

УДК 004.021

И. С. Новиков, В. А. Шахнов  
**ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ  
 ОПТИМИЗАЦИИ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА  
 ТРЕХМЕРНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ МОДУЛЕЙ  
 ПОСРЕДСТВОМ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА**

*Приведены используемые при решении задачи оптимизации конструкции электронных модулей трехмерной компоновки по “тепловому” критерию, структура генетического алгоритма и генетические операторы, проведен их сравнительный анализ.*

**Ключевые слова:** генетические алгоритмы, трехмерные модули, трехмерная компоновка, тепловая оптимизация.

Электронные модули трехмерной компоновки (ЭМТК) — это относительно новое направление в области конструкций микроэлектронных узлов. Общей идеей, объединяющей ЭМТК различных конструкций, является расположение активных и пассивных электронных элементов и коммутирующих их проводников не в плоскости (как на печатной плате), а в объеме модуля. Все электронные элементы модуля распределены по микроплатам, собранным в пакет параллельно друг другу.

Чаще всего электронная аппаратура отказывает из-за наличия в ней так называемых горячих точек, т.е. элементов с большим тепловыделением. Поэтому при проектировании такой аппаратуры необходимо находить конструктивные решения, которые бы обеспечили приемлемый температурный режим работы. К ним можно отнести как осуществление эффективного теплоотвода, так и уменьшение взаимного теплового влияния электронных элементов. Так, обеспечение наименьшего наведенного теплового перегрева элементов, входящих в состав ЭМТК, может быть достигнуто их оптимальным взаимным расположением в объеме модуля, что можно реализовать с помощью такого эффективного инструмента оптимизации, как генетический алгоритм (ГА).

При постановке задачи поиска оптимального размещения элементов внутри ЭМТК при помощи ГА в качестве критерия оптимизации был принят минимум наибольшего значения температуры внутри ЭМТК. Каждая особь популяции ГА описывает конкретный вариант размещения элементов внутри модуля. Особь состоит из одной M-хромосомы, описывающей порядок следования  $n$  микроплат в пакете, и  $n$  E-хромосом, каждая из которых описывает размещение отдельной группы элементов внутри микроплаты. Для расположения

элементов внутри каждой микроплаты используется стратегия размещения в левый нижний угол. Значением целевой функции (ЦФ) особи является максимальная температура внутри модуля. Для расчета значения ЦФ используется метод конечных разностей, а также такие исходные данные, как габаритные размеры элементов и микроплат, значения рассеянных элементами мощностей, значения теплопроводности микроплат и элементов, граничные условия на гранях пакета микроплат.

Для реализации поиска оптимального варианта размещения элементов посредством ГА были разработаны модифицированные генетические операторы, учитывающие особенности решаемой задачи.

**Генетические операторы.** К наиболее распространенным операторам относятся селекция, кроссовер, мутация и репродукция.

Оператор селекции, применяемый в данном ГА, использует стратегию “колеса рулетки” для отбора особей, подлежащих скрещиванию. Число скрещивающихся пар находится случайным образом для каждого очередного поколения особей, но оно не должно превышать половины размера популяции. Вероятность отбора особи для скрещивания определяется следующим образом:

$$P_i = \frac{FF_W - FF_i}{\sum_i (FF_W - FF_i)},$$

где  $FF_W$  — значение ЦФ худшей особи в текущей популяции,  $FF_i$  — значение ЦФ особи, для которой оценивается ее вероятность отбора.

Принятая структура особи во многом влияет на реализацию тех генетических операторов, которые модифицируют генную информацию особи. К ним относятся кроссовер и мутация.

В классическом случае кроссовер (скрещивание) представляет собой способ формирования хромосомы-потомка, в которой одна часть генов наследуется от первого родителя, а другая часть генов — от второго. Учитывая специфику рассматриваемой задачи, опишем специальные виды операторов кроссовера, применяемые в данном ГА.

*Кроссовер M-хромосомы (M-кроссовер, MC)* представляет собой одноточечный кроссовер, применяемый к M-хромосомам двух родительских особей и формирующий две особи-потомка. Формирование M-хромосомы потомков происходит следующим образом. Первый потомок получает набор генов слева от точки разрыва первого родителя и набор генов справа от точки разрыва второго родителя. Поскольку в результате такого обмена некоторые аллели правых частей потомков могут совпадать с аллелями левых частей, то выполняется процедура коррекции генов, после чего все аллели в пределах одной хромосомы становятся уникальными.

Могут использоваться два варианта коррекции генов — детерминированная и недетерминированная. Детерминированная коррекция генов заменяет дублирующиеся аллели первого потомка на отсутствующие в хромосоме аллели в том порядке, в котором они встречаются во втором родителе. Аналогичная замена производится для второго потомка. Недетерминированная коррекция заменяет дублирующиеся аллели на отсутствующие аллели случайным образом.

Особенностью М-кроссовера является то, что потомки наследуют не только гены М-хромосом, но и соответствующие Е-хромосомы. Например, у первого потомка в М-хромосоме слева от точки разрыва будут идти номера Е-хромосом (микроплат) первого родителя, а справа от точки разрыва — номера Е-хромосом второго родителя.

После завершения процесса обмена Е-хромосомами и выполнения коррекции генов возможны случаи, когда  $i$ -я Е-хромосома первого (второго) родителя будет потеряна (не войдет ни в одного из потомков), а аналогичная  $i$ -я Е-хромосома 2-го (1-го) родителя будет содержаться в обоих потомках. Так, на рис. 1, а показан пример, когда в результате коррекции генов Е-хромосома № 3 второго родителя не появляется ни в одном из потомков, а Е-хромосома № 3 первого родителя продублировалась в оба потомка.

*Кроссовер Е-хромосомы (Е-кроссовер, ЕС)* представляет собой одноточечный кроссовер, применяющийся к паре соответствующих Е-хромосом двух родительских особей. Формирование потомков происходит аналогично М-кроссоверу. При этом наследуются как аллель имени, так и аллель ориентации. При необходимости выполняется детерминированная коррекция генов (рис. 1, б).

*Кроссовер особей (F-кроссовер, FC)* применяется к двум особям и представляет собой сочетание одного М-кроссовера для М-хромосом родительских особей и набора Е-кроссоверов для всех соответствующих Е-хромосом родительских особей.

В теории ГА известны также такие разновидности операторов кроссовера, как многоточечный и универсальный кроссоверы. Реализацию и исследование этих вариантов кроссовера применительно к поставленной задаче авторы также планируют провести в будущем.

*Мутация М-хромосомы (М-мутация, MM-Pm)* представляет собой вариант мутации, когда два случайно выбранных гена в М-хромосоме меняются местами (рис. 2, а). Данный вид мутации применяется к особи с вероятностью  $P_m$ .

*Мутация имен Е-хромосомы (EN-мутация, ENM-Pm)* аналогична М-мутации, но применяется к конкретной Е-хромосоме особи и производит обмен как аллелей имен, так и аллелей ориентации (рис. 2, б).

Родительская особь № 1 М-хромосома: 3, 5, 2, 4, 1		
Е-хромосома	Аллели имен	Аллели ориентаций
№ 3	11.5.9.2.7.1.6.10.3.8.4.	0.1.1.0.1.0.1.1.1.1.0
№ 5	3.6.1.4.5.2	1.1.0.1.0.1
№2	1.6.10.4.8.2.7.9.3.5	0.0.1.1.1.0.1.0.1.0
№ 4	2.5.6.3.4.1	1.1.0.1.1.1
№ 1	3.6.2.5.7.1.4	0.1.1.0.1.1.0

Родительская особь № 2 М-хромосома: 2, 4, 1, 3, 5		
Е-хромосома	Аллели имен	Аллели ориентаций
№ 2	9.1.7.1.6.10.4.5.2.8	0.1.1.1.0.0.0.0.0.1
№ 4	1.4.6.2.5.3	1.1.1.0.0.1
№ 1	2.6.1.4.7.3.5	0.1.0.0.0.1
№ 3	3.2.7.1.6.11.4.9.3.5.10	0.1.1.0.0.0.0.1.1.0.0
№ 5	2.4.6.1.5.3	0.1.0.1.1.0

Точка кроссовера М-хромосомы: 2  
 Особи-потомки до коррекции генов

Особь-потомок № 1 М-хромосома: 3, 5, 1, 3, 5
Особь-потомок № 2 М-хромосом а: 2, 4, 2, 4, 1

Особи-потомки после коррекции генов

Особь-потомок № 1 М-хромосома: 3, 5, 1, 2, 4		
Е-хромосома	Аллели имен	Аллели ориентаций
№ 3	11.5.9.2.7.1.6.10.3.8.4.	0.1.1.0.1.0.1.1.1.1.0
№ 5	3.6.1.4.5.2	1.1.0.1.0.1
№ 1	2.6.1.4.7.3.5	0.1.0.0.0.1
№ 2	9.3.7.1.6.1.10.4.5.2.8	0.1.1.1.0.0.0.0.0.1
№ 4	1.4.6.2.5.3	1.1.1.0.0.1

Особь-потомок № 1 М-хромосома: 2, 4, 3, 5, 1		
Е-хромосома	Аллели имен	Аллели ориентаций
№ 2	9.1.7.1.6.10.4.5.2.8	0.1.1.1.0.0.0.0.0.1
№ 4	1.4.6.2.5.3	1.1.1.0.0.1.0
№ 3	11.5.9.2.7.1.6.11.3.8.4.	0.1.1.0.1.0.1.1.1.1.0
№ 5	3.6.1.4.5.2.	1.1.0.1.0.1
№ 1	3.6.2.3.7.1.4	0.1.1.0.1.1.0

a

**Рис. 1 (начало)**

Данный вид мутации применяется к выбранной особи с вероятностью  $P_m$ .

Мутация ориентаций Е-хромосомы (ЕО-мутация, ЕОМ-Р<sub>т</sub>) изменяет ориентацию случайно выбранного элемента. Если элемент имел вертикальную ориентацию в микроплате, его ориентация меняется на горизонтальную и наоборот (рис. 2, в). Данный вид мутации применяется к выбранной особи с вероятностью  $P_m$ .

Е-хромосома	Аллели имен	Аллели ориентаций
№ $i$ , родителя № 1	2.6.1.4.7.3.5	0.1.0.0.0.0.1
№ $i$ , родителя № 2	3.4.2.6.1.7.5	1.1.1.0.0.0.0

Точка кроссовера Е-хромосомы: 3  
Е-хромосомы потомков до коррекции генов

Е-хромосома	Аллели имен	Аллели ориентаций
№ $i$ , потомка № 1	2.6.1.6.1.7.5	0.1.0.0.0.0.0
№ $i$ , потомка № 2	3.4.2.4.7.3.5	1.1.1.0.0.0.1

Е-хромосомы потомков после коррекции генов

Е-хромосома	Аллели имен	Аллели ориентаций
№ $i$ , потомка № 1	2.6.1.3.4.7.5	0.1.0.1.1.0.0
№ $i$ , потомка № 2	3.4.2.6.7.1.5	1.1.1.1.0.0.1

б

Рис. 1 (окончание)

М-хромосома до мутации	1	6	2	3	4	5	7
М-хромосома после мутации	1	4	2	3	6	5	7

а

Е-хромосома до мутации	1	3	6	2	5	7	4
	0	1	1	0	0	0	1
Е-хромосома до мутации	1	3	7	2	5	6	4
	0	1	0	0	0	1	1

б

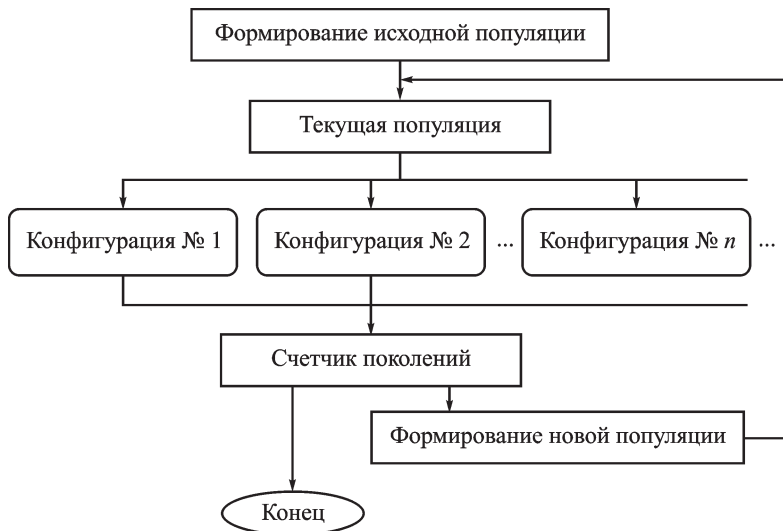
Е-хромосома до мутации	1	3	6	2	5	7	4
	0	1	1	0	0	0	1
Е-хромосома до мутации	1	3	6	2	5	7	4
	0	1	1	0	0	1	1

в

Рис. 2. Примеры М-мутации (а), EN-мутации (б) и ЕО-мутации (в)

Оператор репродукции определяет правило образования очередного поколения особей. После выполнения всех генетических операторов размер популяции, как правило, увеличивается. Это обусловлено появлением потомков в результате работы кроссовера. При решении поставленной задачи принято, что размер популяции должен оставаться постоянным. Поэтому из популяции выбрасывается  $N_f$  особей с худшими значениями ЦФ, где  $N_f$  — то число особей, которое нужно удалить из популяции, чтобы ее размер оставался постоянным. Полученное множество особей считается новой популяцией (новым поколением).

**Структура генетического алгоритма.** Все описанные ранее генетические операторы могут быть использованы в ГА в различных

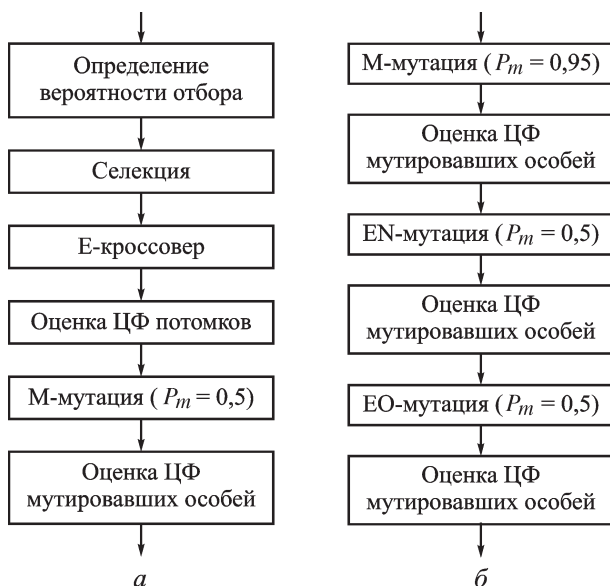


**Рис. 3. Структура генетического алгоритма**

комбинациях. Каждое отдельное сочетание генетических операторов для реализации ГА будем называть конфигурацией. Каждая конфигурация может рассматриваться как изменяемая часть в общей структуре ГА (рис. 3). Для реализации поиска оптимального решения выбирается одна из возможных конфигураций.

На рис. 4 приведены примеры конфигураций “ЕС, ММ-0.5” и “ММ-0.95, ENM-0.5, EOM-0.5”.

Очевидно, что разные конфигурации ГА дадут различные результаты поиска оптимального решения. Рассмотрим несколько configura-



**Рис. 4. Примеры конфигураций генетических операторов:**  
*a* – “ЕС, ММ-0.5”; *б* – “ММ-0.95, ENM-0.5, EOM-0.5”

ций ГА и приведем соответствующие данные результатов их работы, полученные на основе численных экспериментов.

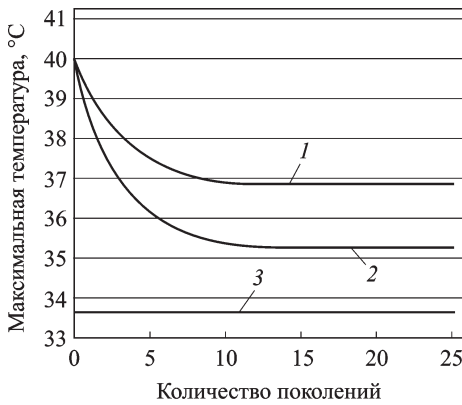
**Описание численных экспериментов.** Для проведения экспериментов были приняты следующие исходные данные. В качестве множества электронных элементов была использована принципиальная электрическая схема автомобильной сигнализации, в которую входило 2 микросхемы, 4 транзистора, 8 диодов, 10 конденсаторов и 16 резисторов. Все элементы были некоторым образом разделены на 5 групп, каждая из которых образовывала элементный состав отдельной микроплаты ЭМТК. Для каждого элемента были заданы габаритные размеры, рассеиваемая мощность и средняя теплопроводность. В качестве граничных условий на торцах пакета микроплат была принята фиксированная температура на одной из граней и тепловой поток, подведенный к другой грани. Все остальные грани считались теплоизолированными.

Для реализации генетического поиска был принят размер популяции в 32 особи. Критерием останова ГА являлось достижение 25 смен поколений особей. Для каждой конфигурации ГА проводилась серия одинаковых экспериментов, число которых варьировалось от 20 до 100 в зависимости от конфигурации. Затем полученные данные по каждой конфигурации усреднялись и использовались для сравнения конфигураций между собой. Кроме того, чтобы проверить “нечувствительность” используемого ГА к качеству исходных данных, исходная популяция в каждом эксперименте формировалась из хромосом с “плохим” значением ЦФ. Эксперименты проводились на ЭВМ с процессором Intel Core Duo 1,83 ГГц и 1 ГБ ОЗУ.

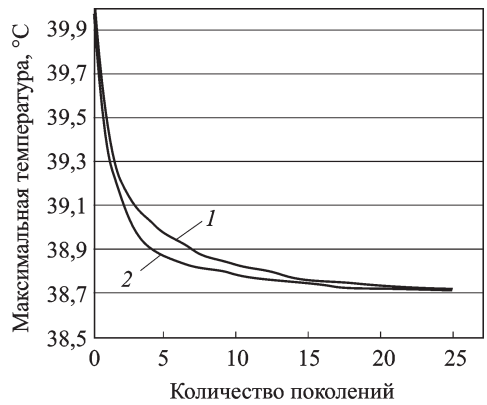
На рис. 5, *a* показано изменение лучшего значения ЦФ особи, усредненного по 100 экспериментам, для конфигураций “МС с детерминированной коррекцией” и “МС с недетерминированной коррекцией”. Как видно из графика, М-кроссовер с недетерминированной коррекцией генов дает лучший результат, что можно объяснить случайным характером формирования правой части М-хромосом особей-потомков. Данный элемент случайности способствует замедлению перехода всей популяции особей в состояние стагнации, которое, так или иначе, имеет место в конфигурации ГА без операторов мутации.

На рис. 5, *a* также приведено значение глобального оптимума, полученного экспериментально для описанных ранее исходных данных, что позволяет оценить степень приближения результатов работы соответствующих конфигураций к оптимальному значению.

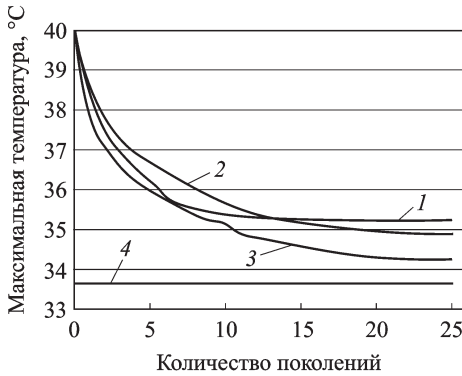
Использование только оператора М-мутации в ГА, как видно из рис. 5, *б*, дает плохой результат. Несмотря на различную вероятность М-мутации, 100-кратное повторение численных экспериментов для



*a*



*б*



*в*

**Рис. 5. Зависимость средних значений ЦФ лучших особей от числа поколений:**  
*a* – МС с детерминированной (1) и недетерминированной (2) коррекцией; экспериментальный оптимум (3); *б* – для конфигураций ГА “ММ-0.5” (1) и “ММ-0.95” (2);  
*в* – для конфигураций ГА “МС с недетерминированной коррекцией” (1); “ЕС, ММ-0.75” (2); “FC, ММ-0.4, ENM-0.3, EOM-0.4” (3); экспериментальный экстремум (4)

конфигураций ММ-0.5 и ММ-0.95 дало практически одинаковые результаты, которые далеки от глобального экспериментального экстремума.

Сочетанием операторов кроссовера и мутации можно добиться лучшей степени приближения к глобальному экстремуму.

На рис. 5, в приведены данные изменения среднего значения лучшей ЦФ для трех конфигураций ГА: конфигурация № 1 “МС с недетерминированной коррекцией”, конфигурация № 2 “ЕС, ММ-0.75”, конфигурация № 3 “FC, ММ-0.4, ENM-0.3, EOM-0.4”. Самое лучшее приближение к глобальному оптимуму обеспечивается с помощью конфигурации № 3. Для конфигурации № 1 было проведено 100 экспериментов, для конфигурации № 2 – 60, для конфигурации № 3 – 20. Среднее время выполнения одного ГА из 25 поколений для конфигурации № 1 составило примерно 1 мин, для конфигурации № 2 – 5 мин, для конфигурации № 3 – 23 мин. Большая длительность



выполнения ГА с конфигурацией № 3 объясняется бóльшим числом обращений к процедуре расчета значения ЦФ.

С учетом изложенного можно указать, что степень приближения получаемых результатов к глобальному экспериментальному оптимуму должна определяться требованиями, предъявляемыми к решению. При этом выдвигать подобные требования можно в том случае, если для применяемого ГА имеются экспериментальные оценки его эффективности. В этом случае возможны адекватная оценка временных затрат, требующихся для получения той или иной степени приближения к глобальному оптимуму, и выбор подходящей конфигурации ГА. И тем не менее конфигурация ГА играет решающую роль. Так, на основе проведенных исследований с бóльшой долей вероятности можно говорить, что даже многократный прогон ГА со слабой конфигурацией за суммарное время  $t$  не обеспечит того результата, который обеспечит однократный прогон ГА с хорошей конфигурацией за то же время  $t$ .

В заключение следует отметить, что принятый в работе критерий минимума максимальной температуры не следует рассматривать как единственно возможный для задачи “тепловой” оптимизации. Он лишь косвенно учитывает надежность трехмерного электронного модуля. В развитии данной темы авторы планируют использовать иное определение оптимальности, которое явным образом связано с показателями надежности. Использование критерия оптимизации по надежности позволит говорить о получаемых оптимальных решениях не просто как о конструкциях ЭМТК, имеющих минимально возможную в данных условиях максимальную температуру внутри модуля, а как о ЭМТК, обладающих в данных условиях наилучшими показателями надежности с точки зрения температурного режима.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Г л а д к о в А. А., К у р е й ч и к В. В., К у р е й ч и к В. М. Генетические алгоритмы. – М.: Физматлит, 2006.
2. Н о р е н к о в И. П. Основы автоматизированного проектирования: Учеб. для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 336 с.
3. Н о в и к о в И. С. Автоматическое размещение разногабаритных электронных элементов посредством генетического поиска с миграцией // Проектирование и технология электронных средств. – 2007. – № 1. – С. 33–38.
4. Н о в и к о в И. С. Программное решение по автоматизации проектирования электронной аппаратуры трехмерной компоновки / 8-я Молодежная науч.-техн. конф. “Наукоемкие технологии и интеллектуальные системы”. – 2006. Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006.
5. <http://www.masterkit.ru/main/set.php?num=386>
6. Н о в и к о в И. С., Ш а х н о в В. А. Теоретические аспекты оптимизации теплового режима трехмерных электронных модулей посредством генетического алгоритма / Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия “Приборостроение”. – 2009. – № 1. – С. 112–123.

Статья поступила в редакцию 29.10.2008

Илья Сергеевич Новиков родился в 1983 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2006 г. Аспирант кафедры “Проектирование и технология производства электронной аппаратуры” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор семи научных работ в области систем автоматизированного проектирования.



I.S. Novikov (b. 1983) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 2006. Post-graduate of “Design and Technology of Electronic Apparatus Production” of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 7 publications in the field of computer-aided design.

Вадим Анатольевич Шахнов — д-р техн. наук, профессор, член-кор. РАН, заведующий кафедрой “Проектирование и технология производства электронной аппаратуры” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 160 научных работ в области проектирования электронных средств.



V.A. Shakhnov (b. 1941) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1966. D. Sc. (Eng.), professor, head of “Design and Production Technology of Electronic Apparatus” department of the Bauman Moscow State Technical University, corresponding member of RAS. Author of 160 publications in the field of microelectronics, information technologies and nanotechnology.

---

УДК 621.791.35

Ф э н Л э й

## ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ СОЕДИНЕНИЙ, ПАЯННЫХ БЕССВИНЦОВЫМ ПРИПОЕМ

*Проведены исследования микроструктуры и механических свойств соединений паянных бессвинцовым припоем (Sn99.3Cu0.7), его предела прочности на разрыв.*

**Ключевые слова:** экология, эвтектика, фаза, смачиваемость, оптимальность, припой, соединение, шлиф.

В последнее время при изготовлении радиоэлектронной техники все большее внимание уделяется вопросам экологической безопасности – проблемам бессвинцовой пайки. Припой (Sn99.3Cu0.7) является одним из самых широко рекомендованных эвтектических составов бессвинцовых припоев. Температура его плавления равна 227 °С, он имеет высокие механические свойства и может заменить свинцовый припой (63Sn37Pb) при монтаже микроэлектроники. Предварительные испытания показали, что по выносливости бессвинцовый припой значительно превосходит припой Sn/Pb [1]. Благодаря добавлению 0,7% Cu улучшается смачиваемость поверхности [2]. Таким образом, главная проблема выбора оптимальных параметров технологических процессов пайки бессвинцовым припоем заключается в поиске подходящего технологического процесса пайки.