

УДК 004.021

И. С. Новиков, В. А. Шахнов

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ОПТИМИЗАЦИИ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА ТРЕХМЕРНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ МОДУЛЕЙ ПОСРЕДСТВОМ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА

Рассмотрена задача оптимизации конструкции электронных модулей трехмерной компоновки по “тепловому” критерию. В качестве инструмента оптимизации применен генетический алгоритм и рассмотрены его отдельные компоненты. Приведены сведения о конструкции электронных модулей трехмерной компоновки.

Одним перспективных направлений развития электроники, в особенности для отрасли бортового оборудования, является разработка и производство электронных модулей трехмерной компоновки (ЭМТК). Используя принятую иерархическую схему деления электронной аппаратуры [1], ЭМТК следует отнести к уровню модульности 0,5, к которому также относятся микросборки. Главное достоинство ЭМТК (по сравнению с печатными платами или микросборками) — их малый объем, высокие плотность монтажа и коэффициент использования объема, короткая длина проводников, возможность применения эффективного теплоотвода. В настоящее время существует целый ряд различных конструктивных исполнений ЭМТК. Однако общей идеей, объединяющей различные ЭМТК, является расположение активных и пассивных электронных элементов и коммутирующих их проводников не в плоскости (как на печатной плате), а в объеме модуля.

К западным компаниям, занимающимся проектированием и изготовлением ЭМТК, относятся такие фирмы, как Amkor Technology, 3D Plus, Irvine Sensors Corporation, VCI, Tezzaron Semiconductor [2–6]. Однако существует и российский запатентованный вариант трехмерных модулей [7–12]. Именно он и будет рассмотрен в настоящей работе.

Одним из достоинств отечественного варианта ЭМТК является эффективный способ отвода теплоты от сильно нагревающихся электронных элементов. “Облегчение” теплового режима модуля снижает риск отказа из-за перегрева критичного к температуре элемента и в итоге повышает надежность ЭМТК.

Вместе с тем, в вопросе защиты от температурного перегрева такую же важную роль, как и обеспечение эффективного теплоотвода,

играет уменьшение взаимного теплового влияния электронных элементов. Обеспечение наименьшего наведенного теплового перегрева элементов достигается оптимальным взаимным расположением этих элементов в объеме модуля. Поиск оптимального расположения может быть реализован с помощью такого эффективного инструмента оптимизации, как генетический алгоритм (ГА). Следует отметить, что в настоящее время известно много примеров успешного применения ГА для оптимизации размещения элементов электронных узлов. Среди них можно упомянуть работы [13–15]. В большинстве известных случаев, как правило, решаются задачи оптимизации двумерного размещения по различным метрическим критериям (например, минимальная суммарная длина соединений), в то время как авторы настоящей статьи используют функционал иного характера.

Вследствие того, что большое число отказов электронной аппаратуры происходит из-за наличия в ней так называемых горячих точек (элементов с большим тепловыделением) [7], в качестве критерия оптимизации был принят “тепловой” критерий, заключающийся в минимизации температуры самой нагретой горячей точки в ЭМТК.

Прежде чем перейти к рассмотрению оптимизации расположения элементов при помощи ГА, необходимо привести краткое описание конструкции ЭМТК.

Говоря об отечественном варианте ЭМТК, правильнее будет упомянуть как минимум о трех конструкторско-технологических методах, подразумевающих применение бескорпусных электронных элементов (чип-элементов). Первые два метода основаны на использовании набора микроплат 1 (рис. 1), собранных в пакет и установленных торцевыми поверхностями на общую коммутационную микроплату 2, содержащую внешние выводы модуля 3. В микроплатах выполнены сквозные окна, в которых закреплены бескорпусные активные и пассивные электронные элементы 4. Коммутация между элементами осуществляется через проводники 5, напыленные на все поверхности микроплат, а коммутация между микроплатами — через проводники, нанесенные на торцевые поверхности пакета. Конструкция из пакета микроплат, установленного на коммутационную микроплату, помещается в герметичный корпус 6.

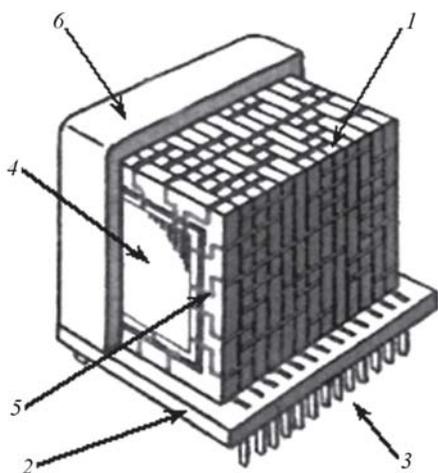


Рис. 1. Конструкция электронного модуля трехмерной компоновки

Основным отличием двух первых методов друг от друга является материал микроплат. В первом конструкторско-технологическом методе используются полимерные микроплаты, имеющие относительно низкую себестоимость, но при этом плохую теплопроводность. Во втором методе применяются микроплаты из алюмонитридной керамики с хорошими показателями теплопроводности. Именно такие ЭМТК на керамических микроплатах будут рассмотрены в настоящей работе.

Электронные модули трехмерной компоновки на керамических микроплатах обеспечивают хороший отвод теплоты от нагреваемых элементов не только в силу того, что керамика обладает хорошей теплопроводностью, но и благодаря тому, что, во-первых, теплота может распространяться через сами элементы (особенно через кремниевые кристаллы), а во-вторых, керамическая коммутационная плата является теплоотражателем.

В одном из вариантов исполнения ЭМТК на керамических микроплатах может использоваться керамическая теплопроводная электроизоляционная пудра для заполнения зазоров между соседними микроплатами и между элементом и стенкой окна в микроплате, а также для улучшения теплоотвода. В результате элементы оказываются со всех сторон охваченными керамикой.

При проектировании конструкции ЭМТК на основе микроплат необходимо распределить все множество электронных элементов по микроплатам. Для этого можно использовать известные алгоритмы компоновки [16]. При этом также необходимо учесть, что применяемые элементы имеют разные габаритные размеры.

К третьему конструкторско-технологическому методу относится метод без применения микроплат, но с использованием пудры в качестве состава, фиксирующего элементы.

Более подробно с каждым из этих методов можно ознакомиться в работах [7–12].

Базовые компоненты генетического алгоритма. Как известно, ГА являются случайно-направленными методами поиска оптимальных решений. Они имитируют процесс биологической эволюции и используются для решения NP-полных задач САПР. Подробному описанию ГА посвящены, например, такие труды, как [17, 18].

В зависимости от специфики той или иной прикладной задачи применяемый ГА будет иметь свои особенности. Как правило, это отражается на таких базовых компонентах генетического алгоритма, как способ кодировки решения, вид целевой функции и генетические операторы.

Способ кодировки решения. Одним из отличий ГА от других оптимизационных методов является то, что они проводят оптимизацию не

одного решения задачи, а случайного множества потенциальных решений. Каждое такое решение представляет собой закодированную структуру, как правило, именуемую в литературе хромосомой.

При разработке структуры хромосомы и способа ее кодирования определяется состав информации, которая будет храниться в хромосоме. Учитывая особенности типовой конструкции ЭМТК на керамических микроплатах, можно сказать, что в состав этой информации должны входить данные о взаимном расположении группы элементов в пределах одной микроплаты, а также данные о порядке следования микроплат в пакете при сборке электронного модуля. Тогда каждая хромосома должна содержать:

- n наборов генов, где n — число микроплат с элементами, а каждый из этих наборов определяет состав элементов и их взаимное расположение в пределах своей микроплаты;
- один набор генов, определяющий последовательность расположения микроплат в пакете.

Поскольку структуру закодированного решения составляют несколько наборов генов, то будет удобнее называть каждое конкретное решение не хромосомой, а особью, которая, в свою очередь, состоит из набора хромосом. Будем называть каждый из набора генов, определяющих расположение элементов, E -хромосомой, а набор генов, отвечающий за порядок микроплат, — M -хромосомой. Таким образом, каждая особь состоит из одной M -хромосомы и из n E -хромосом.

Учитывая особенности конструкции ЭМТК, задачу размещения элементов в объеме ЭМТК можно разделить на несколько подзадач двумерного размещения групп элементов внутри каждой микроплаты. Так, в работе [13] рассмотрен целый ряд алгоритмов двумерного размещения элементов на коммутационном поле. Однако большинство из этих алгоритмов рассчитаны на применение фиксированных позиций регулярных сеток и поэтому эффективно работают лишь с однотипными элементами, имеющими примерно одинаковые габаритные размеры. А поскольку в ЭМТК применяются разногабаритные элементы, то использование этих методов становится нерациональным.

Авторы предлагают использовать метод размещения в левый нижний угол. Он относится к безуровневым стратегиям формирования упаковок прямоугольных блоков в задаче раскроя-упаковки (Packing Problem) [19, 20]. В данном методе реализуется такое расположение элементов, при котором любой из элементов плотно прилегает к соседям (с некоторым минимально допустимым зазором, зависящим, например, от технологии изготовления электронного узла) и не может быть сдвинут влево или вниз (рис. 2).

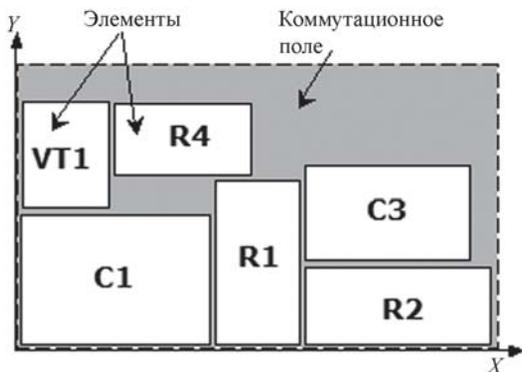


Рис. 2. Пример размещения элементов по способу “левый нижний угол”

Элементы размещаются последовательно, один за другим. Самый первый элемент помещается в нижний левый угол коммутационного поля. Следующий элемент помещается в одно из вакантных мест и т.д. При размещении очередного элемента может оказаться, что существует несколько возможных вакантных мест, поэтому можно использовать различные стратегии выбора предпочтительного вакантного места.

Достоинство данного метода в том, что он не использует регулярные сетки. Это позволяет эффективно работать с разногабаритными элементами в любой их ориентации. Большое преимущество этого способа размещения заключается также в том, что он не требует последующего уплотнения элементов.

И хотя само по себе размещение элемента в левый нижний угол не является алгоритмом поиска оптимального размещения в рассматриваемой задаче и внешне может показаться неэффективным, тем не менее, сочетание такого способа размещения с ГА позволяет достичь качественно хороших результатов.

Особенности описанного способа размещения позволяют хранить информацию о расположении элементов в очень компактной форме. Поскольку идея данного способа заключается в том, что элементы размещаются друг за другом, то в хромосоме достаточно хранить информацию о последовательности размещения элементов. Рассмотрим простой пример.

Пусть группа элементов, подлежащая размещению, содержит шесть элементов, имена которых — A, B, C, D, E, F . Предположим, что данные элементы были размещены в микроплате в следующем порядке: $A-D-C-F-B-E$. Причем при размещении элементам A, B, F, E была задана горизонтальная ориентация (относительно длинной стороны), а элементам D и C — вертикальная. В качестве стратегии выбора вакантного места было выбрано размещение в точку,

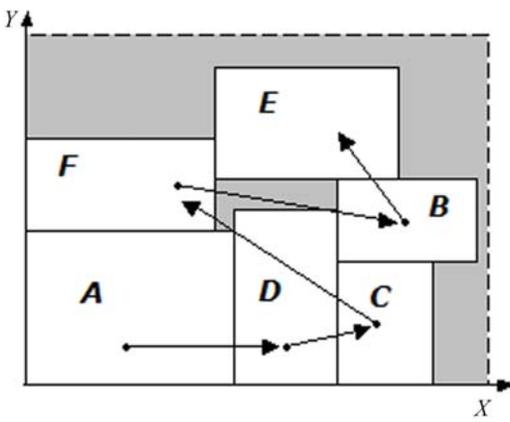


Рис. 3. Последовательность размещения элементов по способу “левый нижний угол”

которая имеет наименьшую Y -координату среди всех прочих вакантных мест. На рис. 3 приведен результат такого размещения, а также стрелками показана последовательность размещения элементов.

Пусть каждому гену в E -хромосоме соответствует один элемент из группы. Тогда аллелей данного гена является имя этого элемента, а локус этого гена зависит от порядка размещения элемента. Поскольку также необходимо учесть ориентацию элемента, то введем дополнительную аллель для каждого гена — аллель ориентации. Значение аллели ориентации равно “0”, если элемент ориентирован вертикально, и равно “1”, если элемент ориентирован горизонтально. Таким образом, для приведенного примера получаем E -хромосому, структура которой проказана на рис. 4.

Очевидно, что для заданных размеров элементов и микроплаты и при заданной стратегии выбора вакантного места данная E -хромосома однозначно определяет представленный вариант размещения. Длина каждой E -хромосомы (число генов) равняется числу элементов в микроплате. В качестве имен элементов (и значений аллелей имен) можно использовать позиционное обозначение элемента на принципиальной электрической схеме.

Существует возможность ввести информацию о положении выводов на элементах. В этом случае необходимо различать уже четыре способа ориентации элементов, а аллели ориентаций должны кодироваться значениями “0”, “1”, “2”, “3” (рис. 5, б). Однако в рассматриваемой задаче такой способ задания ориентации не применяется,

Аллели имен	A	D	C	F	B	E
Аллели ориентации	1	0	0	1	1	1

Рис. 4. Структура E -хромосомы

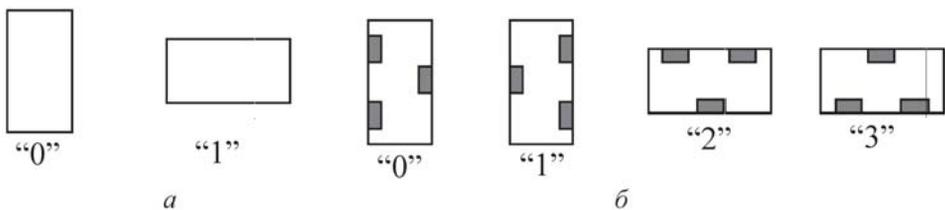


Рис. 5. Варианты ориентации элемента

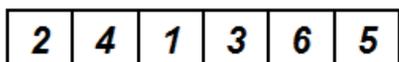


Рис. 6. Пример M -хромосомы

Структура M -хромосомы может быть построена аналогично структуре E -хромосомы. Однако в данном случае будет использоваться только один тип аллелей – аллели имен микроплат. Вводить аллель ориентаций нет необходимости, так как все микроплаты внутри пакета должны иметь одинаковую ориентацию. На рис. 6 приведен пример M -хромосомы для ЭМТК, состоящего из шести микроплат с элементами. Длина M -хромосомы равняется числу микроплат с элементами.

Таким образом, каждая особь описывает порядок размещения элементов в каждой микроплате и порядок следования микроплат. Очень важным свойством как M -хромосомы, так и E -хромосомы является то, что гены в пределах каждой хромосомы не могут иметь одинаковых аллелей.

Существует процесс, обратный процессу кодирования потенциального решения задачи в закодированную особь, – декодирование. Декодирование, как правило, применяется для вычисления количественной оценки решения с помощью принятой целевой функции.

Целевая функция. В соответствии с принятым критерием оптимизации в решаемой задаче требуется минимизировать значение целевой функции (ЦФ) особи. Тогда математически задача поиска оптимального теплового варианта решения может быть сформулирована в самом общем виде следующим образом:

$$F = f(XY_e, P, XY_b, T) \rightarrow \min,$$

где XY_e – множество значений координат размещения и размеров элементов; P – множество значений мощностей, рассеваемых элементами; XY_b – множество значений геометрических и физических параметров микроплаты с элементами; T – множество значений температур и тепловых потоков, заданных в виде граничных условий на краях микроплаты (коммутационного поля).

Очевидно, что использование “теплого” критерия подразумевает расчет распределения температурного поля внутри ЭМТК на основе известных геометрических и физических параметров микроплат и элементов, выделяемых мощностей элементов и заданных граничных условий.

Для расчета температурного распределения и определения максимального значения температуры предлагается использовать трехмерную стационарную линейную модель переноса теплоты в твердых телах (уравнение теплопроводности), которая в общем случае имеет вид:

$$\lambda \frac{d^2 t}{dx^2} + \lambda \frac{d^2 t}{dy^2} + \lambda \frac{d^2 t}{dz^2} + q_V(x, y, z) = 0,$$

где λ — коэффициент теплопроводности материала; t — температура; $q_V(x, y, z)$ — объемная плотность внутреннего источника теплоты ($q_V(x, y, z) = P/(\Delta x \Delta y \Delta z)$; $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ — размеры источника теплоты); P — рассеиваемая источником теплоты мощность.

Поскольку математический расчет модели, которая наиболее полно и точно описывает температурное распределение внутри ЭМТК, потребует больших затрат машинного времени, целесообразно ввести ряд допущений, упрощающих в определенной степени математическую модель:

- 1) для построения тепловой модели будем рассматривать только пакет микроплат с элементами;
- 2) материал микроплат (керамика) обладает свойством изотропности;
- 3) электронные элементы, расположенные в микроплатах, рассматриваем как теплопроводные параллелепипеды, коэффициент теплопроводности которых отличен от коэффициента теплопроводности керамики, но при этом также имеет место свойство изотропности;
- 4) внутри каждого элемента равномерно по всему объему элемента распределен источник теплоты;
- 5) на торце микроплаты, контактирующем с теплорастекателем, поддерживается постоянная температура $T_{тр}$;
- 6) в зависимости от типа применяемого корпуса и расположения ЭМТК в составе прочего бортового электрооборудования стороны микроплаты, контактирующие с материалом корпуса, либо считаются теплоизолированными, либо на них заданы граничные условия второго или третьего рода;
- 7) зазор между микроплатами и элементом и окном микроплаты заполнен уплотненной керамической теплопроводящей пудрой, коэффициент теплопроводности которой принимаем, равным коэффициенту теплопроводности керамики;

8) тепловой контакт между элементом и керамикой считаем идеальным.

Основываясь на некоторых из приведенных допущений, можно заключить, что тепловая модель представляет собой керамический параллелепипед, габаритные размеры которого совпадают с габаритными размерами пакета микроплат. В керамический параллелепипед вкраплены параллелепипеды меньшего размера — электронные элементы, имеющие теплопроводность и являющиеся объемными источниками теплоты.

Модель рассчитываем с помощью метода конечных разностей (МКР), для чего разбиваем тепловую модель на сетку элементарных объемов (параллелепипедов), составляем на базе этой сетки систему линейных алгебраических уравнений и решаем ее с помощью итерационных методов [21, 22].

Конечно-элементная сетка в общем случае имеет неравномерный шаг по координатным осям, а центры элементарных объемов совпадают с узлами сетки. Для каждого внутреннего элементарного объема составляем уравнение теплового баланса:

$$-P_x^{out} + P_x^{in} - P_y^{out} + P_y^{in} - P_z^{out} + P_z^{in} + \iiint_{X_n, Y_n, Z_n} q_v dx_n dy_n dz_n = 0,$$

где P_m^{in}, P_m^{out} — тепловые потоки в элементарный объем и из него в направлении оси $m = \{x, y, z\}$; x_n, y_n, z_n , — размеры элементарного объема. Уравнение (3) можно представить в конечно-разностной форме путем следующей замены:

$$P_m^{out} = \lambda \frac{(t_m - t_{m+1})}{h_{m,m+1}} S_{m,m+1}; \quad P_m^{in} = \lambda \frac{(t_{m-1} - t_m)}{h_{m-1,m}} \cdot S_{m-1,m},$$

где t_m — температура в m -м узле; $h_{m,m+1}$ — расстояние между узлами m и $m + 1$; $S_{m,m+1}$ — площадь поперечного сечения, через которое проходит тепловой поток от элементарного объема с узлом m в элементарный объем с узлом $m + 1$.

Для элементарных объемов, расположенных на гранях модуля, аналогичным образом составляли конечно-разностные уравнения с введением граничных условий первого, второго и третьего родов. Полученные конечно-разностные уравнения использовали для составления системы линейных алгебраических уравнений, представленной в виде матрицы теплопроводностей. Для решения системы применяли итерационный метод последовательной релаксации с изменяемым коэффициентом релаксации α для увеличения скорости сходимости решения.

В результате расчета получен массив значений температур в узлах сетки. По этим данным при необходимости можно восстановить трехмерное графическое изображение распределения температуры внутри

модуля. На рис. 7 показано тепловое распределение на срезе модуля по одной из микроплат.

Среди полученных температур находим максимальную температуру, которую и принимаем за значение целевой функции рассматриваемой особи.

Следует отметить, что использованный критерий минимизации температуры самой горячей точки не является единственно возможным в рамках “тепловой” оптимизации. Так, наличие на электронном элементе большого градиента температур в определенном тепловом диапазоне может привести к его отказу. Используя данные теплового распределения внутри ЭМТК, несложно вычислить температурные перепады на элементах. Поэтому одним из дополнений к решаемой задаче авторы видят реализацию критерия, связанного с минимизацией перепадов температур электронных элементов в составе ЭМТК.

Рассмотренные в настоящей работе вопросы можно отнести к ряду теоретических, раскрывающих специфику задачи и формирующих базу для дальнейшего построения ГА. Для практической реализации ГА необходимо рассмотреть такой базовый компонент генетического алгоритма, как генетические операторы — набор правил для модификации как самих особей, так и их популяций. Базовыми видами генетических операторов являются кроссовер (скрещивание), мутация, селекция и репродукция. Для решения реальных задач, как правило, используются модификации базовых генетических операторов, которые учитывают характер решаемой задачи, а также вид и структуру особи. Модифицированные генетические операторы, применяемые для решения обсуждаемой в настоящей работе задачи, авторы планируют рассмотреть в будущих публикациях.

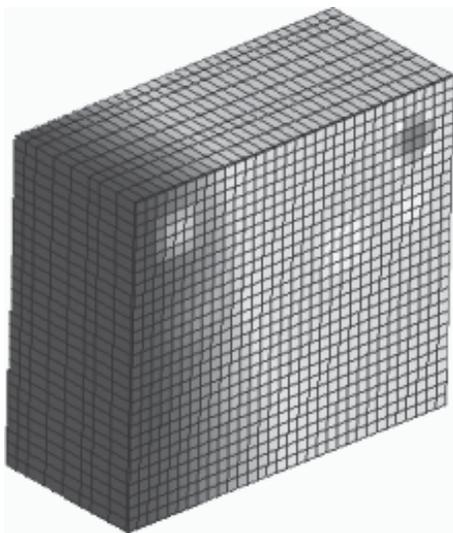


Рис. 7. Пример визуализации теплового распределения внутри ЭМТК

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Конструкторско-технологическое проектирование электронной аппаратуры: Учеб. для вузов / К.И. Билибин, А.И. Власов, Л.В. Журавлева, и др.; Под общ. ред. В.А. Шахнова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 528 с.
2. <http://www.3d-plus.com>
3. <http://www.irvine-sensors.com>

4. <http://www.verticalcircuits.com>
5. <http://www.amkor.com>
6. <http://www.tachyonsemi.com>
7. С а с о в Ю. Д. Проблемы современной электроники и пути их решения // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2005. – № 11. – С. 21–26.
8. С а с о в Ю. Д. Трехмерная электроника. Трехмерные модули с применением керамических микроплат (ChIV-C) // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2006. – № 5. – С. 8–16.
9. П а т е н т RU 2 133 523 Трехмерный электронный модуль, 1999.
10. П а т е н т RU 2 221 312 Способ изготовления трехмерного электронного модуля, 2004.
11. С а с о в Ю. Д. Трехмерная электроника. Трехмерные электронные модули с применением рамочных полимерных микроплат(ChIV-E) // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2006. – № 2. – С. 2–12.
12. С а с о в Ю. Д. Трехмерная электроника. Трехмерные электронные модули с применением безрамочных полимерных микроплат(ChIV-E) // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2006. – № 4. – С. 4–14.
13. 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.
14. В е д е р н и к о в а О. Г. Разработка и исследование комбинированного алгоритма генетического поиска и имитационного отжига для задачи размещения элементов СБИС: Дис... канд. техн. наук. 05.13.12. Ростов н/Д, 1999. – 152 с.
15. К о в а л е в А. В., К о н о п л е в Б. Г. Генетический алгоритм размещения разногабаритных блоков СБИС // Перспективные информационные технологии и интеллектуальные системы. – 2000. – № 5. – С. 71–89.
16. С е л ю т и н В. А. Машинное конструирование электронных устройств. – М.: Сов. радио, 1977. – 384 с.
17. 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 / Под ред. В.М. Курейчика. 2-е изд., испр. и доп. – М.: Изд-во ФМЛ, 2006. – 320 с.
18. К у р е й ч и к В. М. Математическое обеспечение конструкторского и технологического проектирования с применением САПР. – М.: Радио и связь, 1990.
19. Ф и л и п п о в а А. С. Моделирование эволюционных алгоритмов решения задач прямоугольной упаковки на базе технологии блочных структур // Информационные технологии. Приложение. – 2006. – № 6. – 32 с.
20. М у х а ч е в а А. С., Ч и г л и н ц е в А. В., С м а г и н М. А., М у х а ч е в а Э. А. Задачи двумерной упаковки: развитие генетических алгоритмов на базе смешанных процедур локального поиска оптимального решения // Информационные технологии. Приложение. – 2001. – № 9. – 24 с.
21. П р и м е н е н и е ЭВМ для решения задач теплообмена / Дульнев Г.Н. и др.: Учеб. пособие для теплофизич. и теплоэнергетич. спец. вузов. – М.: Высш. шк., 1990.
22. Д у л ь н е в Г. Н., П а р ф е н о в В. Г., С и г а л о в А. В. Методы расчета теплового режима приборов. – М.: Радио и связь, 1990. – 312 с.

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.

**В издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана
в 2008 г. вышла в свет книга**

Митришкин Ю.В.

Линейные модели управляемых динамических систем: Учеб. пособие. В 2 ч. – Ч. 1: Уравнения “вход–выход” и “вход–состояние– выход”. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 222 с. (Информатика в техническом университете).

Рассмотрены линейные модели управляемых динамических систем в непрерывном времени с сосредоточенными параметрами, представляемые в переменных “вход–выход” и в пространстве состояний “вход–состояние–выход”. Приведены сведения, необходимые для понимания математического описания линейных моделей систем, из разделов функционального анализа и обыкновенных дифференциальных уравнений. Рассмотрены линейные скалярные SISO-модели (Single-Input-Single-Output: один вход–один выход) и многомерные MIMO-модели (Multi-Inputs-Multi-Outputs: много входов–много выходов). Представлены простейшие численные примеры, иллюстрирующие линейные модели динамических систем. Приведена программа на языке MATLAB (MATRix LABoratory: матричная лаборатория) для получения временных и частотных характеристик динамических систем. Представлены результаты исследования с ее помощью некоторых элементарных динамических звеньев.

Для студентов III–IV курсов МГТУ им. Н.Э. Баумана, изучающих основы автоматического управления. Настоящее пособие также может быть полезно аспирантам, преподавателям и специалистам, применяющим теорию управления на практике.

По вопросам приобретения обращаться по тел. (499) 263-60-45;
e-mail: press@bmstu.ru