

Budko Natalia Aleksandrovna – RDIRCS SFU; e-mail: natalia.tb13@mail.ru; Taganrog, Russia; phone: +79185670210; engineer; graduate student SFU.

Medvedev Mikhail Yurievich – e-mail: medvmihal@gmail.com; phone: +79198927349; leading researcher; dr. of eng. sc.; professor; head of department SFU.

Budko Artem Yurievich – e-mail: aptem_budko@mail.com; phone: +79281545833; senior research; cand. of eng. sc.; associate professor of the department SFU.

УДК 658.512

DOI 10.18522/2311-3103-2021-2-31-39

В.И. Данильченко, Е.В. Данильченко, В.М. Курейчик

МНОГОМЕРНЫЙ ПОИСК В ЗАДАЧЕ РАЗМЕЩЕНИИ ЭЛЕМЕНТОВ СБИС НА ОСНОВЕ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА

Все крупные производители идут к уменьшению габаритов современных микроэлектронных устройств. Это приводит к переходу на новые нормы проектирования и изготовления СБИС. Известные алгоритмы автоматизированного проектирования не в полной мере способны реализовывать новые требования при проектировании СБИС. В связи с этим, при решении задач конструкторского проектирования появляется необходимость в разработке новых методик решения данного класса задач. Одним из таких методик может стать гибридная многомерная система поиска, основанная на генетическом алгоритме (ГА). Описывается автоматизированный подход к проектированию СБИС на основе генетического алгоритма, позволяющий создать алгоритмическую среду в области многомерного генетического поиска для решения NP полных задач, в частности размещения элементов СБИС. Цель данной работы заключается в нахождении путей размещения элементов СБИС на основе генетического алгоритма. Научная новизна заключается в разработке модифицированного многомерного генетического алгоритма для автоматизированного проектирования сверхбольших интегральных схем. Постановка задачи в данной работе заключается в следующем: оптимизировать размещение элементов СБИС путем применения, многомерного модифицированного ГА. Практическая ценность работы заключается в создании подсистемы, позволяющей использовать разработанные многомерные архитектуры, методы и алгоритмы для эффективного решения задач конструкторского проектирования СБИС, а также проводить сравнительный анализ с существующими аналогами. Принципиальное отличие от известных подходов в применении новых многомерных генетических структур в автоматизированном проектировании СБИС, кроме того в работе приведен модифицированный генетический алгоритм. Приведенные результаты вычислительного эксперимента, показали преимущества предложенного в работе многомерного подхода к решению задач размещения элементов СБИС по сравнению с существующими аналогами. Таким образом, проблема создания методов, алгоритмов и программного обеспечения для автоматизированного размещения элементов СБИС в настоящее время имеет особую актуальность. Ее решение позволит улучшить качественные характеристики проектируемых устройств, сократит сроки и затраты на проектирование.

Генетические алгоритмы; графы и гиперграфы; эволюционные вычисления; размещение СБИС; САПР; многомерные вычисления; производства электронных средств.

V.I. Danilchenko, Y.V. Danilchenko, V.M. Kureichik

AUTOMATED STRUCTURAL-PARAMETRIC SYNTHESIS OF A STEPPED DIRECTIONAL RESPONDER ON CONNECTED LINES BASED ON A GENETIC ALGORITHM

All major manufacturers go to a decrease in the dimensions of modern microelectronic devices. This leads to the transition to new standards for designing and manufacturing SBSS. The well-known automated design algorithms are not fully able to implement new requirements when designing a SBI. In this regard, when solving the tasks of design design, there is a need to

develop new methods for solving this class task. One of these techniques can be a hybrid multidimensional search system based on a genetic algorithm (GA). An automated approach to the design of the SBI based on a genetic algorithm is described, which makes it possible to create an algorithmic medium in the field of multidimensional genetic search to solve the NP full tasks, in particular the placement of the VSA elements. The purpose of this work is to find ways to place the elements of the SBI based on the genetic algorithm. The scientific novelty is to develop a modified multidimensional genetic algorithm for automated design of super-high integrated circuits. The formulation of the problem in this paper is as follows: optimize the placement of the ELEMENTS of the SBI by using, multidimensional modified heuristics. The practical value of the work is to create a subsystem that allows you to use the developed multidimensional architecture, methods and algorithms to effectively solve the tasks of the design design of the SDI, as well as conduct a comparative analysis with existing analogues. The fundamental difference from the well-known approaches in the application of new multidimensional genetic structures in the automated design of the SBI, in addition, the modified genetic algorithm was righteous. The results of the computational experiment showed the advantages of a multidimensional approach to solving the tasks of placing the Elements of the SBI compared to existing analogues. Thus, the problem of creating methods, algorithms and software for the automated placement of the SBS elements is currently of particular relevance. Its solution will improve the qualitative characteristics of the designable devices, will reduce the timing and costs of design.

Genetic algorithms; graphs and hypergraphs; evolutionary calculations; SBI; CAD; Multidimensional calculations; electronic means.

Введение. Основным требованием при размещении элементов является создание условий, обеспечивающих полное размещение элементов. Для выполнения данного требования необходимо учитывать характерные свойства конструкции кристалла, оказывающие существенное влияние на результаты размещения. Согласно работе [1], задача размещения элементов в блоках на модели кристалла относится к NP полным задачам [2], это означает, что в общем случае ее решение в принципе не может быть найдено за конечное время ни одним алгоритмом.

Генетический алгоритм. Базовая структура ГА: инициализация первой популяции, генетический оператор и завершение поиска. На рис. 1 приведена обобщенная схема работы алгоритма с оценкой по обратной связи [6].

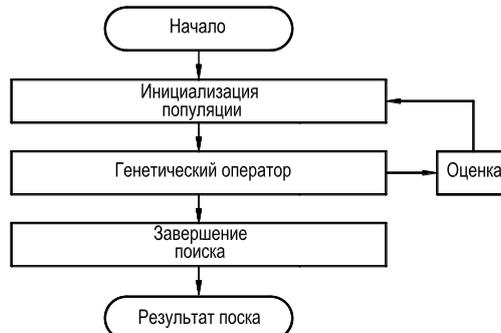


Рис. 1. Базовая структура работы ГА

На рис. 2 приведена модификация базовой структуры генетического поиска на основе использования моделей эволюции Дарвина, Ламарка, де Фриза и Поппера. Здесь, в отличие от базисной структуры, шкала эволюции, взаимодействуя только с внешней средой, вырабатывает сигналы на выбор эволюции Дарвина (0), Ламарка (1), де Фриза (0,5). После этого выполняется модель эволюции Поппера, реализующая один из видов эвристического поиска в виде метода проб и ошибок.

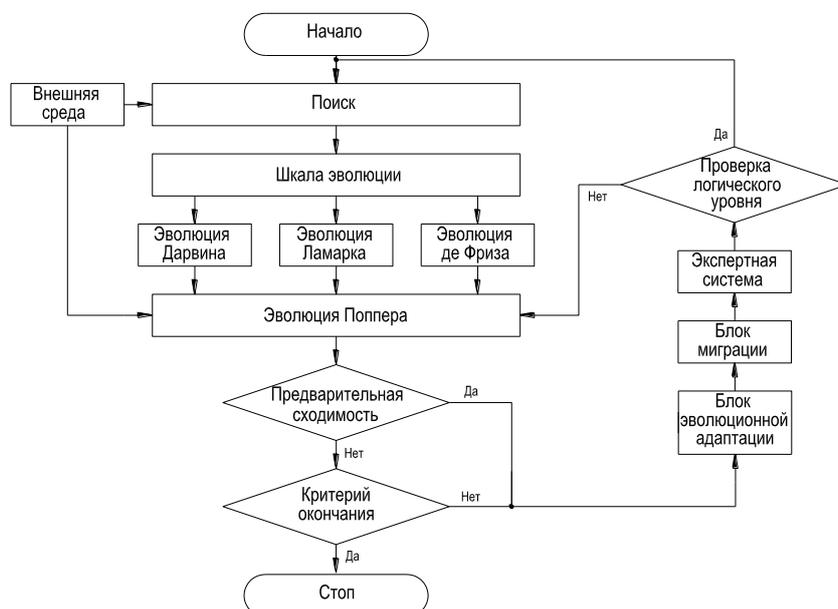


Рис. 2. Модификация базовой структуры

В цепи обратной связи добавлены блоки адаптации и миграции. Они позволяют производить построение порядка из хаоса, установление баланса в системе, выбор параметров для управления эволюционным поиском с целью получения оптимальных и квазиоптимальных решений.

В рассматриваемой задаче методы локального поиска на основе производных обычно не используются, поскольку выражение для производных в аналитическом виде для исследуемых функций получить трудно, а их численное определение с помощью разностных схем может приводить к ощутимой ошибке, в окрестности экстремума. Поэтому предпочтительнее применять методы поиска, основанные на вычислении только самой целевой функции. Информация, полученная на каждом новом шаге поиска, сравнивается с предыдущей, что позволяет сделать процесс поиска экстремума целенаправленным. Например, в одном из таких методов, называемом прямым поиском, сначала дискретно изменяется параметр x_1 при постоянных значениях всех остальных x_k до тех пор, пока целевая функция не станет минимальной. Получение значения $x'_{1\text{опт}}$ фиксируется, и в новом цикле начинается изменение параметра x_2 и т.д. Подобный цикл можно повторять несколько раз. Такой простой алгоритм успешно действует только при слабой зависимости между собой всех параметров x_k в выражении для целевой функции $F_{ц}(x)$. При сильной зависимости между x_k , например при наличии членов типа $x_1 x_2$, стратегии простого поиска может не привести к желаемому результату. Поэтому обычно используют более сложные алгоритмы многомерного поиска минимума целевой функции $F_{ц}(x)$.

В самом общем виде такой алгоритм сводится к следующей итерационной процедуре. В исходной базисной точке $x_0^{(1)}$, за которую можно принять точку с координатами, каждая из которых равна середине зоны изменения соответствующего параметра $x_{ок}^{(1)} = 0,5(x_{k\text{max}} - x_{k\text{min}})$, проводится одномерный поиск: каждая переменная x_i последовательно изменяется на Δx_i при постоянных значениях остальных параметров и вычисляется целевая функция $F_{ц}(x)$. Следовательно, на

первом этапе направления поиска параллельны осям x_1, x_2, \dots, x_n . Фиксируются к какому результату приводит возмущение Δx_i : к оптимальному результату, т.е. к уменьшению целевой функции при минимизации, или попадания в локальный оптимум. После того как пройдены все N направлений (N – число направлений переменных параметров), по каждому параметру вводится новое возмещение: $\alpha \Delta x_i$ в случае успеха и $-\beta \Delta x_i$ в случае неудачи (принимается $\alpha = 3$ и $\beta = 0,5$). Возмущения по всем направлениям задаются до тех пор, пока по каждому из них после предварительного результата не попадает в локальный оптимум. На этом первый этап поиска, состоящий из нескольких циклов последовательного опроса целевой функции по N направлениям, заканчивается.

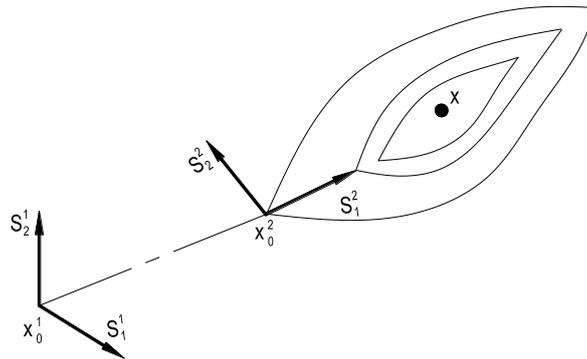


Рис. 3. Построение новых направлений поиска

Полученная в конце 1-го этапа точка становится начальной, базисной для 2-го этапа: $x_0^{(2)} = x_n^{(1)}$. Новое нормированное 1-е направление поиска $S_1^{(2)}$ берется параллельным $(x_0^{(2)} - x_0^{(1)})$, а остальные направления с помощью определенной процедуры выбираются ортонормированными друг к другу и к $S_1^{(2)}$. Построение новых направлений поиска в случае двух переменных показано на рис. 3. Таким образом, новая система координат формируется соответствующим вращением направлений поиска по отношению к предыдущим так, что они оказываются вытянутыми вдоль главных осей квадратурной аппроксимации целевой функции (проход вдоль оврага). Поскольку направления поиска на каждом этапе линейно независимы и ортогональны, то это исключает взаимодействие переменных.

На 2-м этапе поиска по аналогии с 1-м последовательно вводятся возмещения по всем N направлениям. В результате в конце 2-го этапа определяются: новое уменьшенное значение целевой функции, конечная точка 2-го этапа $x_n^{(2)}$, условия для построения новой системы координат для 3-го этапа, поиск в котором начинается с точки $x_0^{(3)} = x_n^{(2)}$. Описанная итерационная процедура, состоящая из K этапов, заканчивается нахождением локального минимума целевой функции или точки, близко к ней расположенной. Для исключения явления «зацикливания» и ограничения времени поиска устанавливаются ограничения как числа вычислений цели на каждом этапе, так и числа K этапов *оптимизации*.

Архитектура гибридного поиска. Одним из основных способов минимизировать сложность задач размещения является сокращение их размерности. На рисунке 4 показана архитектура предлагаемого гибридного подхода на основе двух методов – Розенброка и генетическом поиске [9, 10].

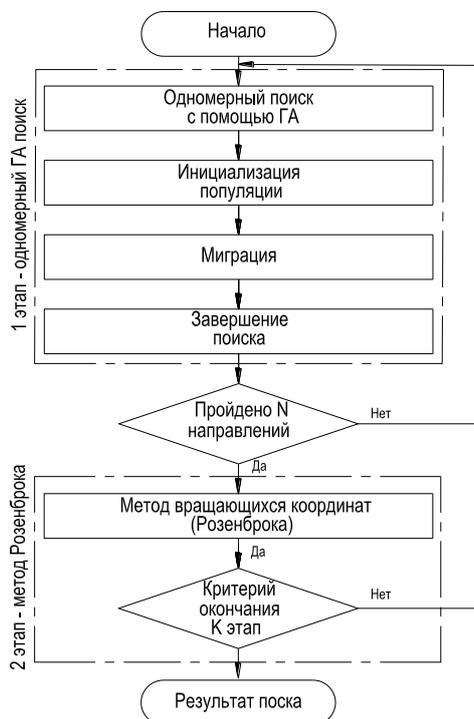


Рис. 4. Архитектура предлагаемого гибридного подхода

Таким образом, отличительной чертой предложенного метода является сведение направлений поиска к новой ортогональной системе в начале каждого этапа минимизации $F_{ц}(x)$ на основании данных, полученных в конце предыдущего этапа. Такой прием вращения направлений поиска на каждой итерации существенно улучшает процесс сходимости, сравнительно быстро приводящий к локальному минимуму или окружающей его окрестности, что подтверждается экспериментально.

Пример. В результате анализа выходных данных, авторами отмечается, что временная сложность разработанного модифицированного алгоритма не выходит за пределы полиномиальной зависимости, и может быть выражена формулой: $O(I\alpha N^2) - O(I\beta N^3)$, где N – число элементов схемы, I – количество итераций (шагов) выполняемых алгоритмом (размер решаемой задачи). Усредненные результаты экспериментов отражены в табл. 1.

Таблица 1

Сравнительная характеристика работы алгоритмов

Алгоритмы	Число элементов схемы									
	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
Модификация базовой структуры ГА (рис. 2)	0,2	0,71	0,94	1,31	1,53	2,04	2,32	3,33	4,71	10,36
Предлагаемый гибридный подход многомерного ГА (рис. 4)	0,23	0,9	1,13	1,43	1,81	2,33	2,58	3,81	5,28	7,28

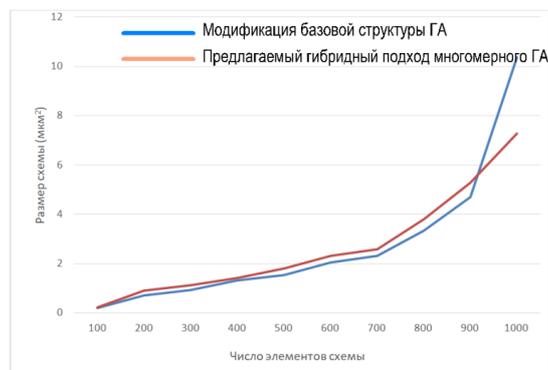


Рис. 5. Сравнительная характеристика работы алгоритмов

Макет из 1000 блоков при проектировании с использованием модифицированной базовой структурой ГА составляет $10,36 \text{ мкм}^2$. Тот же вход при подаче в наш предложенный гибридный подход многомерного ГА возвращается результат с площадью $7,28 \text{ мкм}^2$, что позволяет разместить элементы с минимальным уровнем незадействованного пространства площадки.

При размещении элементов на модели кристалла с помощью гибридного подхода многомерного ГА расположение размещенных элементов имеют оптимальную форму, что дает преимущество на этапе корректировки топологии схемы.

Пример оптимального размещения модифицированным генетическим алгоритмом показан рис. 6.

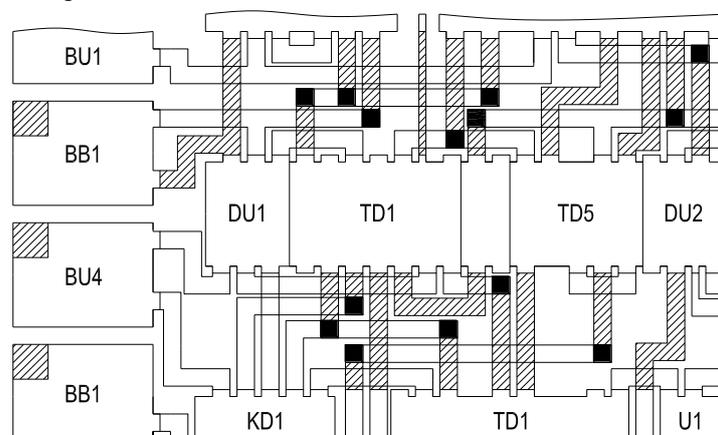


Рис. 6. Оптимальное размещение модифицированным генетическим алгоритмом

При размещении элементов на модели кристалла с помощью модифицированного многомерного генетического алгоритма расположение размещенных элементов имеют оптимальную форму, что дает преимущество на этапе корректировки топологии схемы.

Заключение. В статье описывается автоматизированный подход к проектированию СБИС на основе генетического алгоритма, позволяющий создать алгоритмическую среду в области многомерного генетического поиска для решения NP полных задач, в частности размещения элементов СБИС. Представлена новая архитектура многомерного гибридного подхода на основе ГА, которая дает возможность получить одновременно практически реализуемое схемотехническое

решение с учетом особенностей технологии изготовления и первоначальный вариант размещения элементов СБИС. Описана часть программной реализации методики многомерного поиска. Представленный сравнительный пример работы алгоритмов, подтверждает эффективность предлагаемой архитектуры многомерного гибридного подхода на основе ГА. Проведенные серии экспериментов показали преимущество разработанного алгоритма в среднем на 7 % по сравнению с существующими аналогами.

Поддержка. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-37-90151 и при поддержке Фонда содействия инновациям по договору № 437ГУЦЭС8-Д3/62058 от 05 октября 2020 г.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Тарасов В.Б.* От многоагентных систем к интеллектуальным организациям: философия, психология, информатика. – М.: Эдиториал УРСС, 2002. – 352 с.
2. *Капра Ф.* Паутина жизни. Новое научное понимание живых систем: пер. с англ. – М.: ИД “Гелиос”, 2002.
3. *Курейчик В.М., Данильченко В.И.* Генетический алгоритм планирования размещения СБИС // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2019. – № 2 (204). – С. 26-34.
4. *Данильченко В.И., Курейчик В.М.* Классификация и анализ методов решения задачи размещения СБИС // Информатика, вычислительная техника и инженерное образование. – 2018. – Вып. 1.
5. *Danilchenko V.I., Danilchenko Y.V., Kureichik V.M.* Bio-inspired Approach to Microwave Circuit Design // IEEE EAST-WEST DESIGN & TEST SYMPOSIUM. – 2020. – P. 362-366. – DOI: 10.1109/EWDTS 50664.2020.9224737.
6. *Калентьев А.А., Гарайс Д.В., Добуш И.М., Бабак Л.И.* Структурно-параметрический синтез СВЧ транзисторных усилителей на основе генетического алгоритма с использованием моделей монолитных элементов // Доклады ТУСУРа. – Декабрь 2012. – № 2 (26). – Ч. 2. – С. 104-112.
7. *Tang, Maolin and Yao, Xin.* A memetic algorithm for VLSI floorplanning // IEEE Transactions on Systems, Man, And Cybernetics–Part B: Cybernetics. – 2007. – No. 37 (1).
8. *Горяинов А.Е., Добуш И.М., Бабак Л.И.* Построение параметрических моделей пассивных компонентов СВЧ монолитных интегральных схем с использованием программы Extraction-P.
9. *Kokolov A.A., Salmikov A.S., Sheyerman F.I. and Babak L.I.* Broadband Double-Balanced SiGe BiCMOS Mixer With Integrated Asymmetric MBaluns // Int. Conf. “Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines” (Dynamics-2017), Omsk, Russia, 2017 (accepted for publication).
10. *Wenyuan L. and Qian Z.* A 0.7–1.9GHz Broadband Pseudo-differential Power Amplifier Using 0.13-um SiGe HBT Technology // 2012 Int. Conf. on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT), July 2012. – P. 1-4.
11. *Коколов А.А., Добуш И.М., Шеерман Ф.И., Бабак Л.И. и др.* Сложно-функциональные блоки широкополосных усилителей радиочастоты для однокристалльных приемников L- и S-диапазонов на основе технологии SiGe // 3-я Междунар. науч. конф. «ЭКБ и электронные модули» (Международный форум «Микроэлектроника-2017»), г. Алушта, октябрь 2017. – М.: Техносфера, 2017. – С. 395-401.
12. *Bockleemann D.E. and Eisenstadt W.R.* Combined Differential and Common-Mode Scattering Parameters: Theory and Simulation // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. – July 1995. – Vol. MTT-43, No. 7. – P. 520-523.
13. *Курейчик В.М.* Гибридные генетические алгоритмы // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2007. – № 2 (77). – С. 5-12.
14. *Zhabin D.A., Garays D.V., Kalentyev A.A., Dobush I.M. and Babak L.I.* Automated Synthesis of Low Noise Amplifiers Using S-parameter Sets of Passive Elements, Asia-Pacific Microwave Conference (APMC 2017), Kuala Lumpur, Malaysia, 2017 (accepted for publication).
15. *Kalentyev A.A., Garays D.V. and Babak L.I.* Genetic-Algorithm-Based Synthesis of Low-Noise Amplifiers with Automatic Selection of Active Elements and DC Biases, European Microwave Week 2014, Rome, Italy. October 2014. – P. 520-523.

16. Babak L.I., Kokolov A.A. and Kalentyev A.A. A New Genetic-Algorithm-Based Technique for Low Noise Amplifier Synthesis, European Microwave Week 2012, Amsterdam, The Netherlands, November 2012. – P. 520-523.
17. Mann G.K.I., Gosine R.G. Three-dimensional min–max-gravity based fuzzy PID inference analysis and tuning // Fuzzy Sets and Systems. – 2005. – Vol. 156. – P. 300-323.
18. Голицын Г.А. Петров В.М. Информация и биологические принципы оптимальности: Гармония и алгебра живого. – М.: КомКнига, 2005.
19. Колесов Ю.Б., Сениченков Ю.Б. Моделирование систем. Динамические и гибридные системы: учеб. - метод. пособие. – СПб.: БХВ-Петербург, 2006.
20. Abraham A., Grosan G., Ramos V. Swarm Intelligence in Data Mining. – Berlin. Heidelberg: SpringerVerlag, 2007. – 267 p.

REFERENCES

1. Tarasov V.B. Ot mnogoagentnykh sistem k intellektual'nym organizatsiyam: filosofiya, psikhologiya, informatika [From multi-agent systems to intellectual organizations: philosophy, psychology, informatics]. Moscow: Editorial URSS, 2002, 352 p.
2. Kapra F. Pautina zhizni. Novoe nauchnoe ponimanie zhivykh system [The web of life. New scientific understanding of living systems]: trans. from engl. Moscow: ID “Gelios”, 2002.
3. Kureychik V.M., Danil'chenko V.I. Geneticheskiy algoritm planirovaniya razmeshcheniya SBIS [Genetic algorithm for planning the placement of VLSI], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskaya nauka* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2019, No. 2 (204), pp. 26-34.
4. Danil'chenko V.I., Kureychik V.M. Klassifikatsiya i analiz metodov resheniya zadachi razmeshcheniya SBIS [Classification and analysis of methods for solving the problem of VLSI placement], *Informatika, vychislitel'naya tekhnika i inzhenernoe obrazovanie* [Computer science, computer engineering and engineering education], 2018, Issue 1.
5. Danilchenko V.I., Danilchenko Y.V., Kureichik V.M. Bio-inspired Approach to Microwave Circuit Design, *IEEE EAST-WEST DESIGN & TEST SYMPOSIUM*, 2020, pp. 362-366. DIO: 10.1109/EWDTS 50664.2020.9224737.
6. Kalent'ev A.A., Garays D.V., Dobush I.M., Babak L.I. Strukturno-parametricheskii sintez SVCh tranzistornykh usiliteley na osnove geneticheskogo algoritma s ispol'zovaniem modeley monolitnykh elementov [Structural-parametric synthesis of microwave transistor amplifiers based on a genetic algorithm using models of monolithic elements], *Doklady TUSURa* [Reports of TUSUR], December 2012, No. 2 (26), Part 2, pp. 104-112.
7. Tang, Maolin and Yao, Xin. A memetic algorithm for VLSI floorplanning, *IEEE Transactions on Systems, Man, And Cybernetics–Part B: Cybernetics*, 2007, No. 37 (1).
8. Goryainov A.E., Dobush I.M., Babak L.I. Postroyeniye parametricheskikh modeley passivnykh komponentov SVCh monolitnykh integral'nykh skhem s ispol'zovaniem programmy Extraction-P [Construction of parametric models of passive components of microwave monolithic integrated circuits using the Extraction-P program].
9. Kokolov A.A., Salnikov A.S., Sheyerman F.I. and Babak L.I. Broadband Double-Balanced SiGe BiCMOS Mixer With Integrated Asymmetric MBaluns, *Int. Conf. “Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines” (Dynamics-2017), Omsk, Russia, 2017* (accepted for publication).
10. Wenyuan L. and Qian Z. A 0.7–1.9GHz Broadband Pseudo-differential Power Amplifier Using 0.13-um SiGe HBT Technology, *2012 Int. Conf. on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT)*, July 2012, pp. 1-4.
11. Kokolov A.A., Dobush I.M., Sheyerman F.I., Babak L.I. i dr. Slozhno-funktsional'nye bloki shirokopolosnykh usiliteley radiochastoty dlya odnokristal'nykh priemnikov L- i S-diapazonov na osnove tekhnologii SiGe [Complex-functional blocks of broadband radio frequency amplifiers for single-chip L- and S-band receivers based on SiGe technology], *3-ya Mezhdunar. nauch. konf. «EKB i elektronnyye moduli» (Mezhdunarodnyy forum «Mikroelektronika-2017»)*, g. Alushta, oktyabr' 2017 [3rd International Scientific Conference " ECB and Electronic modules "(International Forum "Microelectronics-2017"), Alushta, October 2017]. Moscow: Tekhnosfera, 2017, pp. 395-401.
12. Bocklemann D.E. and Eisenstadt W.R. Combined Differential and Common-Mode Scattering Parameters: Theory and Simulation, *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, July 1995, Vol. MTT-43, No. 7, pp. 520-523.

13. *Kureychik V.M.* Gibridnye geneticheskie algoritmy [Hybrid genetic algorithms], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2007, No. 2 (77), pp. 5-12.
14. *Zhabin D.A., Garays D.V., Kalentyev A.A., Dobush I.M. and Babak L.I.* Automated Synthesis of Low Noise Amplifiers Using S-parameter Sets of Passive Elements, Asia-Pacific Microwave Conference (APMC 2017), Kuala Lumpur, Malaysia, 2017 (accepted for publication).
15. *Kalentyev A.A., Garays D.V. and Babak L.I.* Genetic-Algorithm-Based Synthesis of Low-Noise Amplifiers with Automatic Selection of Active Elements and DC Biases, European Microwave Week 2014, Rome, Italy. October 2014, pp. 520-523,
16. *Babak L.I., Kokolov A.A. and Kalentyev A.A.* A New Genetic-Algorithm-Based Technique for Low Noise Amplifier Synthesis, European Microwave Week 2012, Amsterdam, The Netherlands, November 2012, pp. 520-523.
17. *Mann G.K.I., Gosine R.G.* Three-dimensional min-max-gravity based fuzzy PID inference analysis and tuning, *Fuzzy Sets and Systems*, 2005, Vol. 156, pp. 300-323.
18. *Golitsyn G.A., Petrov V.M.* Informatsiya i biologicheskie printsipy optimal'nosti: Garmoniya i algebra zhivogo [Information and biological principles of optimality: Harmony and algebra of the living]. Moscow: KomKniga, 2005.
19. *Kolesov Yu.B., Senichenkov Yu.B.* Modelirovanie sistem. Dinamicheskie i gibridnye sistemy: ucheb.-metod, posobie [System modeling. Dynamic and hybrid systems: a training manual]. Saint Petersburg: BKhV-Peterburg, 2006.
20. *Abraham A., Grosan G., Ramos V.* Swarm Intelligence in Data Mining. Berlin. Heidelberg: SpringerVerlag, 2007, 267 p.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н., доцент Ю.П. Волощенко.

Данильченко Евгения Владимировна – Южный Федеральный университет; e-mail: lipkina@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79525691761; кафедра САПР.

Данильченко Владислав Иванович – e-mail: vdanilchenko@sfedu.ru; тел.: +79526088561; кафедра САПР.

Курейчик Виктор Михайлович – e-mail: vmkureychik@sfedu.ru; тел.: +79282132730; кафедра САПР; д.т.н.; профессор.

Danilchenko Yevgenia Vladimirovna – Southern Federal University; e-mail: lipkina@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +79525691761; the department of computer-aided design.

Danilchenko Vladislav Ivanovich – e-mail: vdanilchenko@sfedu.ru; phone: +79526088561; the department of computer-aided design.

Kureichik Viktor Mikhailovich – e-mail: vmkureychik@sfedu.ru; phone: +78634311487; the department of computer-aided design; dr. of eng. sc.; professor.

УДК 004.896

DOI 10.18522/2311-3103-2021-2-39-50

В.В. Курейчик, Вл.Вл. Курейчик

ПРОГРАММНАЯ ПОДСИСТЕМА ДЛЯ РЕШЕНИЯ NP-СЛОЖНЫХ КОМБИНАТОРНО-ЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ НА ГРАФАХ*

Работа посвящена созданию программной подсистемы для решения NP-трудных и NP-сложных комбинаторно-логических задач на графах. В статье приведено описание комбинаторно-логических задач на графах. Для эффективного их решения предлагаются новые многоуровневые архитектуры поиска, такие как простая комбинированная, параллельная комбинированная, двухуровневая, интегрированная и гибридная. Данные архитектуры основаны на методах, инспирированных природными системами. Ключевым отлич-

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-01-00059.