

Раздел I. Автоматизация проектирования

УДК 004.896

М.А. Жиленков, В.В. Курейчик

МОДИФИКАЦИЯ ВЕРОЯТНОСТНОГО ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ РАЗМЕЩЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ЭВА С УЧЕТОМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ*

Предлагается решение одной из важных задач этапа конструкторского проектирования – задачи размещения разногабаритных элементов электронно-вычислительной аппаратуры (ЭВА). При решении данной задачи в качестве основного критерия был выбран критерий электромагнитной совместимости (ЭМС). В связи с обработкой огромных массивов информации задача размещения разногабаритных элементов относится к классу NP-сложных и NP-трудных задач дискретной оптимизации. В статье приводится и описана постановка и математическая модель задачи размещения с учетом критерия ЭМС. Для решения данной задачи в работе предлагается продуктивная модификация вероятностного генетического алгоритма с прогнозом множества Парето на основе метода Strength Pareto Evolutionary Algorithm (SPEA2), что позволяет сократить использование вычислительных ресурсов. Также в работе определена функция оценки качества получаемых решений и описаны особенности ее вычисления, на основе доминирования альтернативных решений и механизма сортировки по нишам. Разработана модифицированная процедура обновления архива парето-оптимальных решений. Представлен метод оценки функции плотности и разброса точек в множестве решений при определенном соотношении модифицированных генетических операторов репродукции, кроссинговера и мутации, что позволило уменьшить вычислительные затраты. Создана программная среда. Проведен вычислительный эксперимент на тестовых примерах бенчмарках. Проведенные серии тестов и экспериментов показали, что использование данного алгоритма позволяет получать наборы оптимальных и квазиоптимальных решений за полиномиальное время, что говорит о перспективности его применения. Временная сложность разработанного алгоритма в лучшем случае $\approx O(n \log n)$, в худшем случае – $O(n^3)$.

Электромагнитная совместимость; размещение; вероятностный генетический алгоритм; множество Парето; парето-доминирование; SPEA2.

M.A. Zhilenkov, V.V. Kureichik

GENETIC MODIFICATION OF PROBABILISTIC ALGORITHM FOR PLACING ELEMENTS OF ECE UNDER EMC

The solution of one of the important problems of design, the problem of electronic computing equipment (ECE) placement, is suggested. In solving this problem the criterion of electromagnetic compatibility (EMC) is selected as the basic one. Due to the big data processing the placement problem belongs to NP-complex and NP-difficult class of problem. The statement and the mathematical model of the placement problem are made, taking into account the electromagnetic compatibility criterion. A productive modification of the probabilistic genetic algorithm with Pareto set forecast based on the Strength Pareto Evolutionary Algorithm (SPEA2) method is proposed, which allows reducing the computing resource in comparison with the analogues algorithms. The function of assessing the quality of the obtained solutions is defined. Also, there described are the features of its calculation on the basis of dominating of alternative solutions. A modified procedure for updating the archive of the pareto-optimal solutions is developed. Also,

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 16–01–00586).

features of calculation of the target fitness function based on the dominance of individuals and the mechanism for sorting by niches are described. A method for estimating the density and scatter function of points in a set of solutions is developed with a certain ratio of genetic reproduction, crossing-over, mutation operators, which has made it possible to reduce computational costs. The software is developed. Computational experiments are carried out on the basis of benchmarks and shows that the given algorithm allows obtaining optimal and quazi-optimal solutions in polynomial time. Time complexity of the developed algorithm is represented as $\approx O(n \log n)$ in the best case and $O(n^3)$ in the worst case.

Electromagnetic compatibility; Accommodation; Probabilistic genetic algorithm; The Pareto set; Pareto-domination; SPEA2.

Введение. Процесс проектирования ЭВА характеризуется высокой размерностью решаемых задач, наличием большого числа потенциальных решений, а также необходимостью учета разнообразных критериев качества. Важную роль при проектировании современных ЭВА приобретает учет критерия электромагнитной совместимости. Это способствует повышению быстродействия и снижению габаритов современных цифровых электронных средств [1–4]. В связи с этим, появляется необходимость в совершенствовании математического и программного обеспечения систем автоматизированного проектирования цифровых электронных средств. В качестве задачи проектирования в статье рассматривается задача размещения разногабаритных компонентов с использованием генетического подхода. Эффективность генетических алгоритмов (ГА) определяется тщательной настройкой и контролем их параметров. В последние годы наблюдается тенденция развития эволюционных подходов, способных к самонастройке параметров за счёт использования сложных гибридных схем [5]. Один из способов сокращения количества параметров эволюционных алгоритмов, которые нуждаются в настройках пользователя, это использование вероятностных генетических алгоритмов (ВГА). Накапливая и используя статистическую информацию о поисковом пространстве, данный вид алгоритмов самостоятельно адаптируется к решаемой проблеме.

Постановка задачи и математическая модель размещения с учетом критерия ЭМС. Сформулируем в общем виде задачу размещения компонентов печатной платы (ПП). Имеется:

- 1) множество элементов $E(e_1, e_2, \dots, e_n)$;
- 2) габариты элементов $G(x_1 \times y_1, x_2 \times y_2, \dots, x_n \times y_n)$;
- 3) множество связей между элементами $C(c_1, c_2, \dots, c_m)$;
- 4) ограничения пространства размещения (размер монтажной платы)
 $S = X \times Y$.

Необходимо отыскать отображение $G \rightarrow S$, при котором критерий качества F приобретает оптимальное значение [5]. Печатная плата соответствует прямоугольнику R , разделенному горизонтальными и вертикальными отрезками на множество участков r_i размером $x_i^* \times y_i^*$. В участках r_i расположены элементы e_i . Размер элемента e_i в совокупности с его полем трассировки t определяют размер участка r_i следующим образом: $x_i \times y_i + t \leq x_i^* \times y_i^*$.

В качестве ограничений для задачи размещения в данной работе будем учитывать: минимальное расстояние между соседними конструктивными компонентами; координаты заранее установленных в определенных местах ПП конструктивных компонентов; перечень граничных компонентов; запрещенные зоны печатной платы; пары размещаемых конструктивных компонентов, которым необходимо располагаться по соседству друг от друга, или напротив – находиться на отдалении [6, 7].

В качестве критерия в данной задаче размещения используется суммарное взвешенное расстояние между компонентами f . Этот критерий необходимо минимизировать:

$$f = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} d_{ij};$$

$$f \rightarrow \min,$$

где d_{ij} – расстояние между i -ым и j -ым компонентами печатной платы, n – количество размещаемых компонентов. Весовой коэффициент c_{ij} при реализации критерия с целью минимизации расстояния между максимально-связанными элементами принимается равным количеству электрических соединений между i -ым и j -ым элементами.

Для удаления друг от друга компонентов, излучающих сильные электромагнитные поля от компонентов, критичных к электромагнитным полям, значение весового коэффициента c_{ij} может быть определено в зависимости от значений параметров электромагнитного излучения компонентов [8, 9].

Для эффективного решения поставленной задачи будем использовать понятие оптимальности по Парето. Финальный субъективный выбор должен осуществляться именно из множества Парето, так как любое решение вне множества Парето является менее предпочтительным с математической точки зрения. При этом чем точнее и равномернее локализовано (аппроксимировано) множество Парето, тем эффективнее решена формальная задача многокритериальной оптимизации [10].

Для этого сформулируем нашу задачу в виде многокритериальной задачи оптимизации:

$$F = Q_{comp}(x) = (Q_1(x), Q_2(x), Q_{EMC}(x)) \rightarrow opt,$$

$$\begin{cases} g_i(x) \leq 0, j = \overline{1, r}, \\ h_j(x) = 0, j = \overline{r+1, M}, \end{cases}$$

где $x = (x_1, x_2, \dots, x_N) \in X$ – вектор решений, $y = Q_{comp}(x) = (Q_1(x), Q_2(x), Q_{EMC}(x)) \in Y_Q$ – вектор целевых функций, Q_1 – критерий суммарно взвешенной длины межсоединений; Q_2 – критерий суммарного количества модулей, необходимых для реализации схемы ППП, Q_{EMC} – общий критерий ЭМС печатной платы, w_1, w_2, w_3 – весовые коэффициенты локальных критериев, при $w_1 + w_2 + w_3 = 1$. При этом X называется пространством решений (или альтернатив), а Y_Q – пространством целей (или критериальным пространством).

Далее введем следующие понятия и термины.

Допустимое множество D . Множество векторов $x \in X$, которые удовлетворяют ограничениям $g_i(x)$ и $h_j(x)$:

$$D = \{x \in X | g_i(x) \leq 0, j = \overline{1, r}; h_j(x) = 0, j = \overline{r+1, M}\}.$$

Образ допустимой области D . Обозначим в пространстве целей как $Y_Q = \{y = Q_{comp}(x) | x \in D\}$.

На основании приведенных определений и терминов вводится понятие *Парето-доминирования*, которое для двух любых векторов определяется тремя возможными вариантами:

- 1) решение a доминирует решение b : $a > b$, если $f(a) > f(b)$;
- 2) решение a слабо доминирует решение b : $a \geq b$, если $f(a) \geq f(b)$;
- 3) решения a и b несравнимы: $a \approx b$, если $f(a) \not\leq f(b) \wedge f(a) \not\geq f(b)$.

Таким образом, $a \in D$ называется *парето-оптимальным*, если не существует $b \in D: b > a$. При этом вектор $x \in D$ называется *недоминируемым* относительно некоторого множества $A \subseteq D$, если не существует $a \in A: a > x$.

Для множества недоминируемых решений в A определим оператор $p(A)$:

$$p(A) = \{a \in A \subseteq D | a - \text{недоминируем относительно } A\}.$$

Множество $X_p = p(D)$ называется *множеством Парето*, а множество $Y_p = f(X_p)$ определяет *фронт Парето*.

Вектор распределения \bar{P} , по которому будет формироваться популяция потомков, вычисляется по формуле:

$$\bar{P} = (p_1, \dots, p_n),$$

$$p_j = P\{x_j = 1\} = \frac{1}{r} \sum_{i=1}^r x_j^i, j = \overline{1, n},$$

где n – длина хромосомы, x_j^i – j -й бит i -го индивида, r – наиболее пригодны индивиды текущей популяции (родители).

Вероятностный генетический алгоритм решения задачи размещения.

В данной работе предлагается модифицированный ВГА на основе *Strength Pareto Evolutionary Algorithm (SPEA2)*. Это обусловлено тем, что этот метод позволит упростить процедуру принятия решений пользователем, а также процесс контроля и настройки параметров алгоритма, что сделает решение задачи более эффективным [11]. Модификация состоит в том, что информация о пространстве поиска, которая была накоплена в процессе работы алгоритма, фиксируется именно в виде оценки распределения единичных компонентов векторов-решений. Заданное распределение формирует новых индивидов и переоценивается после процедуры отбора за счет использования дополнительной статистической информации о пространстве поиска [12].

Структурная схема работы модифицированного ВГА на основе *SPEA2* показана на рис. 1.

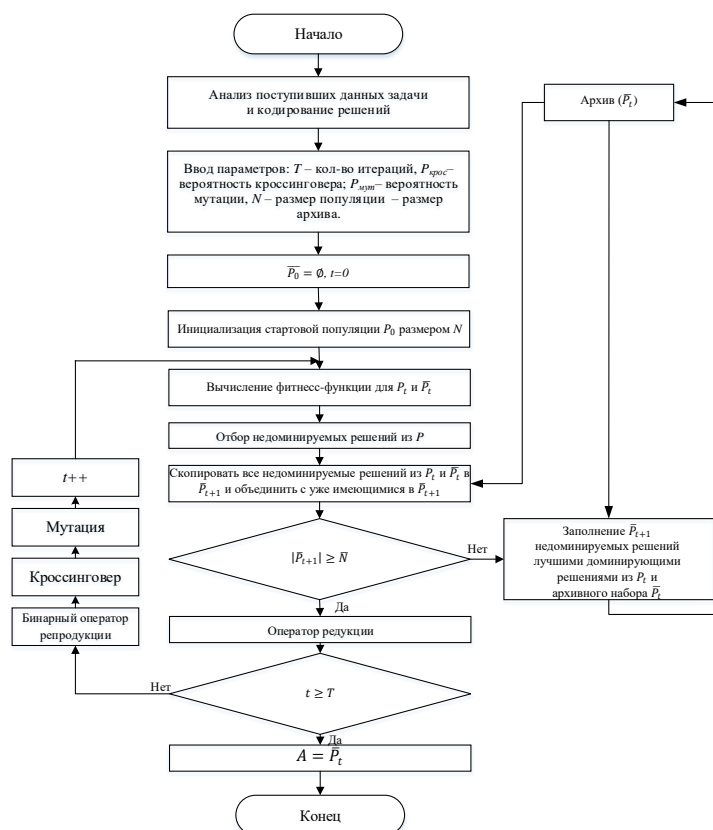


Рис. 1. Структурная схема работы модифицированного ВГА на основе *SPEA2*

В модифицированном ВГА *SPEA2*: N – размер популяции; \bar{N} – размер внешнего множества (архива), T – максимальное количество итераций, A – множество полученных недоминируемых решений.

Для пояснения работы предложенного вероятностного генетического алгоритма рассмотрим подробнее процедуру обновления и заполнения архива P_t .

В начале работы процедуры копируются все недоминируемые решения, т.е. те, которые имеют меньшую функцию пригодности из архива \bar{P}_t и популяции P_t в архив следующего поколения \bar{P}_{t+1} по формуле:

$$\bar{P}_{t+1} = \{i | i \in P_t + \bar{P}_t \wedge F(i) < 1\}.$$

Если недоминируемый фронт точно вписывается в архив ($|\bar{P}_{t+1}| = \bar{N}$), то отбор считается завершенным.

Если архив слишком мал: $|\bar{P}_{t+1}| < \bar{N}$, то лучшие $\bar{N} - |\bar{P}_{t+1}|$ доминированные решения в предыдущем архиве и популяции копируются в новый архив \bar{P}_{t+1} . Это операция может быть реализована при помощи сортировки мультимножества $P_t + \bar{P}_t$, исходя из значений функций пригодности, и скопировать первые $\bar{N} - |\bar{P}_{t+1}|$ решения i с $F(i) \geq 1$ из полученного упорядоченного списка в \bar{P}_{t+1} .

В том случае, если размер текущего недоминируемого мультимножества превышает \bar{N} вызывается оператор редукции, который итеративно удаляет индивидов из \bar{P}_{t+1} пока $|\bar{P}_{t+1}| = \bar{N}$. Здесь на каждой итерации выбирается индивид i для удаления, у которого $i \leq j$ для всех $j \in \bar{P}_{t+1}$, где:

$$i \leq j: \Leftrightarrow \forall 0 < k < |\bar{P}_{t+1}|: \sigma_i^k = \sigma_j^k \vee \exists 0 < k < |\bar{P}_{t+1}|: [(\forall 0 < l < k: \sigma_i^l = \sigma_j^l) \wedge \sigma_i^k < \sigma_j^k],$$

где σ_i^k – расстояние от i до его -го ближайшего соседа в \bar{P}_{t+1} . Таким образом, на каждом шаге выбрасывается то решение, от которого расстояние до его ближайшего соседа минимально. Если есть несколько решений с одинаковым расстоянием до ближайшего соседа, то рассматривается расстояние до второго по близости соседа и так далее.

Для корректной работы предложенного ВГА необходимо учитывать как доминирующие, так и доминируемые решения, поэтому преобразуем вычисление целевой функции для P_t и \bar{P}_t .

Каждому индивиду i в архиве \bar{P}_t и популяции P_t присваивается значение силы $S(i)$, представляющее число решений, которое он доминирует по формуле:

$$S(i) = |\{j | j \in P_t + \bar{P}_t \wedge i \succ j\}|,$$

где $|\cdot|$ – мощность множества, $+$ – множество объединения, и символ \succ соответствует соотношению Парето-доминирования. На основе значений S вычисляется исходная функция пригодности $R(i)$ для каждого индивида i по формуле:

$$R(i) = \sum_{j \in P_t + \bar{P}_t, i \succ j} S(j).$$

Т.е. исходная пригодность определяется силой ее доминаторов как в архиве, так и в популяции. Важно отметить, что функция пригодности здесь должна быть минимизирована, т.е. $R(i) = 0$ соответствует недоминируемому индивиду, в то время как высокое значение $R(i)$ означает, что i доминируется множествами индивидами (что, в свою очередь, доминирует многих индивидов).

Несмотря на то что исходная функция пригодности обеспечивает своего рода механизм сортировки по *нишам*, основанный на концепции Парето доминирования, это может потерпеть неудачу, когда большинство индивидов не доминируют друг с другом [13]. Поэтому добавлена дополнительная информация о *плотности*, чтобы различать индивидов, имеющих одинаковые значения исходной пригодности.

сти. Для каждого индивида i расстояния (в пространстве объектов) до всех индивидов j в архиве и популяции вычисляются и сохраняются в списке. После сортировки списка в порядке возрастания, k -й элемент задает искомое расстояние, обозначаемое как σ_i^k . В качестве общей настройки используем k , равный квадратному корню от размера выборки, таким образом, $k = \sqrt{N + \bar{N}}$. Плотность $D(i)$, соответствующая i , определяется формулой:

$$D(i) = \frac{1}{\sigma_i^k + 2};$$

В знаменателе добавляется 2, чтобы гарантировать, что его значение больше нуля и что $D(i) < 1$. Наконец, добавление $D(i)$ к исходному значению функции пригодности $R(i)$ индивидуума i приводит к его полной функции пригодности $F(i)$:

$$F(i) = R(i) + D(i).$$

Также для управления расстоянием и разбросом точек в множестве решений при реализации вероятностного генетического алгоритма моделируется соотношение генетических операторов: кроссинговера, мутации и репродукции.

Минимальное среднее расстояние: результат пропорциональной селекции, равномерное скрещивание и слабая мутация. Наибольший разброс точек в пространстве решений – при ранговой селекции, одноточечном скрещивании и слабой мутации. Наибольший разброс в пространстве критериев – при турнирной селекции, равномерном скрещивании и средней мутации [14–17].

Вычислительный эксперимент. В табл. 1 представлены результаты размещения компонентов с учетом критерия суммарной взвешенной длины соединений (Q_1), критерия суммарного количества модулей, необходимых для реализации схемы (Q_2), критерия ЭМС (Q_{EMC}).

Таблица 1

Результаты размещения элементов ПП с учетом критериев ЭМС

Номер примера	Количество размещаемых компонентов	Показатели качества конструктивного модуля по критериям			Время работы программного модуля
		Q_1	Q_2	Q_{EMC}	
1	50	39919	7	1339	8
2	100	40122	12	1275	8
3	150	40811	18	1115	9
4	200	213690	21	995	9
5	250	213048	19	808	10
6	500	213640	25	765	10
7	650	558988	27	654	11
8	800	554339	29	547	11
9	950	556077	33	497	12
10	1000	578125	44	412	12

Также была произведена оценка работы эффективности алгоритма на примере сравнения с генетическим и муравьиным алгоритмами размещения. Результат проведенного эксперимента продемонстрирован в табл. 2.

Таблица 2

Сравнительный анализ работы алгоритмов

Алгоритм	Количество элементов				
	100	250	500	850	1000
Генетический	65,3	114,9	123,3	142,8	190,8
Муравьиный	50	102,1	138,5	149,1	198,9
ВГА	58,8	79,8	94,6	122,1	143,5

Графическое представление эффективности алгоритма показано на гистограмме рис. 2.

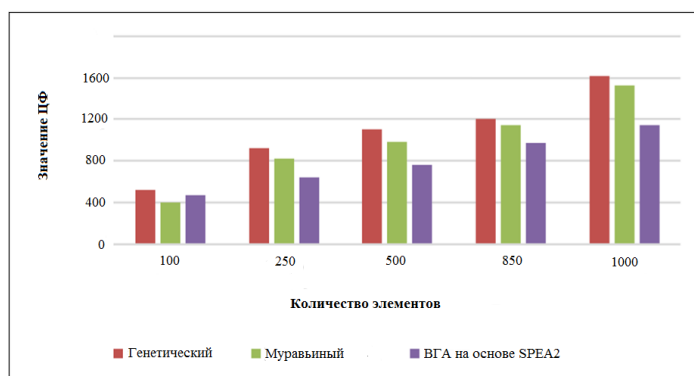


Рис. 2. Гистограмма эффективности разработанного алгоритма

Качество размещений, полученных, на основе разработанного алгоритма, в среднем на 8,7% превосходит результаты размещения, полученные с использованием простого генетического и муравьиного алгоритмов, что говорит об эффективности предложенного подхода.

Временная сложность разработанного в данной статье алгоритма в основном совпадает со сложностью быстрых итерационных алгоритмов и лежит в пределах $O(n) - O(n^3)$. Такая сложность обещает перспективное использование модифицированного ВГА при решении задачи размещения элементов ЭВА с учетом электромагнитной совместимости.

Заключение. Разработан вероятностный генетический алгоритм с прогнозом множества Парето для решения задачи размещения элементов печатной платы. При решении данной задачи основной уклон был сделан на обеспечение электромагнитной совместимости элементов, что и являлось главным критерием. Предложена модификация на основе метода *Strength Pareto Evolutionary Algorithm (SPEA2)*, что позволяет затрачивать наименьший вычислительный ресурс в сравнении с аналогами. Определена функция оценки качества получаемых решений. Разработана модифицированная процедура обновления архива парето-оптимальных решений. Также описаны особенности вычисления целевой функции пригодности на основе доминирования индивидуумов и механизма сортировки по нишам. Разработан метод оценки функции плотности и разброса точек в множестве решений при определенном соотношении генетических операторов репродукции, кроссинговера, мутации, что позволило уменьшить вычислительные затраты. Разработанный модифицированный вероятностный алгоритм размещения позволяет получать более эффективный результат на 8 % чем простой генетический алгоритм и на 7 % чем муравьиный алгоритм. ВСА лежит в пределах $O(n) - O(n^3)$.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Курейчик В.В., Курейчик В.М., Родзин С.И. Теория эволюционных вычислений. – М.: Физматлит, 2012. – 260 с.
2. Гладков Л.А. Курейчик В.В., Курейчик В.М. Генетические алгоритмы. – М.: Физматлит, 2010. – 368 с.
3. Карпенко А.П. Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой: учеб. пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – 446 с.
4. Курейчик В.В., Запорожец Д.Ю. Современные проблемы при размещении элементов СБИС // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2011. – № 7 (120). – С. 68-73.
5. Курейчик В.В., Заруба Д.В., Запорожец Д.Ю. Иерархический подход при размещении компонентов СБИС // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2014. – № 7 (156). – С. 75-84.
6. Kureichik Jr. V., Kureichik V.V., Bova V. Placement of VLSI fragments based on a multilayered approach // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2016. – Vol. 464. – P. 181-190.
7. Курейчик В.В., Курейчик Вл.Вл. Размещения фрагментов СБИС на основе механизма агрегации фракталов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – № 2 (163). – С. 196-205.
8. 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.
9. Чермошенцев С.Ф. Электромагнитная совместимость печатных плат цифровых электронных средств // Информационные технологии. – 2001. – № 4. – С. 17-25.
10. Сопов Е.А. Вероятностный генетический алгоритм и его исследование // VII Королёвские чтения. – Самара: Изд-во Самарского научного центра РАН, 2003. – Т. 5. – С. 38-39.
11. Курейчик В.В., Бова В.В., Курейчик Вл.Вл. Биоинспирированный поиск в задачах конструкторского проектирования и оптимизации // В сборнике: Информационные технологии в науке, образовании и управлении / под ред. проф. Е.Л. Глориозова. – 2015. – С. 427-432.
12. Курейчик В.В., Курейчик Вл.Вл. Интегрированный алгоритм размещения фрагментов СБИС // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2014. – № 7 (156). – С. 84-93.
13. 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.
14. Schaffer J.D. Multiple Objective Optimization with Vector Evaluated Genetic Algorithms // Proc. of an Intern. Conf. on Genetic Algorithms and Their Applications, Pittsburgh, PA, 1985. – P. 93-100.
15. Kasprzyk, J., Kureichik, V.M., Malioukov, S.P., Kureichik, V.V., Malioukov, A.S. Experimental investigation of algorithms developed // Studies in Computational Intelligence. – 2009. – Vol. 212. – P. 211-223+227-236.
16. Sherwani N.A. Algorithms for VLSI Physical Design Automation. Third Edition, Kluwer Academic Publisher, USA, 2013.
17. 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.
18. Alpert C.J., Dinesh P.M., Sachin S.S. Handbook of Algorithms for Physical design Automation, Auerbach Publications Taylor & Francis Group, USA, 2009.
19. Horn J., Nafpliotis N., Goldberg D.E. A Niche Pareto Genetic Algorithm for Multiobjective Optimization // Proc. of the 1st IEEE Conf. on Evolutionary Computation. Piscataway, 1994. – Vol. 1. – P. 82-87.
20. Ficici S.G. Solution Concepts in Coevolutionary Algorithms: A Doctor of Philosophy Diss. Brandeis University, 2004.

REFERENCES

1. Kureychik V.V., Kureychik V.M., Rodzin S.I. Teoriya evolyutsionnykh vychisleniy [The theory of evolutionary computing]. Moscow: Fizmatlit, 2012, 260 p.
2. Gladkov L.A. Kureychik V.V., Kureychik V.M. Geneticheskie algoritmy [Genetic algorithms]. Moscow: Fizmatlit, 2010, 368 p.

3. *Karpenko A.P.* Sovremennyye algoritmy poiskovoy optimizatsii. Algoritmy, vdokhnovlennyye prirodoy: ucheb. posobie [Modern algorithms of search engine optimization. Algorithms inspired by nature: a training manual]. Moscow: Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman, 2014, 446 p.
4. *Kureychik V.V., Zaporozhets D.Yu.* Sovremennyye problemy pri razmeshchenii elementov SBIS [Modern placement's problems of VLSI], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2011, No. 7 (120), pp. 68-73.
5. *Kureychik V.V., Zaruba D.V., Zaporozhets D.Yu.* Ierarkhicheskiy podkhod pri razmeshchenii komponentov SBIS [Hierarchical approach for VLSI components placement], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2014, No. 7 (156), pp. 75-84.
6. *Kureichik Jr. V., Kureichik V.V., Bova V.* Placement of VLSI fragments based on a multilayered approach, *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2016, Vol. 464, pp. 181-190.
7. *Kureychik V.V., Kureychik V.I.* Razmeshcheniya fragmentov SBIS na osnove mekhanizma agregatsii fraktalov [VLSI fragment placement on the basis of fractal aggregation], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2015, No. 2 (163), pp. 196-205.
8. *Suzdal'tsev I.V.* Metodika resheniya zadach proektirovaniya pechatnykh plat tsifrovyykh elektronnykh sredstv s uchedom kriteriev elektromagnitnoy sovmestimosti, s ispol'zovaniem evolyutsionnykh algoritmov [Methods of solving problems of designing digital circuit boards of electronic means taking into account the criteria of electromagnetic compatibility with the use of evolutionary algorithms], *Elektromagnitnaya sovmestimost' i elektromagnitnaya ekologiya: Sb. nauch. dokl. 9-go Mezhdunar. simp.* [Electromagnetic compatibility and electromagnetic ecology: Collection of scientific papers of the 9th International Symposium]. St. Petersburg: LETI, 2011, pp. 220-222.
9. *Chermoshentsev S.F.* Elektromagnitnaya sovmestimost' pechatnykh plat tsifrovyykh elektronnykh sredstv [Electromagnetic compatibility of printed circuit boards digital electronic media], *Informatsionnye tekhnologii* [Information Technology], 2001, No. 4, pp. 17-25.
10. *Sopov E.A.* Veroyatnostnyy geneticheskiy algoritm i ego issledovanie [The probabilistic genetic algorithm and its study], *VII Korolevskie chteniya* [Royal VII reading]. Samara: Izd-vo Samarskogo nauchnogo tsentra RAN, 2003, Vol. 5, pp. 38-39.
11. *Kureychik V.V., Bova V.V., Kureychik V.I.* Bioinspirirovannyi poisk v zadachakh konstruktorskogo proektirovaniya i optimizatsii [Bio-inspired search in problems of engineering design and optimization], *V sbornike: Informatsionnye tekhnologii v nauke, obrazovanii i upravlenii* [In the collection: Information technologies in science, education and management], ed. by prof. E.L. Glorizova, 2015, pp. 427-432.
12. *Kureychik V.V., Kureychik V.I.* Integrirovannyi algoritm razmeshcheniya fragmentov CBIS [Integrated VLSI fragment placement algorithm], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2014, No. 7 (156), pp. 84-93.
13. *Kureychik V.V., Zhilenkov M.A.* Geneticheskiy algoritm dlya resheniya optimizatsionnykh zadach s yavno vyrazhennoy tselevoy funktsiey [Genetic algorithm for solution optimization problems with explicit objective function], *Informatika, vychislitel'naya tekhnika i inzhenernoe obrazovanie* [Information, computing and engineering education], 2014, No. 4 (19), pp. 1-8.
14. *Schaffer J.D.* Multiple Objective Optimization with Vector Evaluated Genetic Algorithms, *Proc. of an Intern. Conf. on Genetic Algorithms and Their Applications, Pittsburgh, PA, 1985*, pp. 93-100.
15. *Kacprzyk, J., Kureichik, V.M., Malioukov, S.P., Kureichik, V.V., Malioukov, A.S.* Experimental investigation of algorithms developed, *Studies in Computational Intelligence*, 2009, Vol. 212, pp. 211-223+227-236.
16. *Sherwani N.A.* Algorithms for VLSI Physical Design Automation. Third Edition, Kluwer Academic Publisher, USA, 2013.
17. *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.
18. *Alpert C.J., Dinesh P.M., Sachin S.S.* Handbook of Algorithms for Physical design Automation, Auerbach Publications Taylor & Francis Group, USA, 2009.
19. *Horn J., Nafpliotis N., Goldberg D.E.* A Niche Pareto Genetic Algorithm for Multiobjective Optimization, *Proc. of the 1st IEEE Conf. on Evolutionary Computation. Piscataway, 1994*, Vol. 1, pp. 82-87.
20. *Ficici S.G.* Solution Concepts in Coevolutionary Algorithms: A Doctor of Philosophy Diss. Brandeis University, 2004.

Статью рекомендовала к опубликованию д.т.н., профессор А.Г. Коробейников.

Жиленков Михаил Александрович – Южный федеральный университет; e-mail: MZhilenkov777@gmail.com; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371651; кафедра систем автоматизированного проектирования; аспирант.

Курейчик Владимир Викторович – e-mail: vkur@sfedu.ru; кафедра систем автоматизированного проектирования; зав. кафедрой; д.т.н.; профессор.

Zhilenkov Mikhail Aleksandrovich – Southern Federal University; e-mail: MZhilenkov777@gmail.com; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928; phone: +78634371651; the department of computer aided design; graduate student.

Kureichik VladimirVictorovich – e-mail: vkur@sfedu.ru; the department of computer aided design; head of department; dr. of eng. sc.; professor.

УДК 004.896

Б.К. Лебедев, О.Б. Лебедев, Е.М. Лебедева

МОДЕРНИЗИРОВАННЫЙ МУРАВЬИНЫЙ АЛГОРИТМ СИНТЕЗА ИДЕНТИФИЦИРОВАННОГО ДЕРЕВА ГИЛЬОТИННОГО РАЗРЕЗА ПРИ ПЛАНИРОВАНИИ СБИС*

Задача планирования решается на основе модифицированной канонической парадигмы муравьиной колонии. Для представления плана используется бинарное дерево гильотинного разреза с идентифицированными вершинами. Структура дерева разрезов задается в виде польского выражения для бинарного дерева. Сформулированы основные свойства польского выражения, выполнение которых необходимо, чтобы запись соответствовало дереву разрезов. В работе рассматривается подход, при котором формирование структуры дерева разрезов муравьиным алгоритмом и разметка всех вершин дерева производится параллельно. Задача синтеза дерева разрезов с идентификацией вершин сводится к задаче формирования соответствующего польского выражения. Для отражения коллективной эволюционной памяти в течение жизни популяции муравьев и для формирования решения задачи в работе используется полный граф с альтернативными состояниями вершин. Вершины множества X_1 соответствуют множеству модулей M . Каждая вершина может находиться в одном из двух альтернативных состояний, соответствующих типу ориентации модуля. Вершины множества X_2 соответствуют разрезам. Каждая вершина может находиться в одном из двух альтернативных состояний, соответствующих типу разреза – горизонтальный или вертикальный. Ключевая проблема, которая была решена в данной работе, связана с разработкой композитной структуры пространства решений, позволяющей одновременно учитывать при построении дерева разрезов ориентацию элементов, тип разреза и метку модуля. Разработана структура модифицированного польского выражения позволяющая, учитывать ориентацию элементов, тип разреза и метку модуля. Это позволило снизить временную сложность задачи планирования и повысить качество решения. Процесс поиска решений итерационный. Каждая итерация l включает три этапа. На первом этапе муравей находит решение. Разработаны эвристики поведения муравья при перемещениях в графе поиска решений, позволяющие формировать легитимный маршрут. На втором этапе муравьи откладывают феромон, на третьем этапе осуществляется испарения феромона. Построенный агентом маршрут трансформируется в польское выражение, которое в свою очередь трансформируется в дерево разрезов с идентифицированными вершинами, а дерево разрезов трансформируется в план. Для написания программы планирования СБИС методом муравьиной колонии был использован язык C++ в среде Microsoft Visual Studio 2010 для ОС Windows, так как главный упор делался на скорость работы приложения. Для проведения экспериментов программы была использована процедура синтеза контрольных примеров с известным оптимумом F_{opt} по аналогии с

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 15–01–05297).