

## **Компоновка электронных блоков бортового оборудования летательного аппарата с учетом критерия электромагнитной совместимости**

*Приведено автоматизированное решение задачи компоновки электронного блока бортового оборудования летательного аппарата. Представлена содержательная и математическая постановка задачи компоновки блоков с учетом критерия электромагнитной совместимости. Разработан генетический алгоритм для решения многокритериальной задачи компоновки блоков. Приведен практический пример решения задачи компоновки блока бортового оборудования.*

**И.В. СУЗДАЛЬЦЕВ,  
Д.Е. КРУПЕННИКОВА**  
(КНИТУ-КАИ, Казань)  
iliasuzd@mail.ru

**Компоновка, блок бортового оборудования, конструктивный модуль, генетический алгоритм, электромагнитная совместимость**

Основными тенденциями совершенствования современного авиационного и космического бортового оборудования является повышение его производительности, функциональной сложности, уменьшение массогабаритных характеристик при сохранении высоких показателей надежности на этапе эксплуатации. При проектировании современного бортового оборудования летательного аппарата возникает проблема обеспечения электромагнитной совместимости [1]. Обеспечение электромагнитной совместимости бортового оборудования летательного аппарата необходимо в связи с высокой частотой сигналов и низким уровнем помехоустойчивости элементов, высокой плотностью компоновки конструктивных модулей, расположенных внутри корпуса блока, а также из-за вероятности внешних электромагнитных воздействий на электронный блок. Игнорирование проблемы электромагнитной совместимости на этапе проектирования бортового электронного оборудования летательных аппаратов может привести к нарушению его функционирования и снижению показателей надежности.

В работах [1–5] предлагаются различные решения, применяемые на этапах схемотехнического, конструкторского и технологического проектирования электронного блока, для обеспечения его электромагнитной совместимости при внешних электромагнитных воздействиях. Однако проблема обеспечения внутриаппаратурной электромагнитной совместимости электронных блоков исследовалась недостаточно полно.

Один из способов решения данной задачи заключается в оптимальном размещении модулей в конструктивном объеме оборудования летательных аппаратов с учетом критерия электромагнитной совместимости. В работе [6] предлагается методика компоновки блоков радиоэлектронных средств с учетом электромагнитных характеристик, но не рассматриваются вопросы автоматизации синтеза конструкции блока с учетом критериев электромагнитной совместимости. В настоящее время поиск оптимального варианта конструкции электронного блока необходимо выполнять вручную. В большинстве случаев решение данной задачи затруднено ввиду большого количества потенциальных проектных решений (вариантов конструкции блока) и числа предъявляемых требований. Автоматизация решения задачи компоновки электронного блока позволит не только повысить качество конструкций блоков с учетом критерия электромагнитной совместимости, но и снизить сроки их проектирования.

Цель данной работы – повышение качества и эффективности решения задачи компоновки электронных блоков бортового оборудования с учетом критерия электромагнитной совместимости. Задачей компоновки является поиск оптимального расположения конструктивных модулей (электронных компонентов, печатных плат) во внутриблочном монтажном объеме электронного средства.

Определим декартову систему координат с осями  $Ox$ ,  $Oy$ ,  $Oz$  с общим началом  $O$ , расположенным в одном из углов электронного блока (рис. 1).

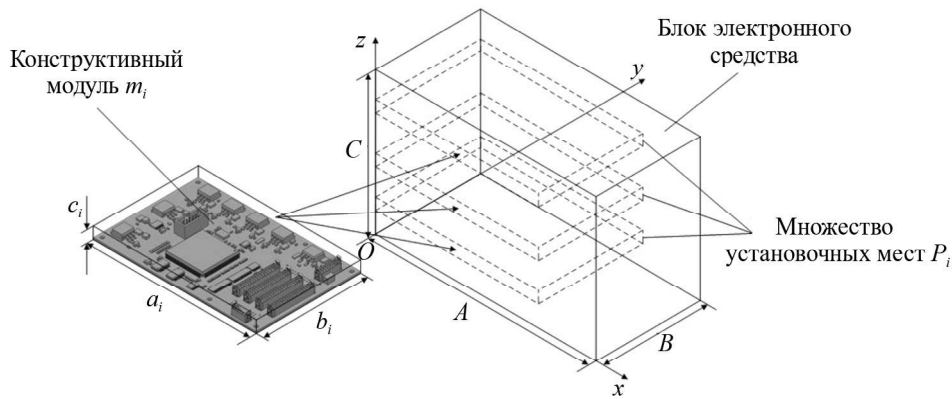


Рис. 1

Электронный блок представляется в виде прямоугольного параллелепипеда с габаритными размерами  $A$ ,  $B$ ,  $C$  вдоль осей абсцисс  $Ox$ , ординат  $Oy$  и аппликат  $Oz$ . Пусть  $M = \{m_i / i = \overline{1..n}\}$  – множество конструктивных модулей (печатных плат, электронных компонент), размещаемых в блоке бортового оборудования ( $n$  – количество размещаемых модулей). Каждый конструктивный модуль  $m_i \in M$  ( $i = \overline{1..n}$ ) аппроксимируется прямоугольным параллелепипедом со следующими габаритными размерами:  $a_i$  (по оси абсцисс),  $b_i$  (по оси ординат),  $c_i$  (по оси аппликат). При этом для каждого размещаемого конструктивного модуля  $m_i \in M$  ( $i = \overline{1..n}$ ) с учетом конструктивных данных и требований эргономики определяется множество потенциальных мест (возможных вариантов) установки  $P_i = \{p_{ij} / j = \overline{1..q_i}\}$ , где  $q_i$  – количество потенциальных мест установки  $i$ -го конструктивного модуля. Каждое установочное место  $p_{ij} \in P_i$  ( $i = \overline{1..n}, j = \overline{1..q_i}$ ) характеризуется координатами  $(x_{ij}, y_{ij}, z_{ij})$  точки его геометрического центра, заданными в декартовой системе координат  $Oxyz$ . Постановка задачи компоновки может быть сформулирована как задача поиска для каждого конструктивного модуля  $m_i$  ( $m_i \in M, i = \overline{1..n}$ ) такого установочного места  $p_{ij}$  ( $p_{ij} \in P_i, j = \overline{1..q_i}$ ), которое наилучшим образом обеспечивает выполнение заданных критериев качества и ограничения. Ограничение задачи учитывает невозможность взаимного пересечения конструктивных объемов двух модулей ( $i_1, i_2 = \overline{1..n}, i_1 \neq i_2$ ), размещаемых в установочные места  $p_{i_1 j_1} \in P_{i_1}$  и  $p_{i_2 j_2} \in P_{i_2}$ :

$$(1 - S_{i_1 i_2}^x)(1 - S_{i_1 i_2}^y)(1 - S_{i_1 i_2}^z) = 1,$$

где  $S_{i_1 i_2}^x, S_{i_1 i_2}^y, S_{i_1 i_2}^z$  – признаки пересечения конструктивных модулей (с номерами  $i_1, i_2$ ), определяемые на основе выражений

$$S_{i_1 i_2}^x = \begin{cases} 0, & \text{если } \left(x_{i_1} - \frac{a_{i_1}}{2} > x_{i_2} + \frac{a_{i_2}}{2}\right) \vee \left(x_{i_1} + \frac{a_{i_1}}{2} < x_{i_2} - \frac{a_{i_2}}{2}\right); \\ 1 & \text{в противном случае;} \end{cases}$$

$$S_{i_1 i_2}^y = \begin{cases} 0, & \text{если } \left(y_{i_1} - \frac{b_{i_1}}{2} > y_{i_2} + \frac{b_{i_2}}{2}\right) \vee \left(y_{i_1} + \frac{b_{i_1}}{2} < y_{i_2} - \frac{b_{i_2}}{2}\right); \\ 1 & \text{в противном случае;} \end{cases}$$

$$S_{i_1 i_2}^z = \begin{cases} 0, & \text{если } \left( z_{i_1} - \frac{c_{i_1}}{2} > z_{i_2} + \frac{c_{i_2}}{2} \right) \vee \left( z_{i_1} + \frac{c_{i_1}}{2} < z_{i_2} - \frac{c_{i_2}}{2} \right); \\ 1 & \text{в противном случае,} \end{cases}$$

где  $x_{i_1}, x_{i_2}, y_{i_1}, y_{i_2}, z_{i_1}, z_{i_2}$  – координаты геометрических центров конструктивных модулей (с номерами  $i_1, i_2$ ) в декартовой системе координат  $Oxyz$  по осям абцисс  $Ox$ , ординат  $Oy$  и аппликат  $Oz$ . Координаты  $(x_i, y_i, z_i)$  геометрического центра модуля  $m_i$  ( $m_i \in M$ ) при его размещении в установочное место  $p_{ij}$  ( $p_{ij} \in P_i$ ) определяются следующим образом:

$$x_i = \sum_{j=1}^{q_i} v_{ij} x_{ij}; \quad y_i = \sum_{j=1}^{q_i} v_{ij} y_{ij}; \quad z_i = \sum_{j=1}^{q_i} v_{ij} z_{ij},$$

где  $v_{ij}$  – признак размещения  $i$ -го модуля в  $j$ -м установочном месте:

$$v_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } i\text{-й модуль размещен в } j\text{-м установочном месте;} \\ 0 & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Следует отметить, что каждый  $i$ -й конструктивный модуль может быть размещен только в одном установочном месте, поэтому справедливо следующее равенство:

$$\sum_{j=1}^{q_i} v_{ij} = 1, \forall i = \overline{1 \dots n}.$$

Одним из критериев задачи компоновки электронных блоков является минимальная длина межмодульных соединений:

$$F_1 = \sum_{i_1=1}^{n-1} \sum_{i_2=i_1+1}^n \sum_{k=1}^{c_{i_1 i_2}} d_{i_1 i_2 k} \rightarrow \min, \quad (1)$$

где  $c_{i_1 i_2}$  – количество соединений между конструктивными модулями с номерами  $i_1, i_2$ ;  $d_{i_1 i_2 k}$  – манхэттенское расстояние между контактами модулей (с номерами  $i_1, i_2$ ), используемых для коммутации  $k$ -го межмодульного соединения:

$$d_{i_1 i_2 k} = \left| (x_{i_1} + x_{i_1 k}^c) - (x_{i_2} + x_{i_2 k}^c) \right| + \left| (y_{i_1} + y_{i_1 k}^c) - (y_{i_2} + y_{i_2 k}^c) \right| + \left| (z_{i_1} + z_{i_1 k}^c) - (z_{i_2} + z_{i_2 k}^c) \right|,$$

где  $x_{i_1 k}^c, x_{i_2 k}^c, y_{i_1 k}^c, y_{i_2 k}^c, z_{i_1 k}^c, z_{i_2 k}^c$  – координаты контактов модулей (с номерами  $i_1, i_2$ ), определяемые относительно их геометрических центров и используемые для коммутации  $k$ -го соединения, по осям абцисс  $Ox$ , ординат  $Oy$  и аппликат  $Oz$ . Минимизация длины межмодульных соединений при решении задачи компоновки электронного блока способствует созданию благоприятных условий для их последующей трассировки. В большинстве случаев межмодульные соединения в блоке конструктивно реализуются в виде жгутов или шлейфов, представляющих собой протяженные параллельные участки с большим количеством близкорасположенных линий передачи сигналов. Минимизация длины межмодульных соединений в таком случае позволит снизить уровень их электромагнитного взаимодействия, а следовательно, и уровень перекрестных помех [1, 7]. Кроме того, благодаря уменьшению длины межмодульных соединений возможно снизить уровень помех, обусловленных внешним электромагнитным воздействием.

Для обеспечения внутриаппаратурной электромагнитной совместимости электронного блока предлагается также учитывать критерий, позволяющий отдалять друг от друга модули, излучающие сильные электромагнитные поля, от чувствительных к ним модулей:

$$F_2 = \sum_{i_1=1}^{n-1} \sum_{i_2=i_1+1}^n \frac{E_{i_1 i_2}}{r_{i_1 i_2}} \rightarrow \min, \quad (2)$$

где  $E_{i_1 i_2}$  – экспертная оценка электромагнитной совместимости конструктивных модулей с номерами  $i_1, i_2$ ;  $r_{i_1 i_2}$  – евклидово расстояние между геометрическими центрами установочных мест, занимаемых конструктивными модулями с номерами  $i_1, i_2$ :

$$r_{i_1 i_2} = \sqrt{(x_{i_1} - x_{i_2})^2 + (y_{i_1} - y_{i_2})^2 + (z_{i_1} - z_{i_2})^2}.$$

Оценку электромагнитной совместимости конструктивных модулей предлагается выполнять относительным методом с применением пятибалльной шкалы. Если два конструктивных модуля с номерами  $i_1, i_2$  ( $i_1, i_2 = \overline{1...n}, i_1 \neq i_2$ ) необходимо разместить во внутриблочном монтажном объеме электронного средства на максимальном расстоянии друг от друга, то соответствующей величине экспертной оценки электромагнитной совместимости  $E_{i_1 i_2}$  присваивается значение, равное пяти, в противном случае – единица. Например, в соответствии с рекомендациями [7] высоковольтные модули вторичных источников питания, излучающие сильные электромагнитные поля, следует располагать как можно дальше от чувствительных к ним высокочастотных цифровых модулей.

Таким образом, в представленной постановке задача компоновки электронных блоков представляет собой многокритериальную задачу оптимизации. Решение задачи многокритериальной оптимизации в общем случае не является оптимальным ни для одного из частных критериев, а оказывается некоторым компромиссом для вектора показателей качества в целом. Для свертки частных критериев (1), (2) при решении данной задачи используется аддитивная целевая функция

$$F = \alpha_1 F_1 + \alpha_2 F_2, \quad (3)$$

где  $\alpha_1, \alpha_2$  – весовые коэффициенты, определяющие приоритет учета соответствующих частных критериев при решении задачи ( $\alpha_1, \alpha_2 \in [0, 1], \alpha_1 + \alpha_2 = 1$ ). Значения весовых коэффициентов определяются с учетом требований, предъявляемых к конструкции электронного блока.

Для решения многокритериальной задачи компоновки электронных блоков в данной работе предлагается использовать генетический алгоритм [8], относящийся к классу стохастических (вероятностных) методов оптимизации и основанный на моделировании законов, механизмов и принципов эволюционного развития организмов в живой природе. Выбор генетического алгоритма обосновывается его эффективностью при решении различных практических многокритериальных задач оптимизации, что подтверждается результатами проведенных исследований [9–13].

Одно потенциальное решение оптимизационной задачи в терминологии генетических алгоритмов называется особью, а их множество – популяцией. Каждое потенциальное решение представляется в закодированной форме, в виде одной или нескольких хромосом. Хромосома состоит из множества участков – генов. В генетическом алгоритме решения задачи компоновки хромосома имеет следующую структуру (табл. 1).

Таблица 1

1	2	...	$i$	...	$n-1$	$n$
$g_1$	$g_2$	...	$g_i$	...	$g_{n-1}$	$g_n$

Количество генов хромосомы определяется количеством модулей  $n$ , размещаемых в блоке. Локус (порядковый номер) гена в хромосоме соответствует номеру размещаемого модуля  $m_i \in M$  ( $i = \overline{1...n}$ ),

а аллель  $g_i$  (значение гена) – номеру установочного места  $p_{ij} \in P_i \left( i = \overline{1..n}, j = \overline{1..q_i} \right)$ , используемого для размещения  $i$ -го модуля. Таким образом, генотип (комбинация значений генов) хромосомы одной особи сопоставляется с одним потенциальным решением задачи компоновки (с одним вариантом размещения модулей в установочные места блока).

Схема генетического алгоритма для решения задачи компоновки электронного блока представлена на рис. 2.

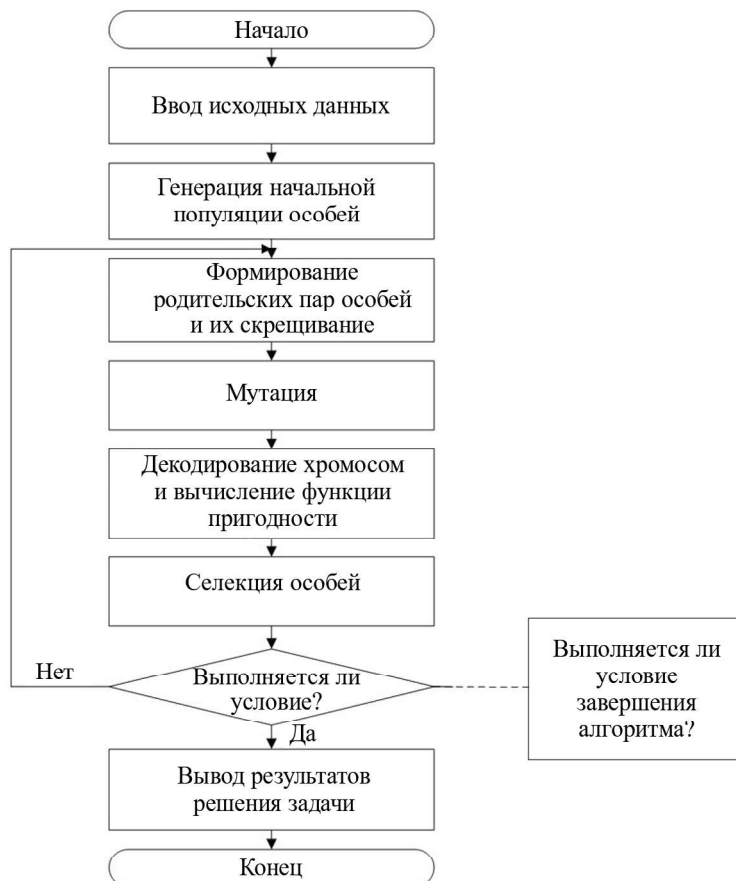


Рис. 2

Рассмотрим основные процедуры генетического алгоритма. На первом шаге работы алгоритма после ввода исходных данных формируется начальное множество потенциальных решений (начальной популяции особей). Генам  $g_i \left( i = \overline{1..n} \right)$  каждой хромосомы особи присваивается случайное значение из диапазона допустимых значений  $\left( g_i \in [1, q_i] \right)$ .

На последующем шаге сформированные особи группируются в родительские пары. Из каждой пары родительских особей с использованием процедуры скрещивания образуются особи-потомки, т. е. новые потенциальные решения задачи. В представленном генетическом алгоритме для образования хромосом особей-потомков применяется одноточечная процедура простого скрещивания [8]. В результате выполнения данной процедуры от каждой родительской пары особей формируются по две особи-потомка. Таким образом, размер популяции особей увеличивается вдвое.

На следующем шаге генетического алгоритма выполняется процедура мутации, когда изменяются значения одного или нескольких генов хромосомы, что также позволяет получить новые потенциальные решения задачи. В рассматриваемом генетическом алгоритме используется процедура одноточечной простой мутации, когда случайным образом определяется номер мутируемого гена, и его значение изменяется.

На следующем шаге генетического алгоритма происходит декодирование хромосом всех особей текущей популяции и оценка их приспособленности в соответствии с целевыми функциями (1), (2). Затем для отбора особей в следующее поколение эволюции применяется метод ранжирования по Парето и процедура элитной селекции [8].

Далее происходит повторное выполнение процедур до тех пор, пока не будет выполнено условие завершения алгоритма – неизменность значения функции пригодности лучшей особи в популяции на протяжении определенного количества последних поколений.

На основе генетического алгоритма для решения задачи компоновки блока летательного аппарата был разработан программный модуль с использованием средств языка программирования Microsoft C#. В качестве примера решения задачи рассматривалась компоновка электронного блока бортового оборудования летательного аппарата, содержащего 21 модуль. Перечень модулей, компонуемых в блоке, и их исходные конструктивные параметры приведены в табл. 2.

Таблица 2

Номер модуля	Модуль	Количество	Длина, мм	Ширина, мм	Высота, мм
1	Вилка СНЦ132	4	6,86	29,4	29,4
2	Печатная плата 1	1	84	94	2,37
3	Печатная плата 2	1	84	94	2,37
4	Печатная плата 3	1	84	94	2,37
5	Печатная плата 4	1	90	140	2,37
6	Порт USB	1	20	25	11,65
7	Плата соединительная ЗПС4-6	2	42	3,94	6
8	Плата соединительная ЗПС4-4	3	3,94	32	6
9	Вилка ЗПММ1-11Ш1	3	5	23	5
10	Розетка ЗПММ1-11Г9	3	5	23	9
11	Розетка DB9-F	1	10,5	10	28,8

Габаритные размеры блока – 155×117×69 мм. Для каждого размещаемого модуля с учетом конструктивных данных и требований к эргономике было определено множество потенциальных установочных мест.

На рис. 3 представлен результат размещения модулей в блоке, полученный в разработанной программе, реализующей генетический алгоритм решения задачи. Номера конструктивных модулей, указанные на рис. 3, соответствуют номерам, представленным в табл. 2.

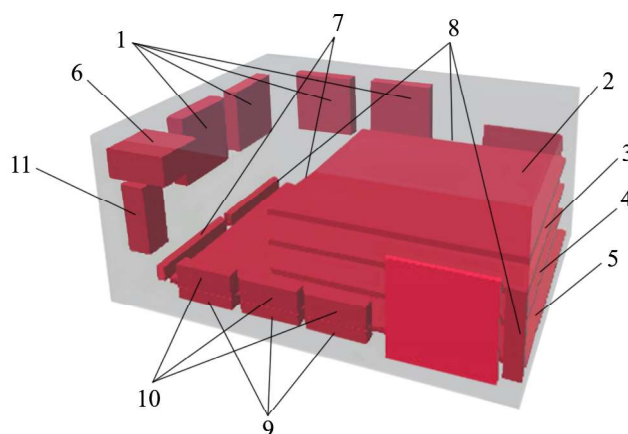


Рис. 3

Конструктивный модуль «Печатная плата № 1» содержит высокочастотные цифровые элементы с низким уровнем помехоустойчивости. Конструктивный модуль «Печатная плата № 4» представляет собой вторичный источник питания и содержит высоковольтные подсистемы, излучающие сильные электромагнитные поля. В связи с этим величина экспертной оценки электромагнитной совместимости модулей «Печатная плата № 1» и «Печатная плата № 4» равна максимальному значению – пяти, что позволило

удалить их друг от друга при размещении во внутриблочном монтажном пространстве, в соответствии с критерием (2).

В работе проводился сравнительный анализ решения задачи компоновки электронного блока летательного аппарата, полученного с использованием разработанной программы, с аналогичным вариантом компоновки, выполненным вручную. На основе проведенного сравнительного анализа можно сделать вывод о том, что автоматизацией компоновки блока на основе генетического алгоритма с учетом критерия электромагнитной совместимости возможно повысить качество получаемых решений на 15 % (по значениям частных целевых функций (1), (2)) и значительно сократить время выполнения проектной процедуры. Аналогичные результаты были получены при проведении исследований на других практических примерах.

Данная работа выполнена по соглашению № 075-03-2023-032 от 16.01.2023 (шифр FZSU-2023-004) между Министерством науки и высшего образования Российской Федерации и КНИТУ-КАИ по теме «Повышение эффективности и надежности элементов оборудования, создание новых нано- и полимерных композиционных материалов для энергетических и транспортных систем».

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Балюк Н.В. и др.* Электромагнитная совместимость технических средств подвижных объектов. М.: МАИ, 2004. 648 с.
2. *Гайнутдинов Р.Р., Чермошенцев С.Ф.* Методология обеспечения внутрисистемной электромагнитной совместимости бортового оборудования беспилотных летательных аппаратов // Изв. вузов. Авиационная техника. 2016. № 4. С. 155–160.
3. *Гайнутдинов Р.Р., Чермошенцев С.Ф.* Экспериментальные исследования электромагнитной стойкости технических систем при электромагнитных воздействиях от нескольких источников // Изв. вузов. Авиационная техника. 2024. № 1. С. 172–176.
4. *Гайнутдинов Р.Р., Чермошенцев С.Ф.* Методология исследования электромагнитной стойкости технических систем при внешних электромагнитных воздействиях от нескольких источников // Изв. вузов. Авиационная техника. 2023. № 1. С. 135–141.
5. *Ромащенко М.А.* Практическое применение конструкторско-технологических решений обеспечения ЭМС и ЭМУ в электронном приборостроении // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2011. № 9. С. 130–133.
6. *Ромащенко М.А., Стрельцов А.П.* Разработка методики компоновки блоков РЭС с учетом электромагнитных и тепловых характеристик // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2018. № 5. С. 95–101.
7. *Барнс Дж.* Электронное конструирование: Методы борьбы с помехами. М.: Мир, 1990. 238 с.
8. *Карпенко А.П.* Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 446 с.
9. *Жиленков М.А., Курейчик В.В.* Модификация вероятностного генетического алгоритма решения задачи размещения элементов ЭВА с учетом электромагнитной совместимости // Известия ЮФУ. Технические науки. 2017. № 7 (192). С. 6–15.
10. *Курейчик В.В., Жиленков М.А., Курейчик В.В.* Генетический алгоритм решения задачи компоновки с учетом электромагнитной совместимости // Информационные технологии. 2018. № 4. С. 239–244.
11. *Макеев П.А., Чермошенцев С.Ф.* Методика автоматизированного размещения элементов на гибко-жесткой печатной плате электронного средства с учетом тепловой и электромагнитной совместимости на основе двухуровневого генетического алгоритма // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2024. № 5. С. 53–64.
12. *Bogula N.Y., Chermoshentsev S.F., Suzdaltsev I.V.* Evolutionary Algorithms for Digital Electronic Printed Circuit Board Design // Proc. of the 15th International Conference on Soft Computing and Measurements, May 19–21, 2015, St. Petersburg, Russia. P. 153–156.
13. *Suzdaltsev I.V., Chermoshentsev S.F., Bogula N.Yu.* Bionic Algorithms for Multi-Criteria Design of Electronic Equipment Printed Circuit Board // Proc. of the 10th IEEE International Conference on Soft Computing And Measurements, May 24–26, 2017, St. Petersburg, Russia. P. 394–396.

Поступила в редакцию 17.12.24

После доработки 23.12.24

Принята к публикации 23.12.24

# Layout of Aircraft Onboard Equipment Electronic Units Taking into Account the Electromagnetic Compatibility Criterion

I.V. SUZDAL'TSEV AND D.E. KRUPENNIKOVA

Tupolev Kazan National Research Technical University, Kazan

*This paper is devoted to the automated solution of the problem of layout of the aircraft onboard equipment electronic unit. The substantive and mathematical formulations of the unit layout problem are presented, taking into account the electromagnetic compatibility criterion. The genetic algorithm for solving the multi-criteria problem of unit layout is developed. A practical example of problem solution is given.*

**Layout, onboard equipment unit, design module, genetic algorithm, electromagnetic compatibility**