в т. ч. из-за необходимости получения большого объема статистического материала. Анализ работы [1],

а также выводов, полученных путем априорного ранжирования факторов, позволяет считать наиболее значимыми плотность размещения отверстий, класс точности и число слоев КП. Поскольку трудоёмкость изготовления КП существенно зависит от уровня технологии, в исследованиях предполагалось применение наиболее перспективных и широко распространенных методов подготовки производства и изготовления КП, в т. ч. с широким применением ЭВМ на этапах изготовления фотошаблонов и управляющих носителей информации (перфолент, магнитных лент, дискет), станков-автоматов для сверления отверстий, автоматических линий для травления и металлизации отверстий.

С целью получения статистических зависимостей между параметрами КП и трудоёмкостью их изготовления были исследованы КП функциональных модулей различных видов современной электронной аппаратуры с использованием широко применяемых микросхем в корпусах 2102, 2103, 4105, 4112 и др. [2]. В результате были получены таблицы значений трудоёмкости изготовления КП в зависимости от плотности размещения отверстий на поверхности КП, класса точности и числа коммутационных слоев КП.

При этом из 150 подвергнутых анализу функциональных модулей с применением методов наименьших квадратов и факторного планирования эксперимента исследовано 80 функционально и конструктивно законченных модулей различных видов, которые были отобраны из общего количества по следующим характерным признакам: максимальному заполнению КП интегральными схемами; высокой плотности трассировки электрических цепей; однотипности корпусов размещаемых на КП микросхем; различным типоразмерам и классам точности КП.

Сопоставительный анализ полученных данных позволяет установить, что в целом трудоёмкость изготовления единицы площади КП увеличивается достаточно плавно при возрастании общего числа монтажных и переходных отверстий на КП ($N_{\text{отв}}$) и класса точности ($N_{\text{точ}}$). Резкое увеличение трудоёмкости изготовления единицы площади КП возникает при переходе от односторонних печатных плат к двухсторонним и от двухсторонних к многослойным печатным платам, т. е., когда число коммутационных слоев ($N_{\text{сл}}$) соответственно равно 1, 2 и 3 и происходит переход от одной технологии изготовления к другой.

В дальнейшем, когда $N_{сл} > 3$, с ростом количества слоев плавность роста трудоемкости в зависимости от параметров КП сохраняется.

Ввиду того, что с ростом количества слоев КП усложняется технология их производства и, как следствие, резко возрастают затраты на изготовление, следует строить отдельные математические модели зависимости трудоемкости производства КП для случаев, когда $N_{сл}=1$, $N_{сл}=2$ и $N_{сл} \geq 3$. Это позволит использовать относительно простые линейные математические модели для обозначенных интервалов изменения параметра $N_{сл}$ без необходимости аппроксимации упомянутого скачка трудоемкости изготовления КП моделями высоких порядков.

С целью получения выражений, устанавливающих аналитические зависимости между трудоемкостью изготовления единицы площади КП, взятой из вышеупомянутых статистических таблиц, и плотностью размещения отверстий по поверхности КП, классом точности, числом коммутационных слоев, исследовались полиномиальные модели вида

$$\bar{T} = a_1 + a_2 N_{точ} + a_3 N_{отв}, \quad (1)$$

$$\bar{T} = a'_1 + a'_2 N_{точ} + a'_3 N_{отв} + a'_4 N_{отв} N_{точ} \quad (2)$$

для случая, когда $N_{сл} = 1$;

$$\bar{T} = b_1 + b_2 N_{точ} + b_3 N_{отв}, \quad (3)$$

$$\bar{T} = b'_1 + b'_2 N_{точ} + b'_3 N_{отв} + b'_4 N_{отв} N_{точ} \quad (4)$$

для случая, когда $N_{сл} = 2$;

$$\bar{T} = c_1 + c_2 N_{точ} + c_3 N_{сл} + c_4 N_{отв} N_{сл}, \quad (5)$$

$$\bar{T} = c'_1 + c'_2 N_{точ} + c'_3 N_{сл} + c'_4 N_{отв} N_{сл} + c'_5 N_{отв} N_{сл} N_{точ} \quad (6)$$

для случая, когда $N_{сл} \geq 3$.

Здесь \bar{T} — среднестатистическая трудоемкость изготовления единицы площади КП, н-ч/дм²; $N_{точ}$ — класс точности КП; $N_{отв}$ — плотность отверстий на КП, дм⁻²; $a_1, a_2, \dots, a'_4, b_1, b_2, \dots, b'_4, c_1, c_2, \dots, c'_5$ — коэффициенты полиномов.

Вычисление коэффициентов по методу наименьших квадратов и оценка выборочного среднеквадратического отклонения (σ_T) для аппроксимирующих опытные данные полиномов (1)–(6) позволяют установить следующее.

1. Коэффициенты $a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3, c_1, c_2, c_3, c_4$ и, соответственно, $a'_1, a'_2, \dots, a'_4, b'_1, b'_2, \dots, b'_4, c'_1, c'_2, \dots, c'_5$ имеют попарно практически равные значения (максимальное относительное расхождение составляет не более 10%) для различных типоразмеров КП и значений $N_{сл}, N_{отв}, N_{точ}$.

2. Коэффициенты a'_4, b'_4, c'_5 имеют значения более низкого порядка, что при возможных значениях $N_{сл}, N_{отв}, N_{точ}$ для существующей и, вероятно, перспективной электронной аппаратуры практически приближает обе зависимости. Так, максимальное расхождение между \bar{T} , вычисленными по (5) и (6) при $N_{сл} < 5$, составляет не более 5%.

3. Значение оценки среднеквадратического отклонения, определенного для полиномов (2), (4) и (6), незначительно меньше (разность не более 3%) среднеквадратического отклонения, вычисленного для полиномов (1), (3) и (5).

4. Среднеквадратические отклонения, определенные для различных типоразмеров КП, $N_{сл}, N_{точ}, N_{отв}$ примерно равны (разность не более 10%).

5. Статистическая проверка гипотезы о равенстве дисперсий по критерию Кохрена для различных отклонений ($T - \bar{T}$) при заданных $N_{сл}, N_{точ}, N_{отв}$ показала, что результаты опыта можно считать однородными и воспроизводимыми с доверительной вероятностью не менее 0,9.

Комплексный учет всех этих факторов позволяет считать полиномиальные модели вида (1), (3) и (5) практически приемлемыми для исследуемой выборки КП при установлении аналитических зависимостей между трудоемкостью производства КП и $N_{отв}, N_{точ}, N_{сл}, S_{КП}$ (площадь КП, дм²). При этом выражения для вычисления трудоемкости изготовления КП имеют вид:

при $N_{сл} = 1$

$$\bar{T} = (a_1 + a_2 N_{точ}) S_{КП} + a_3 N_{отв}; \quad (7)$$

при $N_{сл} = 2$

$$\bar{T} = (b_1 + b_2 N_{точ}) S_{КП} + b_3 N_{отв}; \quad (8)$$

при $N_{сл} \geq 3$

$$\bar{T} = (c_1 + c_2 N_{точ} + c_3 N_{сл}) S_{КП} + c_4 N_{отв} N_{сл}; \quad (9)$$

а статистические оценки коэффициентов принимают следующие значения:

$$a_1 = 1,01 \text{ н-ч/дм}^2; a_2 = 1,18 \text{ н-ч/дм}^2; a_3 = 1,21 \cdot 10^{-3} \text{ н-ч};$$

$$b_1 = 1,44 \text{ н-ч/дм}^2; b_2 = 0,42 \text{ н-ч/дм}^2; b_3 = 3,56 \cdot 10^{-3} \text{ н-ч};$$

$$c_1 = 1,2 \text{ н-ч/дм}^2; c_2 = 0,51 \text{ н-ч/дм}^2; c_3 = 0,29 \text{ н-ч/дм}^2;$$

$$c_4 = 3,37 \cdot 10^{-3} \text{ н-ч}.$$

Для установления общего характера зависимостей (7), (8) и (9) для различных КП была проверена гипотеза о нормальном законе распределения отклонений трудоемкости изготовления единицы площади КП от своих среднестатистических значений, вычисленных по (7), (8) и (9) при известных $N_{отв}, N_{точ}, N_{сл}$. С этой целью по заданной выборке построены экспериментальные (гистограмма) и теоретические плотности распределения отклонений и проведено их сравнение по критерию Пирсона (χ^2). Сравнением теоретических и экспериментальных зависимостей установлено, что наименьшая вероятность истинности выдвинутой гипотезы составляет 0,88. На этом основа-

Коэффициенты полиномов	Доверительные интервалы		
	$P=0,9$	$P=0,95$	$P=0,99$
$a_1=1,01 \text{ н-ч/дм}^2$ $b_1=1,44 \text{ н-ч/дм}^2$ $c_1=1,2 \text{ н-ч/дм}^2$	$\pm 0,04$ $\pm 0,059$ $\pm 0,05$	$\pm 0,05$ $\pm 0,069$ $\pm 0,06$	$\pm 0,08$ $\pm 0,091$ $\pm 0,08$
$a_2=0,18 \text{ н-ч/дм}^2$ $b_2=0,42 \text{ н-ч/дм}^2$ $c_2=0,51 \text{ н-ч/дм}^2$	$\pm 0,02$ $\pm 0,022$ $\pm 0,02$	$\pm 0,03$ $\pm 0,034$ $\pm 0,03$	$\pm 0,05$ $\pm 0,054$ $\pm 0,05$
$c_3=0,29 \text{ н-ч/дм}^2$	$\pm 0,06$	$\pm 0,03$	$\pm 0,07$
$a_3=1,21 \cdot 10^{-3} \text{ н-ч}$ $b_3=3,56 \cdot 10^{-3} \text{ н-ч}$ $c_4=3,37 \cdot 10^{-3} \text{ н-ч}$	$\pm 5,9 \cdot 10^{-5}$ $\pm 6,5 \cdot 10^{-5}$ $\pm 6,2 \cdot 10^{-5}$	$\pm 7,7 \cdot 10^{-5}$ $\pm 8,4 \cdot 10^{-5}$ $\pm 8,1 \cdot 10^{-5}$	$\pm 9,8 \cdot 10^{-5}$ $\pm 1,15 \cdot 10^{-4}$ $\pm 1,1 \cdot 10^{-4}$

нии можно принять гипотезу о нормальном законе распределения отклонений ($T-\bar{T}$).

Исходя из принятой гипотезы проведены вероятностные расчеты, которые показали равенство нулю математических ожиданий отклонений трудоемкости — $M(T-\bar{T})=0$, что подтверждает среднестатистический характер трудоемкости производства единицы площади КП, определяемой при заданных $N_{\text{отв}}$, $N_{\text{точ}}$, $N_{\text{сл}}$ по (7), (8) и (9). Доверительные интервалы для коэффициентов полиномов при различной доверительной вероятности P приведены в **таблице**.

Установленная количественная связь между параметрами T и $N_{\text{отв}}$, $N_{\text{сл}}$, $N_{\text{точ}}$, выраженная в формулах (7), (8) и (9), может быть положена в основу методики расчета оптимального типоразмерного ряда КП для электронной аппаратуры.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Ненашев А. П. Конструирование радиоэлектронных средств.— М.: Высш. школа, 1990.
2. ГОСТ 17467—88. Микросхемы интегральные. Основные размеры.

К. т. н. О. Н. НЕГОДЕНКО, д. т. н. В. А. ВОРОНИН, Д. В. ЗАРУБА

Россия, Таганрогский гос. радиотехнический университет
E-mail: metbis@fep.tsure.ru

Дата поступления в редакцию
01.06 2001 г.

Оппонент к. т. н. В. С. ГОЛУБ
(НПФ "VD MAIS", г. Киев)

ГЕНЕРАТОРЫ С ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ НА АНАЛОГАХ НЕГАТРОНОВ

Показана возможность компенсации паразитных параметров преобразователей в автогенераторах, определены условия устойчивости колебаний при воздействии механических нагрузок.

Генераторы с электромеханическими преобразователями являются источниками ультразвука, который широко используется в диагностических и технологических установках. Они могут использоваться как датчики физических величин. Известны пьезоэлектрические, магнитострикционные и электромагнитные преобразователи [1], которые могут быть как миниатюрными (источники ультразвука для исследования кровеносных сосудов, сенсоры для датчиков), так и больших габаритов (для преобразователей напряжения [2], стиральных машин, ультразвуковых паяльников, гидроакустических станций). Соответственно потребляемая генераторами мощность колеблется от единиц мВт до сотен Вт.

Максимальное излучение ультразвука наблюдается, если преобразователи работают на своей резонансной частоте. В некоторых устройствах (пьезодвигатели, датчики силы, давления, массы, паяльники) механическая нагрузка на преобразователь изменяется, что влияет на его резонансную частоту. В гидроакустических станциях, ультразвуковых паяльниках генераторы, с выхода которых сигнал подается на преобразователь, содержат цепи слежения за ходом резонансной частоты и цепи подстройки частоты генератора. Известны генераторы с кварцевыми пьезопреобразователями на мощных транзисторах, построенные по схемам емкостной или индуктивной трехточки и развивающие мощность в нагрузке в единицы Вт [3]. В таких генераторах при изменении механической нагрузки на преобразователь могут нарушаться условия генерации, поэтому они также нуждаются в цепях подстройки.

Избежать использования цепей слежения и подстройки при определенных условиях удастся при построении автогенераторов на аналогах негатронов с S- или N-образными вольтамперными характеристиками (ВАХ), т. к. они обладают широкополосностью, в них проще создается запас по возбуждению. В этом случае при изменении механической нагрузки на преобразователь меняется частота генерируемых и излучаемых колебаний, но срыва колебаний можно избежать. Пьезопреобразователи обычно работают на частоте последовательного резонанса, магнитострикционные и электромагнитные преобразователи — на частоте параллельного резонанса, если скомпенсировать влияние статической емкости в первом случае и индуктивности обмотки — во втором [1, с. 119]. Маломощные высокочастотные генераторы с кварцевым пьезопреобразователем (резонатором) на аналогах негатронов с S-образной ВАХ описаны в [4]. Величина статической емкости у них невелика и может быть скомпенсирована собственной индуктивностью аналога негатрона (или не компенсироваться вообще). Маломощные высокочастотные генераторы с кварцевыми пьезопреобразователями на туннельных диодах, имеющих N-образную ВАХ, описаны в [5]. Здесь для развязки импедансов туннельного диода и источника питания по переменному току используется LC-фильтр, а статическая емкость не компенсируется. Мощные преобразователи из пьезокерамики имеют большую статическую емкость, которую нужно скомпенсировать, потому что она шунтирует активное сопротивление нагрузки. Генераторы с электромагнитными или магнитострикционными преобразователями [6] на аналогах негатронов пока не исследованы.

Целью работы является подбор таких аналогов негатронов для генераторов с электромеханическими преобразователями, которые позволяли бы работать на резонансных частотах преобразователей за счет компенсации их паразитных параметров, а также выявления условий, при которых не требуется подстрой-