

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ MODELING AND OPTIMIZATION

УДК 004.896

DOI: 10.17587/it.24.239-244

В. В. Курейчик, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой, e-mail: vkur@sfedu.ru,
М. А. Жиленков, аспирант, e-mail: MZhilenkov777@gmail.com,
Вл. Вл. Курейчик, аспирант, e-mail: kureichik@yandex.ru,
Южный федеральный университет

Генетический алгоритм решения задачи компоновки с учетом электромагнитной совместимости¹

Предлагается решение одной из важных задач конструкторского проектирования — задачи компоновки с учетом критерия электромагнитной совместимости элементов. Приводится постановка задачи и ее математическая модель. Разработан модифицированный генетический алгоритм решения задачи компоновки. В качестве модификации генетического алгоритма предлагаются модифицированные генетические операторы. Для решения проблемы предварительной сходимости алгоритма разработаны процедуры глобального и локального улучшения. Проведен вычислительный эксперимент для определения эффективности предложенного подхода. Серия проведенных экспериментов показывает преимущество разработанного генетического алгоритма.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, компоновка, многокритериальная оптимизация, генетический алгоритм, мутация, кроссинговер

Введение

Процесс конструкторского проектирования цифровых электронных средств характеризуется большой размерностью решаемых задач ($n > 1000$ элементов на плате размером 5,5×5,8 дюйма), наличием большого числа потенциальных решений, а также необходимостью учета различных критериев. Важную роль при проектировании современных печатных плат (ПП) приобретает учет критерия электромагнитной совместимости (ЭМС), что обусловлено стремлением к повышению быстродействия и снижению габаритных размеров цифровых электронных средств [1–6]. В связи с этим необходимо совершенствование математического и программного обеспечения систем автоматизированного проектирования печатных плат цифровых электронных средств. Одним из возможных подходов к решению этой проблемы является использование новых технологий на стыке информатики, бионики и автоматизации проектирования. Поэтому разработка

новых биоинспирированных принципов и подходов к принятию эффективных решений в задачах конструкторского проектирования имеет важное экономико-социальное значение и является в настоящее время актуальной и важной задачей [7–12]. Цель данной работы — разработка и исследование эффективности предлагаемого модифицированного генетического алгоритма для решения задачи компоновки.

1. Постановка задачи и математическая модель компоновки с учетом критерия ЭМС

При решении задачи компоновки необходимо учитывать как конструктивные (геометрические), так и функциональные особенности элементов [2, 11, 13–15].

На рис. 1 рассматривается пример функционального вхождения элементов ПП в виде дерева решений $T(V, R)$.

Здесь $i \in I$ — текущий уровень дерева, где $I = \{1, q\}$, q — число уровней дерева; $j \in J_i$ — номер подсхемы i -го уровня, где $J_i = \{1, n_i\}$, n_i — число подсхем i -го уровня; $V_i = \{v_{ij} | j \in J_i\}$ — множество вершин i -го уровня, сопоставленных с подсхемами этого уровня функциональной иерархии.

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке гранта ЮФУ по теме № 2.6432.2017/БЧ и гранта РФФИ № 18-01-00041.

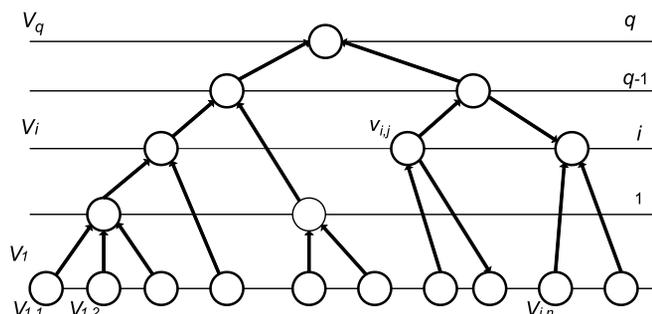


Рис. 1. Вид дерева графа функционального вхождения элементов

Необходимо, чтобы множество вершин дерева $V = \{V_i | i \in I\}$, а также подмножества вершин каждого уровня V_i удовлетворяли условиям:

$$(\forall i \in I, \forall j, k \in J_i) v_{ij} \cap v_{i,k} = \emptyset \& j \neq k; \quad (1)$$

$$(\forall i \in I', \forall j \in J_i) R(v_{ij}) = \{V'_{i-1}, V'_{i-2}, \dots, V'_1\}, \quad (2)$$

где $V'_{i-1} \subset V_{i-1}, V'_{i-2} \subset V_{i-2}, \dots, V'_1 \subset V_1$, $I' = \{2, q\}$, $R(v_{ij})$ — родительская вершина вершины v_{ij} , причем V_{i-k} может быть пустым множеством, когда $i = k = 1$.

Приведем формальное описание структуры ПП на основе ее конструкции:

$$(\forall i \in I, \forall j \in J_i) M_{i-1}^{i,j} \subset M_{i-1}; \quad (3)$$

$$(\forall i \in I, \forall j, k \in J_i) M_{i-1}^{i,j} \cap M_{i-1}^{i,k} = \emptyset \& j \neq k; \quad (4)$$

$$(\forall i \in I) \bigcup_{j \in J_i} M_{i-1}^{i,j} = M_{i-1}. \quad (5)$$

Здесь $M = \{M_i | i \in I\}$ — полное набор конструктивных узлов; $M_i = \{M_{ij} | j \in J_i\}$, $I = \{1, m\}$, $J_i = \{1, n\}$, $M_{i-1}^{i,j} \subset M_{i-1}$ — подмножество конструктивных узлов $(i-1)$ -го уровня, входящих в j -й модуль i -го ранга; m — число уровней иерархии конструктивных модулей; n_i — число модулей i -го уровня.

Сравнение математического описания дерева функциональных записей и конструкторской структуры ПП приводит к формальной постановке задачи компоновки: найти такое отображение множества V функционально законченных схем в множество M конструктивных модулей, при котором удовлетворяются условия (1)–(5) [4].

В данной работе задача компоновки рассматривается как разбиение принципиальной электрической схемы соединения компонентов первого уровня конструктивной иерархии на части для определения схемного состава ПП, составляющих второй уровень конструктивной иерархии модулей цифровых ПП, с учетом определенных критериев и ограничений. В связи с этим представим задачу компоновки как разбиение гипер-

графа $H(X, U)$ на части $H_l(X_l, U_l)$, где вершины графа — компоненты ПП, ребра — межсоединения. Задача разбиения состоит в декомпозиции гиперграфа $H(X, U)$ на совокупность $B(H)$ модулей $H_l(X_l, U_l)$, $l = \overline{1, L}$, где L — требуемое число частей структуры. Полученный в результате декомпозиции набор модулей обладает следующими свойствами [5, 6]:

$$\forall H_l \in B(H) \quad H_l \neq \emptyset; \quad l \in L;$$

$$\forall H_l, H_p \in B(H) \quad X_l \cap X_p = \emptyset \& U_l \cap$$

$$\cap U_p = U_{l,p}; \quad l, p \in L;$$

$$\bigcup_{l \in L} H_l = H,$$

где $U_{l,p}$ — множество ребер в разрезе между ку-сками H_l и H_p .

Тогда целевая функция задачи компоновки примет следующий вид:

$$ЦФ = 1 / \sum_{l,p=1}^L |U_{l,p}|, \quad ЦФ \rightarrow \max,$$

где $|U_{l,p}|$ — мощность множества $U_{l,p}$.

Ограничения задачи вводятся в форме неравенств или равенств и могут накладываться на следующие проектные параметры: площадь монтажного пространства ПП; число компонентов, размещаемых на одной ПП; число внешних выводов ПП; число компоновываемых ПП.

2. Модифицированный генетический алгоритм решения задачи компоновки с учетом критерия ЭМС

Для решения поставленной задачи предлагается модифицированный генетический алгоритм, структурная схема которого представлена на рис. 2 [13–18].

Опишем работу блоков представленной структурной схемы более подробно. На первом шаге анализируются поступившие данные решаемой задачи, а также выполняется кодирование альтернативных решений (хромосом) [13, 17, 19]. Далее создается начальная популяция P , и для каждой хромосомы в популяции вычисляются максимальные, минимальные и средние значения ЦФ задачи компоновки. Определяем K_1 как среднее значение ЦФ ($ЦФ_{cp}$) всей популяции альтернативных решений. В одной итерации алгоритма это значение будет константой. Далее все альтернативные решения, имеющие значения ЦФ большие, чем значение $ЦФ_{cp}$, переносятся в подпопуляцию P_1 . На следующем шаге случайно генерируем P_2 исходя из P_1 . Комплектуем популяцию P из суммы P_1 и P_2 . Затем проверяем условие оста-

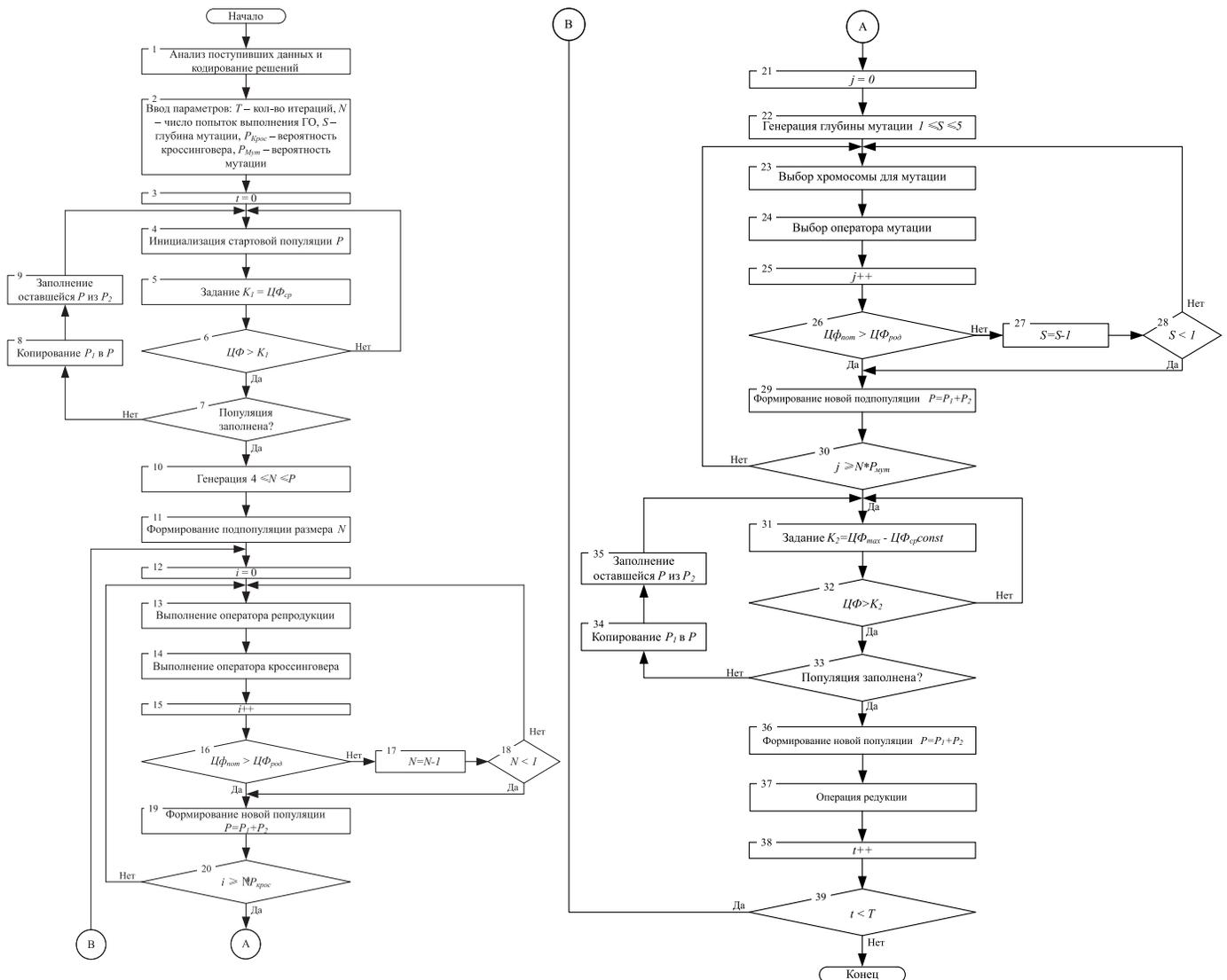


Рис. 2. Схема работы модифицированного генетического алгоритма

нова: если оно выполняется, то следует переход к пункту 10, если нет — к пункту 4. Далее задаем N как параметр мощности стартовой популяции, а также используем мощность N для построения P_1 как подпопуляции. Затем для создания хромосом-потомков проводится реализация модифицированных генетических операторов. Устанавливаем фильтр, отсекающий хромосомы-потомки со значением ЦФ, меньшим, чем у родительских хромосом. Проверяем данное условие: если выполнено, то комплектуем популяцию P из суммы P_1 и P_2 , если нет, то N присваиваем значение $N - 1$ и возвращаемся к пункту 13. Снова проверяем условия останова, при их выполнении осуществляется переход к пункту 21, если условия останова не выполнены, возвращаемся к пункту 13, повторяя процедуру. На следующем шаге выполняется процедура "глубина мутации", где S находится в пределах от 1 до 5. После этого создаем P_1 как подпопуляцию и применяем модифицированный

оператор мутации. После выполнения оператора мутации получаем новые хромосомы-потомки и проверяем условие, чтобы значение ЦФ потомков было больше, чем значение ЦФ родительских хромосом. При его выполнении комплектуем популяцию P из суммы P_1 и P_2 , но в случае его невыполнения возвращаемся к пункту 23. Далее следует проверка условия останова: если условие верно, то следует пункт 31, если нет — пункт 23. На следующем шаге вычисляем коэффициент K_2 по формуле: $K_2 = \text{ЦФ}_{\max} - \text{ЦФ}_{\text{кр}}$, где ЦФ_{\max} — максимальное значение целевой функции отдельного альтернативного решения (хромосомы) задачи компоновки, причем $K_2 > K_1$. Затем, исходя из полученного значения K_2 и сравнивая его со значением ЦФ_1 , отбираем решения в подпопуляцию P_1 . Далее комплектуем популяцию P из суммы P_1 и P_2 и реализуем оператор редукции. На следующем шаге происходит инкрементирование регистратора числа итераций алгоритма и финальная про-

верка заданного условия останова. В случае если условие останова выполнено, то конец работы алгоритма, нет — возврат к пункту 12.

В качестве модификации разработанного генетического алгоритма предлагаются модифицированные операторы кроссинговера, мутации, а также процедура локального и глобального улучшения [13, 17, 18]. Процедура локального улучшения состоит в следующем. Альтернативные решения-потомки, прошедшие этапы кроссинговера и рекомбинации и имеющие более высокие результаты значений целевой функции F , подвергаются мутации в цикле из S попыток. Процедура мутации выполняется не менее $S - 1$ числа попыток. Тем самым параметр S на данном этапе алгоритма исполняет функцию глубины мутации, которая задается динамически на интервале $1 \leq S \leq 5$. Лучшие альтернативные решения формируют новое поколение в виде набора P .

Для отбора решений в следующие популяции используется процедура глобального улучшения за счет введения элитных и случайных альтернативных решений. В первом случае это позволяет быстрее получать наборы оптимальных и квазиоптимальных решений задачи компоновки, а во втором случае — разнообразить популяцию решений и решить проблему преждевременной сходимости. Для сохранения заданного размера популяции в работе применяется оператор отбора [13]. Условием окончания работы алгоритма является заданное число итераций.

3. Вычислительный эксперимент

На основе предложенного алгоритма была разработана прикладная программа в среде *Microsoft Visual Studio 2017 Express* с применением языка $C++$. При проведении экспериментальных исследований с использованием ряда тестовых примеров оценивалась зависимость параметров эффективности разработанного генетического алгоритма от начальных значений введенных данных [20]. При проведении исследований учитывалось время работы программы и значения аддитивной целевой функции лучшего решения. Значения параметров эффективности программы, реализующей генетический алгоритм решения задачи компоновки в зависимости от размерности исходных данных, представлены в таблице.

В ходе вычислительного эксперимента была проведена оценка работы эффективности разработанного модифицированного генетического алгоритма в сравнении с эволюционным и роевым алгоритмами компоновки. На рис. 3 (см. вторую сторону обложки) представлен результат сравнения в виде гистограммы.

Результаты работы алгоритма

№	Число элементов	Параметры эффективности алгоритма компоновки	
		Время работы программы, с	F
1	500	8	39919,9
2	650	8	40122,7
3	800	9	40811,1
4	950	9	213690
5	1100	10	213048
6	1250	10	213640
7	1400	11	558988
8	1500	11	554339

Как видно из представленной гистограммы, использование модифицированного генетического алгоритма дает заметно лучший результат в среднем на 15 % по значению целевой функции, чем другие тестируемые алгоритмы.

Серия проведенных экспериментов показывает, что временная сложность алгоритма находится в пределах $O(n \log n) - O(n^2)$ и линейно зависит от количества генераций.

Заключение

Разработан модифицированный генетический алгоритм для решения задачи компоновки элементов печатной платы. При решении данной задачи основной уклон был сделан на обеспечение электромагнитной совместимости элементов, что и являлось главным критерием задачи. Отличительной особенностью данного подхода является разработанная процедура локального и глобального улучшения. Продемонстрированный метод решает вопрос предварительной сходимости генетического алгоритма и представляет множество как оптимальных, так и квазиоптимальных решений за полиномиальное время. Разработана программная среда на языке $C++$. Проведена серия тестов экспериментальных исследований, что позволило уточнить теоретические оценки временной сложности алгоритмов: в лучшем случае — $O(n \log n)$, в худшем случае — $O(n^2)$. Предлагаемый подход позволяет частично решить вопрос предварительной сходимости. Разработанный модифицированный генетический алгоритм компоновки дает возможность получать более эффективный результат в среднем на 15 % лучше, чем другие тестируемые алгоритмы.

Список литературы

1. Alpert C. J., Dinesh P. M., Sachin S. S. Handbook of Algorithms for Physical design Automation. USA: Auer Bach Publications Taylor & Francis Group, 2009.

2. **Sherwani N. A.** Algorithms for VLSI Physical Design Automation. Third Edition. USA: Kluwer Academic Publisher, 2013.
3. **Lim S. K.** Practical Problems in VLSI Physical Design Automation. Germany: Springer Science + Business Media B.V, 2008.
4. **Суздальцев И. В.** Методика решения задач проектирования печатных плат цифровых электронных средств с учетом критериев электромагнитной совместимости, с использованием эволюционных алгоритмов // Электромагнитная совместимость и электромагнитная экология: Сб. науч. докл. 9-го Междунар. симп. СПб.: ЛЭТИ, 2011. С. 220–222.
5. **Чермошенин С. В.** Многокритериальная оптимизация электромагнитной совместимости межсоединений печатных плат цифровых электронных средств генетическими алгоритмами // Электромагнитная совместимость: Сб. докл. VII Рос.науч.-техн. конф. СПб. 2002. С. 298–300.
6. **Хьюбинг Т., Хьюбинг Н., Очур О.** Электромагнитная совместимость и разводка печатных плат // Технологии в электронной промышленности. 2017. № 93. С. 18–20.
7. **Родзин С. И., Курейчик В. В.** Теоретические вопросы и современные проблемы развития когнитивных биоинспирированных алгоритмов оптимизации (обзор) // Кибернетика и программирование. 2017. № 3. С. 51–79.
8. **Курейчик В. В., Бова В. В., Курейчик Вл. Вл.** Комбинированный поиск при проектировании // Образовательные ресурсы и технологии. 2014. № 2 (5). С. 90–94.
9. **Курейчик В. В., Курейчик Вл. Вл.** Биоинспирированный поиск при проектировании и управлении // Известия ЮФУ. Технические науки. 2012. № 11 (136). С. 178–183.
10. **Ficci S. G.** Solution Concepts in Coevolutionary Algorithms: A Doctor of Philosophy Diss. Brandeis University, 2004.
11. **Курейчик В. В., Курейчик Вл. Вл.** Биоинспирированный алгоритм разбиения схем при проектировании СБИС // Известия ЮФУ. Технические науки. 2013. № 7 (144). С. 23–29.
12. **Курейчик В. В., Заруба Д. В., Запорожец Д. Ю.** Биоинспирированный алгоритм компоновки блоков ЭВА на основе модифицированной раскраски графа // Известия ЮФУ. Технические науки. 2015. № 4 (165). С. 6–14.
13. **Гладков Л. А., Курейчик В. В., Курейчик В. М.** Генетические алгоритмы. М.: Физматлит, 2010. 368 с.
14. **Гладков Л. А., Гладкова Н. В., Гордиенко В. Н.** Модифицированный генетический алгоритм решения задачи компоновки блоков ЭВА // Информатика, вычислительная техника и инженерное образование. 2015. № 4 (24). С. 18–27.
15. **Курейчик В. М., Курейчик В. В.** Генетический алгоритм разбиения графа // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 1999. № 4. С. 79–87.
16. **Мухлаева И. В.** Компоновка на основе ГА // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2012. № 8 (43). С. 84–85.
17. **Курейчик В. В., Жиленков М. А.** Генетический алгоритм для решения оптимизационных задач с явно выраженной целевой функцией // Информатика, вычислительная техника и инженерное образование. 2014. № 4 (19). С. 1–8.
18. **Fonseca C. M., Fleming P. J.** Genetic Algorithms for Multi-Objective Optimization: Formulation, Discussion and Generalization // Proc. of the 5th Intern. Conf. on Genetic Algorithms. San Mateo, California. 1993. P. 416–423.
19. **Kurejchik V. V., Kurejchik V. M.** ON GENETIC-BASED CONTROL // Автоматика и телемеханика. 2001. N. 10. С. 174–187.
20. **Kacprzyk J., Kureichik V. M., Malioukov S. P., Kureichik V. V., Malioukov A. S.** Experimental investigation of algorithms developed // Studies in Computational Intelligence. 212. 2009. P. 211–223, 227–236.

DOI: 10.17587/it.24.239-244

V. V. Kureichik, D. Sc., Professor, Head of Department, e-mail: vkur@sfedu.ru,
M. A. Zhilenkov, Graduate Student, e-mail: MZhilenkov777@gmail.com,
VI. VI. Kureichik Jr., Graduate Student, e-mail: kureichik@yandex.ru,
 South Federal University

Genetic Algorithm or Partitioning Problem in View of Electromagnetic Compability

The paper deals with one of the important design problems — a partitioning of elements on a printed circuit board (PCB). The authors provide a problem formulation with restriction and describe a mathematical model as a decision tree. As a main criterion was selected electromagnetic elements compability. The partitioning problem belongs to NP-hard class of combinatorial optimization problems, which is suggested to solve by modified genetic algorithm. As a modification of the genetic algorithm there are introduced modified genetic operators. To avoid a preliminary converges of the algorithm the authors apply procedures of global and local improvements. They are based on elite and random transformations in the modified genetic algorithm. It possible to obtain optimal and quazi-optimal problem solutions more quickly and to vary of an alternative solution population. To confirm the effectiveness the developed approach there are created a software and carried out computational experiments on benchmarks. As a result, configuration parameters of the algorithm were specified. The obtain results on the average by 15 % are better in the value of the objective function of the developed modified genetic algorithm than in other tested algorithms. Time complexity of the developed modified genetic algorithm can be represented as $O(n \log n)$ in the best case and $O(n^2)$ in the worst case.

Keywords: electromagnetic compatibility, layout of PCB elements, multi-criteria optimization, genetic algorithm, mutation, crossing-over

References

1. **Alpert C. J., Dinesh P. M., Sachin S. S.** Handbook of Algorithms for Physical design Automation, Auer Bach Publications Taylor & Francis Group, USA, 2009.
2. **Sherwani N. A.** Algorithms for VLSI Physical Design Automation. Third Edition, Kluwer Academic Publisher, USA, 2013.
3. **Lim S. K.** Practical Problems in VLSI Physical Design Automation, Springer Science + Business Media B.V, Germany, 2008.
4. **Suzdal'cev I. V.** Metodika reshenija zadach proektirovaniya pechatnyh plat cifrovyyh jelektronnyh sredstv s uchetoм kriteriev jelektromag-

nitnoj sovместimosti, s ispol'zovaniem jevoljucionnyh algoritmov (Methods for solving the problems of designing printed circuit boards of digital electronic devices with consideration of the criteria of electromagnetic compatibility, using evolutionary algorithms), *Jelektromagnitnaja sovместimost' i jelektromagnitnaja jekologija: sb. nauch. dokl. 9-go Mezhdunar. simp.*, SPb., LJeTI, 2011, pp. 220–222 (in Russian).

5. Chermoshencev S. V. *Mnogokriterial'naja optimizacija jelektromagnitnoj sovместimosti mezhsjoedinenij pechatnyh plat cifrovyyh jelektroennyh sredstv geneticheskimi algoritmami* (Multi-criteria optimization of electromagnetic compatibility of interconnections of digital electronic circuit boards using genetic algorithms), *Jelektromagnitnaja sovместimost': Sb. dokl. VII Ros. nauch.-tehn. konf.*, SPb., 2002, pp. 298–300 (in Russian).

6. H'jubing T., H'jubing N., Ochur O. *Jelektromagnitnaja sovместimost' irazvodka pechatnyh plat* (Electromagnetic compatibility and PCB layout), *Tehnologii v Jelektroonnoj Promyshlennosti*, Sankt-Peterburg, Media KiT, 2017, no. 93, pp. 18–20 (in Russian).

7. Rodzin S. I., Kureichik V. V. *Teoreticheskie voprosy i sovremennye problemy razvitiya kognitivnyh bioinspirirovannyh algoritmov optimizacii (obzor)* (Theoretical questions and contemporary problems of the development of cognitive bio-inspired optimization algorithms (review)), *Kibernetika i Programirovanie*, 2017, no. 3, pp. 51–79 (in Russian).

8. Kureichik V. V., Bova V. V., Kureichik VI. VI. *Kombinirovannyj poisk pri proektirovanii* (Combined design search), *Obrazovatel'nye Resursy i Tehnologii*, 2014, no. 2 (5), pp. 90–94 (in Russian).

9. Kureichik V. V., Kureichik VI. VI. *Bioinspirirovannyj poisk pri proektirovanii i upravlenii* (Bio-search for design and management), *Izvestiya JuFU. Tehnicheskie Nauki*, 2012, no. 11 (136), pp. 178–183 (in Russian).

10. Ficici S. G. *Solution Concepts in Coevolutionary Algorithms: A Doctor of Philosophy Diss.* Brandeis University, 2004.

11. Kureichik V. V., Kureichik VI. VI. *Bioinspirirovannyj algoritm razbieniya skhem pri proektirovanii SBIS* (Bioinspired algorithms for partitioning VLSI circuits in design), *Izvestiya YuFU. Tehnicheskie Nauki*, 2013, no. 7 (144), pp. 23–29 (in Russian).

12. Kureichik V. V., Zaruba D. V., Zaporozhec D. Ju. *Bioinspirirovannyj algoritm komponovki blokov JeVA na osnove modifirovannoj raskraski grafa* (Bioinspiral algorithm for composing EVA blocks based on the modified coloring of the graph), *Izvestiya JuFU. Tehnicheskie Nauki*, 2015, no. 4 (165), pp. 6–14 (in Russian).

13. Gladkov L. A., Kureichik V. V., Kureichik V. M. *Geneticheskie algoritmy* (Genetic algorithms), Moscow Fizmatlit, 2010 (in Russian).

14. Gladkov L. A., Gladkova N. V., Gordienko V. N. *Modifirovannyj geneticheskij algoritm reshenija zadachi komponovki blokov JeVA* (Modified genetic algorithm for solving the EVA block layout problem), *Informatika, Vychislitel'naja Tehnika i Inzhenernoe Obrazovanie*, 2015, no. 4 (24), pp. 18–27 (in Russian).

15. Kureichik V. V., Kureichik V. M., *Geneticheskij algoritm razbieniya grafa* (Genetic algorithms for graf partitioning), *Izvestiya Rossijskoj Akademii Nauk. Teoriya i Sistemy Upravleniya*, 1999, no. 4, pp. 79–87 (in Russian).

16. Muhlaeva I. V. *Komponovka na osnove GA* (Layout based on GA), *Izvestiya Juzhnogo Federal'nogo Universiteta. Tehnicheskie Nauki*, 2012, no. 8 (43), pp. 84–85 (in Russian).

17. Kureichik V. V., Zhilenkov M. A. *Geneticheskij algoritm dlja reshenija optimizacionnyh zadach s javno vyrazhennoj celevoj funkciej* (Genetic algorithm for solving optimization problems with an explicit objective function), *Informatika, Vychislitel'naja Tehnika i Inzhenernoe Obrazovanie*, 2014, no. 4 (19), pp. 1–8 (in Russian).

18. Fonseca C. M., Fleming P. J. *Genetic Algorithms for Multi-Objective Optimization: Formulation, Discussion and Generalization*, *Proc. of the 5th Intern. Conf. on Genetic Algorithms*. San Mateo, California, 1993, pp. 416–423.

19. Kureichik V. V., Kureichik V. M. *On genetic-based control*, *Avtomatika i Telemekhanika*, 2001, no. 10, pp. 174–187.

20. Kacprzyk J., Kureichik V. M., Malioukov S. P., Kureichik V. V., Malioukov A. S. *Experimental investigation of algorithms developed*, *Studies in Computational Intelligence*, 212, 2009, pp. 211–223, 227–236.

УДК 004.94, 620.91

DOI: 10.17587/it.24.244-251

Д. Н. Кобзаренко, д-р техн. наук, зав. лаб., kobzarenko_dm@mail.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем геотермии Дагестанского научного центра Российской академии наук, Махачкала

Технологии геоинформационного моделирования пространственного распределения геотермальных ресурсов

Рассматриваются технологии геоинформационного моделирования распределения потенциальных геотермальных ресурсов и технически доступных геотермальных ресурсов на примере Дагестана.

Одной из задач, которая предшествует освоению потенциального тепла сухих пород, является задача получения информации о пространственном распределении геотермальных ресурсов. Решение такой задачи позволяет: выявить и обозначить территории, которые обладают наибольшим геотермальным потенциалом, сопоставить эти территории с объектами инфраструктуры, а также с картами потенциала ветровой и солнечной энергии для возможного комбинированного использования. Данная информация очень важна при выборе оптимальных площадей для строительства объектов геотермальной энергетики.

Ключевые слова: геоинформационные технологии, геоинформационное моделирование, потенциальные геотермальные ресурсы, технически доступные геотермальные ресурсы

Введение

Интерес к возобновляемым источникам энергии как в России, так и в мире за последнее время

не только не ослабевает, но и возрастает. Международное энергетическое агентство в официально опубликованном статистическом отчете о балансах мировой энергетики в 2016 г. [1] приводит