

## **Автоматизированное размещение элементов на печатной плате электронного средства летательного аппарата**

**П.А. МАКЕЕВ,  
И.Р. МУЗАФАРОВ,  
С.Ф. ЧЕРМОШЕНЦЕВ,**  
д-р техн. наук  
(КНИТУ-КАИ, Казань)  
pragramer@yandex.ru

*Разработаны критерии качества для решения задачи автоматизированного размещения элементов на печатной плате электронного средства летательного аппарата. Разработана методика автоматизированного размещения элементов на печатной плате электронного средства с учетом тепловой и электромагнитной совместимости. Произведена апробация разработанной методики на практическом примере.*

**Тепловая совместимость, электромагнитная совместимость, печатная плата, генетический алгоритм, автоматизированное размещение элементов**

В связи с развитием современных летательных аппаратов возникает необходимость применения электронных средств высокой вычислительной мощности, размещаемых на борту летательного аппарата.

В зависимости от вида летательного аппарата (самолет, вертолет, беспилотный летательный аппарат) необходимо уменьшение габаритных размеров и массы электронных средств [1–7]. Решение данной задачи осуществляется применением новой элементной базы с уменьшенными габаритными размерами, а также более плотного размещения элементов на печатной плате.

Однако в связи с увеличением вычислительной мощности электронных средств при одновременном уменьшении их габаритных размеров возникает проблема обеспечения тепловой и электромагнитной совместимости печатной платы. Уменьшение габаритных размеров электронных средств и рост потребляемой мощности для достижения более высокой производительности приводят к ужесточению требований к тепловой совместимости электронных средств. Увеличение вычислительной мощности достигается за счет увеличения тактовых частот, что совместно с плотным размещением элементов на печатной плате вызывает искажения и отражения сигналов или возникновение помех в цепях питания. Данные виды помех относятся к электромагнитной совместимости [8–17].

Решение проблем тепловой и электромагнитной совместимости печатной платы электронных средств необходимо осуществлять на этапе проектирования печатной платы, так как доработка электронных средств на последующих этапах приводит к значительным временным и финансовым затратам. Из-за игнорирования проблем тепловой и электромагнитной совместимости возникают сбои при функционировании изделия или происходит полный выход его из строя.

Проектирование печатной платы с большим объемом исходных данных (количество элементов более 1000 шт., плотность размещения элементов на печатной плате более 80 %) является сложной, NP-полной задачей. Необходимо также обеспечение тепловой и электромагнитной совместимости при проектировании печатной платы.

Проектирование печатной платы осуществляется поэтапно. На первом этапе элементы размещают на печатной плате, на втором проводят трассировку межсоединений печатной платы. Для качественного проектирования печатной платы выполнение данных этапов необходимо автоматизировать, что позволит сократить сроки проектирования печатной платы и за счет применения специализированных критериев качества повысить качество электронных средств.

В данной статье рассматривается автоматизация этапа размещения элементов на печатной плате электронных средств для летательного аппарата.

Целью работы является повышение эффективности и качества автоматизированного размещения элементов на печатной плате электронных средств с учетом тепловой и электромагнитной совместимости.

Для решения NP-полной задачи автоматизированного размещения элементов на печатной плате с учетом тепловой и электромагнитной совместимости необходимо применение особых методов поиска луч-

шего решения и специализированных критериев качества [18]. Предлагается применение методики автоматизированного размещения элементов, основанной на применении двухуровневого генетического алгоритма, позволяющего обеспечить нахождение оптимального решения за приемлемое время, а также на использовании критериев тепловой и электромагнитной совместимости, что повышает качество печатной платы.

В данной работе для обеспечения качественного автоматизированного размещения элементов на печатной плате применяются следующие критерии качества:

- минимум суммарно взвешенной длины соединений:

$$F_{\text{sum}} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n c_{ij} d_{ij} \rightarrow \min ,$$

где  $c_{ij}$  – количество связей между элементами;  $d_{ij}$  – расстояние между элементами;

$$d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (|z_i - z_j| h_{\text{пп}})^2} ,$$

где  $(x_i; y_i)$ ,  $(x_j; y_j)$  – координаты  $i$ -го и  $j$ -го элементов,  $z_i$ ,  $z_j$  – сторона размещения  $i$ -го и  $j$ -го элементов на печатной плате (0 – лицевая, 1 – обратная);  $h_{\text{пп}}$  – толщина печатной платы.

- критерий тепловой совместимости:

$$F_{\text{termo}} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \frac{P_i + P_j}{R_{ij}} \rightarrow \min ,$$

где  $P_i$ ,  $P_j$  – мощности тепловыделения  $i$ -го и  $j$ -го элементов;

$$R_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2} ,$$

где  $(x_i; y_i; z_i)$ ,  $(x_j; y_j; z_j)$  – координаты  $i$ -го и  $j$ -го элементов;

- критерий электромагнитной совместимости:

$$F_{\text{EMC}} = \rho(f) = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{y_{mn} c_{mn}(X_s, Y_s) c_{mn}(X_f, Y_f) W_z / (W_x W_y)}{\frac{\varepsilon \omega}{Q} + j \left( \varepsilon \omega - \frac{k_{xm}^2 + k_{yn}^2}{\omega \mu} \right) + \frac{y_{mn} W_z}{W_x W_y} S_{Nc}} \rightarrow \min ,$$

где  $m$ ,  $n$  – распространяющиеся моды;  $X_s$ ,  $Y_s$  – координаты размещения источника питания;  $X_f$ ,  $Y_f$  – координаты размещения нагрузки;  $\mu$  – абсолютная магнитная проницаемость;

$$y_{mn} = \begin{cases} 1, m = 0 \text{ и } n = 0; \\ 2, (m \neq 0 \text{ и } n = 0) \text{ или } (m = 0 \text{ и } n \neq 0); \\ 4, m \neq 0 \text{ и } n \neq 0; \end{cases}$$

$$c_{mn}(X_i, Y_i) = \cos(k_{xm} X_i) \cos(k_{yn} Y_i) \text{sinc}\left(\frac{k_{xm} A_{xi}}{2}\right) \text{sinc}\left(\frac{k_{yn} B_{yi}}{2}\right);$$

$$k_{xm} = \frac{\pi m}{W_x}; k_{yn} = \frac{\pi n}{W_y}; \varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r ,$$

где  $\varepsilon$  – абсолютная диэлектрическая постоянная;  $\varepsilon_0$  – электрическая постоянная;  $\varepsilon_r$  – относительная диэлектрическая проницаемость;

$$\omega = 2\pi f ,$$

где  $\omega$  – угловая частота;

$$Q = \left[ \operatorname{tg} \delta + \sqrt{\frac{2}{\omega \mu_0 k W_z^2}} \right]^{-1};$$

где  $\operatorname{tg} \delta$  – тангенс угла диэлектрических потерь;  $\mu_0$  – магнитная постоянная;  $k$  – удельная электропроводность;

$$S_{N_c} = \sum_{i=1}^{N_c} \frac{c_{mn}^2 (X_{c_i}, Y_{c_i})}{\rho_{c_i}},$$

где  $N_c$  – количество конденсаторов;  $X_{c_i}$ ,  $Y_{c_i}$  – координаты размещения  $i$ -го конденсатора;  $\rho_{c_i}$  – комплексное сопротивление  $i$ -го конденсатора;

$$\rho_c = -\frac{j}{2\pi f C},$$

где  $j$  – мнимая единица;  $f$  – частота, Гц;  $C$  – емкость конденсатора, Ф.

Рассмотрим процесс автоматизированного проектирования печатной платы. Для формирования методики автоматизированного размещения элементов на печатной плате необходимо рассмотреть весь процесс автоматизированного проектирования печатной платы. Схема приведена на рис. 1.

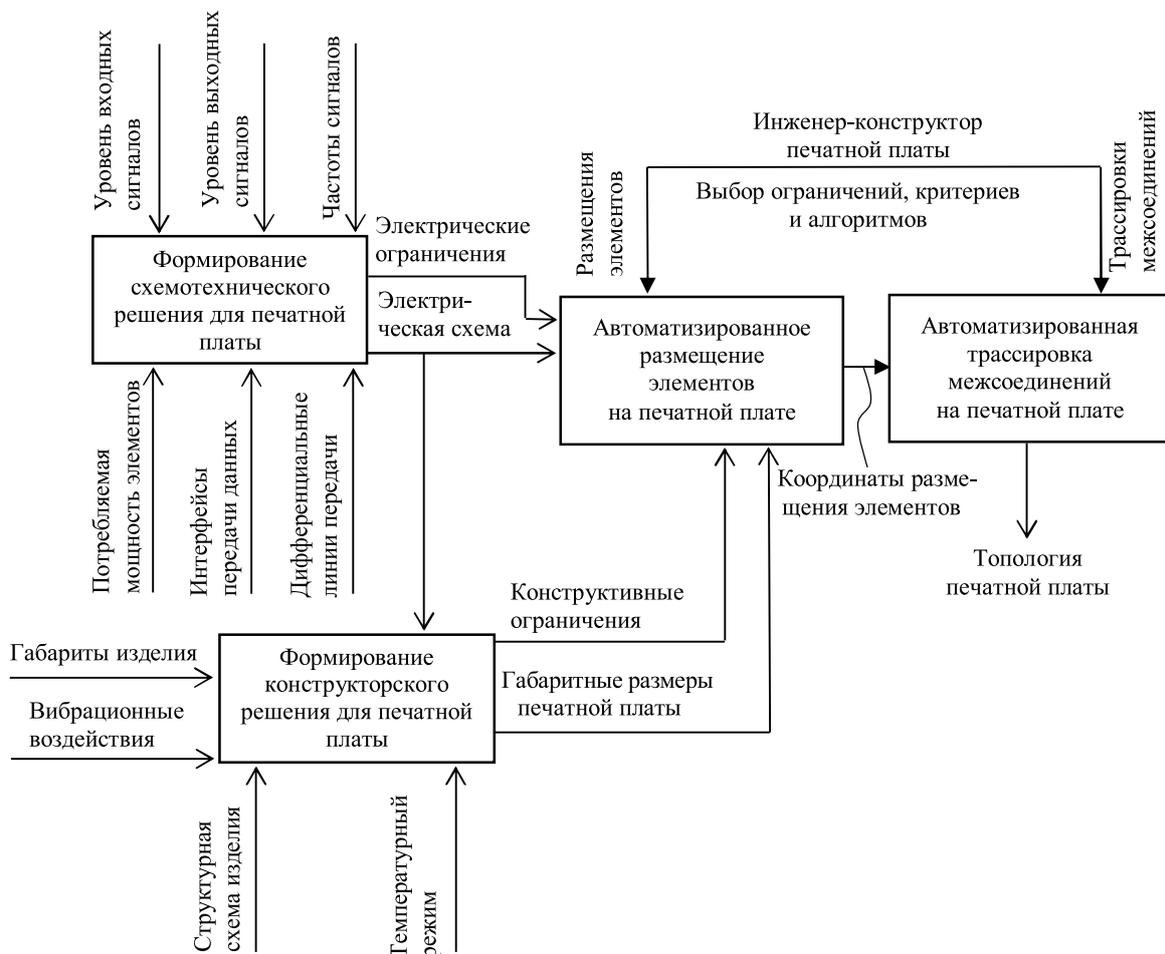


Рис. 1

Для формирования решения автоматизированного размещения элементов на печатной плате, а именно получения координат размещения элементов на печатной плате, необходимо наличие исходных данных – электрической схемы печатной платы; ограничений, связанных с электрическими параметрами

элементов; габаритных размеров печатной платы; конструктивных ограничений, обусловленных особенностями корпуса устройства.

В рамках процесса автоматизированного размещения элементов на печатной плате рассматривается этап формирования схемотехнического решения для печатной платы. Данный этап включает разработку электрической схемы печатной платы и определение ограничений, обусловленных электрическими параметрами элементов. Исходные данные проекта формируются на основе технического задания на устройство или частного технического задания, разработанного применительно к печатной плате.

После завершения формирования схемотехнического решения для печатной платы переходим к этапу автоматизированного размещения элементов на ней. На этом этапе получаем исходные данные в виде электрической схемы и ограничений, обусловленные электрическими параметрами элементов, что будет учитываться при размещении элементов. Также электрическая схема используется как исходные данные для формирования конструкторского решения для печатной платы.

На этапе формирования конструкторского решения для печатной платы определяются габаритные размеры проекта печатной платы и формируются ограничения, связанные с конструктивными особенностями изделий.

Этап автоматизированного размещения элементов на печатной плате заключается в нахождении оптимальных координат размещения элементов на печатной плате.

Ввиду того что функциональность печатной платы обусловлена соблюдением требований по тепловой и электромагнитной совместимости, разработка методики автоматизированного размещения элементов на печатной плате электронных средств с учетом тепловой и электромагнитной совместимости на основе двухуровневого генетического алгоритма является актуальной задачей.

Структура методики автоматизированного размещения элементов на печатной плате приведена на рис. 2.

На этапе формирования исходных данных проекта необходимо определить исходные данные для размещения элементов на печатной плате.

Электрическую принципиальную схему необходимо привести к виду ненаправленного мультиграфа, в котором каждому элементу в соответствие ставится вершина графа, связи между элементами определяются ребрами графа; количество связей – вес соответствующего ребра.

После формирования исходных данных проекта необходимо выполнить оценку плотности размещения элементов на печатной плате. Плотность размещения элементов на плате можно выразить в процентном отношении суммарной площади размещаемых элементов к общей площади монтажной плоскости согласно выражению

$$q = \frac{\sum_{i=1}^{el} S_i}{S_{мп}} 100 \%,$$

где  $q$  – плотность размещения элементов;  $S_i$  – площадь  $i$ -го элемента;  $S_{мп}$  – площадь монтажной плоскости печатной платы;  $el$  – количество элементов, подлежащих размещению.

Возможен случай, при котором  $q > 100 \%$ , что свидетельствует о недостаточной площади монтажной плоскости печатной платы. Размещение элементов на плате невозможно, и необходим пересмотр исходных данных проекта.

На первом уровне предлагаемой методики автоматизированного размещения элементов на печатной плате происходит формирование суперэлементов и их размещение на печатной плате с учетом критериев минимума суммарно взвешенной длины и тепловой совместимости и ряда ограничений (размещение элементов в фиксированные позиции, непересечение суперэлементов, отсутствие суперэлементов в запретных для размещения зонах).

На втором уровне предлагаемой методики для автоматизированного размещения элементов на печатной плате производится размещение элементов внутри суперэлементов. Данное размещение элементов осуществляется с применением критериев качества – минимума суммарно взвешенной длины и электромагнитной совместимости.

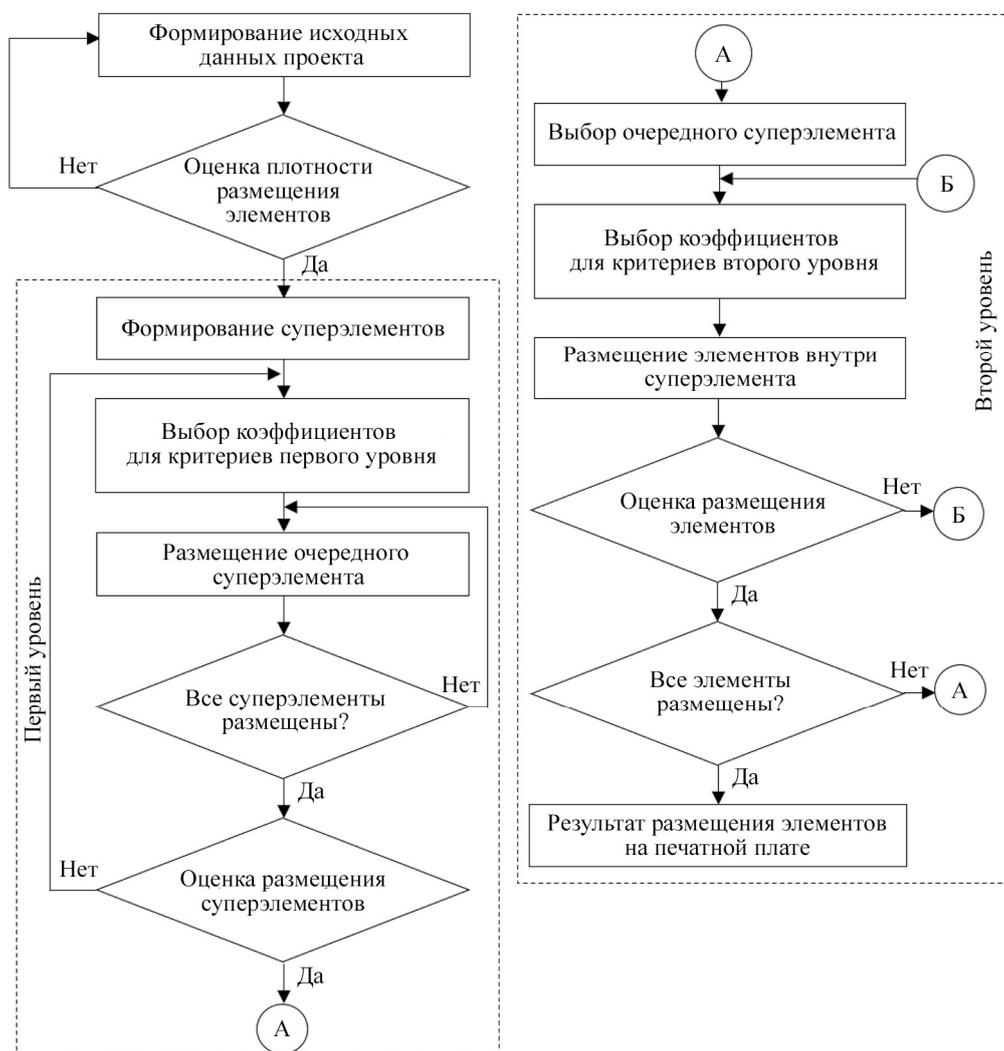


Рис. 2

Для экспериментального исследования методики с целью подтверждения эффективности проводилась ее апробация на практическом примере – материнской плате с большим объемом исходных данных. В качестве центрального элемента используются процессоры российского производства «Эльбрус 16С». Основные интерфейсы, используемые на данной материнской плате, – интерфейс Ethernet 10 Гбит стандарта 10GBASE-KR; интерфейс Ethernet стандарта 10/100/1000 Base-T (2 шт.); интерфейс USB 3.0 (2 шт.); интерфейс USB 2.0 (2 шт.); 4 слота интерфейса PCIe 3.0×16; 16 слотов для установки оперативной памяти DDR4-3200.

Количество элементов, подлежащих размещению, составляет 2786, плотность размещения  $q = 73 \%$ .

На этапе формирования суперэлементов электрическая схема материнской платы, состоящая из 2786 элементов, приведена к 87 суперэлементам, максимальное количество элементов внутри суперэлемента – 624.

Для критериев первого уровня выбраны следующие значения коэффициентов:  $k_t = 0,8$ ;  $k_s = 0,2$ . Выбор весовых коэффициентов обусловлен необходимостью учета тепловой совместимости на материнской плате.

На этапе размещения очередного суперэлемента, исходя из рекомендаций к методике, выбраны следующие управляющие параметры генетического алгоритма: размер популяции хромосом – 870, значение условия остановки – 870, вероятность мутации – 0,2. Результат размещения суперэлементов на печатной плате приведен на рис. 3.

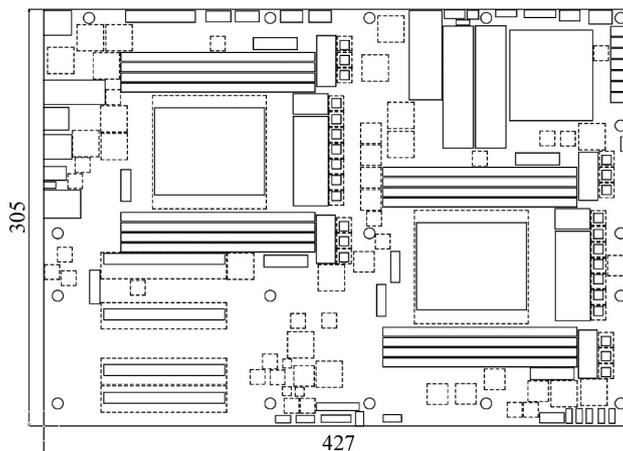


Рис. 3

С целью верификации полученного решения с точки зрения тепловой совместимости проведено моделирование тепловых процессов на печатной плате. По результатам теплового моделирования печатной платы, отсутствует перегрев микросхем, за исключением микросхемы процессора, на который согласно конструкции изделия предполагается установка дополнительного радиатора. Таким образом, результат автоматизированного размещения суперэлементов является приемлемым для дальнейшего размещения элементов на печатной плате.

Следующий этап – выбор коэффициентов для критериев второго уровня. Для обеспечения целостности питания микросхем процессора и памяти по критерию электромагнитной совместимости выбирают весовые коэффициенты  $k_{EMC} = 0,9$  и  $k_s = 0,1$  для суперэлементов с данными микросхемами. Для остальных суперэлементов выбраны следующие значения:  $k_{EMC} = 0,6$ ;  $k_s = 0,4$ .

При размещении элементов внутри суперэлемента управляющие параметры генетического алгоритма подбираются с учетом рекомендаций к методике. Для суперэлемента с максимальным количеством элементов, равным 624, управляющие параметры устанавливаются следующим образом: размер популяции хромосом – 6240, значение условия остановки – 6240, вероятность мутации – 0,2.

С целью верификации полученного результата размещения элементов на печатной плате относительно целостности питания для микросхем процессора и памяти производилось моделирование входного импеданса для цепей питания.

Приведем результат моделирования входного импеданса цепи питания для микросхемы процессора (рис. 4) и микросхем памяти (рис. 5).

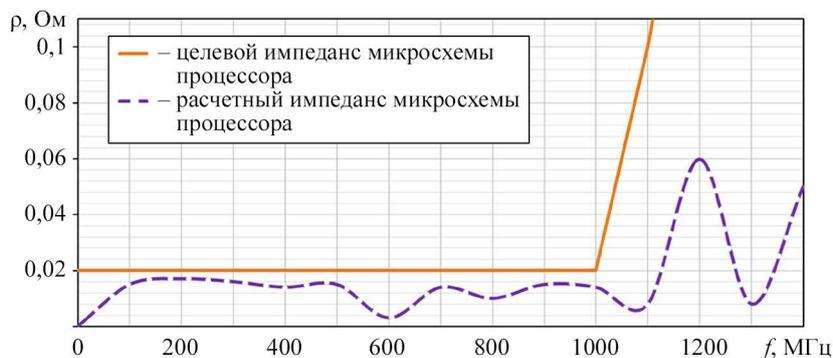


Рис. 4

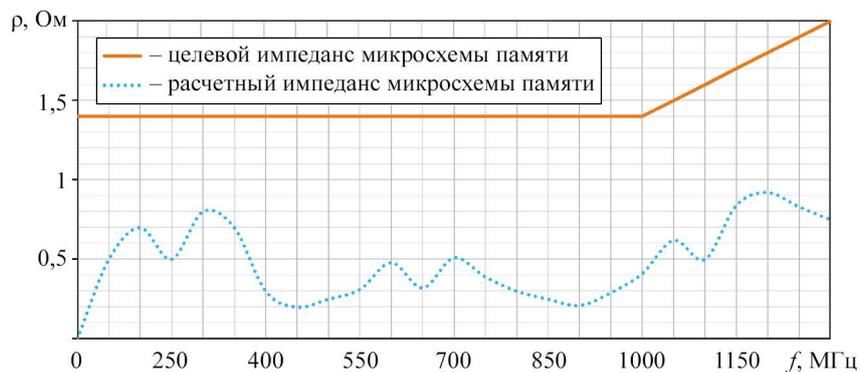


Рис. 5

Таким образом, результаты проведенного моделирования тепловых процессов на печатной плате и входного импеданса цепей питания позволяют использовать полученное автоматизированное размещение элементов на печатной плате на этапе трассировки.

По результатам данной работы можно сделать следующие выводы.

Апробация методики автоматизированного размещения элементов на печатную плату электронного средства с учетом тепловой и электромагнитной совместимости на реальных проектах подтверждает эффективность предложенного в работе подхода к решению задачи размещения элементов на плату: время, затрачиваемое на размещение элементов на печатную плату, сократилось в 5–10 раз в сравнении с размещением элементов на плату вручную.

Благодаря применению разработанной методики автоматизированного размещения элементов на печатную плату электронного средства с учетом тепловой и электромагнитной совместимости повысились качественные показатели реальных проектов печатных плат по критериям тепловой и электромагнитной совместимости (до 10 % в сравнении с размещением элементов на плату вручную).

Реализованные проекты печатных плат подтверждают возможность применения методики автоматизированного размещения элементов на печатную плату электронного средства с учетом тепловой и электромагнитной совместимости при проектировании печатных плат.

Работа выполнена в рамках соглашения № 075-03-2023-032 от 16.01.2023 (шифр FZSU-2023-0004).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трохов Д. А., Туркин И.К. К вопросу проектирования беспилотного летательного аппарата для решения разведывательных задач на море // Тр. МАИ [Электронный журнал]. 2014. № 78. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=53735> (дата обращения: 25.11.2024).
2. Билецкая В.В. и др. Обоснование оптимальной размерности беспилотного летательного аппарата для решения задачи обнаружения пожаров в лесном массиве. Мониторинг сектора лесного массива заданного размера (часть 1) // Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России. 2023. № 1 (157). С. 28–34.
3. Павлов М.С. и др. Оптимальное проектирование корпуса беспилотного летательного аппарата // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2021. № 73. С. 71–80.
4. Кириллов В.Ю., Слипаченко А.А. Проектирование бортовой кабельной сети перспективного летательного аппарата // Тр. МАИ [Электронный журнал]. 2012. № 59. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=34842> (дата обращения: 25.11.2024).
5. Кретов А.С., Шатаев П.А. К оценке массы фюзеляжа самолета при переходе на композиционные материалы // Изв. вузов. Авиационная техника. 2020. № 3. С. 17–26.
6. Федоров И.И. Комплекс конструктивных составляющих и метод предварительного определения массы фюзеляжа вертолета // Изв. вузов. Авиационная техника. 2021. № 4. С. 188–194.
7. Бакулин В.Н. Влияние размеров прямоугольных в плане вырезов и модуля упругости подкрепляющих закладных элементов на напряженно-деформированное состояние трехслойных отсеков // Изв. вузов. Авиационная техника. 2023. № 2. С. 11–21.
8. Уайт К., Рентюк В. Особенности конструирования печатных плат с выполнением требований по ЭМС // Компоненты и технологии. 2019. № 6. С. 121–128.

9. Ромащенко М.А. Методика анализа помехоустойчивости печатных плат при проектировании РЭС с учетом ЭМС // Радиотехника. 2014. № 3. С. 92–95.
10. Глотов В.В., Ромащенко М.А. Оптимизация радиоэлектронных устройств по критериям внутри-аппаратурной электромагнитной совместимости // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2018. № 4. С. 103–107.
11. Аверин С.В. и др. Обеспечение электромагнитной совместимости бортовых кабелей беспилотных летательных аппаратов // Изв. вузов. Авиационная техника. 2017. № 3. С. 113–117.
12. Гизатуллин З.М., Шлеймович М.П. Методика исследования кондуктивных помех от энергетических устройств самолета на этапе его модернизации // Изв. вузов. Авиационная техника. 2023. № 1. С. 142–147.
13. Кирсанов Ю.А. и др. Об измерении времени тепловой релаксации в переходных термических процессах твердых тел // Изв. вузов. Авиационная техника. 2015. № 3. С. 3–8.
14. Тушцев А.И. и др. Исследование тепловых режимов печатных плат радиоэлектронных средств и вычислительной техники при конвекционном и радиационном теплообменах // Вестник НГИЭИ. 2014. № 12 (43). С. 88–93.
15. Цитина Н.В., Хорошайлов Р.Н., Турецкий И.А. Оптимизация теплового режима узла на печатной плате с использованием байесовского подхода // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2022. № 6. С. 78–86.
16. Аксянов Р.А. и др. Рекомендации по повышению эффективности систем охлаждения радиоэлектронного оборудования // Изв. вузов. Авиационная техника. 2021. № 2. С. 107–112.
17. Попов И.А. и др. Системы охлаждения электронных устройств на основе оребренных тепловых труб // Изв. вузов. Авиационная техника. 2015. № 3. С. 57–62.
18. Макеев П.А. Двухстороннее автоматизированное размещение элементов на гибко-жесткой печатной плате на основе двухуровневого генетического алгоритма // Изв. СПбГЭТУ ЛЭТИ. 2021. № 5. С. 28–36.

Поступила в редакцию 25.12.24  
После доработки 26.12.24  
Принята к публикации 26.12.24

## Automated Placement of Elements on a Printed Circuit Board of an Aircraft Electronic Device

P.A. MAKEEV, I.R. MUZAFAROV, AND S.F. CHERMOSHENTSEV

Tupolev Kazan National Research Technical University, Kazan

*The quality criteria were developed to solve the problem of automated placement of elements on the printed circuit board in the aircraft electronic device. A technique for automated placement of elements on the printed circuit board in the electronic device was developed taking into account the thermal and electromagnetic compatibility. The proposed technique was tested by a practical example.*

**Thermal compatibility, electromagnetic compatibility, printed circuit board, genetic algorithm, automated placement of elements**