

Научная статья

УДК 658.512.2:621.3.049.75

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=186902>

EDN: <https://www.elibrary.ru/XRAJOW>

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ РАЗМЕЩЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ НА ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЕ ЭЛЕКТРОННОГО СРЕДСТВА НА ОСНОВЕ МУРАВЬИНОГО АЛГОРИТМА С УЧЕТОМ КРИТЕРИЯ ТЕПЛОВОЙ СОВМЕСТИМОСТИ

И.В. Сузальцев 

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ», г. Казань, Республика Татарстан, Россия

 iliasuzd@mail.ru

Цитирование: Сузальцев И.В. Автоматизированное размещение элементов на печатной плате электронного средства на основе муравьиного алгоритма с учетом критерия тепловой совместимости// Труды МАИ. 2025. № 145. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=186902>

Аннотация. Одна из актуальных проблем проектирования современных авиационных и космических бортовых электронных средств заключается в обеспечении их нормального теплового режима, при котором для всех элементов должно выполняться условие работоспособности в диапазоне допустимых температур. Актуальность данной проблемы обуславливается наличием большого количества элементов, обладающих высокой мощностью тепловыделения, при условии их высокой плотности размещения в корпусе бортового электронного средства. Одним из способов снижения температур элементов является их оптимальное размещение на монтажной области печатной платы электронного средства, обеспечивающее максимальное увеличение тепловых потоков между элементами. В связи с этим, возникает необходимость в решении задачи оптимального размещения элементов на печатной плате с учетом критериев тепловой совместимости.

В данной работе рассматривается решение задачи размещения элементов на печатной плате электронного средства. Обосновывается выбор ограничений и критериев для данной задачи оптимизации. Для обеспечения нормального теплового режима печатной платы, в данной работе предлагается учитывать критерий тепловой совместимости. Показателем качества решения задачи является максимальная температура элемента среди всех элементов, размещаемых на печатной плате. Приводится описание муравьиного алгоритма для решения задачи размещения элементов на печатной плате. Представлены результаты вычислительных экспериментов по исследованию эффективности муравьиного алгоритма для решения задачи размещения элементов на печатной плате электронного средства. Проведенные эксперименты показали, что рациональное размещение элементов на печатной плате электронного средства позволяет снизить максимальную температуру элементов.

Ключевые слова: автоматизированное размещение элементов, печатная плата, электронное средство, муравьиный алгоритм, температура элементов, Парето-множество.

Финансирование: работа выполнена по соглашению № 075-03-2023-032 от 16.01.2023 г. (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».

AUTOMATED ELEMENTS PLACEMENT ON A PRINTED CIRCUIT BOARD OF ELECTRONIC DEVICE BASED ON THE ANT ALGORITHM TAKING INTO ACCOUNT THE THERMAL COMPATIBILITY CRITERION

I.V. Suzdaltsev  

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI»,
Kazan, Republic of Tatarstan, Russia

 iliasuzd@mail.ru

Citation: Suzdaltsev I.V. Automated elements placement on a printed circuit board of electronic device based on the ant algorithm taking into account the thermal compatibility criterion // Trudy MAI. 2025. No. 145. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=186902>

Abstract. One of the current issues for modern aviation and space onboard electronics design is providing their normal thermal conditions, ensuring all components operate within the permissible temperature range. This issue is conditioned by the large number of components with high heat dissipation power, which are densely packed within the onboard electronics housing. One way to reduce component temperatures is its optimal positioning on the printed circuit board (PCB) mounting area, maximizing heat flow between the components. Therefore, optimal PCB placement, taking into account thermal compatibility criteria, is essential.

The article considers the formulation of the problem of elements placement on a printed circuit board of an electronic device. The constraints and criteria for this optimization problem is described. To ensure normal thermal conditions of the printed circuit board, thermal compatibility criterion is proposed to take into account. The criteria of the problem solution quality is the maximum temperature of an element among all the elements placed on the printed circuit board. The temperature of the elements on the board is determined based on the solution of the heat balance equation. The ant algorithm for solving the problem of elements placement on a printed circuit board is described. The sequence of solution graph vertices in the path formed by the ant colony determines the sequence of elements placement on the printed circuit board and thus corresponds to a solution option for the placement problem. As part of the computational experiments, a decrease in the maximum temperature of elements on the printed circuit board of an electronic device was estimated depending on the number of the best path constructing stage by the ant colony, with different thermal conductivity between the elements and the air environment. The results of computational experiments on the study of the ant algorithm efficiency for solving the problem of elements placement on the printed circuit board of electronic devices are presented. The experiments showed the efficiency of the ant algorithm, namely: optimal

elements placement on the printed circuit board of the electronic device allows to reduce the maximum temperature of the elements.

Keywords: elements placement, printed circuit board, electronic device, ant algorithm, thermal compatibility, Pareto set, concession method.

Funding: This work was carried out under Agreement No. 075-03-2023-032 dated January 16, 2023 (code: FZSU-2023-004) between the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation and KNRTU-KAI, on the topic: «Improving the Efficiency and Reliability of Equipment Components and Developing New Nano- and Polymer Composite Materials for Energy and Transport Systems».

Введение

Современные авиационные и космические бортовые электронные средства (ЭС) содержат большое количество элементов на печатной плате, обладающих высокой мощностью тепловыделения, при условии их высокой плотности размещения. В связи с этим, при проектировании ЭС возникает необходимость в обеспечении нормального теплового режима, при котором для всех элементов должно выполняться условие работоспособности в диапазоне допустимых температур. Одним из способов снижения температур элементов является их оптимальное размещение на монтажной области печатной платы, обеспечивающее максимальное увеличение тепловых потоков между элементами. Таким образом, возникает необходимость в решении задачи оптимального размещения элементов на печатной плате с учетом, не только критериев трассируемости соединений, но и критериев тепловой совместимости элементов.

В работе [1, 2] представлены алгоритмы размещения элементов на печатных платах, с учетом «теплового» критерия. Однако, предлагаемые в данных работах, алгоритмы применяются только для размещения элементов на рельефных платах с металлическими подложками и кондуктивным теплоотводом с краев платы. Работа [3] посвящена разработке и исследованию генетического алгоритма размещения элементов на микроплатах электронного

модуля трехмерной компоновки с учетом критерия, минимизирующего величину интенсивности отказов ЭС, которая определяется на основе максимальных значений температуры каждого элемента. Максимальные значения температур каждого элемента вычисляются на основе уравнения теплопроводности с использованием метода конечных разностей. Однако, использование метода конечных разностей значительно увеличивает вычислительную сложность предлагаемого алгоритма решения задачи. В работе [4] исследуется методика автоматизированного размещения элементов на гибко-жесткой печатной плате ЭС с учетом критерия минимума суммарной взвешенной длины соединений печатной платы, а также критерия равномерного распределения теплонагруженных элементов по поверхности печатной платы, на основе генетического алгоритма. Однако, предлагаемый в работе критерий тепловой совместимости, не учитывает значения температур размещаемых элементов, что не исключает возможности их перегрева. В работе [5] предлагается использование муравьиного алгоритма для оптимизации размещения элементов на печатной плате с целью минимизации их максимальной и средней рабочей температуры. Однако, при решении задачи размещения элементов на печатной плате, не учитываются критерии трассируемости электрических соединений элементов. В работе [6] рассматривается применение мультиагентных систем для решения задачи размещения элементов на печатной плате. Однако, в работе не представлены исследования эффективности предлагаемого подхода для решения задачи размещения элементов на печатной плате с учетом длины электрических соединений и тепловых параметров элементов.

На основе проведенного обзора источников по теме данной работы, можно сделать вывод о необходимости в проведении дальнейших исследований, направленных на поиск эффективных алгоритмов для решения задачи размещения элементов на печатной плате с учетом критериев качества, учитывающих как длину электрических соединений, так и температуру элементов.

Целью данной работы является разработка и исследование эффективности муравьиного алгоритма для решения задачи размещения элементов на печатной

плате ЭС с учетом критерия минимизации длины соединений, а также критерия тепловой совместимости.

Постановка задачи автоматизированного размещения элементов на печатной плате

Задача размещения элементов на печатной плате заключается в нахождении оптимального их месторасположения в пределах монтажной области печатной платы ЭС. Исходными данными задачи компоновки являются: электрическая принципиальная схема соединения размещаемых элементов; габаритные размеры, ориентация и тепловые параметры элементов; габаритные размеры монтажной области печатной платы. Результатом решения задачи являются координаты геометрических центров (центров вращения) элементов, размещаемых в пределах монтажной области печатной платы.

Пусть E ($E=\{e_i / i = \overline{1, n}\}$) – множество прямоугольных посадочных площадок элементов (n - количество размещаемых элементов) с габаритными размерами $a_i \times b_i$. Определим на монтажной области печатной платы с габаритными размерами $A \times B$ двумерную правостороннюю декартовую прямоугольную систему координат с множеством точек P ($P=\{p\}$), образованную перпендикулярными действительными числовыми осями Ox и Oy с общим началом в точке O и одинаковой масштабной единицей. При этом, каждая точка $p \in P$ определяется упорядоченной парой координат $p=(x_p, y_p)$. Тогда, решение задачи размещения элементов на печатной плате может быть представлено инъективным отображением:

$$\lambda = Inj(E, P), \lambda \in \Lambda$$

где Λ - множество допустимых решений задачи. При этом, необходимо найти такой вариант размещения элементов на монтажной области печатной платы ($\lambda \in \Lambda$), при котором обеспечивается выполнение критериев оптимизации и ограничений задачи.

Критерием оптимального размещения элементов на печатной плате является минимум суммарной взвешенной связанности элементов [4, 6, 7, 8]:

$$\phi_1(\lambda) = \sum_{i_1=1}^n \sum_{i_2=i_1+1}^n c_{i_1 i_2} d(p_{i_1}, p_{i_2}) \rightarrow \min, \quad (1)$$

где $c_{i_1 i_2}$ - количество соединений между i_1 -ым и i_2 -ым элементами ($i_1 = \overline{1, n}$, $i_2 = \overline{1, n}$), а $d(p_{i_1}, p_{i_2})$ - Евклидово расстояние между точками центров вращения p_{i_1} и p_{i_2} прямоугольных посадочных площадок i_1 -го и i_2 -го элементов на печатной плате:

$$d(p_{i_1}, p_{i_2}) = \sqrt{(x_{p_{i_1}} - x_{p_{i_2}})^2 + (y_{p_{i_1}} - y_{p_{i_2}})^2}, \quad p_{i_1} \in P, p_{i_2} \in P, p_{i_1} = (x_{i_1}, y_{i_1}), p_{i_2} = (x_{i_2}, y_{i_2})$$

Использование критерия (1), при оптимизации размещения элементов, позволяет минимизировать длину электрических соединений, что способствует повышению трассируемости электрических соединений (увеличению процента разведенных на этапе трассировки соединений от общего их числа) печатных плат.

Для формализации ограничений определим признаки ориентации, а также абсциссы и ординаты крайних точек посадочных площадок размещаемых элементов.

Признак ориентации g_i :

$$g_i = \begin{cases} 1, & \text{если } i\text{-ый элемент располагается горизонтально, } i = \overline{1..n}. \\ 0, & \text{если } i\text{-ый элемент располагается вертикально,} \end{cases}$$

Абсцисса крайних левых (x_i^l) и правых (x_i^r) точек элемента i ($i = \overline{1, n}$) определяются выражениями:

$$\begin{aligned} x_i^l &= x_i - (g_i(a_i - b_i) + b_i) / 2, \\ x_i^r &= x_i + (g_i(a_i - b_i) + b_i) / 2. \end{aligned}$$

Ординаты крайних нижних (y_i^f) и верхних (y_i^c) точек элемента i ($i = \overline{1, n}$) определяются аналогично:

$$\begin{aligned} y_i^f &= y_i - (g_i(b_i - a_i) + a_i) / 2, \\ y_i^c &= y_i + (g_i(b_i - a_i) + a_i) / 2. \end{aligned}$$

Местоположения геометрических центров элементов должны располагаться в пределах монтажной области печатной платы:

$$x_i^l \geq 0, x_i^r \leq A, y_i^f \geq 0, y_i^c \leq B, i = \overline{1, n}. \quad (2)$$

Введем в рассмотрение признаки:

$$W_{i_1 i_2}^g = \begin{cases} 1, & \text{если } x_{i_1}^r \leq x_{i_2}^l, i_1 = \overline{1, n}, i_2 = \overline{1, n}, \\ 0, & \text{в противном случае;} \end{cases}$$

$$W_{i_1 i_2}^v = \begin{cases} 1, & \text{если } y_{i_1}^c \leq y_{i_2}^f, i_1 = \overline{1, n}, i_2 = \overline{1, n}, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Элементы при размещении на плате не должны пересекаться:

$$(1 - W_{i_1 i_2}^g)(1 - W_{i_2 i_1}^g)(1 - W_{i_1 i_2}^v)(1 - W_{i_2 i_1}^v) = 0, i_1 = \overline{1, n}, i_2 = \overline{1, n}. \quad (3)$$

Кроме того, в качестве конструктивных ограничений задачи размещения элементов на плате могут быть заданы координаты фиксированных элементов и запрещенные зоны печатной платы, расположение элементов в которых является недопустимым.

Каждый размещенный элемент на плате характеризуется максимально возможной мощностью выделяемого теплового потока Q_i , равномерно распределенного по его прямоугольной области ($i = \overline{1, n}$). Оценим температурное поле печатной платы с расположенными на ней элементами [9, 10]. Теплота, выделяемая каждым элементом, уносится воздухом и лучистым потоком, а также передается другим элементам посредством теплопроводности материала печатной платы и соединяющих их проводников.

Рассмотрим критерий тепловой совместности размещаемых элементов на печатной плате. При определении температурного поля печатной платы ЭС будем использовать следующие допущения:

- плата представляет собой анизотропную пластину, тепловое поле которой изменяется по двум координатам, перепадом по толщине пренебрегаем;
- температура каждого элемента есть среднеповерхностная температура его корпуса;
- тепловой поток от элемента к плате равномерно распределен по прямоугольной области посадочного места.

Пусть температура воздуха и размещенного i -го элемента равны соответственно T_0 и T_i , а фоновая температура θ_i определяется выражением: $\theta_i = T_i - T_0$, ($i = \overline{1..n}$). Можно оценить тепловую проводимость σ_{i_1, i_2} между i_1 -ым и i_2 -ым элементами ($i_1, i_2 = \overline{1..n}$), а также $\sigma_{i_1, 0}$, тепловую проводимость между i_1 -ым размещаемым элементом и воздухом.

При указанных допущениях система линейных уравнений теплового баланса для каждого элемента имеет следующий вид:

$$Q_{i_1} = \left(\sum_{i_2=1..n, i_1 \neq i_2} \sigma_{i_1, i_2} + \sigma_{i_1, 0} \right) \times \theta_{i_1} - \sum_{i_2=1..n, i_1 \neq i_2} (\sigma_{i_1, i_2} \theta_{i_2}), \quad i_1 = \overline{1..n}.$$

Искомые значения фоновой температуры являются корнями системы линейных уравнений.

Тогда, задача размещения элементов на печатной плате с учетом критерия тепловой совместности, формулируется следующим образом. Необходимо найти такое размещение элементов (месторасположение центров прямоугольных областей элементов) на печатной плате, при котором температура элемента, обладающего максимальной температурой среди всех элементов, размещаемых на печатной плате, была бы минимальна:

$$\phi_2(\lambda) = \max_{i=1..n} (T_i) \rightarrow \min. \quad (4)$$

При этом, во избежание перегревов элементов на печатной плате, их температура не должна превышать предельно-допустимые значения, установленные в спецификациях:

$$T_i < T_i^{\text{valid}}, \quad i = \overline{1..n},$$

где T_i^{valid} - предельно-допустимая температура i -го элемента.

В задаче размещения элементов на печатной плате возникает необходимость обеспечить решение, учитывая одновременно критерии оптимальности отражающих длину соединений ($\phi_1(\lambda)$) и температуру элементов ($\phi_2(\lambda)$) ($\lambda \in \Lambda$), т. е. решение характеризуется векторной оценкой совокупности скалярных показателей:

$$\vec{\phi}(\lambda) = (\phi_1(\lambda), \phi_2(\lambda)) (\Phi = \{\vec{\phi}(\lambda) / \lambda \in \Lambda\}).$$

Данная задача размещения элементов на печатной плате относится к задачам многокритериальной оптимизации, так как критерии противоречивы и независимая оптимизация по каждому из них приводит к различным решениям. По каждому критерию, независимо от других критериев, можно упорядочить варианты размещения элементов на печатной плате таким образом, что меньшее значение первого критерия соответствует предпочтению варианта размещения перед другими вариантами, а большее значения второго критерия соответствует предпочтению варианта размещения перед другими вариантами.

Решение задачи многокритериальной оптимизации в общем случае не является оптимальным ни для одного из частных критериев, а оказывается некоторым компромиссом для вектора в целом. Для решения многокритериальной задачи размещения элементов на печатной плате осуществляется построение Парето множества Λ^* [11]:

$$\forall \lambda^* \in \Lambda^* \neg \exists \lambda \in \Lambda ((\Phi(\lambda^*) \succ \Phi(\lambda))).$$

Выбор результирующего варианта размещения элементов на монтажной области печатной платы осуществляется лицом, принимающим решение (ЛПР), исходя из его предпочтений (одного варианта перед другим), с учетом двух критериев задачи, среди множества Парето-оптимальных решений.

Муравьиный алгоритм для решения задачи автоматизированного размещения элементов на печатной плате

Для решения многокритериальной задачи размещения элементов на печатной плате используется муравьиный алгоритм [11, 12, 13, 14, 15]. Муравьиные алгоритмы относятся к классу вероятностно-детерминированных методов оптимизации и основаны на моделировании поведения муравьев при поиске кратчайшего пути от муравейника до источника пищи. Для решения задачи размещения элементов на печатной плате с использованием муравьиного алгоритма преобразуем исходную задачу в задачу нахождения оптимального пути в графе.

Построим взвешенный связанный ориентированный граф решений $G=(V, U)$, представляющий собой сеть с одним истоком и одним стоком. Каждой вершине графа $v \in V$ сопоставляется множество решений задачи решений задачи. Определим множество вершин V графа следующим образом:

$$V = \bigcup_{t=0}^n V_t, V_t = \{v_t\}, \text{ где}$$

$$v_t = \begin{cases} \emptyset, & \text{если } t = 0, \\ \text{Inj}(N_t \rightarrow I^E), & \text{если } 1 \leq t < n, \\ N_n \times I^E, & \text{если } t = n, \end{cases}$$

где: I^E – множество номеров размещаемых элементов, $I^E = \{i / i = \overline{1..n}\}$; n – количество размещаемых элементов, $n = |I^E|$; N_t – отрезок натурального ряда, $N_t = \{j / 1 \leq j \leq t\}, t = \overline{1, n}$.

Определим множество дуг U графа:

$$U = \{(v_t, v_{t+1}) / v_t \in V_t, v_{t+1} \in V_{t+1}, v_t \subset v_{t+1}, t = \overline{0, n-1}\}.$$

Ввиду отсутствия кратных дуг в графе G определим множество путей S из вершины v_0 в вершину v_n в виде инъекций отрезка натурального ряда с включенным нулем и вершин графа решений:

$$S = \{s / s : N_n^* \rightarrow V, N_n^* = \{j / 0 \leq j \leq n\}, v_0 = s(0), v_n = s(n), (s(t), s(t+1)) \in U, t = \overline{0, n-1}\}.$$

При движении муравья по пути $s \in S$ из начальной вершины v_0 в конечную вершину v_n формируется комбинация чисел натурального ряда N_n^* , определяющая порядок размещения элементов на монтажной области печатной платы, с использование процедуры блочного декодера [16].

Таким образом, каждый путь муравья $s \in S$ соответствует одному варианту решения задачи размещения элементов на печатной плате.

Поставим в соответствие каждой дуге графа G ее весовые оценки C_1 и C_2 , определяемые на основе первого и второго критериев задачи.

В соответствии с первым критерием:

$C_1: U \rightarrow R$,

$$C_1(u) = \begin{cases} 1, & \text{если } u = (v_0, v_1), v_1 \in V_1, \\ \sum_{j=1}^t c(v_t(j), v_{t+1}(t+1)) \times d(p_{v_t(j)}, p_{v_{t+1}(t+1)}), & \text{если } u = (v_t, v_{t+1}), t = \overline{1, n-2}, \\ \sum_{j=1}^{n-1} c(v_{n-1}(j), j^*) \times d(p_{v_{n-1}(j)}, p_{j^*}), & \text{если } u = (v_{n-1}, v_n), j^* \in (I^E \setminus \text{Im}(v_{n-1})), \end{cases},$$

где $v_t(j)$ – номер элемента, занимающего j -ое положение в очереди при размещении на печатной плате, в соответствии с множеством решений, сопоставленном вершине v_t графа G ; $v_{t+1}(t+1)$ - номер элемента, занимающего положение $t+1$ в очереди при размещении на печатной плате, в соответствии с множеством решений, сопоставленном вершине v_{t+1} графа G

В соответствии со вторым критерием:

$C_2: U \rightarrow R$,

$$C_2(u) = \begin{cases} 1, & \text{если } u = (v_0, v_1), v_1 \in V_1, \\ \sum_{j=1}^t \frac{|Q_{v_t(j)} - Q_{v_{t+1}(t+1)}|}{d(p_{v_t(j)}, p_{v_{t+1}(t+1)})}, & \text{если } u = (v_t, v_{t+1}), t = \overline{1, n-2}, \\ \sum_{j=1}^{n-1} \frac{|Q_{v_{n-1}(j)} - Q_{j^*}|}{d(p_{v_{n-1}(j)}, p_{j^*})}, & \text{если } u = (v_{n-1}, v_n). j^* \in (I^E \setminus \text{Im}(v_{n-1})), \end{cases}$$

Таким образом, задача размещения элементов на печатной плате сводится к задаче поиска пути в построенном графе решений G .

Для решения задачи используется «муравьиный» алгоритм, представленный на рисунке 1, выполнение которого включает серию итераций (поколений муравьев).

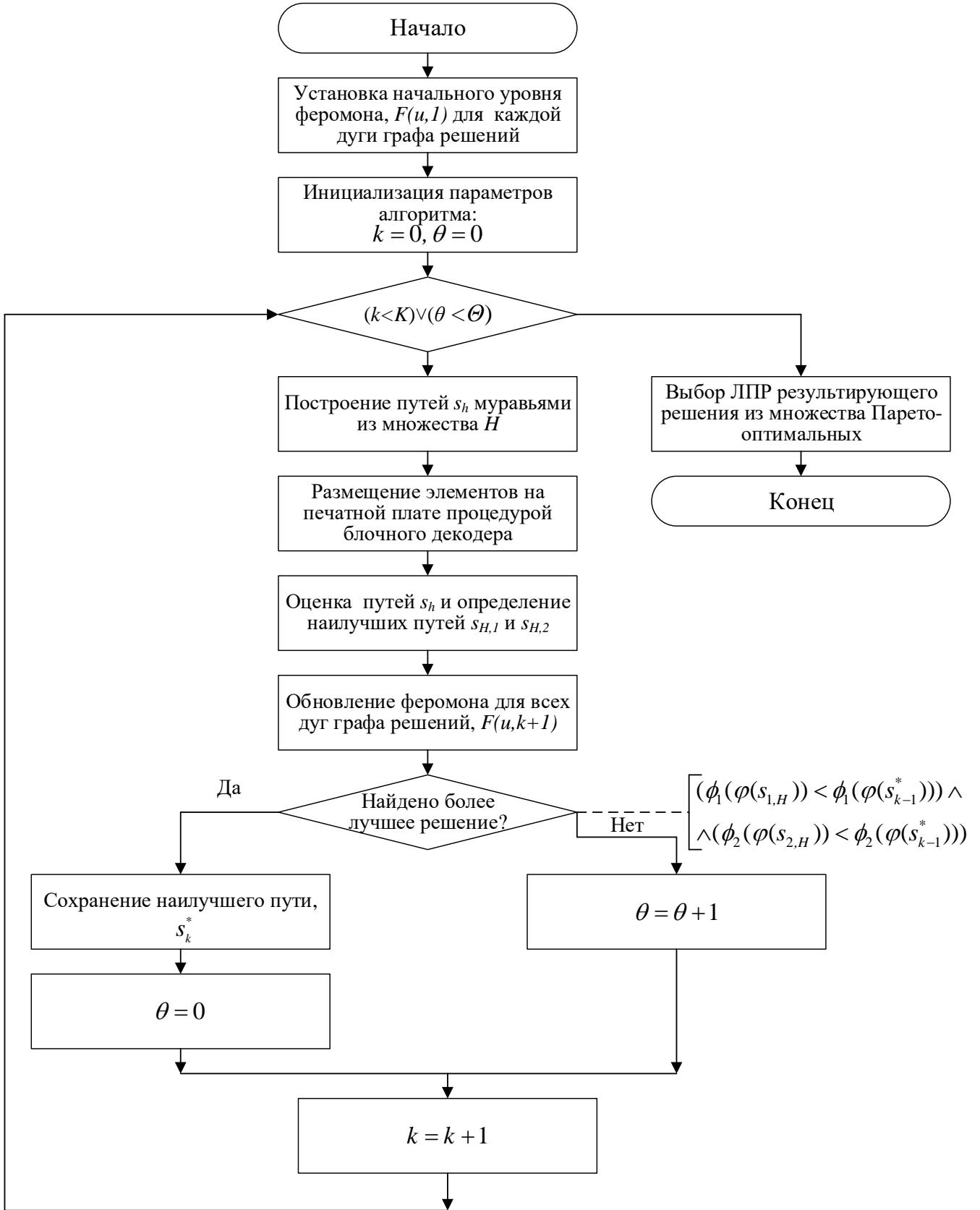


Рисунок 1 - Структурная схема муравьиного алгоритма.

Каждой дуге $u \in U$ графа решений $G(VU)$ ставится в соответствие коэффициент $F(u, k)$ – уровень «феромона», определяющий значимость дуги при ее выборе муравьем в процессе построения пути (k -номер итерации алгоритма).

Перед первой итерацией муравьиного алгоритма коэффициент $F(u,1)$ для каждой дуги $u \in U$ графа решений $G(V,U)$ равен единице:

$$F(u, 1) = 1, \forall u \in U.$$

На каждой итерации алгоритма осуществляется построение путей S_H ($S_H = \{S_h\}$) муравьями из множества (колонии) H ($H = \{h\}$) из начальной вершины v_0 в конечную вершину v_n графа решений $G(V,U)$. При этом, половина муравьев из множества H осуществляет построение путей S_{H_1} ($S_{H_1} = \{s_{h_1}\}, S_{H_1} \in S_H, H_1 \in H, |H_1| = |H|/2$), в соответствии с первым критерием задачи, а другая половина – в соответствии с вторым критерием. Муравьи из множества S_{H_2} ($S_{H_2} = \{s_{h_2}\}, S_{H_2} \in S_H, H_2 \in H, |H_2| = |H|/2, H_1 \cup H_2 = H, S_{H_1} \cup S_{H_2} = S_H$) – в соответствии с третьим критерием.

Путь s_h каждого «муравья» ($s_h \in S, h \in H$) формируется случайно и включает n шагов. Пусть перед выполнением j -ого шага ($j = \overline{1..n}$) «муравей» находится в вершине v_{j-1} ($v_{j-1} \in V_{j-1}$). Делая очередной шаг, «муравей» случайно выбирает дугу u ($u = (v_{j-1}, v_j)$) из множества дуг U_j ($U_j \subset U$) исходящих из вершины v_{j-1} , по которой осуществляется переход к следующей вершине.

Вероятность выбора дуги u оценивается выражениями соответственно для первого и второго критериев:

$$P(u, k) = \frac{F_1(u, k) \times \frac{1}{C_1(u)}}{\sum_{w \in U_j} F_1(w, k) \times \frac{1}{C_1(u)}}, \quad U_j = \{w / w \in U, w = (v_{j-1}, v_j), v_j \in V\},$$

$$P(u, k) = \frac{F_2(u, k) \times C_2(u)}{\sum_{w \in U_j} F_2(w, k) \times C_2(u)}, \quad U_j = \{w / w \in U, w = (v_{j-1}, v_j), v_j \in V\}.$$

Выбор дуги с заданной вероятностью осуществляется с помощью процедуры «колесо рулетки». Количество секторов рулетки определяется равным числу дуг $u \in U_j$, исходящих из текущей вершины v_{j-1} (т.е. размерности множества $|U_j|$). Площадь каждого сектора колеса рулетки пропорциональна вероятности $P(u)$. Выбор «муравьем» следующей вершины маршрута при

найденных оценках значений вероятностей может быть представлен, как результат поворота колеса рулетки, поскольку «выигравшая» вершина относится к выпавшему сектору этого колеса. Очевидно, что чем больше сектор, тем больше вероятность «победы» соответствующей вершины при выборе.

После завершения построения путей множеством муравьев выполняется процедура блочного декодера [16]. Процедура блочного декодера выполняет последовательное размещение элементов на монтажной области печатной платы, в соответствии с порядком, заданным комбинацией чисел натурального ряда N_n^* , формируемой муравьем при построении пути. При выполнении процедуры блочного декодера, очередной элемент устанавливается на печатную плату в вакантную левую нижнюю позицию, с учетом накладываемых ограничений задачи (2) и (3). Таким образом, с использованием процедуры блочного декодера, каждому пути $s_h \in S_H$, построенному муравьем, ставится в соответствии вариант размещения элементов на монтажной области печатной платы, что может быть задано отображением:

$$\varphi : S_H \rightarrow \Lambda$$

Далее происходит оценка каждого варианта размещения элементов на монтажной области печатной платы, в соответствии с критериями задачи (1) и (4). Кроме того, среди всех путей, построенных колонией муравьев на текущей (k -ой) итерации алгоритма, определяются наилучшие пути муравья, соответствующие вариантам размещения элементов на монтажной области печатной платы, обладающим минимальными значениями целевых функций (1) и (4):

$$s_{H,1} = \underset{s_h \in S_H}{\operatorname{argmin}}(\phi_1(\varphi(s_h))), \varphi(s_h) \in \Lambda,$$

$$s_{H,2} = \underset{s_h \in S_H}{\operatorname{argmin}}(\phi_2(\varphi(s_h))), \varphi(s_h) \in \Lambda.$$

В рамках последующей процедуры муравьиного алгоритма, происходит изменение коэффициента уровня «феромона» для каждой дуги u ($u \in U$) графа решений, в соответствии со следующими выражениями:

$$F_1(u, k+1) = \begin{cases} \frac{1-\alpha}{\alpha} \frac{\sum_{w \in U_j} \frac{1}{C_1(w)}}{\frac{1}{C_1(u)}}, & \text{если дуга } u \in s_{1,H}^*, \\ F_1(u, k) - \frac{1-e^{-\beta k}}{1-\alpha e^{-\beta k}} \times F_1(u, k), & \text{в противном случае,} \end{cases},$$

$$F_2(u, k+1) = \begin{cases} \frac{1-\alpha}{\alpha} \frac{\sum_{w \in U_j} C_2(w)}{C_2(u)}, & \text{если дуга } u \in s_{2,H}^*, \\ F_2(u, k) - \frac{1-e^{-\beta k}}{1-\alpha e^{-\beta k}} \times F_2(u, k), & \text{в противном случае,} \end{cases}.$$

где $u = (v_{j-1}, v_j)$, α – коэффициент, равный вероятности события, заключающего в том, что при построении путей множеством муравьев не будет выбираться дуга, принадлежащая наилучшему пути s_k^* , ($k \in N$); $\overline{U_j}$ – множество дуг ($\overline{U_j} \subset U$), исходящих из вершины v_{j-1} за исключением дуги u ; β – коэффициент, определяющий скорость «испарения» феромона; $F(u, k)$ – значение коэффициента уровня феромона дуги u на k -ой итерации алгоритма.

Если в течение текущей итерации муравьиного алгоритма, было найдено более лучшее решение хотя бы по одному из критериев задачи, по сравнению с решениями, полученными на предыдущих итерациях алгоритма, $((\phi_1(\varphi(s_{1,H})) < \phi_1(\varphi(s_{k-1}^*)) \quad \text{или} \quad (\phi_2(\varphi(s_{2,H})) < \phi_2(\varphi(s_{k-1}^*)))$, то путь муравья, соответствующий данному решению, сохраняется:

$$s_k^* = \begin{cases} s_{1,H}, & \phi_1(\varphi(s_{1,H})) < \phi_1(\varphi(s_{k-1}^*)) \\ s_{2,H}, & \phi_2(\varphi(s_{2,H})) < \phi_2(\varphi(s_{k-1}^*)) \end{cases},$$

а величине θ (равной количеству попыток улучшить текущее решение) присваивается нулевое значение ($\theta=0$). В противном случае, величина θ увеличивается на единицу.

Работа муравьиного алгоритма завершается в одном из двух случаев:

1. При выполнении заданного количества итераций (поколений) муравьиного алгоритма, K (т.е., пока $k < K$).

2. При выполнении заданного количества попыток для улучшения полученного решения, θ (т.е., пока $\theta < \Theta$).

Выбор результирующего решения задачи (варианта размещения элементов) осуществляется ЛПР среди множества Парето-оптимальных решений, полученных на последней итерации алгоритма.

Исследования эффективности муравьиного алгоритма решения задачи автоматизированного размещения элементов на печатной плате

Рассмотренный муравьиный алгоритм решения задачи размещения элементов на печатной плате был реализован в среде программирования MS Visual Studio, на языке C#. С использованием разработанной программы были проведены экспериментальные исследования эффективности разработанного алгоритма. В качестве исходных данных, для проведения экспериментальных исследований, использовались электрические принципиальные схемы бортовых ЭС летательного аппарата, обладающие различным количеством элементов.

В работе были проведены следующие экспериментальные исследования муравьиного алгоритма решения задачи размещения элементов на печатной плате:

1. Исследование Парето-аппроксимации решений задачи размещения с учетом критерия взвешенного расстояния и критерия максимальной температуры.

В рамках данного экспериментального исследования, выполнялась оценка мощности множества Парето-оптимальных решений задачи, получаемых с использованием муравьиного алгоритма. На рисунке 2 представлена Парето-аппроксимация решений задачи размещения 21 элемента на печатной плате, соответствующих множеству путей, построенных муравьями на последней итерации алгоритма. По осям абсцисс и ординат откладываются нормализованные значения первого и второго критериев соответственно. Квадратные точки соответствуют Парето-оптимальным решениям задачи.

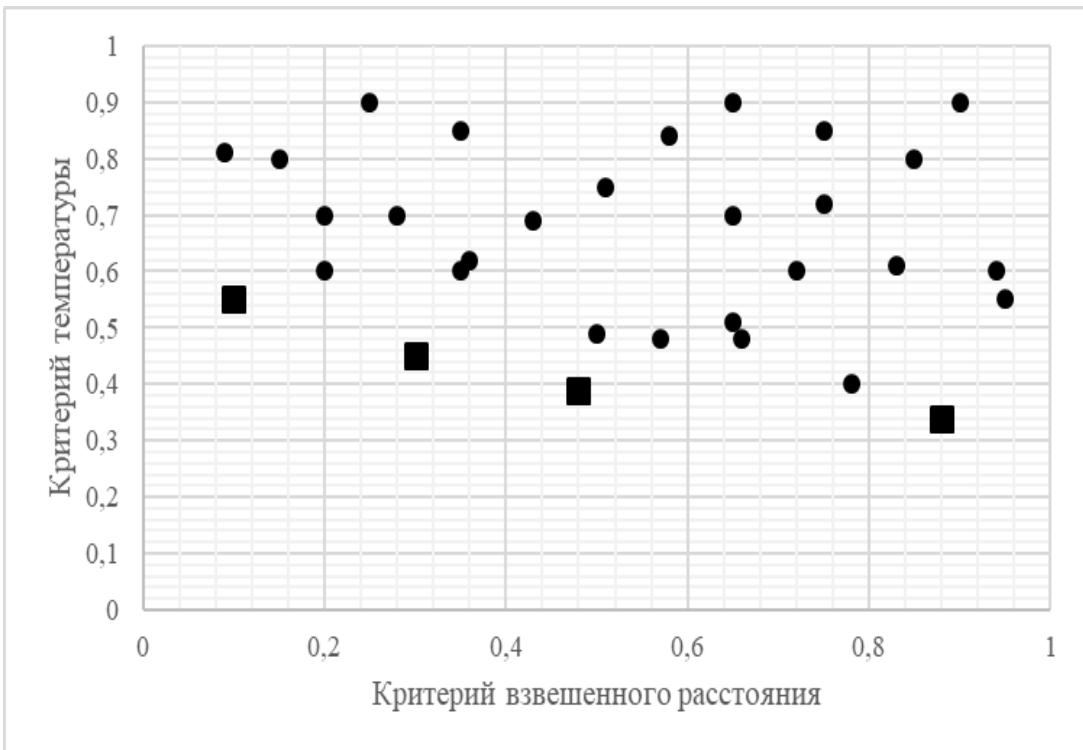


Рисунок 2 - Парето-аппроксимация решений задачи размещения элементов на печатной плате с учетом критерия взвешенного расстояния и критерия максимальной температуры элемента.

По результатам проведенных исследований можно сделать вывод о том, что количество Парето-оптимальных решений составляет 10-15 % от общего количества полученных решений (составляющих последнее поколение муравьиного алгоритма).

2. Тепловое моделирование различных вариантов размещений элементов на печатной плате, полученных с использованием разработанной программной реализации муравьиного алгоритма.

В рамках экспериментальных исследований, в системе «АСОНИКА-ТМ» было выполнено тепловое моделирование различных вариантов размещений элементов на печатной плате, полученных с использованием разработанной программной реализации муравьиного алгоритма.

На рисунке 3 представлен пример теплового моделирования (термограмма) размещения 21 элемента на печатной плате.

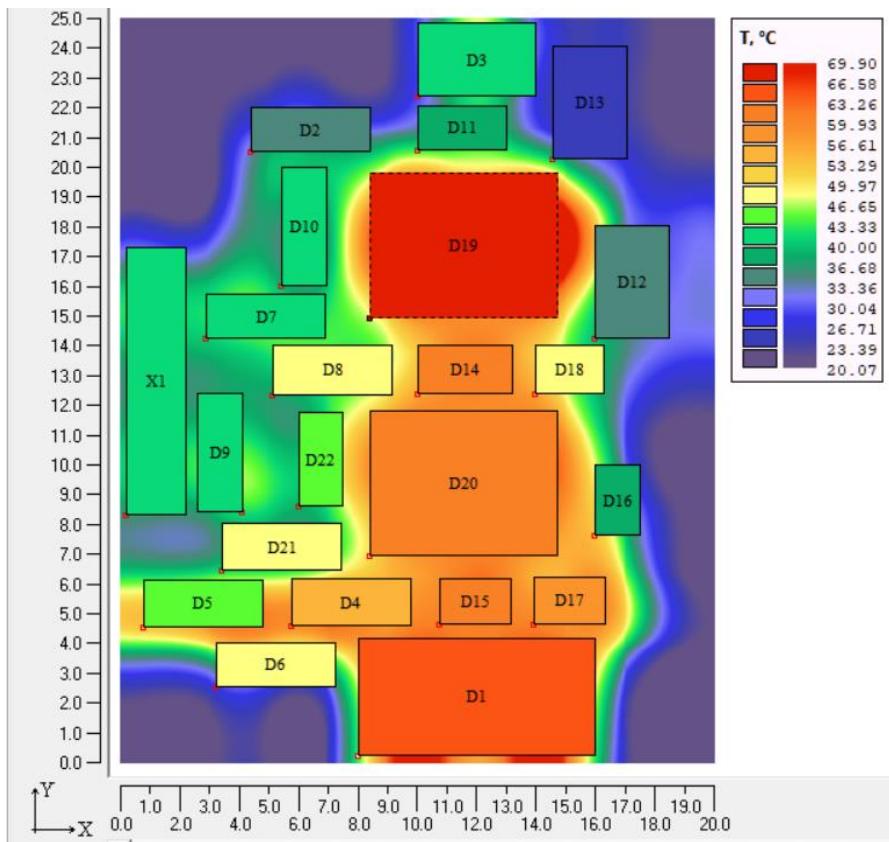


Рисунок 3 - Термограмма печатной платы, полученная в системе «АСОНИКА-ТМ».

Исходя из результатов моделирования в системе «АСОНИКА-ТМ», для рассматриваемого примера (рисунок 2), максимальная температура на печатной плате достигается в элементе D19 и составляет около 70 °С, что вполне соответствует аналогичным результатам, полученным в разработанной программе. При этом, температура всех элементов не превышает предельно-допустимые значения, установленные в их спецификациях.

3. Сравнительные исследования качества решений задачи размещения элементов на печатной плате по критерию минимального взвешенного расстояния, полученных с использованием муравьиного, жадного и слепого алгоритмов.

В экспериментальном исследовании оценивалось значение целевой функции (1) для решений задачи размещения элементов, полученных с использованием различных алгоритмов размещения. В таблице 1 представлены значения показателей качества по критерию минимального суммарного взвешенного расстояния, для решений задачи размещения элементов на

печатной плате с использованием муравьиного, жадного алгоритмов, а также алгоритма слепого поиска.

Таблица 1

Результаты исследований показателя качества, полученных с использованием различных алгоритмов

Количество размещаемых элементов	Жадный алгоритм	Алгоритм слепого поиска	Муравьиный алгоритм
22	861	772 (10,3%)	757 (12,0%)
81	6013	5237 (12,9%)	5006 (16,7%)
106	7499	7035 (6,1%)	6757 (9,9%)
148	12138	11752 (3,1%)	11273 (7,1%)
182	15363	14518 (5,5%)	14055 (8,5%)

Как видно из результатов исследований, муравьиные алгоритмы превосходят другие рассмотренные алгоритмы размещения (жадные и слепой алгоритмы) на 3- 16% по качеству получаемых решений.

Заключение

В процессе работы была сформулирована содержательная и математическая постановка задачи автоматизированного размещения элементов на печатной плате электронного средства, с учетом критерия и ограничения тепловой совместимости. Разработанный для решения данной задачи муравьиный алгоритм, показал свою эффективность в ходе проведенных экспериментальных исследований, качественно превосходя другие алгоритмы размещения, позволяя оптимизировать размещение элементов на печатной плате для снижения максимальной температуры.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

Список источников

1. Кокотов, В.З. Модифицированный алгоритм "теплового размещения" электрорадиоэлементов на платах с четырехсторонним кондуктивным теплоотводом / В.З. Кокотов // Информационные технологии. – 2006. – № 4. – С. 2-9.
2. Квинт И.Э. Алгоритмы размещения электрорадиоэлементов на платах с кондуктивным теплоотводом / И.Э. Квинт // Наукоемкие технологии и интеллектуальные системы 2009: Материалы X международной молодежной научно-технической конференции. М., 2009. – С. 160-165.
3. Новиков И.С. Оптимизация конструкции электронных модулей трехмерной компоновки по тепловому критерию / И.С. Новиков, В.А. Шахнов // Проектирование и технология электронных средств. – 2007. – №3. – С. 31-37.
4. Макеев П.А. Апробация методики автоматизированного размещения элементов на гибко-жесткой печатной плате на практических примерах / Макеев П. А., Чермошенцев С. Ф. // Труды МАИ. – 2024. – № 134. – URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=178481>.
5. Wang Lianlian. Thermal Optimization of Electronic Devices on PCB Based on the Ant Colony Algorithm / Lianlian Wang, Guanghua Lu, Kunkun Yang // Conference proceeding of 2018 International Conference on Electronics Technology, Chengdu, China, May 23-27, 2018. – Chengdu, 2018. – Р. 55-59. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8401424> (дата обращения 19.11.2025).
6. Корячко В. П. Математическая модель представления мультиагентных систем и ее применение в задачах топологического проектирования модулей радиоэлектронных средств / В. П. Корячко, Д. А. Перепелкин, В. Ю. Ликучев // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2023. – № 83. – С. 48-61. – DOI 10.21667/1995-4565-2023-83-48-61.
7. Автоматизация конструкторского проектирования электронной аппаратуры : учебное пособие / С. Ю. Лузин [и др.]. - Санкт-Петербург : ГУАП, 2005. - 204 с.
8. Зыков А.Г. Алгоритмы конструкторского проектирования ЭВМ / А.Г. Зыков, В.И. Поляков. – СПб: Университет ИТМО, 2014. – 133 с.

9. Дульнев Г.Н. Применение ЭВМ для решения задач теплообмена / Г.Н. Дульнев, В.Г. Парфенов, А.В. Сигалов. – М.: Высшая школа, 1990. – 208 с.
10. Образцов Н.С. Конструирование радиоэлектронных устройств: лабораторный практикум / Н.С. Образцов, А.М. Ткачук, Н.А. Смирнова. – Минск: БГУИР, 2007. – 35 с.
11. Карпенко, А. П. Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой / А. П. Карпенко. – Москва : Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), 2014. – 448 с.
12. Лебедев Б.К. Механизмы адаптивного поведения муравьиной колонии в задаче размещения / Б.К. Лебедев, О.Б. Лебедев, Е.М. Лебедева // Информатика, вычислительная техника и инженерное образование. – 2014. – № 4 (19). – С. 9-17.
13. Гладков Л.А. Интеллектуальные системы: модели и методы метаэвристической оптимизации : монография / Л. А. Гладков, Ю. А. Кравченко, В. В. Курейчик, С. И. Родзин. – Чебоксары: Среда, 2024. – 228 с.
14. Ванидовский В.А., Лебедев О.Б. Двумерная упаковка в полуограниченную полосу на основе моделирования адаптивного поведения муравьиной колонии // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2014. № 7 (156). – С. 34-42.
15. Suzdaltsev I.V. Modified Ant Colony Algorithm for Placement of Electronic Elements on the Printed Circuit Board / I.V. Suzdaltsev, V.A. Suzdaltsev, N.Y. Bogula // Proceedings 2021 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). – Chelyabinsk, 2021. – Р. 1014-1017.
16. Мухачева Э.А. Проектирование прямоугольных упаковок на базе развития технологии блочных структур / Э. А. Мухачева, Д. А. Назаров, А. С. Филиппова, А. В. Чиглинцев // Информационные технологии. – 2007. – № 1. – С. 20-29.

References

1. Kokotov V.Z. Modified algorithm of "thermal layout" of electronic radio components on the boards with four-sided conductive heat dissipation / V.Z. Kokotov // Information Technologies. – 2006. – № 4. – Р. 2-9.

2. Kvint I.E. Algorithms for placing electronic components on boards with conductive heat dissipation / I.E. Kvint // High Technologies and Intelligent Systems 2009: Proceedings of the X International Youth Scientific and Technical Conference. Moscow, 2009. P. 160-165.

3. Novikov I.S. Construct optimization of three-dimensional layout electronic modules according to the thermal criterion / I.S. Novikov, V.A. Shahnov // Design and technology of electronic equipment. - 2007. - № 3. - P. 31-37.

4. Makeev P.A. Testing the method of automated placement of elements on a rigid-flexible printed board using practical examples / Makeev P.A., Chermoshentsev S.F. // Trudy of MAI. № 134. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=178481>.

5. Wang Lianlian. Thermal Optimization of Electronic Devices on PCB Based on the Ant Colony Algorithm / Lianlian Wang, Guanghua Lu, Kunkun Yang // Conference proceeding of 2018 International Conference on Electronics Technology, Chengdu, China, May 23-27, 2018. – Chengdu, 2018. – P. 55-59. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8401424> (дата обращения 19.11.2025).

6. Koryachko V.P. Mathematical model of representation of multi-agent systems and its application in the problems of topological design of modules of radio-electronic devices / V.P. Koryachko, D.A. Perepelkin, V.Y. Likuchev // Vestnik of Ryazan State Radio Engineering University. – 2023. – № 83. – P. 48-61. – DOI 10.21667/1995-4565-2023-83-48-61.

7. Automation of electronic equipment engineering design : textbook / S. Yu. Luzin [etc]. – Saint-Petersburg : SUAI, 2005. - 204 pp.

8. Zykov A.G. Algorithms for computer engineering design / A.G. Zykov, V.I. Polyakov. – Saint-Petersburg : ITMO University, 2014. 133 pp.

9. Dulnev G.N. Application of computers to solve heat exchange problems / G.N. Dulnev, V.G. Parfenov, A.V. Sigalov. – Moscow: Higher school, 1990. – 208 pp.

10. Obraztsov N.S. Design of radio electronic devices: laboratory practical training / N.S. Obraztsov, A.M. Tkachuk, N.A. Smirnova. – Minsk: BSUIR, 2007. – 35 pp.

11. Karpenko A.P. Modern Search Optimization Algorithms: Algorithms Inspired by Nature / A. P. Karpenko. – Moscow : Bauman Moscow State Technical University, 2014. – 448 pp.

12. Lebedev B.K. Mechanisms of adaptive behavior of ant colony in the location problem / B.K. Lebedev, O.B. Lebedev, E.M. Lebedeva // Computer Science, computer Engineering and engineering education. – 2014. – № 4 (19). – P. 9-17.

13. Gladkov L.A. Intelligent systems: models and methods of metaheuristic optimization: monograph / L. A. Gladkov, Yu. A. Kravchenko, V. V. Kureichik, S. I. Rodzin. – Cheboksary: Sreda, 2024. – 228 pp.

14. Vanidovsky V.A. Two-dimensional strip packing based on simulation of adaptive behavior of an ant colony / V.A. Vanidovsky, O.B. Lebedev // Izvestiya SFedU. Engineering sciences. 2014. № 7 (156). P. 34-42.

15. Suzdaltsev I.V. Modified Ant Colony Algorithm for Placement of Electronic Elements on the Printed Circuit Board / I.V. Suzdaltsev, V.A. Suzdaltsev, N.Y. Bogula // Proceedings 2021 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). – Chelyabinsk, 2021. – P. 1014-1017.

16. Mukhacheva E.A. The designing of orthogonal packings on the basis of block structures technology development / Mukhacheva E.A., Nazarov D.A., Filippova A.S., Chiglintsev A.V. // Information Technologies. – 2007. – № 1. – P. 20-29.

Информация об авторах

Илья Владимирович Сузда́льцев, старший преподаватель, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ; г. Казань, Республика Татарстан, Россия; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9186-4936>; e-mail: iliasuzd@mail.ru

Information about the authors

Ilia V. Suzdaltsev, Senior Lecture, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI»; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9186-4936>; e-mail: iliasuzd@mail.ru