

К. т. н. А. С. КОНДРАШОВ, к. т. н. В. И. ШЕЛЕСТ

Россия, г. С.-Петербург, Центр прикладной математики
и механики СПбО РАН
E-mail: kast68@mail.ru

Дата поступления в редакцию
22.07—11.11 2002 г.

Оппонент А. Л. КРАВЦОВ
(НИИРИ, г. Харьков)

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ СИНТЕЗА КОМПОНОВОЧНОЙ СХЕМЫ БАЗОВЫХ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ

Предложена и обоснована математическая постановка задачи структурно-параметрического синтеза компоновочной схемы базовых несущих конструкций радиоэлектронных средств.

При проектировании новых стоечных радиоэлектронных средств (РЭС) выбор структуры компоновочной схемы трехуровневой базовой несущей конструкции (БНК) и основных параметров конструктивных модулей различных уровней иерархии является одной из основных задач. Рациональный выбор схемы построения БНК, габаритных и установочных размеров конструктивных модулей на продолжительное время предопределяет функциональную емкость РЭС, размещаемых в перспективных БНК, и конкурентоспособность новой техники.

Для современных БНК характерна иерархическая структура построения, в которой модули нижестоящих уровней размещаются в модулях вышестоящих уровней. Различают [1] следующие уровни разукрупнения РЭС в модульном исполнении по конструктивной сложности: радиоэлектронный модуль третьего уровня (РЭМ 3) — функционально законченный радиоэлектронный шкаф, пульт, стойка, выполненные на основе БНК третьего уровня, модуль второго уровня (РЭМ 2) — блок или рама, выполненные на основе БНК второго уровня, и модуль первого уровня (РЭМ 1) — ячейка, плата, выполненные на основе БНК первого уровня (см. рис. 1). При этом модули БНК различного уровня иерархии должны обладать свойствами конструктивной и функциональной взаимозаменяемости, т. е. между наружными размерами конструктивных модулей нижестоящих уровней конструктивной иерархии и посадочными местами под их размещение в конструктивных модулях вышестоящего уровня иерархии должно соблюдаться размерно-геометрическое соответствие.

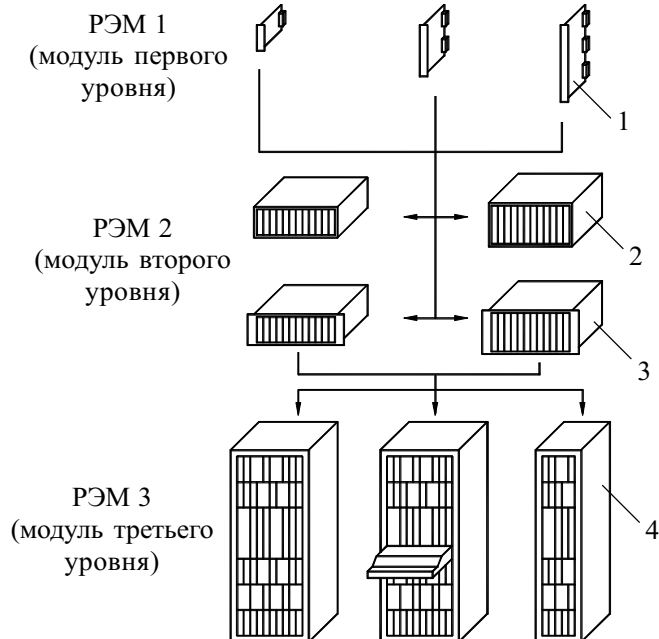


Рис. 1. Иерархия модулей несущих конструкций:
1 — блок; 2 — моноблок; 3 — секция; 4 — стойка

Рассмотрим обобщенную геометрическую модель конструктивного модуля БНК (рис. 2). Модуль БНК представляет собой прямоугольный параллелепипед с габаритными размерами L, B, H , внутри которого имеется множество прямоугольных областей $\{V(k)\}$ с размерами $\{L_k, B_k, H_k\}$ для размещения модулей нижестоящих уровней. Кроме того, конструктивный модуль обладает краевыми полями с размерами $m_{x1}, m_{x2}, m_{y1}, m_{y2}, m_{z1}, m_{z2}$ и межмодульными полями, ограниченными по соответствующим измерениям плоскостями с координатами $x_p^1, x_p^2, y_p^1, y_p^2, z_p^1, z_p^2$.

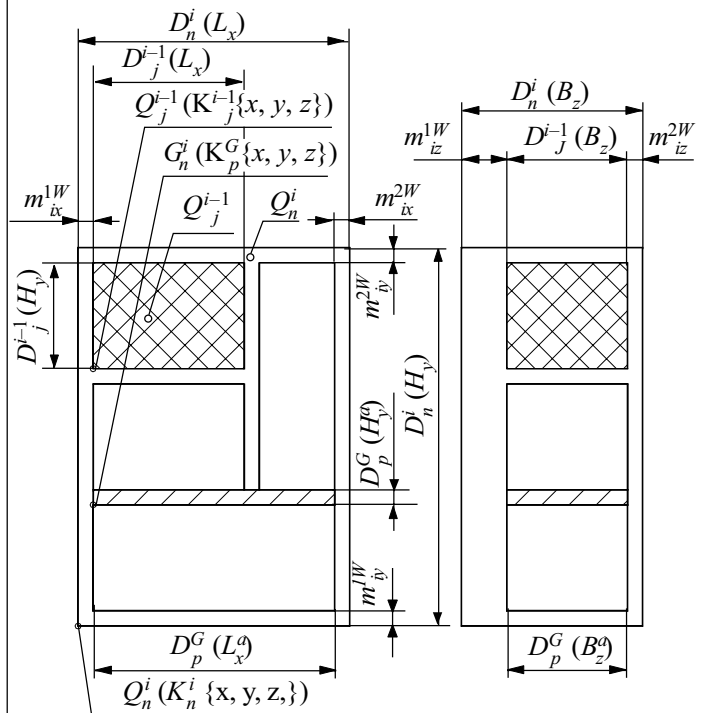


Рис. 2. Обобщенная геометрическая модель конструктивного модуля БНК

Следует отметить, что для выполнения принципа конструктивной взаимозаменяемости соединители во всех размещаемых модулях (за исключением конструктивного модуля 3-го уровня конструктивной иерархии) должны располагаться на одной стороне и лежать в одной плоскости, чтобы было возможно образовать зоны коммутации и электромонтажа в модуле вышестоящего уровня иерархии. Кроме того, эта сторона должна быть перпендикулярна направлению, вдоль которого перемещается размещаемый модуль при замене.

Сориентируем геометрическую модель разрабатываемого модуля БНК так, чтобы его стороны были параллельны осям координат. При этом можно видеть, что межмодульные поля отсутствуют только вдоль оси, совпадающей с направлением перемещения размещаемых модулей при их замене. В рассматриваемом случае эта ось направлена вдоль размера B_z . (Межмодульные и краевые поля необходимы для размещения конструктивных элементов, обеспечивающих фиксацию разрабатываемых модулей, жесткость конструкции, экранирование, теплоотвод, расположение элементов коммутации и электромонтажа.)

Отметим, что описанные элементы геометрической модели конструктивного модуля БНК присутствуют на всех уровнях конструктивной иерархии, кроме уровня РЭМ 1 (блока), где отсутствуют межмодульные поля, поскольку модуль находится на самом нижнем уровне конструктивной иерархии. В РЭМ 1 не могут входить другие конструктивные модули, однако в этом случае межмодульные поля можно геометрически интерпретировать как место расположения элементов жесткости и теплоотводящих шин на поверхности коммутационной платы (КП). В РЭМ 1 КП служит для установки и электрического соединения изделий электронной техники (микросхем, навесных элементов и т. д.), на которых построено размещаемое функциональное устройство.

Таким образом, рассматриваемая геометрическая модель пригодна для описания модулей любого уровня иерархии БНК.

Следует подчеркнуть, что в настоящей статье рассматриваются только вопросы размещения и компоновки модулей 3-уровневых БНК. Двухуровневая структура построения БНК, также находящая применение на практике, может быть получена из 3-уровневой путем исключения из ее состава модулей 2-го уровня конструктивной иерархии. Вопросы выбора для этих модулей размеров краевых и межмодульных полей, диктуемых распределением массы в синтезируемых БНК, тепловым режимом размещаемых РЭС и иными факторами, определяются математически моделями, изложенными, например, в [2, 3].

Важнейшим условием, обеспечивающим возможность автоматизированного решения задачи выбора компоновочной схемы и основных ее параметров для проектируемой трехуровневой БНК, является формализация поставленной задачи. Для выполнения этого условия приведем формальную постановку задачи синтеза структуры и конструктивных параметров многоуровневых иерархических БНК.

Обозначим модуль БНК через Q_n^i , где i — номер уровня структурной иерархии модуля БНК, n — порядковый номер модуля БНК в множестве модулей, которое необходимо разместить в модуле вышестоя-

щего уровня иерархии. Каждому Q_n^i поставим в соответствие множество параметров:

$$Q_n^i = \{K_n^i\{x, y, z\}; V_n^{\min(i)} \leq V_n^i, M_n^i \leq M_n^{\max(i)}, D_n^i\{L_{\min} \leq L_x \leq L_{\max}, B_{\min} \leq B_z \leq B_{\max}, H_{\min} \leq H_y \leq H_{\max}\}; M_n^{iw}\{m_{ix}^{1w}, m_{ix}^{2w}, m_{iy}^{1w}, m_{iy}^{2w}, m_{iz}^{1w}, m_{iz}^{2w}\}, w \in [1, W]; G_n^i\{K_p^G(x, y, z), D_p^G\{L_x^a, B_z^a, H_y^a\}, p \in [1, P], a \in [1, A]\}; \{Q_j^{i-1}, j \in [1, J]\}, \quad (1)$$

где $K_n^i\{x, y, z\}$ — множество, содержащее координаты базовой точки модуля БНК, служащей для определения его местоположения в модуле БНК вышестоящего уровня иерархии (например, это может быть одна из вершин эквивалентного параллелепипеда, являющегося геометрической моделью модуля БНК); $V_n^{\min(i)}$ — минимально допустимая величина полезного объема проектируемого модуля БНК; V_n^i — полезный объем проектируемого модуля БНК; M_n^i — масса проектируемого модуля БНК; $M_n^{\max(i)}$ — максимально допустимая масса проектируемого модуля; $D_n^i\{L_{\min} \leq L_x \leq L_{\max}, B_{\min} \leq B_z \leq B_{\max}, H_{\min} \leq H_y \leq H_{\max}\}$ — множество, содержащее размеры сторон эквивалентного параллелепипеда, образованного габаритными размерами проектируемого модуля БНК, и ограничения на эти размеры; $M_n^{iw}\{m_{ix}^{1w}, m_{ix}^{2w}, m_{iy}^{1w}, m_{iy}^{2w}, m_{iz}^{1w}, m_{iz}^{2w}\}, w \in [1, W]$ — множество значений сочетаний краевых полей эквивалентного параллелепипеда, выбираемое из возможных W сочетаний и соответствующее n -му проектируемому модулю БНК i -го уровня конструктивной иерархии; $G_n^i\{K_p^G(x, y, z), D_p^G\{L_x^a, B_z^a, H_y^a\}, p \in [1, P], a \in [1, A]\}$ — множество, содержащее координаты базовой точки p -го межмодульного поля и a -е размеры его сторон, выбираемых из множества допустимых к применению; $\{Q_j^{i-1}, j \in [1, J]\}$ — множество модулей БНК нижестоящего уровня иерархии, размещаемых в проектируемом модуле БНК (при этом для каждого элемента этого множества задана вся совокупность параметров, перечисленная выше).

Для успешного решения задачи выбора структуры и основных параметров компоновочной схемы трехуровневых БНК необходимо найти такие значения параметров, перечисленных в (1), чтобы приведенная ниже целевая функция принимала минимальное значение.

$$F^i(n) = k1 * [\sum_{j=1}^J L_j^{i-1} * H_j^{i-1} * B_j^{i-1}] / [L_n^i * H_n^i * B_n^i] + k2 * [C_n^i + \sum_{j=1}^J C_j^{i-1}] / C_{\max(n)}^i, \quad (2)$$

где $F(n)$ — значение целевой функции для n -го модуля БНК i -го уровня конструктивной иерархии; $L_j^{i-1}, H_j^{i-1}, B_j^{i-1}$ — габаритные размеры j -го размещаемого модуля БНК $i-1$ -го уровня конструктивной иерархии; J — число модулей $i-1$ -го уровня конструктивной иерархии, размещаемых в проектируемом модуле БНК; L_n^i, H_n^i, B_n^i — габаритные размеры n -го проектируемого модуля БНК i -го уровня конструктивной иерархии; C_n^i — затраты на изготовление n -го проектируемого модуля БНК i -го уровня конструктивной иерархии; C_j^{i-1} — затраты на изготовление j -го раз-

мещаемого модуля БНК $i-1$ -го уровня конструктивной иерархии; $C_{\max(n)}^i$ — заданный максимально допустимый уровень затрат на изготовление n -го проектируемого модуля БНК i -го уровня конструктивной иерархии; k_1, k_2 — весовые коэффициенты, выбираемые пользователем в зависимости от условий синтеза конструктивной системы БНК.

Данная целевая функция приведена для случая синтеза перспективной конструктивной системы БНК. В случае (для производителя РЭС, а не БНК) если требуется с ее помощью оценить целесообразность применения той или иной закупаемой конструктивной системы, в качестве затрат должны фигурировать затраты на закупку соответствующих конструктивных модулей и максимально допустимый уровень этих затрат.

Весовые коэффициенты необходимы для достижения желаемого баланса между стоимостью изготовления и компоновочной емкостью проектируемых БНК. С точки зрения затрат на производство, для производителя, изготавливающего БНК серийно на специализированном производстве, выгодно иметь ограниченный ряд типоразмеров. При этом чем меньше количество типоразмеров модулей БНК различных уровней конструктивной иерархии будет иметь синтезируемая конструктивная система, тем выше серийность изготовления входящих в ее состав модулей, а значит, ниже себестоимость их изготовления. Однако при этом из-за несовпадения требуемых типоразмеров и имеющихся в наличии неизбежно снижение коэффициента использования объема конструктивных модулей при размещении в них функциональных устройств РЭС [4]. И наоборот, чем больше типоразмеров модулей БНК имеет конструктивная система, тем выше вероятность подобрать типоразмер, адекватный объему, необходимому для размещения функционального устройства РЭС. При этом из-за наличия большого числа типоразмеров конструктивных модулей происходит рост стоимости изготовления такой конструктивной системы БНК.

Анализируя приведенную целевую функцию (2), можно сделать вывод, что результат, выдаваемый целевой функцией, является безразмерным. И кроме этого, значения каждого из слагаемых, входящих в целевую функцию, без учета величин весовых коэффициентов лежат в диапазоне от 0 до 1. Поэтому выбором диапазона изменения весовых коэффициентов k_1 и k_2 можно задать желаемый диапазон изменения целевой функции. В частности, при $k_1=k_2=0,5$ значения целевой функции лежат в диапазоне от 0 до 1.

Объем любого конструктивного модуля, вне зависимости от уровня его конструктивной иерархии в составе разрабатываемой системы БНК, можно разделить на две основные группы. Это, во-первых, компоновочный (полезный) объем, используемый для размещения модулей нижестоящего уровня иерархии. И, во-вторых, служебный объем, предназначенный для обеспечения фиксации размещаемых конструктивных модулей, механической прочности, жесткости конструкции и реализации других функций, обеспечивающих надежное функционирование РЭС в составе размещаемых модулей.

Значение компоновочного объема определяется суммой объемов размещаемых модулей БНК нижестоящего уровня иерархии и дополнительным объемом, возникающим при неплотной укладке размещаемых модулей БНК. Значение служебного объема модуля БНК определяется числом и шириной межмодульных полей, а также шириной краевых полей. Ширина межмодульных и краевых полей зависит от числа и состава размещаемых модулей БНК, допустимых к применению профилей, материалов, номенклатуры комплектующих изделий и условий эксплуатации РЭС, размещаемых в проектируемой системе БНК.

Приведенные в (1) параметры конструктивного модуля в соответствии с принципами системного подхода к конструированию БНК можно разделить на три подгруппы: входные, выходные и ограничения.

К первой подгруппе относятся $Q_j^{-1}, j \in [1, J]$ — множество модулей БНК нижестоящего уровня иерархии, размещаемых в проектируемом модуле БНК с соответствующим набором перечисленных в (1) параметров.

Ко второй подгруппе параметров относятся $K_n^i\{x, y, z\}$ — координаты размещения проектируемого модуля БНК в модуле вышестоящего уровня конструктивной иерархии; V_n — полезный объем проектируемого модуля БНК; M_n — масса проектируемого модуля с учетом размещенных в нем модулей нижестоящего уровня конструктивной иерархии; $D_n^i\{L_x, B_z, H_y\}$ — габаритные размеры проектируемого модуля БНК, $M_n^{iw}\{m_{ix}^{1w}, m_{ix}^{2w}, m_{iy}^{1w}, m_{iy}^{2w}, m_{iz}^{1w}, m_{iz}^{2w}\}$, $w \in [1, W]$ — выбираемые из W возможных сочетания размеров краевых полей в проектируемом модуле БНК; $G_n^i\{K_p^G(x, y, z), D_p^G\{L_x^a, B_z^a, H_y^a\}\}$, $p \in [1, P]$, $a \in [1, A]$ — множество, содержащее координаты базовой точки p -го межмодульного поля и a -е размеры его сторон, выбираемых из множества допустимых к применению в проектируемом модуле БНК.

К ограничениям относятся V_n^{\min} — минимально возможное значение полезного объема проектируемого модуля БНК; M_n^{\max} — максимально допустимое значение массы проектируемого модуля; $D_n^i\{L_{\min} \leq L_x \leq L_{\max}, B_{\min} \leq B_z \leq B_{\max}, H_{\min} \leq H_y \leq H_{\max}\}$ — допустимые диапазоны изменения габаритов проектируемого модуля БНК.

Ограничения на габариты сторон модулей БНК связаны с конструктивными особенностями размещаемых в них функциональных устройств или модулей БНК нижестоящего уровня конструктивной иерархии. Например, ограничения для размеров параллелепипедов, соответствующих модулям БНК второго и третьего уровня структурной иерархии, определяются максимальными размерами сторон размещаемых параллелепипедов. При этом размеры сторон параллелепипеда, в котором осуществляется размещение, должны быть больше размеров соответствующих сторон размещаемых параллелепипедов.

Если рассматривать многоуровневую БНК как сложную систему, то пространство, образованное краевыми и межмодульными полями, используется для размещения подсистем БНК, обеспечивающих надежное функционирование РЭС, — в частности, механи-

ческую прочность, нормальный тепловой режим РЭС, электромагнитную совместимость размещаемых РЭС, зоны для электросоединителей и электромонтажа.

Например, с позиции подсистемы обеспечения механической прочности БНК геометрические параметры краевых и межмодульных полей проектируемых БНК зависят от состава, размеров, массы и ориентации в пространстве размещаемых модулей БНК, от величины и направления действия ударных нагрузок, от интенсивности и частотного диапазона вибрационных нагрузок. Для остальных подсистем БНК можно определить свой перечень ограничений, входных и выходных параметров.

После анализа взаимосвязей подсистем, взаимного влияния разнообразных факторов, определяющих их свойства и режимы функционирования, станет возможным построить системную модель БНК и решить задачу их автоматизированного многокритериального синтеза. Эта задача весьма объемная, поэтому в настоящей статье анализируются ограничения, вход-

ные и выходные параметры только подсистемы компоновки БНК. Вместе с тем выбор параметров и структуры подсистемы компоновки БНК имеет принципиальное значение. Это связано с тем, что в ходе синтеза конструктивной системы модулей БНК результатом этого синтеза являются, в первую очередь, выходные параметры подсистемы компоновки.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. ГОСТ 26632—85. Уровни разукрупнения радиоэлектронных средств по функционально-конструктивной сложности. Термины и определения.
2. Ненашев А. П. Конструирование радиоэлектронных средств.— М.: Высш. шк., 1990.
3. Лутченков Л. С. Автоматизированное проектирование несущих конструкций радиоэлектронных средств. — М.: Радио и связь, 1991.
4. Кондрашов А. С. Математическая постановка задачи выбора оптимальных габаритов типовых элементов замены стоечной аппаратуры связи / В сб.: Синтез и анализ алгоритмов оптимальной обработки сигналов.— СПб, ГУТ.— 1993.— № 159.— С. 94—99.

ПАМЯТНЫЕ ДАТЫ В 2003 ГОДУ

- 130 лет со времени опубликования (1873) английским физиком Д. Максвеллом «Трактата об электричестве и магнетизме», в котором дана законченная теория электрических и магнитных явлений.
- 125 лет назад (1878) физиком и изобретателем Д. Юзом разработан угольный микрофон.
- 120 лет назад (1883) американский изобретатель Т.-А. Эдисон первым обнаружил явление термоэлектронной эмиссии (эффект Эдисона), который лег в основу создания радиопромышленности.
- 85 лет назад (1918) русский ученый М. А. Бонч-Бруевич и английские ученые В. Икклз и Ф. Джордан независимо друг от друга создали электронное реле, названное триггером.
- 70 лет назад (1933) ученые в области телевизионной техники П. В. Шмаков и П. В. Тимофеев изобрели первую в мире передающую трубку «с переносом изображения» (супериконоскоп).
- 7 марта — 100 лет со дня рождения М. А. Леонтовича (1903—1981), физика-теоретика, основателя научной школы по радиофизике и физике плазмы.
- 11 марта — 90 лет со дня рождения Б. Н. Петрова (1913—1980), ученого в области систем автоматического управления авиационной и космической техники, организатора науки.
- 12 марта — 140 лет со дня рождения В. И. Вернадского (1863—1945), ученого-естествоиспытателя, минералог, кристаллограф, основоположника геохимии, биогеохимии, радиогеологии и учения о биосфере, историка науки.
- 1 мая — 75 лет со дня рождения (1928) Б. П. Захарчени, ученого-физика, специалиста в области полупроводниковой оптики и спектроскопии, создателя научной школы.
- 10 мая — 100 лет со дня рождения О. В. Лосева (1903—1942), ученого-радиофизика, одного из основоположников полупроводниковой электроники, создателя кристадина.

- 21 мая — 80 лет со дня рождения (1923) И. М. Цидильковского, ученого в области физики полупроводников.
- 22 мая — 100 лет со дня рождения Б. М. Вула (1903—1985), ученого в области физики диэлектриков и полупроводников, квантовой электроники, одного из создателей полупроводниковых лазеров.
- 23 мая — 120 лет со времени изобретения (1883) русским ученым П. М. Голубицким микрофона с угольным порошком.
- Июль — 70 лет со времени выхода в свет (1933) первого номера научно-популярного журнала «Техника молодежи».
- 3 июля — 100 лет со дня рождения Д. Е. Мальярова (1903—1942), ученого в области электровакуумного приборостроения.
- 18 июля — 150 лет со дня рождения Х. А. Лоренца (1853—1928), нидерландского физика-теоретика, создателя классической электронной теории, лауреата Нобелевской премии.
- 26 июля — 75 лет назад (1928) состоялась первая демонстрация телевизионной установки «Радиотелефот», изобретенной Б. П. Грабовским, прообраза электронного телевидения.
- 6 августа — 250 лет со дня смерти Г. В. Рихмана (1711—1753), ученого-физика, положившего начало исследованиям электричества в России, сподвижника М. В. Ломоносова.
- 12 августа — 70 лет со дня рождения Д. Н. Наследова (1903—1975), ученого в области физики и техники полупроводников.
- 24 августа — 80 лет со дня рождения В. М. Глушкова (1923—1982), ученого в области математики и вычислительной техники, основателя научной школы в области теоретической кибернетики.
- 6 сентября — 95 лет со дня рождения (1908) В. А. Котельникова, ученого в области радиофизики и радиотехники, создателя планетной радиолокации.
- 20 сентября — 125 лет со дня рождения В. В. Татаринова (1878—1941), ученого-радиофизика, одного из пионеров отечественной радиотехники.

Из «Календаря юбилейных и памятных дат в области естествознания и техники на 2003 год».— М.: Политехн. музей, Центр. политехн. б-ка, 2002.