

Автоматизированное размещение развязывающих конденсаторов на печатной плате генетическим алгоритмом

П. А. Макеев✉

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

✉ pragramer@yandex.ru

Аннотация. Рассматривается процедура автоматизированного размещения развязывающих конденсаторов на печатной плате с применением генетического алгоритма и критерия качества на основе входного импеданса цепи питания. Представлен практический пример применения генетического алгоритма для решения задачи размещения элементов на гибко-жесткой печатной плате. Проведено сравнение результатов входного импеданса, полученных с помощью разработанного алгоритма с результатами работ других авторов. Проведен сравнительный анализ результатов решения задачи автоматизированного размещения развязывающих конденсаторов на печатную плату генетическим алгоритмом и алгоритмом слепого поиска.

Ключевые слова: автоматизированное размещение, процедура, развязывающий конденсатор, генетический алгоритм, печатная плата, цепь питания

Для цитирования: 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.

Original article

Automated Placement of Decoupling Capacitors on a Printed Circuit Board by Genetic Algorithm

P. A. Makeev✉

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

✉ pragramer@yandex.ru

Abstract. The procedure for automated placement of decoupling capacitors on a printed circuit board using a genetic algorithm and a quality criterion based on the input impedance of the power circuit is considered. A practical example of the application of a genetic algorithm for solving the problem of placing elements on a flexible-rigid printed circuit board is presented. The results of the input impedance obtained using the developed algorithm are compared with the results of the works of other authors. A comparative analysis of the results of solving the problem of automated placement of decoupling capacitors on a printed circuit board using a genetic algorithm and a blind search algorithm is carried out.

Keywords: automated placement, procedure, decoupling capacitor, genetic algorithm, printed circuit board, power circuit

For citation: Makeev P. A. Automated Placement of Decoupling Capacitors on a Printed Circuit Board by Genetic Algorithm // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2022. Vol. 15, no. 3. P. 32–41. doi: 10.32603/2071-8985-2022-15-3-32-41.

Введение. Развитие современных электронных средств направлено на повышение быстродействия, увеличение объема передаваемой информации и надежности. Передача больших объемов данных за меньшее время приводит к необходимости применения микросхем с тактовыми частотами в десятки гигагерц. Совместно с тактовой частотой повышается и количество операций, выполняемых микросхемой, что приводит к увеличению энергопотребления. Токовая нагрузка на печатную плату (ПП) может достигать сотни ампер. Высокая скорость переключения в совокупности с большой мощностью потребления создают сложности при проектировании цепи питания на ПП. Традиционным решением при проектировании цепи питания ПП является установка развязывающих конденсаторов, однако недостаточное их количество или некорректное расположение приводит к резкому возрастанию входного импеданса, что в совокупности с большими токами оказывает серьезное влияние на функционирование микросхем на ПП.

Например, в [1] целевое значение входного импеданса цепи питания вычисляется как

$$Z_{tar} = \frac{V_{core} \cdot 0.05}{I_{core} \cdot 0.5},$$

где Z_{tar} – целевой импеданс, Ом; V_{core} – напряжение питания, В; I_{core} – сила тока, А.

Достижение целевого значения входного импеданса цепи питания ПП возможно за счет увеличения количества развязывающих конденсаторов. Однако данный подход приводит к увеличению стоимости изделия, а ввиду конструктивных особенностей может быть нереализуем вовсе из-за недостатка свободного места на ПП.

Таким образом, корректное расположение развязывающих конденсаторов на ПП является необходимым подходом при проектировании качественной цепи питания.

В [2]–[4] рассматриваются варианты анализа входного импеданса, однако расположение развязывающих конденсаторов осуществляется в фиксированные позиции. В [5]–[9] расположение развязывающих конденсаторов осуществляется в некоторых областях печатной платы, однако при этом не учитывается размещение остальных элементов устройства.

Цель данной статьи – оптимизация входного импеданса цепи питания на этапе автоматизированного размещения развязывающих конденсаторов на

ПП с учетом конструктивных особенностей ПП и расположения всех элементов устройства.

Полостная модель для входного импеданса полигона питания. Входной импеданс для прямоугольных полигонов питания и земли ПП (рис. 1) с габаритными размерами $W_x \times W_y \times W_z$ и габаритными размерами портов $P_{xi} \times P_{yi}$, расположенных в координатах $\{X_i, Y_i\}$, на основании функции Грина двумерного уравнения Гельмгольца [10] можно выразить как

$$Z(f) = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{y_{mn} c_{mn}(X_s, Y_s) c_{mn}(X_f, Y_f) W_z / (W_x W_y)}{\frac{\epsilon \omega}{Q} + j \left(\epsilon \omega - \frac{k_{xm}^2 + k_{yn}^2}{\omega \mu} \right) + \frac{y_{mn} W_z}{W_x W_y} S_{Nc}}, \quad (1)$$

где m, n – распространяющиеся моды; X_s, Y_s – координаты размещения источника питания; X_f, Y_f – координаты размещения нагрузки;

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

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

$$k_{xm} = \frac{\pi m}{W_x}; \quad k_{yn} = \frac{\pi n}{W_y};$$

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$$

(ϵ_0 – электрическая постоянная; ϵ_r – относительная диэлектрическая проницаемость);

$$\omega = 2\pi f;$$

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

($\operatorname{tg} \delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь, μ_0 – магнитная постоянная; k – удельная электропроводность; μ – абсолютная магнитная проницаемость);

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

(N_c – количество конденсаторов; X_{Ci}, Y_{Ci} – координаты размещения i -го конденсатора);

$$Z_{Ci} = \sqrt{\frac{C_{Ci}^2 L_{Ci}^2 \omega^4 + C_{Ci}^2 R_{s_{Ci}}^2 \omega^2 - 2 C_{Ci} L_{Ci} \omega^2 + 1}{C_{Ci}^2 \omega^2}}.$$

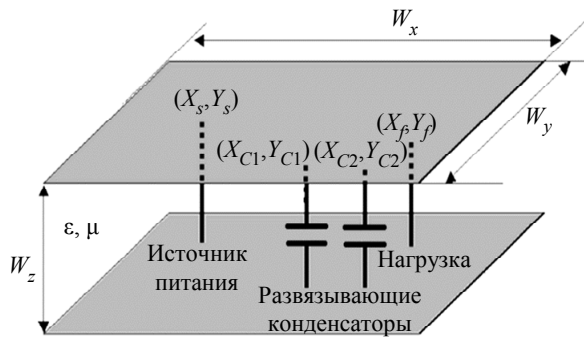


Рис. 1. Полигоны питания и земли с развязывающими конденсаторами
Fig. 1. Power and ground polygons with decoupling capacitors

По выражению (1) рассчитывается значение входного импеданса для прямоугольных полигонов питания ПП с расположенными на них развязывающими конденсаторами.

Комплексное сопротивление конденсатора Z_C может быть рассчитано, исходя из следующего выражения [11]:

$$Z_C = -\frac{j}{2\pi fC},$$

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

Стоит также отметить, что резонансная частота конденсатора f_p вычисляется, исходя из выражения [11]

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_C C}},$$

где L_C – последовательная индуктивность конденсатора, Гн.

При частотах выше f_p конденсатор начинает вести себя аналогично катушке индуктивности, в связи с чем целесообразно выбирать конденсаторы для работы на частотах ниже f_p .

Такие параметры конденсаторов, как емкость, последовательное сопротивление (ESR), последовательная индуктивность (ESL), а также координаты размещения, оказывают значительное влияние на значение входного импеданса полигона цепи питания.

Так как в рамках данной работы не предполагается решение задачи оптимизации значений емкостей развязывающих конденсаторов, то наибольший интерес представляют именно координаты их размещения. Оптимизируя расположение развязывающих конденсаторов, можно уменьшить значение входного импеданса полигона цепи питания.

Традиционно развязывающие конденсаторы принято размещать на ПП максимально близко к

потребителям питания. Однако при большом количестве элементов, подлежащих размещению на ПП, возникает проблема отсутствия свободного места и необходимость выбора такого их расположения, при котором входной импеданс цепи питания остается в приемлемом диапазоне. Данная проблема особенно остро проявляется при проектировании гибко-жестких ПП (ГЖПП), так как в виду своих конструктивных особенностей данные ПП обладают повышенной плотностью размещения.

Задачи размещения развязывающих конденсаторов на ПП имеют следующие ограничения:

1. Расположение развязывающих конденсаторов только в пределах монтажной зоны ПП.
2. Непересечение развязывающих конденсаторов друг с другом и другими элементами электрической схемы на ПП.
3. Запрет на размещение развязывающих конденсаторов в некоторые зоны ПП, обусловленные конструктивными особенностями.
4. Диапазон частот при оптимизации входного импеданса полигона цепи питания составляет $f_{\min} \leq f \leq f_{\max}$. Выбор значения f_{\max} обусловлен тактовыми частотами нагрузки, $f_{\max} \geq f_{\text{Load}}$, где f_{Load} – тактовая частота работы нагрузки.
5. Размещение фиксированных элементов.
6. Динамическое непересечение элементов, расположенных на различных жестких частях ГЖПП, при условии, что эти части расположены друг напротив друга:

$$h_i + h_j < H_{\max},$$

где h_i – высота i -го элемента; h_j – высота j -го элемента; H_{\max} – расстояние между жесткими частями ГЖПП.

Для оценки качества полученного размещения в данной статье применяются следующие критерии качества.

Основываясь на (1), критерий качества размещения развязывающих конденсаторов цепи питания или критерий электромагнитной совместимости (ЭМС) представим следующим образом:

$$F_{\text{ЭМС}} = Z(f) \rightarrow \min.$$

Таким образом, за счет оптимального расположения развязывающих конденсаторов на ПП происходит оптимизация входного импеданса полигона цепи питания.

Минимум суммарной взвешенной длины всех соединений платы [12]

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

где c_{ij} – количество связей между элементами;

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

– расстояние между элементами, где $(x_i; y_i; z_i)$ и $(x_j; y_j; z_j)$ – координаты i -го и j -го элементов; z_i, z_j – сторона размещения i -го и j -го элементов ($z = 0$ – лицевая сторона ПП, $z = 1$ – обратная сторона ПП); $h_{ПП}$ – толщина ПП.

Поскольку критерии минимума суммарной взвешенной длины и критерий ЭМС имеют различную размерность, их необходимо привести к нормализованному виду:

$$F' = \frac{F_{\max} - F_i}{F_{\max}} \rightarrow \max,$$

где F' – нормализованный критерий; F_{\max} – максимальное значение нормализуемого критерия; F_i – нормализуемый критерий.

Таким образом, обобщенный критерий представим в следующем виде:

$$F = k_s F'_{\text{Sum}} + k_E F'_{\text{EMC}} \rightarrow \max, \quad (2)$$

где k_s, k_E – весовые коэффициенты для критерия минимума суммарно взвешенной длины и критерия ЭМС; F'_{Sum} – нормализованный критерий минимума суммарно взвешенной; F'_{EMC} – нормализованный критерий ЭМС.

Генетический алгоритм. В [12] рассматривается двухуровневый генетический алгоритм (ГА), в котором элементы объединяются в суперэлементы и подлежат размещению. В рамках данной статьи рассматривается размещение элементов внутри суперэлемента. Для решения последней задачи применяется ГА, блок-схема которого приведена на рис. 2. В качестве целевой функции применяется выражение (2). Преимущество ГА заключается в возможности нахождения квазиоптимальных решений, пригодных для дальнейшего использования, за малое время.

В рамках ГА примем следующие соответствия: *хромосома* – элемент, подлежащий размещению; *особь* – набор хромосом, представляющий результат размещения всех элементов; *популяция* – набор особей, различных решений из числа которых выбирается лучшее.

Хромосома имеет следующий вид:

$$\text{hromosoma} = \{x, y, z, \alpha, \text{cap}\},$$

где x, y определяют координаты центра элемента, z – принимает значение 1 или 0 и определяет рас-

положение элемента на лицевой или обратной стороне ГЖПП; α определяет угол поворота элемента, cap принимает значение 1 или 0 и определяет, является ли элемент конденсатором.

Селекция и ранжирование. В качестве оператора селекции применяется селекция на основе лучших особей. Также на данном этапе происходит ранжирование хромосом внутри особи следующим образом: на первое место ставятся хромосомы, соответствующие микросхеме; затем хромосомы конденсаторов (в порядке возрастания номинала); хромосомы резисторов; хромосомы диодов и хромосомы катушек индуктивностей. Таким образом, внутри суперэлемента наибольший приоритет отдается микросхеме – наиболее габаритному элементу, затем размещаются конденсаторы, после чего по остаточному принципу и по критерию минимума суммарно взвешенной длины размещаются остальные элементы. Остальные операторы ГА аналогичны операторам, представленным в [12].



Рис. 2. Генетический алгоритм
Fig. 2. Genetic algorithm

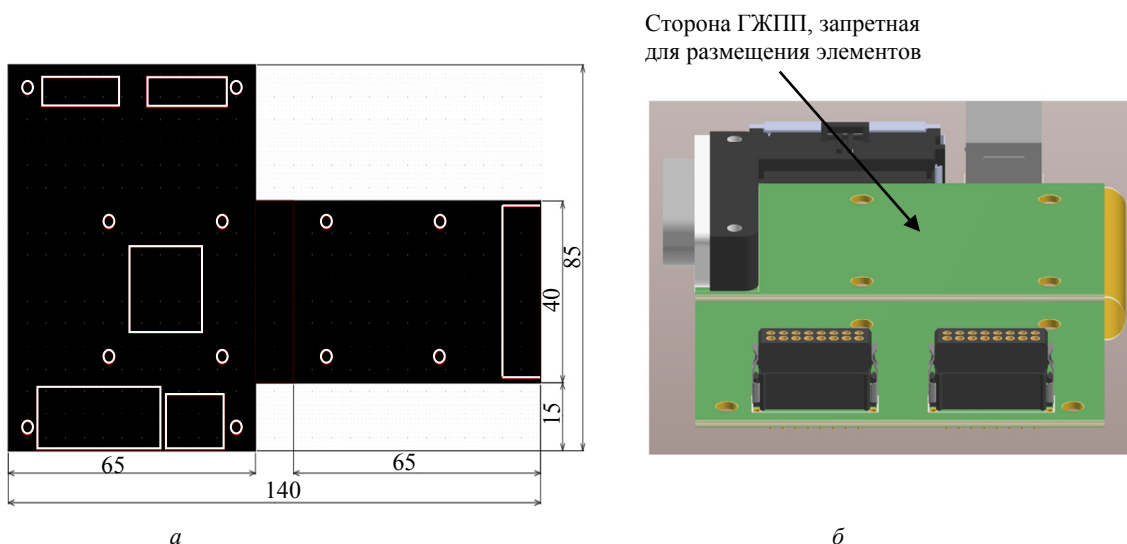


Рис. 3. Габариты ГЖПП: а – в разложенном виде; б – в сложенном виде
Fig. 3. Rigid-flex PCB dimensions: а – unfolded; б – folded

Работа алгоритма на практическом примере. Рассмотрим работу алгоритма на практическом примере. На рис. 3, а представлены габаритные размеры ГЖПП с установленными фиксированными элементами и запретными зонами в виде крепежных отверстий. На рис. 3, б приведен вид ГЖПП в сложенном состоянии. Стоит отметить, что ввиду конструктивных особенностей расположение элементов на верхней плате со стороны разъема недопустимо, а расстояние между жесткими частями ГЖПП в сложенном состоянии составляет 5 мм.

Данная ГЖПП выполняет роль процессорной платы изделия и состоит из следующих основных функциональных узлов:

- процессор TMS320DM648ZUTD9;
- 2 модуля памяти DDR2 MT47H128M16RT-25E-IT;
- Ethernet-контроллер Marvell 88E1111-B2-NDC2i000 (аQFN-96);
- 2 импульсных источника питания TPS54478RTET (WQFN-16);
- импульсный источник питания LM53635NQRNLRQ1 (VQFN-22);
- 137 конденсаторов различной емкости, 12 катушек индуктивности и 68 резисторов.

С помощью двухуровневого генетического алгоритма [12] на ГЖПП были размещены суперэлементы, результат размещения приведен на рис. 4, где сплошной линией обозначены фиксированные элементы и запретные зоны, а штриховой – границы суперэлементов.

Следующий этап – размещение элементов внутри каждого суперэлемента. Так как процесс

размещения идентичен для каждого суперэлемента, то для дальнейшего рассмотрения выберем суперэлемент, в состав которого входит микросхема процессора. Данный суперэлемент содержит 96 элементов, среди которых конденсаторы следующих емкостей: 0.1 мкФ – 20 шт., 0.22 мкФ – 15 шт., 0.47 мкФ – 17 шт., 10 мкФ – 5 шт., 22 мкФ – 2 шт. Управляющие параметры генетического алгоритма на основании исследований в [12] выставлены в следующие значения: размер популяции – 1000, значение условия остановки – 1000, вероятность мутации – 0.2.

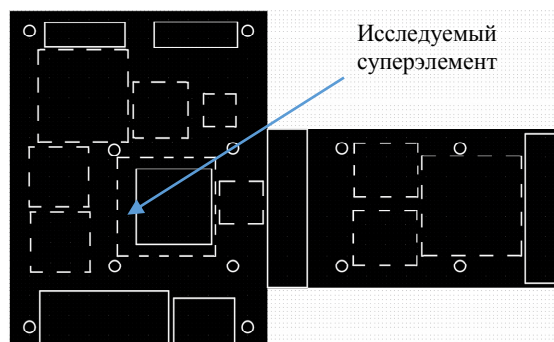


Рис. 4. Размещение суперэлементов
Fig. 4. Placement of superelements

Рассмотрим основные этапы ГА.

Создание начальной популяции. Происходит случайное заполнение хромосом в каждой особи популяции с учетом всех ограничений, используемых в рамках данной задачи.

Селекция и ранжирование. На данном этапе необходимо отсортировать лучшие особи по критерию качества (2), затем внутри каждой особи происходит ранжирование хромосом.

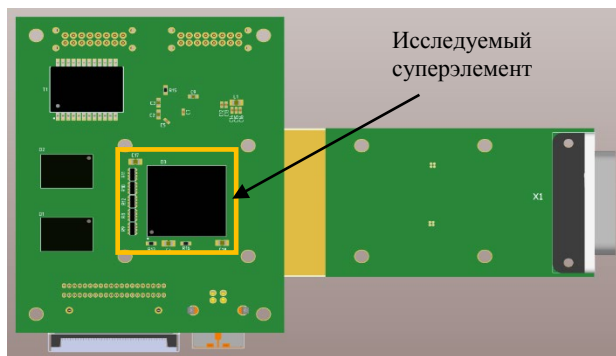


Рис. 5. Размещение элементов на лицевой стороне ГЖПП
 Fig. 5. Placement of elements on the front side of a flex-rigid PCB

Кроссинговер. На этапе кроссинговера происходит скрещивание особей для получения новых вариантов решения – хромосом потомков. На основе координат размещения хромосом родителей выбираются значения координат размещения хромосом потомков. В результате получаем популяцию больше исходной в 2 раза, а именно 2000 элементов в рамках данного примера.

Мутация. Данный этап предназначен для выхода генетического алгоритма из локальных оптимумов значения целевой функции. Так как значение вероятности мутации составляет 0.2, то выбираются случайные 200 особей в каждой из которых одна из хромосом меняет координаты размещения случайным образом, при этом оцениваются ограничения задачи размещения. По завершении этапа размер популяции составляет 2200 особей: 1000 – родители (лучшие из предыдущей популяции), 1000 – потомки, 200 – мутующие особи.

Селекция и ранжирование. По значению критерия качества отбирается 1000 особей, которые будут участвовать в следующей итерации работы генетического алгоритма, также внутри каждой особи происходит ранжирование хромосом (микросхема, конденсатор, резистор и т. д.).

Условие остановки. При отсутствии улучшений целевой функции на протяжении 1000 поколений работы генетического алгоритма останавливается. Особь, имеющая лучшее значение целевой функции, – искомое решение задачи размещения.

Результат размещения элементов на ПП приведен на рис. 5 (лицевая сторона ГЖПП) и 6 (обратная сторона ГЖПП). Также на рис. 6 показана работа ограничения по динамическому учету высоты элементов, находящихся друг напротив друга в силу гибкости ГЖПП. При работе алгоритма

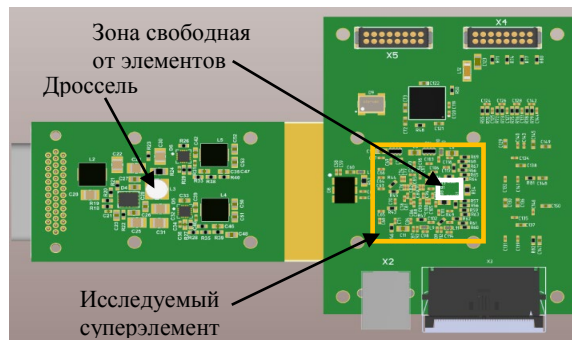


Рис. 6. Размещение элементов на обратной стороне ГЖПП
 Fig. 6. Placement of elements on the reverse side of a flex-rigid PCB

расположение дросселя возможно в разных координатах, что делает необходимым именно динамический учет, так как расстояния между жесткими частями ГЖПП не позволяют разместить данный дроссель напротив любого другого элемента.

На рис. 7 показан график изменения значения входного импеданса цепи питания. Стоит отметить, что частота работы процессора составляет ~500 МГц, что делает целесообразным контроль значения входного импеданса цепи питания ГЖПП до данной частоты. На основании анализа данного графика можно сделать следующие выводы.

Результат размещения развязывающих конденсаторов удовлетворяет поставленной задаче; входной импеданс цепи питания до частоты 500 МГц находится на уровне до 0.1 Ом; на графике отсутствуют явные точки резонанса, которые могли бы привести к сбою функционирования устройства.

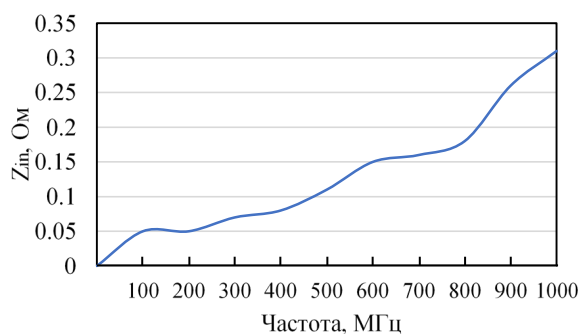


Рис. 7. Входной импеданс цепи питания
 Fig. 7. Power input impedance

Экспериментальные исследования. В целях подтверждения работоспособности разработанного алгоритма и программного обеспечения был проведен сравнительный анализ результатов размещения с тестовыми примерами из [4], [7], [8]. Результаты сведены в таблицу.

Сравнительный анализ результатов размещения
Comparative analysis of placement results

Номер анализа	Источник	Метод исследования	Размещаемые элементы	Габариты ПП, мм	Недостатки решения задачи размещения	Сравнительный результат
1	[7]	Метод множителей Лагранжа	Конденсатор 1 нФ, ESR = 0.06 Ом, ESL = 0.04 нГн	130 × 100 × 0.123	Размещение одного конденсатора в выделенную область, без размещения остальных элементов электрической схемы	Результат входного импеданса цепи питания приведен на рис. 8, результат лучше на 2 %.
2	[7]		Конденсатор 30 пФ, ESR = 0.06 Ом, ESL = 0.289 нГн	50 × 50 × 0.1		Значение входного импеданса цепи питания улучшено на 4 %
3	[8]	Генетический алгоритм	C1 = 100 нФ C2 = 220 нФ ESR = 0.058 Ом ESL = 0.186 нГн	50 × 50 × 0.127	Размещение конденсаторов на фиксированном расстоянии от выводов питания	Результаты аналогичны, расхождение менее 1 %
4	[4]	Ручное размещение на основе данных моделирования	Конденсатор 0.01 мкФ	152.4 × 228.6 × 1.12	Отсутствие оптимизации, качество размещения конденсаторов напрямую зависит от опыта инженера-конструктора	Результаты аналогичны, расхождение менее 1 %
5	[4]		4 конденсатора 0.01 мкФ	152.4 × 228.6 × 1.12		Значение входного импеданса цепи питания улучшено на 3 %

Рассмотрим исследование № 1 из таблицы более подробно.

В [6] авторы начинают с моделирования ПП без размещенных развязывающих конденсаторов, тем самым анализируя входной импеданс. Для оценки качества разработанной математической модели было проведено аналогичное исследование, результаты приведены на рис. 8.

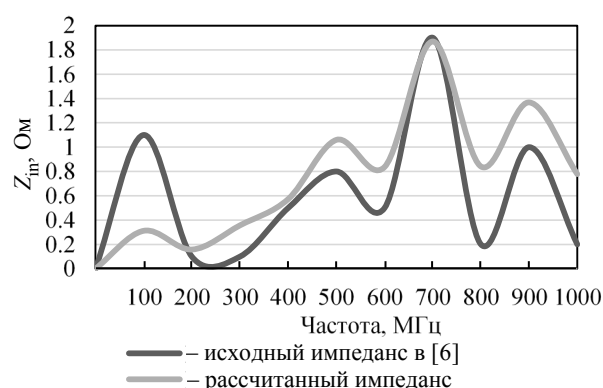


Рис. 8. Входной импеданс без развязывающих конденсаторов

Fig. 8. Input impedance without decoupling capacitors

Анализируя рис. 8, можно сделать вывод о приемлемом качестве разработанной математической модели. В [6] значение входного импеданса анализируется на частоте 700 МГц и составляет 1.9 Ом; в

данной статье значение входного импеданса на аналогичной частоте составляет 1.869 Ом. Расхождения в пределах 2 % незначительны и никак не влияют на дальнейшие результаты размещения развязывающих конденсаторов на ПП.

Следующим этапом является непосредственное размещение развязывающих конденсаторов. В [6] авторы выбирали некоторую область ПП, внутри которой происходило размещение развязывающего конденсатора. Представленный алгоритм позволяет произвести размещение развязывающего конденсатора как в рамках подобной области, так и используя всю площадь, а также две стороны ПП. Так как целью данного исследования служит оптимизация входного импеданса цепи питания ПП посредством оптимального расположения развязывающего конденсатора, то поиск проводился по всей монтажной области ПП. Входной импеданс цепи питания полученного размещения в сравнении с результатами в [6] представлен на рис. 9.

Таким образом, оптимальное расположение развязывающего конденсатора на ПП найдено в точке с координатами (42.11), что привело к снижению входного импеданса цепи питания до значения 0.236 Ом относительно значения импеданса в [6], равного 0.2769 Ом.

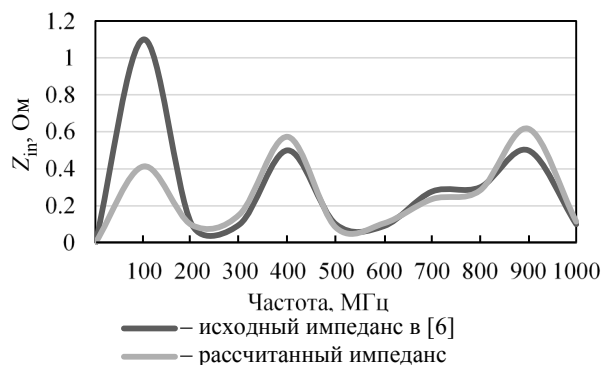


Рис. 9. Входной импеданс с развязывающим конденсатором
 Fig. 9. Input impedance with decoupling capacitor

Аналогично проводились остальные исследования, представленные в таблице.

Далее рассмотрим сравнение генетического алгоритма и алгоритма слепого поиска [13].

Для оценки качества разработанного генетического алгоритма его сравнивали с классическим алгоритмом слепого поиска. В качестве тестового примера использовалась ПП с габаритными размерами $50 \times 50 \times 0.1$ мм и диэлектрической проницаемостью материала $\epsilon_r = 4.1$. Источник питания расположен в координатах (5.5), элемент потребления – в координатах (23.36). Необходимо разместить 3 развязывающих конденсатора с емкостями 0.1, 1 и 10 мкФ соответственно. Результаты исследования приведены на рис. 10.

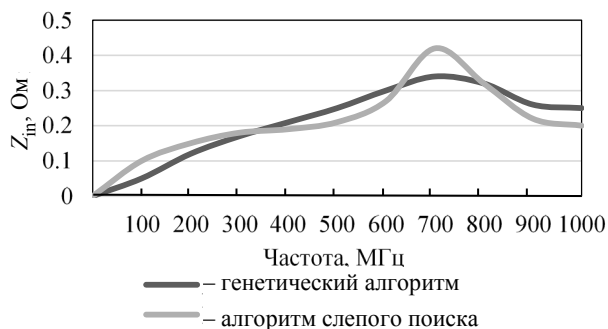


Рис. 10. Сравнительный анализ генетического алгоритма и алгоритма слепого поиска
 Fig. 10. Comparative analysis of the genetic algorithm and the blind search algorithm

Таким образом, генетический алгоритм позволяет получить решение задачи по оптимизации

импеданса полигона питания ПП, на 23 % лучшее в сравнении с алгоритмом слепого поиска.

Заключение. По результатам данной работы можно сделать следующие выводы.

1. Разработана процедура автоматизированного размещения развязывающих конденсаторов на печатной плате с применением генетического алгоритма и критерия качества на основе входного импеданса цепи питания.

2. Разработана полостная модель для оценки входного импеданса полигонов питания на печатной плате. Данная модель позволяет оценить влияние размещения развязывающих конденсаторов на входной импеданс.

3. Рассмотрены ограничения для задачи размещения развязывающих конденсаторов на печатной плате.

4. Разработан генетический алгоритм, позволяющий решить задачу автоматизированного размещения развязывающих конденсаторов на печатной плате.

5. Разработано программное обеспечение, реализующее процедуру автоматизированного размещения развязывающих конденсаторов на печатной плате с применением генетического алгоритма и критерия качества на основе входного импеданса цепи питания.

6. Рассмотрен практический пример применения генетического алгоритма для решения задачи размещения элементов на гибко-жесткой печатной плате.

7. Проведены исследования разработанного программного обеспечения, позволяющие оценить качество предложенного генетического алгоритма и полостной модели. По результатам данных исследований значения входного импеданса оказывалось лучше на 5 % относительно результатов работ других авторов.

8. Сравнительный анализ генетического алгоритма и алгоритма слепого поиска показал эффективность именно генетического алгоритма, позволивший получить на 23 % лучшее значение целевого импеданса.

Список литературы

1. Bharath K., Engin E., Swaminathan M. Automatic package and board decoupling capacitor placement using genetic algorithms and M-FDM // 45th ACM/IEEE Design Automation Conf. IEEE, 2008. P. 560–565. doi: 10.1145/1391469.1391611.

2. Effective PCB Decoupling Optimization by Combining an Iterative Genetic Algorithm and Machine Learning / R. Cecchetti, F. De Paulis, C. Olivieri, A. Orlandi, M. Buecker // Electronics. 2020. Vol. 9. P. 1243.

3. Efficient iterative process based on an improved genetic algorithm for decoupling capacitor placement at board level / F. De Paulis, R. Cecchetti, C. Olivieri, S. Piersanti, A. Orlandi, M. Buecker // *Electronics*. 2019. Vol. 8. P. 1219. doi: 10.3390/electronics8111219.

4. Quantifying decoupling capacitor location / Jun Fan, J. L. Knighten, A. Orlandi, N. W. Smith, J. L. Drewniak // *IEEE Intern. Symp. on Electromagnetic Compatibility*. IEEE, 2000. Vol. 2. P. 761–766. doi: 10.1109/ISEMC.2000.874717.

5. Bharath K., Engin E., Swaminathan M. Automatic package and board decoupling capacitor placement using genetic algorithms and M-FDM // *45th ACM/IEEE Design Automation Conf.* IEEE, 2008. P. 560–565. doi: 10.1145/1391469.1391611.

6. Choi J. Y., Swaminathan M. Decoupling capacitor placement in power delivery networks using MFEM // *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*. 2011. Vol. 1, no. 10. P. 1651–1661. doi: 10.1109/TCPMT.2011.2165954.

7. Xu Z., Wang J., Fan J. Decoupling capacitor placement optimization with lagrange multiplier method // *Intern. Symp. on Electromagnetic Compatibility & Signal/Power Integrity (EMCSI)*. IEEE, 2020. P. 22–25. doi: 10.1109/EMCSI38923.2020.9191625.

8. Erdin I., Achar R. Multipin optimization method for placement of decoupling capacitors using a genetic algorithm // *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 2018. Vol. 60, no. 6. P. 1662–1669. doi: 10.1109/TEMC.2018.2803047.

9. Kamo A., Watanabe T., Asai A. Simulation for the optimal placement of decoupling capacitors on printed circuit board // *Intern. Symp. on Circuits and Systems (Cat. No.01CH37196)*. IEEE, 2001. Vol. 2. P. 727–730. doi: 10.1109/ISCAS.2001.921435.

10. Kahng S. GA-optimized decoupling capacitors damping the rectangular power-bus' cavity-mode resonances // *IEEE Microwave and Wireless Components Lett.* IEEE, 2006. Vol. 16, no. 6. P. 375–377.

11. Li-xin W., Yu-xia Z., Gang Z. Power integrity analysis for high-speed PCB // *First Intern. Conf. on Pervasive Computing, Signal Proc. and Appl.* IEEE, 2010. P. 414–418. doi: 10.1109/PCSPA.2010.106.

12. 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.

13. Минаков И. А. Сравнительный анализ некоторых методов случайного поиска и оптимизации // *Изв. Самарского научного центра Российской академии наук*. 1999. Т. 1, № 2. С. 286–293.

Информация об авторе

Макеев Павел Алексеевич – аспирант Казанского национального технического университета КАИ им. А. Н. Туполева.
E-mail: pragramer@yandex.ru

References

1. Bharath K, Engin E., Swaminathan M. Automatic package and board decoupling capacitor placement using genetic algorithms and M-FDM // *45th ACM/IEEE Design Automation Conf.* IEEE, 2008. P. 560–565. doi: 10.1145/1391469.1391611.

2. Cecchetti, R., De Paulis F., Olivieri C., Orlandi A., Buecker M. Effective PCB decoupling optimization by combining an iterative genetic algorithm and machine learning // *Electronics*. 2020. Vol. 9. P. 1243.

3. De Paulis F., Cecchetti R., Olivieri C., Piersanti S., Orlandi A., Buecker M. Efficient iterative process based on an improved genetic algorithm for decoupling capacitor placement at board level // *Electronics*. 2019. Vol. 8. P. 1219. doi: 10.3390/electronics8111219.

4. Jun Fan, Knighten J. L., Orlandi A., Smith N. W., Drewniak J. L. Quantifying decoupling capacitor location // *IEEE Intern. Symp. on Electromagnetic Compatibility*. IEEE, 2000. Vol. 2. P. 761–766. doi: 10.1109/ISEMC.2000.874717.

5. Bharath K., Engin E., Swaminathan M. Automatic package and board decoupling capacitor placement using genetic algorithms and M-FDM // *45th ACM/IEEE Design Automation Conf.* IEEE, 2008. P. 560–565. doi: 10.1145/1391469.1391611.

6. Choi J. Y., Swaminathan M. Decoupling capacitor placement in power delivery networks using MFEM // *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*. 2011. Vol. 1, no. 10. P. 1651–1661. doi: 10.1109/TCPMT.2011.2165954.

7. Xu Z., Wang J., Fan J. Decoupling capacitor placement optimization with lagrange multiplier method // *Intern. Symp. on Electromagnetic Compatibility & Signal/Power Integrity (EMCSI)*. IEEE, 2020. P. 22–25. doi: 10.1109/EMCSI38923.2020.9191625.

8. Erdin I., Achar R. Multipin optimization method for placement of decoupling capacitors using a genetic algorithm // *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 2018. Vol. 60, no. 6. P. 1662–1669. doi: 10.1109/TEMC.2018.2803047.

9. Kamo A., Watanabe T., Asai A. Simulation for the optimal placement of decoupling capacitors on printed circuit board // *Intern. Symp. on Circuits and Systems (Cat. No.01CH37196)*. IEEE, 2001. Vol. 2. P. 727–730. doi: 10.1109/ISCAS.2001.921435.

10. Kahng S. GA-optimized decoupling capacitors damping the rectangular power-bus' cavity-mode resonances // *IEEE Microwave and Wireless Components Lett.* IEEE, 2006. Vol. 16, no. 6. P. 375–377.

11. Li-xin W., Yu-xia Z., Gang Z. Power integrity analysis for high-speed PCB // First Intern. Conf. on Pervasive Computing, Signal Processing and Appl. IEEE, 2010. P. 414–418. doi: 10.1109/PCSPA.2010.106.

12. Makeev P. A. Dvustoronnee avtomatizirovannoe razmeshchenie elementov na gibko-zhestkoj pechatnoj plate na osnove dvuhurovneвого geneticheskogo algo-

ritma // Izv. SPbGETU LETI. 2021. № 5. S. 28–36. (In Russ.).

13. Minakov I. A. Sravnitel'nyj analiz nekotoryh metodov sluchajного poiska i optimizacii // Izvestiya Samarskogo nauchного centra Rossijskoj akademii nauk. 1999. T. 1, № 2. S. 286–293. (In Russ.).

Information about the author

Pavel A. Makeev, graduate student of Kazan National Research Technical University KAI named after A. N. Tupolev.

E-mail: pragramer@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 20.02.2022; принята к публикации после рецензирования 11.03.2022; опубликована онлайн 30.03.2022.

Submitted 20.02.2022; accepted 11.03.2022; published online 30.03.2022.
