

<https://doi.org/10.32603/2071-8985-2024-17-5-53-64>

## Методика автоматизированного размещения элементов на гибко-жесткой печатной плате электронного средства с учетом тепловой и электромагнитной совместимости на основе двухуровневого генетического алгоритма

П. А. Макеев<sup>✉</sup>, С. Ф. Чермошенцев

Казанский национальный исследовательский технический университет  
им. А. Н. Туполева – КАИ, Казань, Россия

✉ [pragramer@yandex.ru](mailto:pragramer@yandex.ru)

**Аннотация.** Рассматривается процесс автоматизированного размещения элементов на гибко-жесткой печатной плате. Разработана методика автоматизированного размещения элементов на гибко-жесткой печатной плате электронного средства с учетом тепловой и электромагнитной совместимости на основе двухуровневого генетического алгоритма. Проведены исследования, направленные на определение весовых коэффициентов для двух уровней разработанной методики автоматизированного размещения элементов на гибко-жесткую печатную плату. На практическом примере рассмотрено применение разработанной методики автоматизированного размещения элементов на гибко-жесткой печатной плате. Проведен сравнительный анализ результатов решения задачи размещения элементов на гибко-жесткую печатную плату в ручном и автоматизированном режимах.

**Ключевые слова:** гибко-жесткая печатная плата, методика автоматизированного размещения элементов, тепловая совместимость, электромагнитная совместимость, электронное средство

**Для цитирования:** 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 // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2024. Т. 17, № 5. С. 53–64. doi: 10.32603/2071-8985-2024-17-5-53-64.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Финансирование:** Работа выполнена в рамках Соглашения с Минобрнауки России № 075-03-2023-032 от 16.01.2023 (шифр FZSU-2023-0004).

Original article

## Method of Automated Placement of Elements on a Rigid-Flexible Printed Board of an Electronic Medium Taken into Consideration of Thermal and Electromagnetic Compatibility Based on a Two-Level Genetic Algorithm

P. A. Makeev<sup>✉</sup>, S. F. Chermoshencev

Kazan National Research Technical University named  
after A. N. Tupolev – KAI, Kazan, Russia

✉ [pragramer@yandex.ru](mailto:pragramer@yandex.ru)

**Abstract.** The process of automated placement of elements on a rigid-flex printed circuit board is considered. A technique has been developed for automated placement of elements on a rigid-flexible printed circuit board of an electronic device, taking into account thermal and electromagnetic compatibility based on a two-level genetic algorithm. Research was carried out aimed at determining the weight coefficients for two levels of the developed methodology for automated placement of elements on a rigid-flex printed circuit board. The work of the developed method for automated placement of elements on a rigid-flexible printed circuit board is considered using a practical example. A comparative analysis of the results of solving the problem of placing elements on a rigid-flexible printed circuit board in manual and automated modes was carried out.

**Keywords:** rigid-flex PCB, automated element placement technique, thermal compatibility, electromagnetic compatibility, electronic means

**For citation:** Makeev P. A., Chermoshencev S. F. Method of Automated Placement of Elements on a Rigid-Flexible Printed Board of an Electronic Medium Taken into Consideration of Thermal and Electromagnetic Compatibility Based on a Two-Level Genetic Algorithm // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2024. Vol. 17, no. 5. P. 53–64. doi: 10.32603/2071-8985-2024-17-5-53-64.

---

**Conflict of interest.** The authors declare no conflicts of interest.

**Funding:** The work was carried out within the framework of an agreement with the Ministry of Education and Science of the Russian Federation № 075-03-2023-032 dated 16.01.2023 (code FZSU-2023-0004).

**Введение.** Тенденции развития современных электронных средств направлены на уменьшение габаритных размеров электронных средств. Для использования всего внутреннего пространства электронных средств применяются гибко-жесткие печатные платы (ГЖПП). Их применение позволяет уплотнить компоновку и уменьшить объем жгутовых соединений. Однако применение ГЖПП в малых габаритах электронных средств ведет к возникновению проблем, связанных с тепловой (ТС) и электромагнитной совместимостью (ЭМС). Проектирование ГЖПП за счет большого количества элементов занимает значительное время, а для учета ТС и ЭМС инженеру-конструктору необходимо обладать существенным уровнем подготовки. Применение автоматизированных этапов проектирования – автоматизированное размещение элементов и автоматизированная трассировка межсоединений на ГЖПП и т. п., позволяет существенно снизить временные затраты, вместе с тем повысить качество разрабатываемых изделий.

В рамках данной статьи рассматривается этап автоматизированного размещения элементов на ГЖПП. Представленные в существующих работах [1]–[6] методики автоматизированного размещения элементов на печатных платах не допускают двухстороннего размещения элементов, что актуально при проектировании ГЖПП, а также не позволяют одновременно оптимизировать качество размещения элементов с учетом ТС и ЭМС. Так, в публикациях [1]–[3] размещение осуществляется на основе критериев ТС без учета ЭМС, в [4], [5] – по критериям ЭМС без учета ТС. Работа [6] направлена на решение специфической задачи – проектирования рельефных печатных плат, где автор реализовал возможность учета критериев ТС и ЭМС, однако ввиду одностороннего размещения элементов и узкой специфики задачи данная методика не может быть применена при проектировании ГЖПП.

Цель данной статьи состоит в разработке методики автоматизированного размещения элементов на гибко-жесткой печатной плате электронного средства с учетом тепловой и электромагнитной совместимости на основе двухуровневого генетического алгоритма (ГА).

Двухуровневый ГА и модификации классического ГА для двухстороннего размещения элементов на ГЖПП с учетом ТС и ЭМС рассматривались в [7], [8].

Технология автоматизированного проектирования печатных плат включает в себя этапы схемотехнического, конструкторского и технологического проектирования. Автоматизированное размещение элементов относится к этапу конструкторского проектирования [9]. Рассмотрим процесс автоматизированного размещения элементов на ГЖПП более подробно.

**1. Процесс автоматизированного размещения элементов на ГЖПП.** Обобщенная схема процесса проектирования ГЖПП приведена на рис. 1.

Для формирования решения автоматизированного размещения элементов на ГЖПП, (получения координат их размещения) необходимо получить исходные данные – электрическую схему ГЖПП; ограничения, вызванные электрическими параметрами элементов; габаритные размеры ГЖПП и конструктивные ограничения, обусловленные особенностями корпуса устройства.

В рамках процесса автоматизированного размещения элементов рассматривается этап формирования схемотехнического решения для ГЖПП. На данном этапе происходит создание электрической схемы ГЖПП и формирование ограничений, вызванных электрическими параметрами элементов. На основании технического задания на устройство или частного технического задания на ГЖПП формируются исходные данные проекта. Примером исходных данных проекта служат входные и выходные уровни сигналов, частота обработки информации, предельная допустимая мощность потребления элементов на ГЖПП,

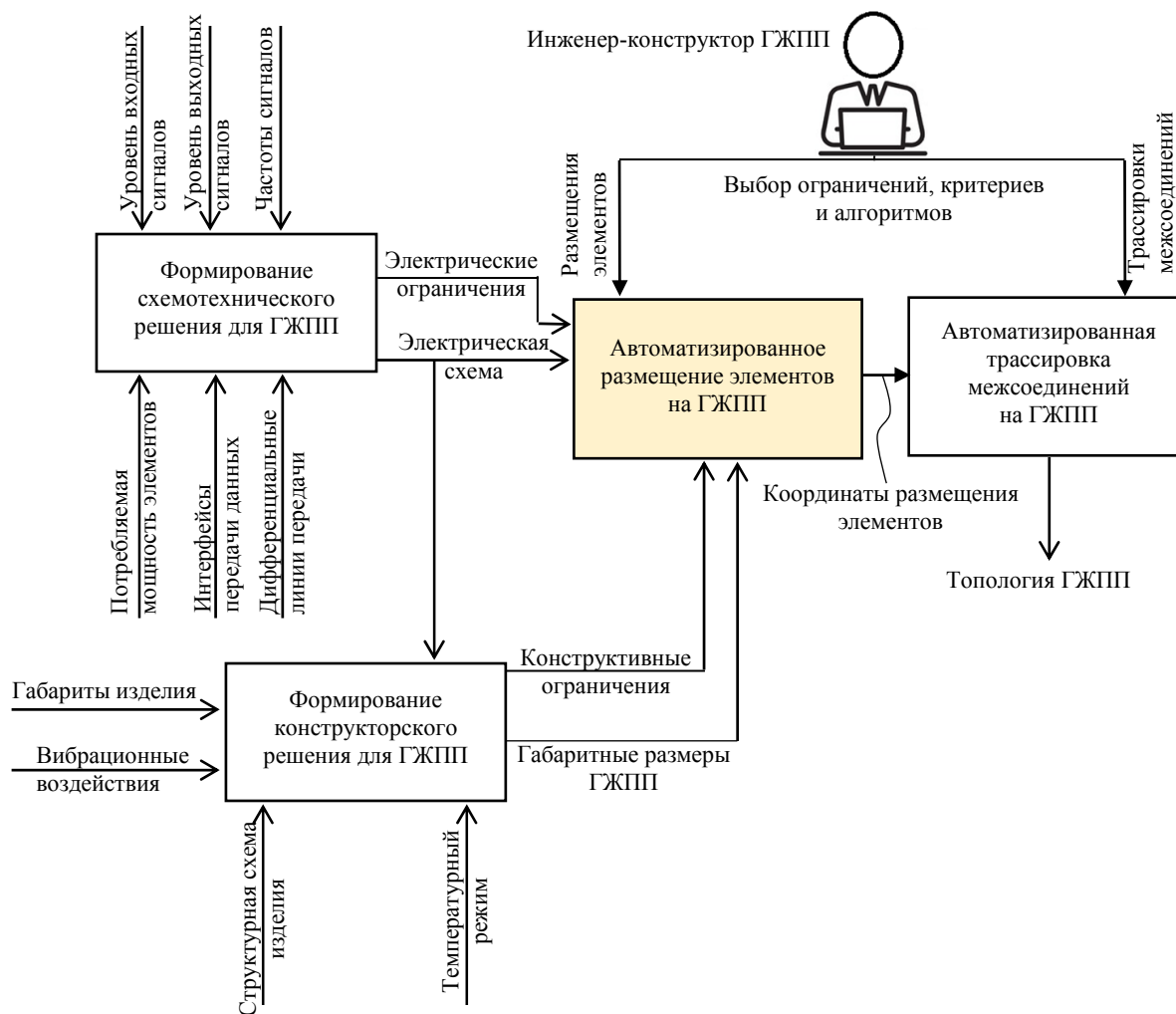


Рис. 1. Процесс автоматизированного проектирования ГЖПП  
 Fig. 1. Computer aided Rigid-flex PCB design process

применяемые интерфейсы передачи данных и наличие в них дифференциальных линий передачи сигналов. На основании исходных данных выбирается элементная база, обеспечивающая предъявляемые требования к ГЖПП, и формируется электрическая схема. После формирования электрической схемы и ее верификации выделяются критические участки электрической схемы и формулируются ограничения, обусловленные электрическими параметрами элементов.

После этапа формирования схмотехнического решения для ГЖПП на этапе автоматизированного размещения элементов на печатную плату поступают исходные данные от электрической схемы и ограничений, обусловленных электрическими параметрами элементов. Электрическая схема устройства попадает на этап формирования конструкторского решения для ГЖПП в качестве исходных данных.

Этап формирования конструкторского решения для ГЖПП предназначен для определения габаритных размеров будущей ГЖПП и форми-

рования ограничений, обусловленных конструктивными особенностями изделия. Таким образом, результатом данного этапа становятся габаритные размеры ГЖПП и ограничения, направленные на размещение конкретных элементов в фиксированных позициях, или запрет на размещение отдельных элементов в определенных зонах ГЖПП.

Этап автоматизированного размещения элементов на ГЖПП заключается в нахождении оптимальных координат размещения элементов с учетом всех ограничений, сформулированных на этапах формирования схмотехнического и конструкторского решений для ГЖПП. Результатом данного этапа становятся непосредственно координаты размещения элементов на ГЖПП, передаваемые на этап автоматизированной трассировки межсоединений на ГЖПП, где формируется топология платы.

Однако для автоматизированного размещения элементов на ГЖПП наряду с исходными данными необходимо выбрать алгоритм решения дан-

ной задачи, а также критерия, на основании которого будет проводиться оценка качества полученного решения. Так как инженер-конструктор ГЖПП не обладает компетенциями в области построения САПР, то выбор и реализация алгоритмов и критериев оказываются сложны для него. В связи с этим инженеру-конструктору ГЖПП необходимо предоставить методики для решения задач автоматизированного размещения элементов и трассировки межсоединений на плате, направленные на получение качественных решений за приемлемое время.

Ввиду того, что функциональность ГЖПП обусловлена соблюдением требований по ТС и ЭМС, актуальна разработка методики для автоматизированного размещения элементов на ГЖПП с

учетом обеспечения ТС и ЭМС. Также данная методика должна обеспечивать двухстороннее размещение элементов на ГЖПП, так как это повышает плотность размещения элементов на ней, что в условиях общей миниатюризации изделий особенно актуально.

**2. Методика автоматизированного размещения элементов на гибко-жесткой печатной плате электронного средства с учетом тепловой и электромагнитной совместимости на основе двухуровневого генетического алгоритма.** Структура методики приведена на рис. 2, рассмотрим основные этапы подробнее.

**Оценка плотности размещения.** После формирования исходных данных необходимо выполнить оценку плотности размещения элементов на

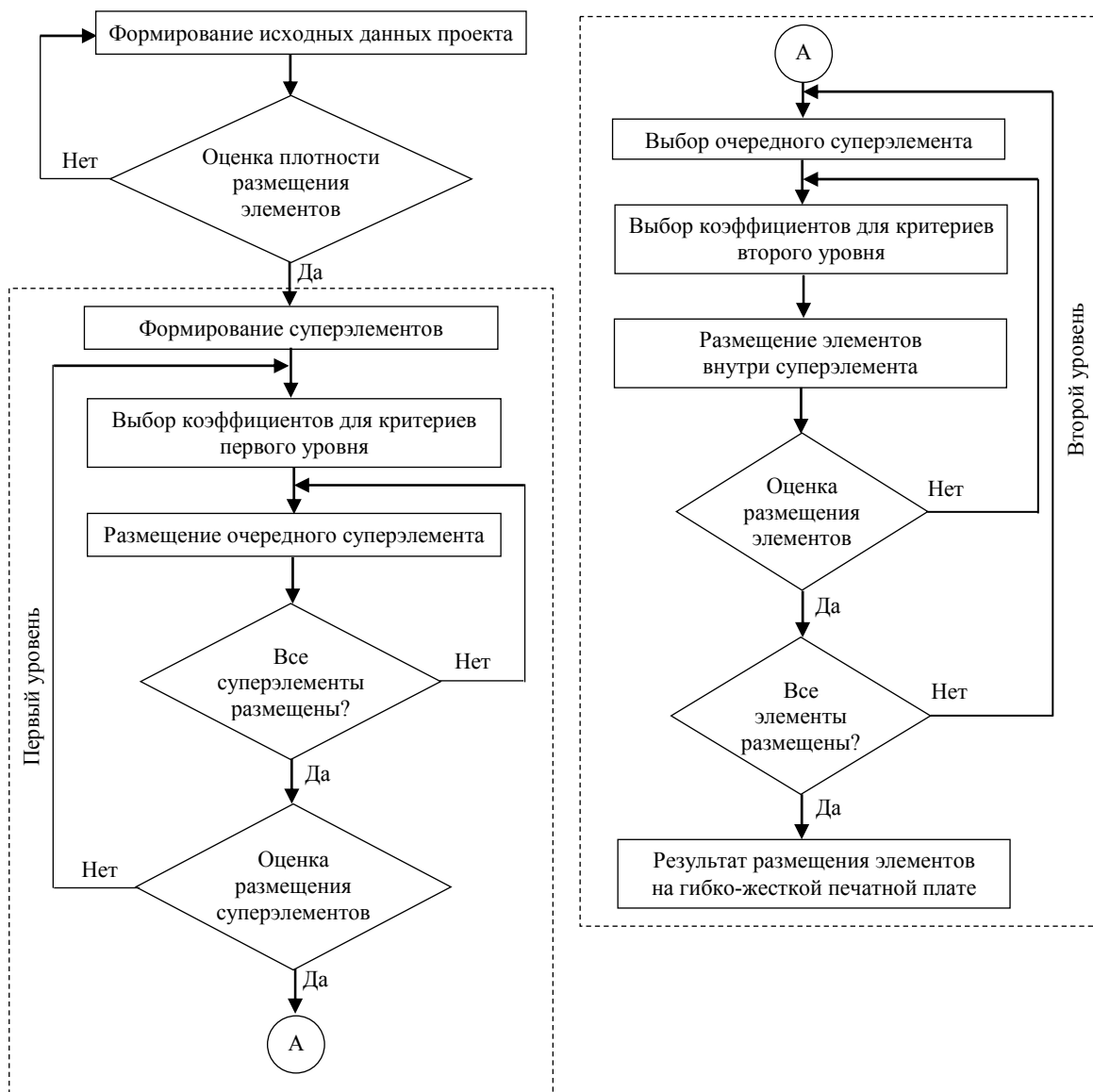


Рис. 2. Методика автоматизированного размещения элементов на ГЖПП  
Fig. 2. Methodology for automated placement of elements on the Rigid-flex PCB

ГЖПП. Плотность размещения элементов на плате можно выразить в отношении суммарной площади размещаемых элементов к площади монтажной плоскости (в процентах) согласно выражению [6]:

$$q = \frac{\sum_{i=1}^n S_i}{S_{\text{м.п}}} 100 \%,$$

где  $q$  – плотность размещения элементов;  $S_i$  – площадь  $i$ -го элемента;  $S_{\text{м.п}}$  – площадь монтажной плоскости ГЖПП;  $n$  – количество элементов, подлежащих размещению.

Таким образом, ГЖПП по плотности размещения могут быть распределены на три класса:

– с неплотным размещением элементов, при  $q < 60 \%$ ,

– с плотным размещением элементов, при  $60 \% < q < 80 \%$ ,

– со сверхплотным размещением элементов, при  $q > 80 \%$ .

Предлагаемая методика позволяет автоматизированно размещать элементы на ГЖПП любого класса. Однако стоит отметить, что при повышении плотности размещения элементов на ГЖПП качество полученного решения неизбежно ухудшается, а время выполнения данной процедуры увеличивается. В связи с этим целесообразно по возможности уменьшать плотность размещения элементов на плате, заменяя схемотехнические решения или изменяя габаритные размеры ГЖПП.

Возможен случай, при котором  $q > 100 \%$ , что свидетельствует о недостаточной площади монтажной плоскости ГЖПП, когда размещение элементов невозможно и необходим пересмотр исходных данных проекта.

**Первый уровень методики.** На первом уровне предлагаемой методики автоматизированного размещения элементов на ГЖПП происходит формирование суперэлементов и их размещение на плате с учетом критериев минимума суммарно взвешенной длины и равномерного распределения теплонагруженных элементов в пределах монтажной плоскости, а также ряда ограничений: размещение элементов в фиксированные позиции, непересечение суперэлементов, отсутствие суперэлементов в запретных для размещения зонах и т. п.

**Формирование суперэлементов.** Фрагментация электрической схемы устройства позволяет разместить функционально связанные элементы

вне зависимости от их электрической связности или мощности тепловыделения. В рамках данной статьи предполагается объединение активного элемента (микросхемы) и конфигурирующих ее пассивных элементов (резисторы, конденсаторы) в единый суперэлемент. Количество связей суперэлемента рассчитывается, исходя из внешних связей всех элементов, входящих в суперэлемент.

**Выбор коэффициентов для критериев первого уровня.** На первом уровне двухуровневого ГА происходит размещение суперэлементов с учетом ТС по целевой функции согласно выражению

$$F_{\text{ц}} = (k_{\text{T}} F'_{\text{term}} + k_{\text{C}} F'_{\text{sum}}) \rightarrow \max,$$

где  $F_{\text{ц}}$  – целевая функция для размещения суперэлементов;  $k_{\text{T}}$  и  $k_{\text{C}}$  – весовые коэффициенты для критериев равномерного распределения теплонагруженных элементов и минимума суммарно взвешенной длины;  $F'_{\text{term}}$  и  $F'_{\text{sum}}$  – нормализованные критерии качества [7].

Однако для получения качественного решения задачи размещения элементов на ГЖПП необходимо учесть два противоречащих друг другу критерия. С одной стороны, для обеспечения оптимума решения по критерию минимума суммарно взвешенной длины суперэлементы необходимо разместить максимально близко друг к другу, а с другой, для обеспечения качественного решения, обеспечивающего ТС ГЖПП, суперэлементы с высокими параметрами тепловыделения необходимо разместить на максимальном расстоянии друг от друга. В связи с этим для определения значений весовых коэффициентов проводилось исследование методики автоматизированного размещения элементов на ГЖПП. Результаты эксперимента приведены на рис. 3, где по оси  $X$  отложены значения весового коэффициента  $k_{\text{T}}$ , а так как  $k_{\text{T}} + k_{\text{C}} = 1$ , то  $k_{\text{C}} = k_{\text{T}} - 1$ .

По результатам экспериментальных данных можно сформулировать следующие рекомендации:

– для получения решения ГЖПП максимально направленного на обеспечение ТС значение коэффициента  $k_{\text{T}}$  должно находиться в диапазоне от 0.7 до 0.9, а  $k_{\text{C}}$  – от 0.1 до 0.3 соответственно. Однако при таком решении длина связей на ГЖПП максимальна, что может негативно сказаться на качестве этапа трассировки;

– оптимальное значение коэффициента  $k_{\text{T}}$  находится в диапазоне от 0.5 до 0.7, а  $k_{\text{C}}$  – от 0.3 до 0.5 соответственно. При таких значениях

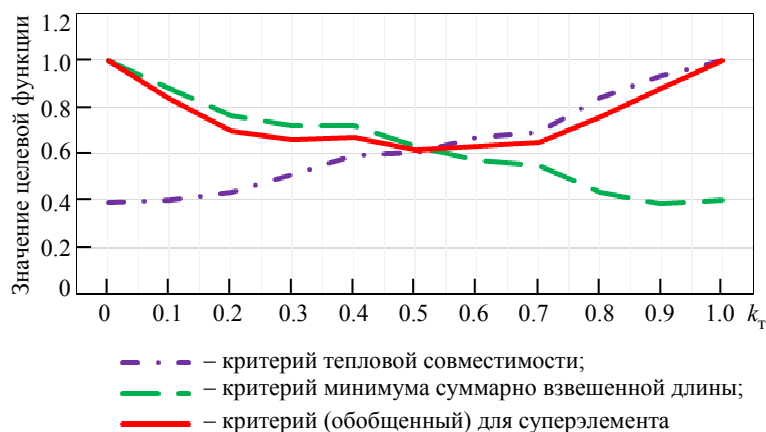


Рис. 3. Изменение значений целевой функции для первого уровня методики

Fig. 3. Changing the values of weight coefficients for the first level of the methodology

управляющих параметров решение задачи размещения элементов на ГЖПП обладает приемлемой связностью и вместе с тем равномерным распределением теплонагруженных элементов;

– варианты, когда значение коэффициента  $k_T$  находится в диапазоне от до 0.5, а  $k_c$  – от 1 до 0.5 соответственно, подходят для размещения элементов на ГЖПП, если отсутствуют теплонагруженные элементы или их учет не требуется;

– при значениях коэффициента  $k_T = 1$ , а  $k_c = 0$  возможно получение решения ГЖПП, не пригодного для дальнейшей трассировки, ввиду чего применение такой комбинации нежелательно.

*Размещение очередного суперэлемента.* Последовательность автоматизированного размещения суперэлементов на ГЖПП – важный аспект решения данной задачи. При плотном варианте размещения элементов на плате возможна ситуация, когда элементам, находящимся в конце последовательности, не хватит места с учетом поставленных ограничений. В связи с этим целесообразно размещать суперэлементы в последовательности уменьшения их габаритных размеров (от большего к меньшему). Однако такой подход может привести к ухудшению полученного решения ГЖПП по критерию минимума суммарно взвешенной длины, что впоследствии окажет негативное влияние на этапе трассировки межсоединений.

В данной статье предлагается ранжировать суперэлементы по количеству внешних связей с другими суперэлементами. Такой подход обеспечивает возможность размещения нагруженных суперэлементов на ГЖПП по количеству связей, в большинстве случаев имеющих наибольшие га-

баритные размеры, в самые выгодные координаты монтажного пространства платы. Однако при наличии элементов, размещаемых в фиксированные позиции ГЖПП, целесообразно разместить суперэлементы с данными элементами в первую очередь ввиду невозможности существенного изменения их координат.

Таким образом, последовательность размещения суперэлементов формируется следующим образом:

– выделяются все суперэлементы, в составе которых имеются элементы, размещаемые в фиксированные позиции;

– данные элементы ранжируются по уменьшению количества внешних связей и помещаются в начало последовательности размещения;

– оставшиеся элементы также ранжируются по уменьшению количества внешних связей и дополняют последовательность размещения, располагаясь за суперэлементами, имеющими в своем составе элементы, размещаемые в фиксированные позиции.

При получении решения ГЖПП, когда некоторый суперэлемент последовательности размещения не имеет возможности нахождения координат размещения с учетом всех ограничений, происходит возвращение к первому суперэлементу в последовательности размещения, и процесс автоматизированного размещения суперэлементов на ГЖПП возобновляется.

*Оценка размещения суперэлементов.* Полученный результат автоматизированного размещения суперэлементов на ГЖПП оценивается по значению целевой функции в зависимости от выбранных значений весовых коэффициентов: оп-

тимизация проекта по критерию минимума суммарно взвешенной длины либо по критерию равномерного распределения теплонагруженных элементов. Однако в случае, когда на ГЖПП размещаются несколько теплонагруженных элементов при плотном или сверхплотном размещении, необходимо выполнить тепловое моделирование ГЖПП в специализированных системах анализа с целью верификации полученного решения, автоматизированного размещения элементов на плате, на предмет отсутствия локальных перегревов элементов.

При принятии положительного решения относительно качества полученного результата автоматизированного размещения элементов на ГЖПП происходит переход на второй уровень методики, а в противном случае необходимо повторить процедуру размещения суперэлементов, откорректировав коэффициенты для критериев минимума суммарно взвешенной длины и равномерного распределения теплонагруженных элементов.

**Второй уровень методики.** На втором уровне предлагаемой методики для автоматизированного размещения элементов на ГЖПП элементы размещаются внутри суперэлементов. При этом применяются следующие критерии качества: минимум суммарно взвешенной длины и критерий ЭМС.

**Выбор очередного суперэлемента.** Размещение элементов на данном уровне предлагаемой методики для автоматизированного размещения элементов на ГЖПП осуществляется в пределах уже размещенных суперэлементов, поэтому последовательность выбора очередного суперэлемента не имеет особого значения, однако для упрощения программной реализации предлагается использование уже сформированной на первом уровне методики последовательности.

**Выбор коэффициентов для критериев минимума суммарно взвешенной длины и электромагнитной совместимости элементов.** При решении задачи автоматизированного размещения элементов на ГЖПП с учетом только критерия минимума суммарно взвешенной длины все элементы, принадлежащие одной цепи, например развязывающие конденсаторы, будут «стремиться» располагаться в одной зоне монтажного пространства ГЖПП. Такое положение развязывающих конденсаторов негативно сказывается на качестве питания микросхем и приводит к возникновению проблем, связанных с ЭМС. Для оптимизации полученного решения ГЖПП по критериям минимума суммарной взвешенной длины и критерия ЭМС предлагается применение следующей целевой функции:

$$F_{\text{эл}} = (k_{\text{ЭМС}} F'_{\text{ЭМС}} + k_c F'_{\text{sum}}) \rightarrow \max,$$

где  $F_{\text{эл}}$  – целевая функция для размещения элементов внутри суперэлемента;  $k_{\text{ЭМС}}$  – весовой коэффициент для критерия ЭМС;  $F'_{\text{ЭМС}}$  – нормализованный критерий ЭМС [8].

Для определения значений весовых коэффициентов проводилось исследование методики автоматизированного размещения элементов на ГЖПП. Результаты эксперимента приведены на рис. 4, где по оси  $X$  отложены значения весового коэффициента  $k_{\text{ЭМС}}$ , а так как  $k_{\text{ЭМС}} + k_c = 1$ , то  $k_c = k_{\text{ЭМС}} - 1$ .

Экспериментальным путем выявлены следующие рекомендации для коэффициентов  $k_{\text{ЭМС}}$  и  $k_c$ :

– оптимальное значение коэффициентов  $k_{\text{ЭМС}}$  – в диапазоне от 0.6 до 0.9 и  $k_c$  – в диапазоне от 0.1

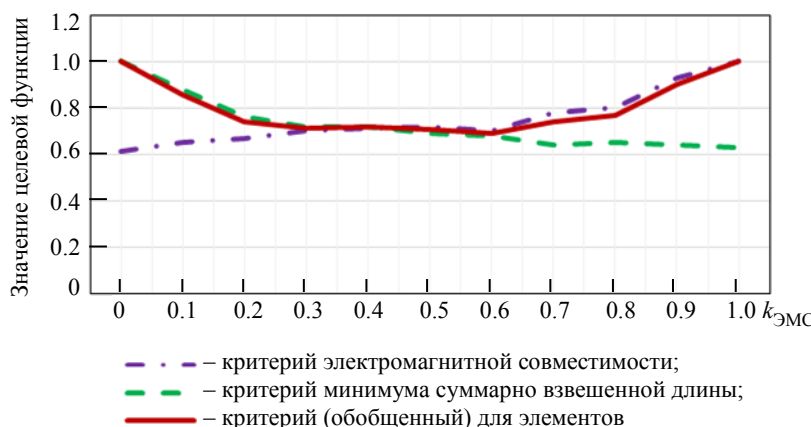


Рис. 4. Изменение значений целевой функции для второго уровня методики  
Fig. 4. Changing the values of weight coefficients for the second level of the methodology

до 0.4, данные значения позволяют обеспечить наиболее качественное размещение элементов на ГЖПП с точки зрения целостности питания;

– значения коэффициента  $k_{ЭМС}$  в диапазоне от 0 до 0.3 и  $k_c$  в диапазоне от 0.7 до 1 позволяют получить решения, обеспечивающие максимальную связность элементов, однако негативно сказываются на ЭМС;

– при значениях коэффициентов  $k_{ЭМС} = 1$ ,  $k_c = 0$  возможно получение решения, не пригодного для дальнейшей трассировки, ввиду чего применение такой комбинации нежелательно.

*Размещение элементов внутри суперэлемента.* Такое размещение необходимо начинать с определения последовательности размещения элементов. Так как в каждом суперэлементе есть активный элемент (микросхема), связанный со всеми остальными элементами, целесообразно начинать размещение с него. Затем необходимо разместить развязывающие конденсаторы для обеспечения целостности питания. Размещение активного элемента и развязывающих конденсаторов осуществляется с применением таких критериев качества, как минимум суммарно взвешенной длины и критерий ЭМС. Последовательность развязывающих конденсаторов определяется по габаритным размерам корпуса от меньшего к большему, а в пределах одного корпуса – по увеличению номинала емкости. Таким образом, в последовательности размещения за активным элементом следует конденсатор в наименьшем корпусе и с наименьшей емкостью из имеющихся. После размещения развязывающих конденсаторов идут оставшиеся элементы, ранжированные по уменьшению количества связей внутри суперэлемента. Так как размещение оставшихся элементов не оказывает влияния на критерий ЭМС, то их размещение осуществляется лишь по критерию минимума суммарно взвешенной длины, обеспечивая наиболее качественное решение для последующего этапа трассировки межсоединений.

*Оценка размещения элементов.* Полученный результат автоматизированного размещения элементов на ГЖПП внутри суперэлемента оценивается по значению целевой функции в зависимости от выбранных значений весовых коэффициентов: оптимизация решения ГЖПП по критерию минимума суммарно взвешенной длины либо по

критерию ЭМС. Также полученное решение имеет расчетное значение входного импеданса цепи питания на рабочих частотах, которое необходимо сравнить с целевым значением. При отсутствии превышения целевого импеданса решение считается качественным, в противном случае необходимо выполнить размещение элементов повторно, с корректировкой весовых коэффициентов для критериев минимума суммарно взвешенной длины и электромагнитной совместимости элементов.

Размещение элементов на ГЖПП продолжается, пока для каждого элемента не будут найдены необходимые координаты.

#### ***Результаты размещения элементов на ГЖПП.***

Результатом решения задачи автоматизированного размещения элементов на ГЖПП служат полученные координаты этих элементов.

**3. Практический пример. Устройство интерфейсное. Формирование исходных данных проекта.** Устройство интерфейсное (УИ) выполняет функцию расширения интерфейса Serial Attached SCSI (SAS). Интерфейс SAS предназначен для подключения устройств хранения данных, в рамках данного устройства – жестких дисков. За счет последовательной передачи данных и высокой скорости на один канал до 24 Гбит/с данный интерфейс широко применяется в вычислительной технике. Конструктивно УИ представляет собой ГЖПП, состоящую из 3 жестких и 2 гибких частей. Количество элементов, подлежащих размещению составляет 648, 4 из которых имеют фиксированное расположение. Среди элементов, подлежащих размещению на ГЖПП, можно выделить следующие основные элементы:

- микросхема контроллера (потребление 5 Вт);
- микросхемы DC-DC преобразователей (потребление 300 мВт);
- соединители интерфейса SAS;
- пассивные элементы (резисторы, конденсаторы, индуктивности).

Общие габаритные размеры ГЖПП составляют  $350 \times 55$  мм, а размеры жестких частей, пригодных для размещения элементов, –  $60 \times 55$  мм (3 части). Стоит отметить, что обратные стороны ГЖПП ввиду конструктивных особенностей изделия могут содержать элементы не более 2 мм, что накладывает дополнительные ограничения на размещение элементов в данной области. Внешний вид ГЖПП приведен на рис. 5.



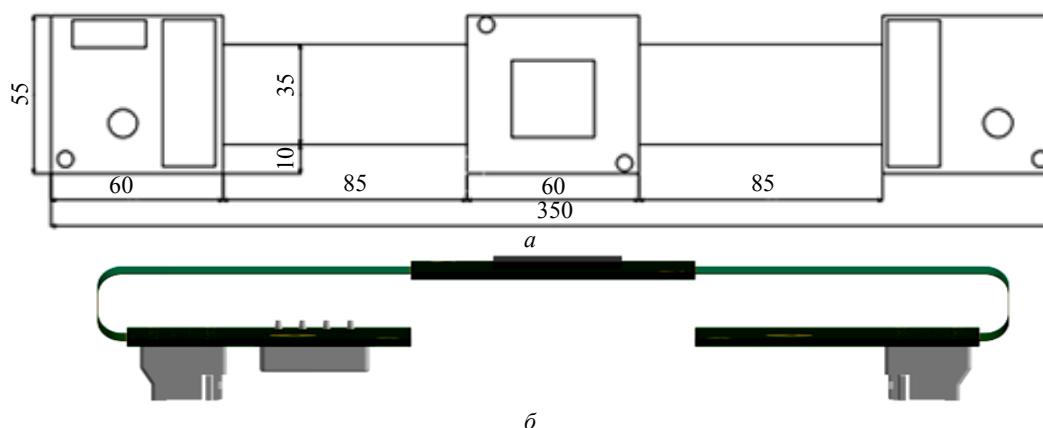


Рис. 5. Внешний вид ГЖПП: а – разложенный; б – сложенный  
Fig. 5. Appearance of the Rigid-flex PCB: a – unfolded; б – folded

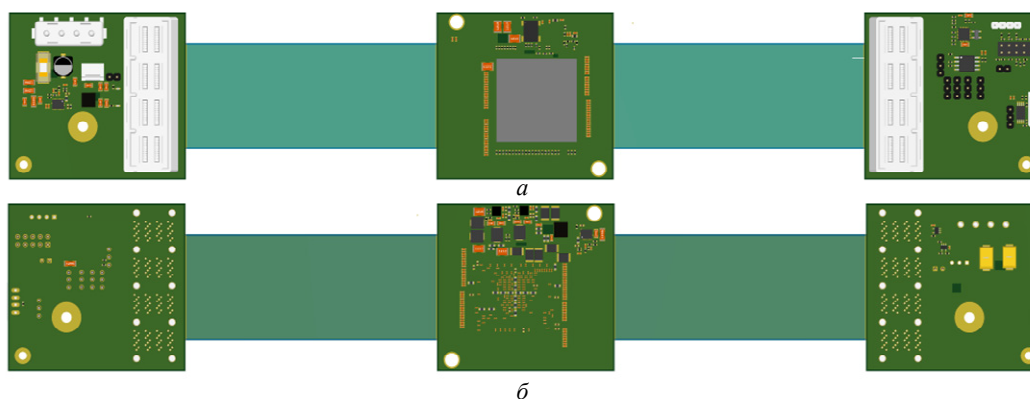


Рис. 6. Результат размещения элементов на ГЖПП: а – лицевая сторона; б – обратная сторона  
Fig. 6. Result of placing elements on the Rigid-flex PCB: а – front side; б – back side

**Формирование суперэлементов.** Электрическая схема устройства ввода и обработки данных, состоящая из 648 элементов, преобразована к 13 суперэлементам, включающим в себя активный элемент (микросхема) и пассивные элементы (резисторы, конденсаторы). Максимальное количество элементов внутри суперэлемента составляет 374.

**Выбор коэффициентов для критериев первого уровня.** В рамках данного устройства теплонагруженным элементом служит контроллер, для которого необходим дополнительный радиатор, а остальные элементы не имеют высокой тепловой нагрузки. В соответствии с разработанной методикой значение коэффициента  $k_T$  выбрано равным 0.5, значение  $k_C = 0.5$  соответственно. Данные коэффициенты направлены на получение решения задачи размещения элементов на ГЖПП с обеспечением большой связанности элементов.

**Размещение очередного суперэлемента.** Так как общее количество суперэлементов, подлежащих размещению составляет 11, то выбраны следующие управляющие параметры ГА: размер популяции хромосом – 130, значение условия останки – 130, вероятность мутации – 0.2.

**Оценка размещения суперэлементов.** Ввиду отсутствия нескольких теплонагруженных элементов нет необходимости теплового моделирования, однако для решения задачи отвода тепла от микросхемы контроллера требуется тепловое моделирование в составе изделия совместно с установленным радиатором охлаждения.

**Выбор коэффициентов для критериев второго уровня.** Для обеспечения целостности питания по критерию ЭМС для критичного к питанию элемента (микросхемы контроллера) весовые коэффициенты  $k_{ЭМС}$  и  $k_C$  составляют 0.9 и 0.1 соответственно. В свою очередь, для оставшихся суперэлементов приоритетно минимальное расстояние сигнальных линий, а значит, весовые коэффициенты логично выбрать следующие:  $k_{ЭМС} = 0.1$  и  $k_C = 0.9$ .

**Размещение элементов внутри суперэлемента.** В зависимости от суперэлемента, а именно от количества элементов, входящих в его состав, управляющие параметры ГА будут различаться. Так, при максимальном количестве элементов в суперэlemente, равном 374, управляющие параметры выберем следующим образом: размер по-

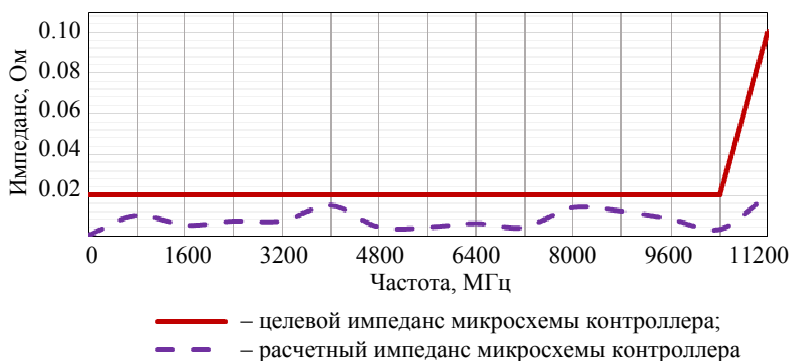


Рис. 7. Результат моделирования резонанса полигона питания микросхемы контроллера

Fig. 7. Result of modeling the resonance of the power supply area of the controller chip

пуляции хромосом – 3740, значение условия остановки – 3740, вероятность мутации – 0.2.

Результат размещения элементов на ГЖПП в данном примере приведен на рис. 6.

*Оценка размещения элементов.* Для определения качества полученного результата размещения элементов на ГЖПП применительно к ЭМС, а именно целостности питания, проведено моделирование полученного решения в специализированном программном продукте. Сравнение целевого импеданса с результатом моделирования входного импеданса для цепи питания микросхемы контроллера +1 В приведено на рис. 7.

На основании результатов моделирования можно сделать следующий вывод: размещение элементов на ГЖПП позволяет обеспечить требуемый уровень входного импеданса для основных цепей питания.

Результаты сравнительного анализа  
Results of the conducted analysis

Режим размещения	Затраченное время, мин	Значение целевой функции ТС	Значение целевой функции ЭМС
Ручной, инженер 1	1440	0.724	0.832
Ручной, инженер 2	1680	0.768	0.798
Ручной, инженер 3	1320	0.823	0.784
Автоматизированный режим	146	0.826	0.908

**Результат размещения элементов на гибко-жесткой печатной плате.** Полученное размещение элементов на ГЖПП позволяет обеспечить ТС и ЭМС.

С целью получения результатов сравнительного анализа ручного и автоматизированного вариантов размещения элементов на ГЖПП размещение осуществлялось тремя инженерами различного уровня подготовки и в автоматизированном режиме с применением разработанной методики. Результаты сравнительного анализа размещения элементов на ГЖПП приведены в таблице.

Таким образом, при автоматизированном размещении элементов на ГЖПП значение целевой функции по критерию ЭМС улучшено на 9 %, а время, затраченное на проектирование устройства, уменьшено в 9 раз.

**Заключение.** По результатам данной статьи можно сказать следующее:

1. Разработана методика автоматизированного размещения элементов на гибко-жесткой печатной плате электронного средства с учетом тепловой и электромагнитной совместимости на основе двухуровневого генетического алгоритма.

2. Определены границы изменения значений весовых коэффициентов, используемых в многокритериальной постановке задачи размещения элементов на гибко-жесткой печатной плате, с целью обеспечения тепловой и электромагнитной совместимости.

3. По результатам апробации разработанной методики на практическом примере «Устройство интерфейсное» для получения решения было затрачено в 9 раз меньше времени относительно ручного варианта размещения элементов, а качество решения по критерию электромагнитной совместимости улучшено на 9 %.

### Список литературы

1. Новиков И. С. Автоматизация размещения тепловыделяющих элементов в электронных модулях трехмерной компоновки на основе генетического алгоритма: дис. ... канд. техн. наук. М., 2009. 132 с.
2. Квинт И. Э. Разработка алгоритмов размещения электрорадиоэлементов на модулях с кондуктивным теплоотводом: дис. ... канд. техн. наук. М., 2011. 119 с.
3. Брагин Д. М. Разработка специального математического и программного обеспечения эволюционного размещения электрорадиоэлементов с учетом тепловых полей: дис. ... канд. техн. наук. Воронеж, 2007. 195 с.
4. Зудин С. В. Анализ и разработка методов автоматизированного размещения компонентов электронных схем: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2004. 135 с.
5. Ирбенек В. С. Временная верификация и оптимизация размещения компонентов предельных по скорости ЭВМ: дис. ... д-ра техн. наук. М., 2001. 193 с.
6. Кокотов В. З. САПР рельефного монтажа: дис. ... д-ра техн. наук. М., 1998. 324 с.
7. Макеев П. А. Двустороннее автоматизированное размещение элементов на гибко-жесткой печатной плате на основе двухуровневого генетического алгоритма // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2021. № 5. С. 28–36.
8. Макеев П. А. Автоматизированное размещение развязывающих конденсаторов на печатной плате генетическим алгоритмом // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2022. Т. 15, № 3. С. 32–41. doi: 10.32603/2071-8985-2022-15-3-32-41.
9. Аветисов А. Г. Проектирование печатных плат с применением автоматизированного программного средства и технологии внутреннего монтажа: дис. ... канд. техн. наук. М., 2012. 187 с.

---

### Информация об авторах

**Макеев Павел Алексеевич** – науч. сотрудник Казанского национального технического университета им. А. Н. Туполева – КАИ, ул. К. Маркса, 10, г. Казань, Республика Татарстан, 420111, Россия.  
E-mail: pragramer@yandex.ru

**Чермошенцев Сергей Федорович** – д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой САПР Казанского национального технического университета им. А. Н. Туполева – КАИ, ул. К. Маркса, 10, г. Казань, Республика Татарстан, 420111, Россия.  
E-mail: sapr@kai.ru

### References

1. Novikov I. S. Avtomatizacija razmeshhenija teplovydeljajushhih jelementov v jelektronnyh moduljah trehmernoj komponovki na osnove geneticheskogo algoritma: dis. ... kand. tehn. nauk. M., 2009. 132 s. (In Russ.).
2. Kvint I. Je. Razrabotka algoritmov razmeshhenija jelektorradiojelementov na moduljah s konduktivnym teplootvodom: dis. ... kand. tehn. nauk. M., 2011. 119 s. (In Russ.).
3. Bragin D. M. Razrabotka special'nogo matematicheskogo i programmnoho obespechenija jevoljucionnogo razmeshhenija jelektorradiojelementov s uchjotom teplovyh polej: dis. ... kand. tehn. nauk. Voronezh, 2007. 195 s. (In Russ.).
4. Zudin S. V. Analiz i razrabotka metodov avtomatizirovannogo razmeshhenija komponentov jelektronnyh shem: dis. ... kand. tehn. nauk: 05.13. SPb., 2004. 135 s. (In Russ.).
5. Irbenek V. S. Vremennaja verifikacija i optimizacija razmeshhenija komponentov predel'nyh po bystrodejstvu jeVM: dis. ... d-ra tehn. nauk. M., 2001. 193 s. (In Russ.).
6. Kokotov V. Z. SAPR rel'efnogo montazha: dis. ... d-ra tehn. nauk. M., 1998. 324 s. (In Russ.).
7. Makeev P. A. Dvustoronnee avtomatizirovannoe razmeshhenie jelementov na gibko-zhestkoj pechatnoj plate na osnove dvuhurovnevoego geneticheskogo algoritma // Izv. SPbGjeTU «LJeTI». 2021. № 5. S. 28–36. (In Russ.).
8. Makeev P. A. Avtomatizirovannoe razmeshhenie razvjazjy-vajushhih kondensatorov na pechatnoj plate geneticheskim algoritmom // Izv. SPbGjeTU «LJeTI». 2022. T. 15, № 3. S. 32–41. doi: 10.32603/2071-8985-2022-15-3-32-41. (In Russ.).
9. Avetisov A. G. Proektirovanie pechatnyh plat s primeneniem avtomatizirovannogo programmnoho sredstva i tehnologii vnutrennego montazha: dis ... kand. tehn. nauk. M., 2012. 187 s. (In Russ.).

---

### Information about the authors

**Pavel A. Makeev** – researcher of Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI, K. Marx St., 10, Kazan, Republic of Tatarstan, 420111, Russia.  
E-mail: pragramer@yandex.ru

---

**Sergey F. Chermoshencev** – Dr Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Automation and Control Processes, Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI, K. Marx St., 10, Kazan, Republic of Tatarstan, 420111, Russia.

E-mail: [sapr@kai.ru](mailto:sapr@kai.ru)

Статья поступила в редакцию 14.03.2024; принята к публикации после рецензирования 23.03.2024; опубликована онлайн 24.05.2024.

Submitted 14.03.2024; accepted 23.03.2024; published online 24.05.2024.

---