

Научная статья

УДК 658.512.2

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=178481>

## **АПРОБАЦИЯ МЕТОДИКИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО РАЗМЕЩЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ НА ГИБКО-ЖЕСТКОЙ ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЕ НА ПРАКТИЧЕСКИХ ПРИМЕРАХ**

**Павел Алексеевич Макеев<sup>1✉</sup>, Сергей Фёдорович Чермошенцев<sup>2</sup>**

<sup>1,2</sup>Казанский национальный исследовательский технический университет  
им. А. Н. Туполева – КАИ,

Казань, Россия

<sup>1</sup>[pragramer@yandex.ru](mailto:pragramer@yandex.ru)✉

<sup>2</sup>[SAPR@kai.ru](mailto:SAPR@kai.ru)

***Аннотация.*** Рассматривается применение методики автоматизированного размещения элементов на гибко-жесткой печатной плате электронного средства с учетом тепловой и электромагнитной совместимости на основе двухуровневого генетического алгоритма на практических примерах. В соответствии с методикой проведено моделирование тепловой и электромагнитной совместимости спроектированных гибко-жестких печатных плат. Результаты моделирования подтверждают качество проектных решений с применением предлагаемой методики автоматизированного размещения элементов. Сравнительный анализ ручного размещения с автоматизированным режимом подтверждает эффективность

использования методики автоматизированного размещения элементов. Приведена апробация методики автоматизированного размещения элементов на плате на 11 практических примерах, подтверждающая возможность применения разработанной методики как для гибко-жестких печатных плат, так и для обычных печатных плат.

**Ключевые слова:** автоматизированное размещение элементов, генетический алгоритм, гибко-жесткая печатная плата, электронное средство, тепловая совместимость, электромагнитная совместимость

**Финансирование:** работа выполнена в рамках Соглашения №075-03-2023-032 от 16.01.2023 (шифр FZSU-2023-0004)

**Для цитирования:** Макеев П.А., Чермошенцев С.Ф. Апробация методики автоматизированного размещения элементов на гибко-жесткой печатной плате на практических примерах // Труды МАИ. 2024. № 134. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=178481>

Original article

## **TESTING THE METHOD OF AUTOMATED PLACEMENT OF ELEMENTS ON A RIGID-FLEXIBLE PRINTED BOARD USING PRACTICAL EXAMPLES**

**Pavel A. Makeev<sup>1</sup>, Sergey F. Cermoshencev<sup>2</sup>**

<sup>1,2</sup>Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev - KAI,  
Kazan, Russia

<sup>1</sup>[pragramer@yandex.ru](mailto:pragramer@yandex.ru)✉

<sup>2</sup>[SAPR@kai.ru](mailto:SAPR@kai.ru)

**Abstract.** The use of rigid-flex printed circuit boards on aircraft is due to the necessity of reducing overall dimensions and its weight. However, the use of rigid-flex printed circuit boards leads to problems of with thermal and electromagnetic compatibility due to the high density of elements on the board.

This article proposes the use of a technique for automated placement of elements on a rigid-flex printed circuit board of an electronic device, taking into account thermal and electromagnetic compatibility based on a two-level genetic algorithm.

The technique includes two levels of placing elements on the printed circuit board. At each level of the methodology, when solving the problem of automated elements placement, a modified genetic algorithm is used. The first level of the technique consists of super elements placement (an active element-microcircuit and associated passive elements) on a rigid-flex printed circuit board, taking into account the criteria of thermal compatibility and a minimum of total weighted length. The second level of the technique ensures the elements placement on the printed circuit board within a super element, taking into account the criteria of electromagnetic compatibility and the minimum of total weighted length. Verification of the obtained solutions is achieved through the use of computer modeling tools at each level of the proposed methodology. This ensures thermal and electromagnetic compatibility on the rigid-flex printed circuit board.

Validation of the developed methodology on a real practical example confirms its effectiveness and the quality of the results of elements placement on a rigid-flex printed circuit board. A summary of practical examples demonstrates the possibility of using the

developed methodology for the printed circuit boards design, as a special case of rigid-flexible printed circuit boards.

**Keywords:** automated placement, genetic algorithm, rigid-flex printed circuit board, thermal compatibility, electromagnetic compatibility

**Funding:** the work was carried out within the framework of Agreement No. 075-03-2023-032 dated January 16, 2023 (code FZSU-2023-0004)

**For citation:** Makeev P.A., Chermoshencev S.F. Testing the method of automated placement of elements on a rigid-flexible printed board using practical examples. *Trudy MAI*, 2024, no. 134. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=178481>

## Введение

Одной из основных задач при проектировании современных летательных аппаратов, включая беспилотные летательные аппараты, является уменьшение габаритных размеров и снижение собственной массы. Для решения данной задачи используют современную элементную базу электронных средств, отличающаяся малыми размерами. Однако применение современной элементной базы не решает проблем связанных с объемом жгутовых соединений между печатными платами (ПП). Одним из вариантов уменьшения габаритных размеров и массы является применение гибко-жестких печатных плат (ГЖПП), обеспечивающих решение данной задачи за счет увеличения плотности размещения и отсутствия жгутового соединения [1-4].

Проектирование ГЖПП осуществляется в системах автоматизированного проектирования (САПР). Однако представленные на рынке САПР не позволяют производить автоматизированное двухстороннее размещение элементов на ГЖПП или ПП с учетом критериев тепловой (ТС) и электромагнитной совместимости (ЭМС). Возникновение проблем ТС и ЭМС обусловлено высокой плотностью размещения элементов на плате, увеличением тактовых частот микросхем и повышением их мощности тепловыделения [5-13].

Проектирование ГЖПП занимает значительное время, так как количество элементов, подлежащих размещению на плате, может составлять более тысячи единиц. Для сокращения времени проектирования возможно применение автоматизированных процедур размещения элементов на ГЖПП и трассировки межсоединений. Однако существующие методики, представленные в работах [14-19] не позволяют осуществлять двухстороннее автоматизированное размещение элементов с учетом ТС и ЭМС. Таким образом, задача двухстороннего автоматизированного размещения элементов на ГЖПП с учетом ТС и ЭМС является актуальной.

Целью данной работы является подтверждение эффективности разработанной методики автоматизированного размещения элементов на ГЖПП электронного средства с учетом ТС и ЭМС на основе двухуровневого генетического алгоритма на реальных практических примерах.

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

Для решения задачи двухстороннего автоматизированного размещения элементов на ГЖПП с учетом ТС и ЭМС разработана методика. Структура методики приведена на рисунке 1. Отличительной особенностью данной методики является двухуровневое решение задачи размещения элементов на ГЖПП.

На первом уровне методики производится размещение суперэлементов на ГЖПП. Под суперэлементом понимается набор элементов, состоящих из активного элемента (микросхема) и связанных с ним пассивных элементов (резисторы, конденсаторы и т.д.). Оценка качества проектного решения на первом уровне осуществляется на основании целевой функции, представленной в следующем выражении:

$$F_{SEI} = (k_t F'_{termo} + k_s F'_{sum}) \rightarrow max,$$

где  $F_{SEI}$  – целевая функция для размещения суперэлементов,  $k_t$  и  $k_s$  – весовые коэффициенты для критерия равномерного распределения теплонагруженных элементов и критерия минимума суммарно взвешенной длины,  $F'_{termo}$  и  $F'_{sum}$  – нормализованные критерии качества. Данные критерии качества рассмотрены в работе [20] подробно.

На втором уровне методики производится размещение элементов внутри суперэлементов, обеспечивая близкое расположение элементов имеющих функциональную связанность, даже при отсутствие большого количества связей

между ними. Оценка качества проектного решения осуществляется по целевой функции представленной в следующем выражении:

$$F_{El} = (k_{EMC}F'_{EMC} + k_sF'_{sum}) \rightarrow max,$$

где  $F_{El}$  – целевая функция для размещения элементов внутри суперэлемента,  $k_{EMC}$  - весовой коэффициент для критерия ЭМС,  $F'_{EMC}$  – нормализованный критерий ЭМС. Данные критерии качества рассмотрены подробно в работе [21].

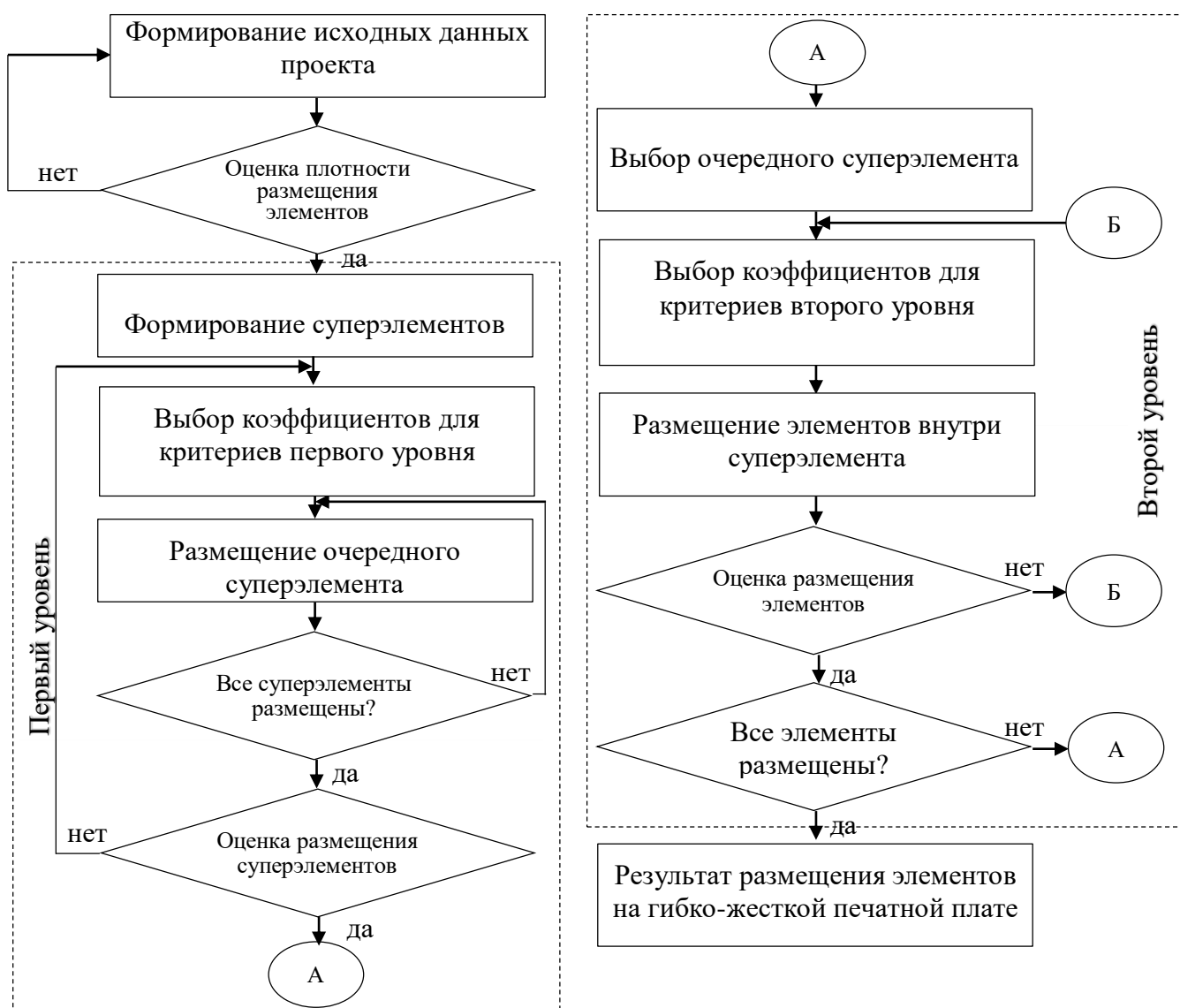


Рис. 1. Методика автоматизированного размещения элементов на гибко-жесткой печатной плате

На каждом из уровней методики для оценки качества размещения элементов на ГЖПП производится компьютерное моделирование в специализированных программных продуктах, на основании которого принимается решение о пригодности полученного проектного решения для следующего этапа.

Рассмотрим работу методики автоматизированного размещения элементов на гибко-жесткой печатной плате электронного средства с учетом тепловой и электромагнитной совместимости на основе двухуровневого генетического алгоритма на практическом примере.

### **Практический пример. Устройство ввода и обработки данных**

*Формирование исходных данных проекта.* Устройство ввода и обработки данных – устройство, предназначенное для получения и обработки видеоизображения. Конструктивно устройство выполнено в виде ГЖПП, состоящей из 3 жестких и 2 гибких частей. Количество элементов, подлежащих размещению составляет 372, 3 из которых имеют фиксированное расположение. Среди элементов, подлежащих размещению можно выделить следующие основные элементы:

- телевизионная матрица (потребление 200 мВт);
- процессор (потребление 2 Вт);
- программируемая логическая интегральная схема (ПЛИС) (потребление 700 мВт);
- оперативная память стандарта DDR3 (потребление 100 мВт);
- источники вторичного питания (потребление 150 мВт);



- пассивные элементы (резисторы, конденсаторы, индуктивности).

Внешний вид ГЖПП устройства приведен на рисунке 2.

Общие габаритные размеры ГЖПП составляют 165x45мм, а размеры жестких частей, пригодных для размещения элементов 35x37мм и 45x45мм (2 части) соответственно. Стоит отметить, что обратная сторона ГЖПП где расположена телевизионная матрица является запретной для размещения элементов ввиду конструктивных особенностей изделия. Расстояние между двумя другими жесткими частями ГЖПП составляет 2 мм, что накладывает ограничение на высоту элементов пригодных для размещения в данной области.

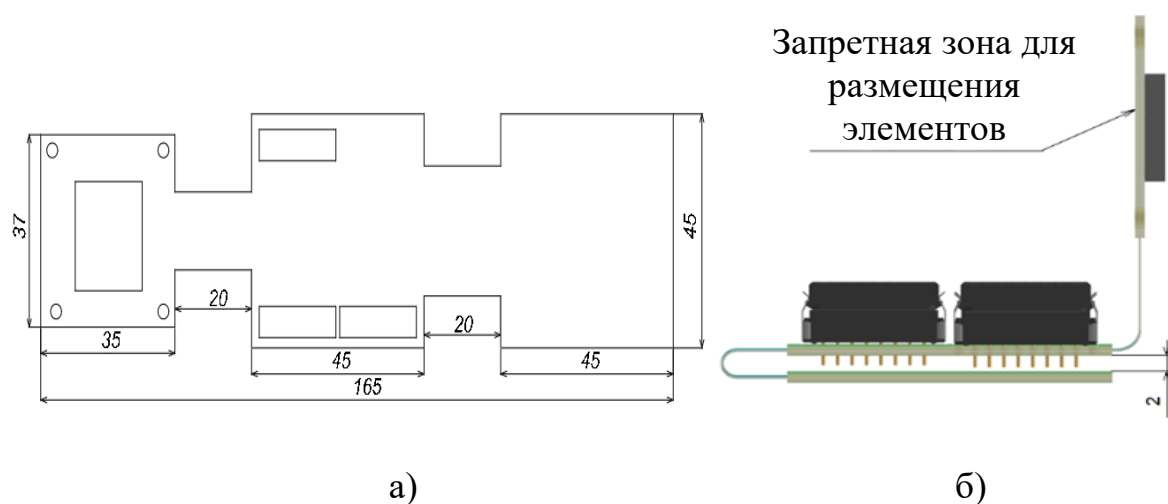


Рис. 2. Внешний вид ГЖПП: а) в развернутом состоянии, б) в сложенном состоянии

*Формирование суперэлементов.* Электрическая схема устройства ввода и обработки данных, состоящая из 372 элементов преобразована к 12 суперэлементам, включающим в себя активный элемент (микросхема) и пассивные элементы

(резисторы, конденсаторы). Максимальное количество элементов внутри суперэлемента составляет 103.

*Выбор коэффициентов для критериев первого уровня.* В соответствии с разработанной методикой, значение коэффициента  $k_t$  выбрано 0,8, значение  $k_s = 0,2$  соответственно. Данные коэффициенты обеспечивают решение задачи размещения элементов на ГЖПП с учетом ТС.

*Размещение очередного суперэлемента.* Так как общее количество суперэлементов подлежащих размещению составляет 12, то управляющие параметры генетического алгоритма выбраны следующие [20]: размер популяции хромосом – 120, значение условия останковки – 120, вероятность мутации – 0,2. Результат размещения суперэлементов на ГЖПП приведен на рисунке 3.

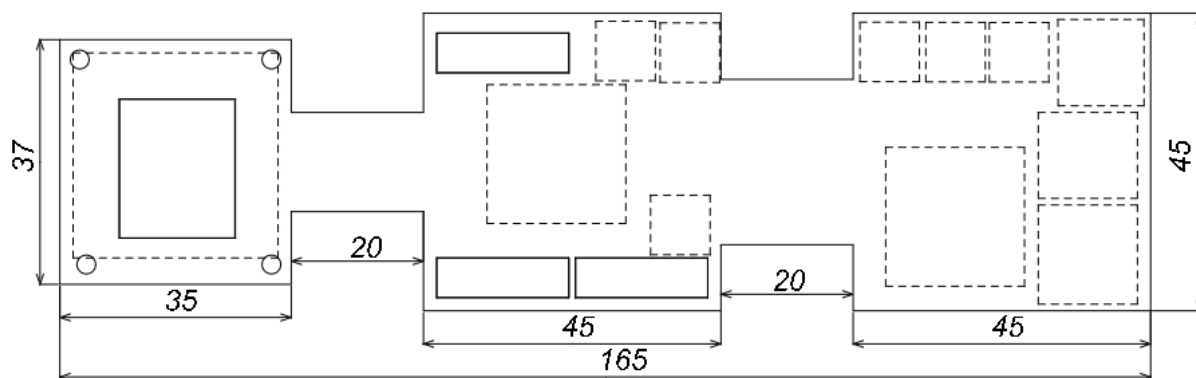


Рис. 3. Результат размещения суперэлементов на ГЖПП

*Оценка размещения суперэлементов.* С целью верификации качества размещения суперэлементов по критерию ТС, было проведено компьютерное моделирование устройства на ГЖПП с размещенными суперэлементами в

специализированном программном продукте. Результаты теплового моделирования устройства на ГЖПП приведены на рисунке 4.

На основе результатов теплового моделирования устройства на ГЖПП можно сделать следующие выводы:

1. Обеспечено равномерное распределение теплонагруженных элементов на ГЖПП. Данное размещение суперэлементов на ГЖПП пригодно для дальнейшего размещения элементов внутри суперэлементов.

2. Средняя температура на ГЖПП составляет около  $70^{\circ}\text{C}$  при температуре окружающей среды  $20^{\circ}\text{C}$ , что удовлетворяет техническим характеристикам используемых элементов.

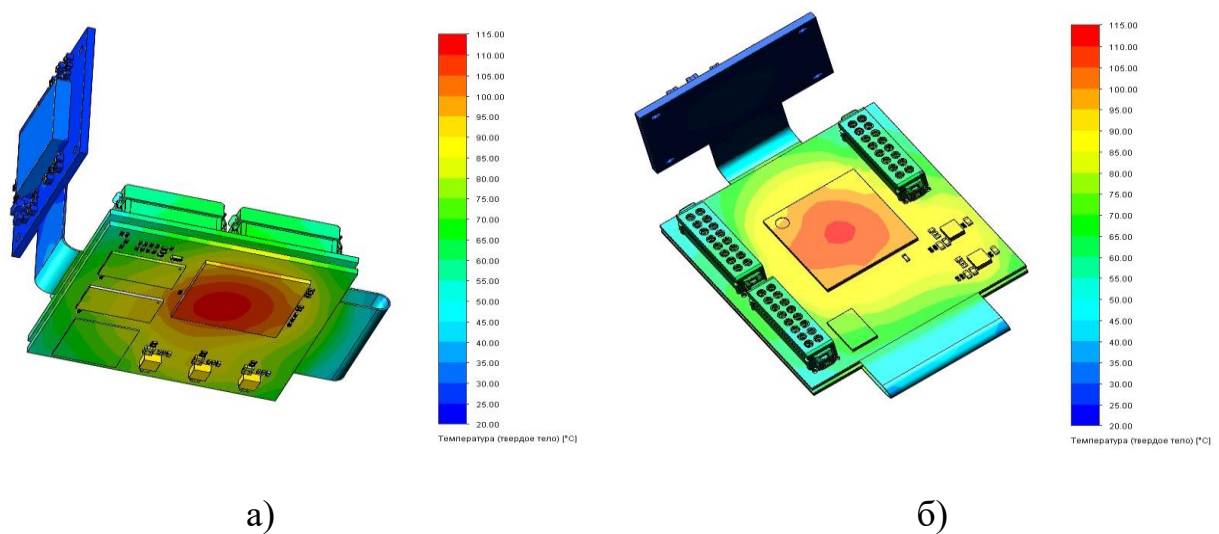


Рис. 4. Результаты теплового моделирования устройства на ГЖПП:

а) вид снизу, б) вид сверху

3. Перегрев, наблюдаемый на микросхеме процессора обусловлен его высокой потребляемой мощностью. Для охлаждения данного элемента необходима установка

дополнительного радиатора. Однако несмотря на локальный перегрев элемента это не приводит к перегреву соседних элементов, в силу их малого собственного тепловыделения.

*Выбор коэффициентов для критериев второго уровня.* Для обеспечения целостности питания ГЖПП по критерию ЭМС для критичных к питанию элементов, а, именно: микросхемы телевизионной матрицы, процессора, памяти и ПЛИС весовые коэффициенты  $k_{EMC}$  и  $k_s$  составляют 0,9 и 0,1 соответственно. В свою очередь для оставшихся суперэлементов (импульсные источники питания и перепрограммируемая память) приоритетным является минимальное расстояние сигнальных линий, а, следовательно, весовые коэффициенты логично установить следующим образом:  $k_{EMC} = 0,1$  и  $k_s = 0,9$ .

*Размещение элементов внутри суперэлемента.* В зависимости от суперэлемента, а именно, количества элементов входящего в его состав, управляющие параметры генетического алгоритма будут отличаться. Так при максимальном количестве элементов в суперэлементе равном 103 управляющие параметры выберем следующим образом [20]: размер популяции хромосом – 1030, значение условия останова – 1030, вероятность мутации – 0,2.

Результат размещения элементов на ГЖПП приведен на рисунке 5.

*Оценка размещения элементов.* Для определения качества полученного результата размещения элементов на ГЖПП с точки зрения ЭМС, а именно, целостности питания, проведено компьютерное моделирование данного проектного решения в специализированном программном продукте.

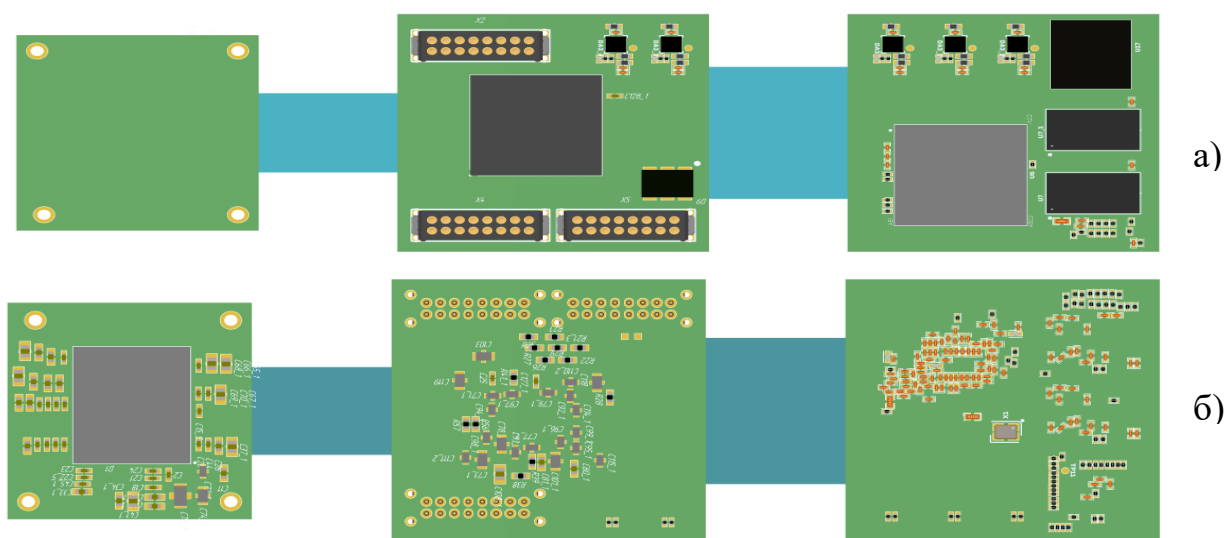


Рис. 5. Результат размещения элементов на ГЖПП:

а) лицевая сторона, б) обратная сторона

В рамках данного примера наиболее чувствительными к качеству питания являются следующие микросхемы: телевизионная матрица, процессор, оперативная память стандарта DDR3, ПЛИС.

Целевой импеданс и результаты моделирования входного импеданса для цепи питания микросхемы телевизионной матрицы +1,1 В приведены на рисунке 6.

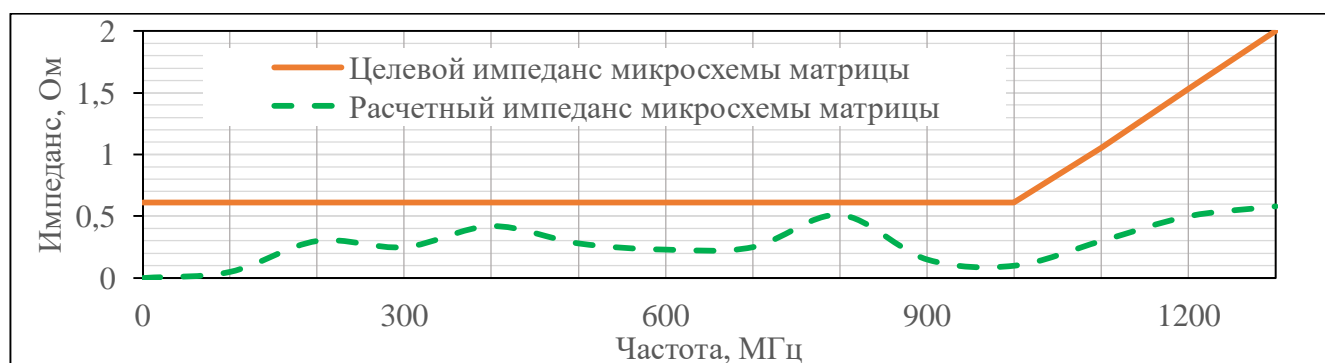


Рис. 6. Результат моделирования резонанса полигона питания микросхемы телевизионной матрицы

Целевой импеданс и результаты моделирования входного импеданса для цепи питания микросхемы процессора +0,8 В приведены на рисунке 7.

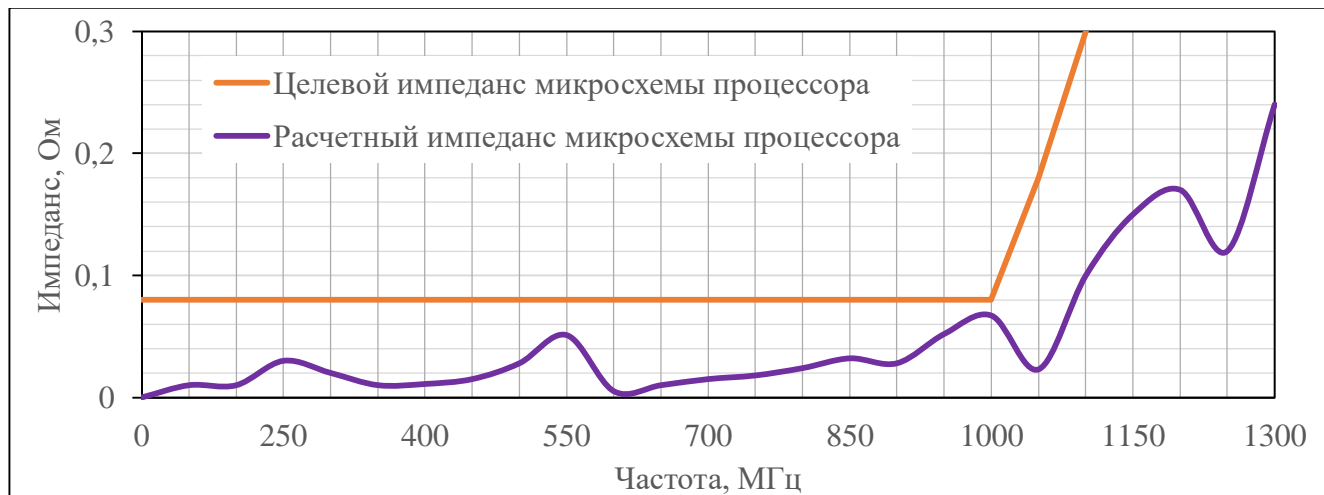


Рис. 7. Результат моделирования резонанса полигона питания микросхемы процессора

Целевой импеданс и результаты моделирования входного импеданса для цепи питания микросхемы памяти +1,2 В приведены на рисунке 8.

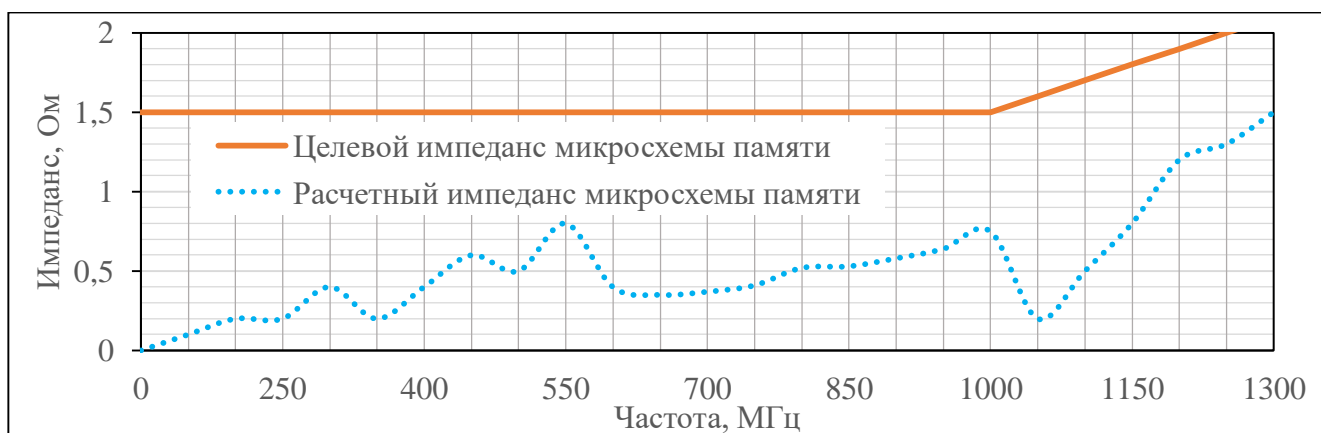


Рис. 8. Результат моделирования резонанса полигона питания микросхемы памяти

Целевой импеданс и результаты моделирования входного импеданса для цепи питания микросхемы ПЛИС +0,9 В приведены на рисунке 9.

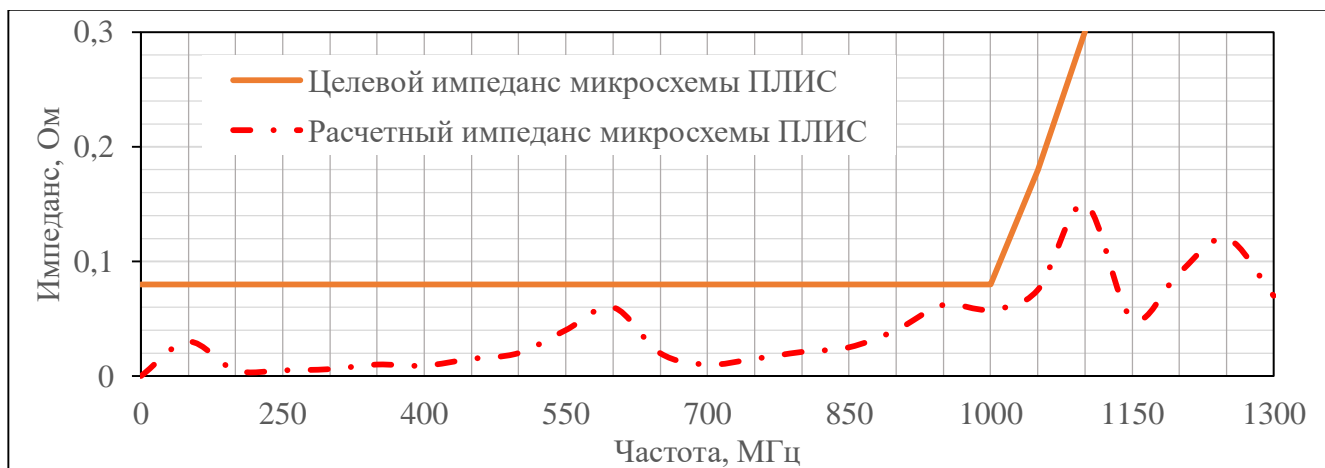


Рис. 9. Результат моделирования резонанса полигона питания микросхемы ПЛИС

*Результат размещения элементов на гибко-жесткой печатной плате.* На основании результатов компьютерного моделирования резонансов полигонов питания, для микросхем с повышенными требованиями к качеству питания, можно сделать следующий вывод, что данное размещение элементов позволяет обеспечить требуемый уровень входного импеданса для основных цепей питания ГЖПП.

Таким образом, полученное размещение элементов на ГЖПП позволяет обеспечить ТС и ЭМС устройства на ГЖПП.

С целью получения результатов для сравнительного анализа между ручным и автоматизированным вариантом размещения элементов на ГЖПП производилось размещение 3 инженерами различного уровня подготовки в ручном режиме и в автоматизированном режиме с применением разработанной методики. Результаты

для сравнительно анализа по размещению элементов на ГЖПП приведены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты для сравнительного анализа

Режим размещения	Затраченное время, мин.	Значение целевой функции ТС	Значение целевой функции ЭМС
Ручной, инженер 1	180	0,645	0,638
Ручной, инженер 2	120	0,845	0,821
Ручной, инженер 3	150	0,712	0,691
Автоматизированный режим	15	0,953	0,873

Таким образом, при автоматизированном размещении элементов на ГЖПП устройства ввода и обработки данных значение целевой функции улучшено на 12% и 6% для ТС и ЭМС соответственно, а время, затраченное на проектирование уменьшено в 10 раз.

### **Обобщение практических примеров**

В рамках данной статьи, была проведена апробация разработанной методики автоматизированного размещения элементов на ГЖПП в различных реальных проектах, успешно реализованных в готовые изделия. Основные данные проектов приведены в таблице 2.



Таблица 2. Обобщение практических примеров

Номер	Наименование проекта	Тип ПП	Количество элементов	Габаритные размеры, мм	Затраченное время, мин.	Значение целевой функции ТС	Значение целевой функции ЭМС
1	Устройство ввода и обработки данных	ГЖПП	372	165x45	15	0,953	0,873
2	Устройство вычислительное	ГЖПП	256	90x60	23	0,843	0,945
3	Устройство интерфейсное	ГЖПП	648	350x55	146	0,826	0,908
4	Серверная материнская плата	ПП	2786	305x426	1026	0,961	0,937
5	Устройство процессорное	ГЖПП	426	115x87	42	0,853	0,861
6	Устройство аналого-цифрового преобразователя	ГЖПП	361	157x70	18	0,901	0,886
7	Устройство управления	ГЖПП	613	100x80	183	0,875	0,892
8	Устройство фотоприемное	ГЖПП	184	80x40	24	0,886	0,917
9	Модуль управления процессором	ПП	355	70x42	28	0,942	0,914
10	Устройство преобразования питания	ПП	80	78x71	8	0,927	0,905
11	Модуль объединительный	ПП	53	142x74	5	0,912	0,882

Данные реальные проекты (таблица 2) подтверждают эффективность методики автоматизированного размещения элементов на гибко-жесткой печатной плате электронного средства с учетом тепловой и электромагнитной совместимости на основе двухуровневого генетического алгоритма. Данные проектные решения в ходе практического применения методики обеспечили дальнейшее успешное

прохождение этапа трассировки межсоединений на плате, последующие испытания готовых образцов изделий подтверждают работоспособность устройств.

## **Заключение**

1. Апробация методики автоматизированного размещения элементов на гибко-жесткую печатную плату электронного средства с учетом тепловой и электромагнитной совместимости на реальных проектах подтверждает эффективность, предложенного в данной работе подхода к решению задачи размещения элементов на плату, а именно время, затрачиваемое на размещение элементов на гибко-жесткую печатную плату, сократилось до 10 раз, относительно ручного варианта размещения элементов на плату инженером.

2. Применение разработанной методики автоматизированного размещения элементов на гибко-жесткую печатную плату электронного средства с учетом тепловой и электромагнитной совместимости позволило повысить качество реальных проектов гибко-жестких печатных плат, по значениям критериев тепловой и электромагнитной совместимости, до 12% относительно ручного варианта размещения элементов на плату инженером.

3. Реализованные реальные проекты печатных плат подтверждают возможность применения методики автоматизированного размещения элементов на гибко-жесткую печатную плату электронного средства с учетом тепловой и электромагнитной совместимости для проектирования печатных плат, как частного случая гибко-жестких печатных плат.

4. Проведено обобщение ряда практических примеров применения методики автоматизированного размещения элементов на гибко-жесткой печатной плате. Реализованные проекты подтверждают эффективность и адекватность разработанной методики автоматизированного размещения элементов на гибко-жесткую печатную плату электронного средства с учетом тепловой и электромагнитной совместимости.

### **Список источников**

1. Трохов Д.А., Туркин И.К. К вопросу проектирования беспилотного летательного аппарата для решения разведывательных задач на море // Труды МАИ. 2014. № 78. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=53735>
2. Билецкая В.В., Жеребин А.М., Топорова М.И., Широков А.И. 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. DOI: [10.52190/1729-6552\\_2023\\_1\\_28](https://doi.org/10.52190/1729-6552_2023_1_28)
3. Павлов М.С., Каравацкий А.К., Костюшин К.В. и др. Оптимальное проектирование корпуса беспилотного летательного аппарата // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2021. № 73. С. 71-80. DOI: [10.17223/19988621/73/7](https://doi.org/10.17223/19988621/73/7)
4. Кириллов В.Ю., Слипаченко А.А. Проектирование бортовой кабельной сети перспективного летательного аппарата // Труды МАИ. 2012. № 59. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=34842>

5. Уайтт К., Рентюк В. Особенности конструирования печатных плат с выполнением требований по ЭМС // Компоненты и технологии. 2019. № 6 (215). С. 121-128.
6. Ромащенко М.А. Методика анализа помехоустойчивости печатных плат при проектировании РЭС с учетом ЭМС // Радиотехника. 2014. № 3. С. 92-95.
7. Глотов В.В., Ромащенко М.А. Оптимизация радиоэлектронных устройств по критериям внутриаппаратурной электромагнитной совместимости // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2018. Т. 14. № 4. С. 103-107.
8. Туищев А.И., Губанов И.О., Плеханов В.М., Токарев Д.Г. Исследование тепловых режимов печатных плат радиоэлектронных средств и вычислительной техники при конвекционном и радиационном теплообменах // Вестник НГИЭИ. 2014. № 12 (43). С. 88-93.
9. Селиванов К.В., Долотов И.И., Домников А.С. Выбор конструкционных материалов и приемов для эффективного отвода тепла от печатных плат // Технологии инженерных и информационных систем. 2023. № 1. С. 3-11.
10. Ципина 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. Т. 18. № 6. С. 78-86. DOI: [10.36622/VSTU.2022.18.6.010](https://doi.org/10.36622/VSTU.2022.18.6.010)
11. Фэйсал Р.Г., Хади О.Ш., Литвинов А.Н., Баннов В.Я. Анализ тепловых полей печатных узлов // Theoretical & Applied Science. 2016. № 2 (34). С. 58-65. DOI: [10.15863/TAS.2016.02.34.10](https://doi.org/10.15863/TAS.2016.02.34.10)

12. Суанов Т.А. Моделирование высокоскоростных линий передачи в многослойных печатных платах // Известия ЮФУ. Технические науки. 2013. № 11 (148). С. 186-194.
13. Суровцев Р.С., Газизов Т.Р. Оценка целостности сигналов в печатных платах системы автономной навигации космического аппарата // Труды МАИ. 2015. № 83.  
URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=62204>
14. Новиков И.С. Автоматизация размещения тепловыделяющих элементов в электронных модулях трехмерной компоновки на основе генетического алгоритма: Дисс... канд. техн. наук. – Москва, 2009. – 132 с.
15. Квинт И.Э. Разработка алгоритмов размещения электрорадиоэлементов на модулях с кондуктивным теплоотводом: Дисс... канд. техн. наук. – Москва, 2011. – 119 с.
16. Зудин С.В. Анализ и разработка методов автоматизированного размещения компонентов электронных схем: Дисс... канд. техн. наук. – Санкт-Петербург, 2004. – 135 с.
17. Брагин Д.М. Разработка специального математического и программного обеспечения эволюционного размещения электрорадиоэлементов с учётом тепловых полей: Дисс... канд. техн. наук. – Воронеж, 2007. – 195 с.
18. Ирбенек В.С. Временная верификация и оптимизация размещения компонентов предельных по быстродействию ЭВМ: Дисс... доктора технических наук. – Москва, 2001. – 193 с.
19. Кокотов В.З. САПР рельефного монтажа: Дисс... доктора технических наук. – Москва, 1998. – 324 с.

20. Макеев П.А. Двустороннее автоматизированное размещение элементов на гибко- жесткой печатной плате на основе двухуровневого генетического алгоритма // Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ. 2021. № 5. С. 28-36.

21. Макеев П.А. Автоматизированное размещение развязывающих конденсаторов на печатной плате генетическим алгоритмом // Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ. 2022. Т. 15. № 3. С. 32-41. DOI: [10.32603/2071-8985-2022-15-3-32-41](https://doi.org/10.32603/2071-8985-2022-15-3-32-41)

## References

1. Trokhov D.A., Turkin I.K. *Trudy MAI*, 2014, no. 78. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=53735>

2. Biletskaya V.V., Zherebin A.M., Toporova M.I., Shirokov A.I. *Oboronnyi kompleks - nauchno-tekhnicheskomu progressu Rossii*, 2023, no. 1 (157), pp. 28-34. DOI: [10.52190/1729-6552\\_2023\\_1\\_28](https://doi.org/10.52190/1729-6552_2023_1_28)

3. Pavlov M.S., Karavatskii A.K., Kostyushin K.V. et al. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika*, 2021, no. 73, pp. 71-80. DOI: [10.17223/19988621/73/7](https://doi.org/10.17223/19988621/73/7)

4. Kirillov V.Yu., Slipachenko A.A. *Trudy MAI*, 2012, no. 59. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=34842>

5. Uaitt K., Rentyuk V. *Komponenty i tekhnologii*, 2019, no. 6 (215), pp. 121-128.

6. Romashchenko M.A. *Radiotekhnika*, 2014, no. 3, pp. 92-95.

7. Glotov V.V., Romashchenko M.A. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2018, vol. 14, no. 4, pp. 103-107.

8. Tuishchev A.I., Gubanov I.O., Plekhanov V.M., Tokarev D.G. *Vestnik NGIEI*, 2014, no. 12 (43), pp. 88-93.
9. Selivanov K.V., Dolotov I.I., Domnikov A.S. *Tekhnologii inzhenernykh i informatsionnykh system*, 2023, no. 1, pp. 3-11.
10. Tsipina N.V., Khoroshailov R.N., Turetskii I.A. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2022, vol. 18, no. 6, pp. 78-86. DOI: [10.36622/VSTU.2022.18.6.010](https://doi.org/10.36622/VSTU.2022.18.6.010)
11. Feisal R.G., Khadi O.Sh., Litvinov A.N., Bannov V.Ya. Analiz teplovykh polei pechatnykh uzlov, *Theoretical & Applied Science*, 2016, no. 2 (34), pp. 58-65. DOI: [10.15863/TAS.2016.02.34.10](https://doi.org/10.15863/TAS.2016.02.34.10)
12. Suanov T.A. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki*, 2013, no. 11 (148), pp. 186-194.
13. Surovtsev R.S., Gazizov T.R. *Trudy MAI*, 2015, no. 83. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=62204>
14. Novikov I.S. *Avtomatizatsiya razmeshcheniya teplovydelyayushchikh elementov v elektronnykh modulyakh trekhmernoï komponovki na osnove geneticheskogo algoritma* (Automation of the placement of fuel elements in electronic modules of a three-dimensional layout based on a genetic algorithm), Doctor's thesis, Moscow, 2009, 132 p.
15. Kvint I.E. *Razrabotka algoritmov razmeshcheniya elektroradioelementov na modulyakh s konduktivnym teplootvodom* (Development of algorithms for the placement of electrical radioelements on modules with conductive heat sink), Doctor's thesis, Moscow, 2011, 119 p.

16. Zudin S.V. *Analiz i razrabotka metodov avtomatizirovannogo razmeshcheniya komponentov elektronnykh skhem* (Analysis and development of methods for automated placement of components of electronic circuits), Doctor's thesis, Saint-Petersburg, 2004, 135 p.
17. Bragin D.M. *Razrabotka spetsial'nogo matematicheskogo i programmnoho obespecheniya evolyutsionnogo razmeshcheniya elektroradioelementov s uchetom teplovykh polei* (Development of special mathematical and software for the evolutionary placement of electrical radio elements taking into account thermal fields), Doctor's thesis, Voronezh, 2007, 195 p.
18. Irbenek V.S. *Vremennaya verifikatsiya i optimizatsiya razmeshcheniya komponentov predel'nykh po bystrodeistviyu EVM*: (Temporary verification and optimization of the placement of components of the maximum speed of a computer), Doctor's thesis, Moscow, 2001, 193 p.
19. Kokotov V.Z. *SAPR rel'efnogo montazha* (CAD for relief installation), Doctor's thesis, Moscow, 1998, 324 p.
20. Makeev P.A. *Izvestiya SPbGETU LETI*, 2021, no. 5, pp. 28-36.
21. Makeev P.A. *Izvestiya SPbGETU LETI*, 2022, vol. 15, no. 3, pp. 32-41. DOI: [10.32603/2071-8985-2022-15-3-32-41](https://doi.org/10.32603/2071-8985-2022-15-3-32-41)

Статья поступила в редакцию 01.02.2024

Одобрена после рецензирования 09.02.2024

Принята к публикации 27.02.2024



The article was submitted on 01.02.2024; approved after reviewing on 09.02.2024; accepted for publication on 27.02.2024