

Gladkov Leonid Anatol'evich – Southern Federal University; e-mail: leo_gladkov@mail.ru; 44, Nekrasovskiy lane, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371625; CAD department; associate professor.

Gladkova Nadezhda Viktorovna – e-mail: nadyusha.gladkova77@mail.ru; CAD department; senior teacher.

Yasir Mukhanad Dzhabbar Yasir – e-mail: yasir_82@mail.ru; CAD department; postgraduate student.

УДК 658.512

DOI 10.18522/2311-3103-2020-4-157-164

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

**АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ
СИНТЕЗ СТУПЕНЧАТОГО НАПРАВЛЕННОГО ОТВЕТВИТЕЛЯ
НА СВЯЗАННЫХ ЛИНИЯХ НА ОСНОВЕ ГЕНЕТИЧЕСКОГО
АЛГОРИТМА**

Описывается автоматизированный подход к структурно-параметрическому синтезу ступенчатого направленного ответвителя на связанных линиях на основе генетического алгоритма (ГА), позволяющий создать алгоритмическую среду в области генетического поиска для решения NP полных задач, в частности структурно-параметрический синтез ступенчатого направленного ответвителя на связанных линиях. Цель данной работы заключается в нахождении путей структурно-параметрического синтеза ступенчатого направленного ответвителя на связанных линиях на основе бионспирированной теории. Научная новизна заключается в разработке модифицированного генетического алгоритма для автоматизированного структурно-параметрического синтеза ступенчатого направленного ответвителя на связанных линиях. Постановка задачи в данной работе заключается в следующем: оптимизировать синтез схем пассивных и активных СВЧ цепей путем применения модифицированного ГА. Принципиальное отличие от известных подходов в применении новых модифицированных генетических структур в автоматизированном структурно-параметрическом синтезе, кроме того в работе проведен новый метод расчёта ступенчатого направленного ответвителя на связанных линиях на основе модифицированного ГА. Таким образом, проблема создания методов, алгоритмов и программного обеспечения для автоматизированного структурного синтеза СВЧ модулей в настоящее время имеет особую актуальность. Ее решение позволит улучшить качественные характеристики проектируемых устройств, сократит сроки и затраты на проектирование, снизит требования к квалификации разработчика.

Генетические алгоритмы; графы и гиперграфы; эволюционные вычисления; автоматизация синтеза СВЧ модулей; САПР; принципиальная схема; топология.

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**

An automated approach to the structural-parametric synthesis of a stepped directional coupler on connected lines based on a genetic algorithm (GA) is described, which makes it possible to create an algorithmic environment in the field of genetic search for solving NP complete problems, in particular, the structural-parametric synthesis of a stepped directional coupler on connected lines. The purpose of this work is to find ways of structural-parametric synthesis of a stepped directional coupler on coupled lines based on the bionspiration theory. The scientific novelty lies in the development of a modified genetic algorithm for automated structural-parametric synthesis of

a stepped directional coupler on connected lines. The problem statement in this work is as follows: to optimize the synthesis of passive and active microwave circuits by using a modified GA. A fundamental difference from the known approaches in the use of new modified genetic structures in automated structural-parametric synthesis, in addition, a new method for calculating a stepped directional coupler on connected lines based on a modified GA is righteous in the work. Thus, the problem of creating methods, algorithms and software for automated structural synthesis of microwave modules is currently of particular relevance. Its solution will improve the quality characteristics of the designed devices, reduce design time and costs, and reduce the requirements for developer qualifications.

Genetic algorithms, graphs and hypergraphs, evolutionary calculations, automation of microwave modules synthesis, CAD, schematic diagram, topology.

Введение. К проблемам при решении задач структурно-параметрического синтеза схем пассивных и активных СВЧ цепей на основе классического ГА можно отнести большое многообразие этих схем, что затрудняет их систематизацию и разработку универсального алгоритма кодирования-декодирования, а также приводит к получению избыточных или нереализуемых на практике решений. Согласно работе [1], задача структурного синтеза РЭУ 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. Для устранения данной проблемы были разработаны модифицированные версии ГА, использующие предварительные знания о проектируемом классе устройств. Значительный вклад в развитие данного направления внесли следующие авторы: Л.С. Берштейн, Г.Г. Казеннов, В.П. Корячко, В.М. Курейчик, И.П. Норенков, Л.А. Растрин, Г.Г. Рябов, П.И. Соснин, А.Л. Стемповский, Д. Гольдберг, Д. Холланд и многие другие.

Теоретическая часть. Направленные ответители (НО) служат для отбора части мощности, падающей или отраженной волны из основного канала во вспомогательный (рис. 1). По схемному признаку они относятся к симметричным восьмиполосникам, у которых каждый из четырех входов связан с двумя другими и развязан с третьими. Согласно принципу взаимности, НО может быть и делителем мощности одного сигнала, и сумматором мощностей двух сигналов одинаковой частоты при соблюдении определенного фазового соотношения. При делении мощности поровну между двумя выходными каналами, т.е. при выполнении равенства $P_{3пад} = P_{4пад} = 0.5P_{1пад}$ (рис. 1), но называется гибридным соединением, которое, в свою очередь, является мостовым устройством при постоянном сдвиге фаз выходных сигналов в определенной полосе частот. S-матрица идеального НО имеет вид [3, 4]:

$$\begin{vmatrix} 0 & 0 & S_{13} & S_{14} \\ 0 & 0 & S_{14} & S_{13} \\ S_{13} & S_{14} & 0 & 0 \\ S_{14} & S_{13} & 0 & 0 \end{vmatrix}.$$

S-параметры позволяют определить характеристики НО, в том числе переходное затухание между каналами 1 и 3, 1 и 4: $b_{13} = -20 \lg |S_{13}|$, $b_{14} = -20 \lg |S_{14}|$ и коэффициент деления $K_d = 20 \lg |S_{13}|/|S_{14}|$. В радиопередатчиках, НО выполняют две основные функции: деления и суммирования мощностей из основного канала во вспомогательный для контроля параметров сигнала. В первом случае, НО является мостовым устройством, которое как типовое звено может входить в схему сумматора – делителя большого числа сигнала [4].

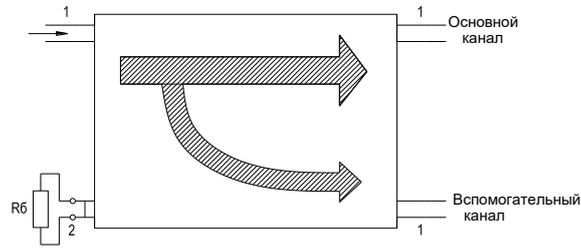


Рис. 1. Направленный ответвитель

Рассмотрим структурно-параметрический синтез одного из наиболее важных типов НО, применяемых в СВЧ диапазоне – на связанных линиях.

Синтез НО на связанных линиях осуществляется обычно восстановлением матрицы [T] или [S] для реализации требуемого переходного затухания b_{13} и b_{14} в заданной полосе частот. Коэффициент деления НО, определяющий переходное затухание, является одним из элементов такой матрицы. Сама процедура синтеза, включающая вычисление корней функции рабочего затухания, отбор устойчивых корней, восстановление матриц, обрушение к четырёхколёсному аналогу и другие этапы, достаточно сложна. Кроме того, применение метода ограничено невозможностью учета влияния неоднородностей в местах стыка ступенек и расчетом параметров НО по таблицам только при определенных значениях коэффициента деления K_d . Поэтому определять параметры НО при промежуточном значении K_d можно только путем интерпретации. Обе причины снижают точность расчета НО в СВЧ диапазоне.

Предлагаемый далее генетический метод дихотомии параметрического синтеза НО основан на применении бионспирированных методов. Его сущность заключается в анализе большого множества вариантов, например, 1000, среди которых по определенному критерию выбирается наилучший. К достоинствам такого метода, практическая реализация которого возможна только с применением ЭВМ, относятся:

- ◆ повышение точности расчета, поскольку можно учесть все неоднородности, в том числе и в месте стыка ступенек;
- ◆ получение не только заданной частотной характеристики переходного затухания, но и других параметров, например, минимального КСВ по входу устройства;
- ◆ возможность синтеза не только при активной, но и при комплексной нагрузке;
- ◆ отсутствие обширных таблиц при дискретных значениях переходного затухания НО, поскольку расчет на ЭВМ можно производить при любом значении данного параметра;
- ◆ возможность выбора ступени НО на связанных линиях любой длины, а не только, как обычно принято, четвертьволновых.

Метод реализуется за счет механизма обычного перебора возможных точек разрыва. Он аналогичен методу деления отрезка пополам для нахождения точки, в которой значение целевой функции имеет локальный оптимум.

Например, на отрезке $A = [a, b]$, представленном в виде набора точек $A : a|b|c|d|f|g|i|h$, возможно максимально 8 точек разрыва. Однако, точность (эффективность) такого процесса определяется количеством выбранных точек n , причем $n=L-1$, где L – длина отрезка, т.е. количество выделенных дискретных точек. Дискретный интервал [1–8] обозначим L_0 . Реализованный интервал назовем интервалом неопределенности L_H .

Эффективность поиска будет составлять $2L_0/(n+1)$, что приблизительно равно двум. Такой метод деления отрезка пополам для нахождения точки, в которой целевая функция имеет локальный оптимум, называется методом дихотомии.

Приведем укрупненный алгоритм метода дихотомии:

- ◆ получить набор или одно альтернативное решение;
- ◆ ввести границы интервала, параметр ε ;
- ◆ разделить исходный отрезок пополам (при нечетном размере в любую часть берется ближайшее большее число);
- ◆ вблизи точки деления (по разные стороны с наименьшим интервалом) $\varepsilon = 0, 1, 2 \dots$ точки с экстремальным значением целевой функции;
- ◆ каждую половину отрезка снова разделить пополам и процесс расчета продолжать по исходной схеме до тех пор, пока не будет получено наилучшее значение целевой функции или ранее не будет закончено деление на основе заданной метки;
- ◆ конец работы алгоритма.

Целевая функция. Целевая функция программы синтеза НО направлена на решение двух задач: получение требуемого затухания $b_{13\tau} = b_{13k}$ или коэффициента передачи падающей волны со входа 1К в 3К НО: $K_{п.тр} = 10^{-0,05b_{12T}}$ в полосе частот $f_1 \dots f_2$ и минимума КСВ по входу 1К:

$$F_{ц} = V_1 \sum_{f_i=f_1}^{f_n} [S_{13K}(f_i) - K_{п.тр}]^2 + V_2 \sum_{f_i=f_1}^{f_n} [S_{11K}(f_i)]^2, \quad (1)$$

где V_1, V_2 – коэффициенты веса.

Варьируемыми параметрами при определении минимума целевой функции (1) являются коэффициенты связи $k_{св1}, \dots, k_{свk}$ отдельных ступеней. Следует найти такую комбинацию этих параметров при которой обеспечивается получение $\min F_{ц}$ ($k_{св1}, \dots, k_{свk}$).

Поиск глобального минимума $F_{ц}$ целевой функции осуществляется в алгоритме на основе метода перебора путем 3х вложенных друг в друга циклов ДО. предусмотрена возможность синтеза симметричного НО, состоящего из числа ступеней $K=7,5$ или 3 с коэффициентами связи $k_{св5} = k_{св3}, k_{св6} = k_{св2}, k_{св7} = k_{св1}$, каждый из которых меняется по закону:

$$k_{свk} = (C_{Hk} + \Delta C_{шк} MK) K_{п.тр}, \quad (2)$$

где C_{Hk} – начальное значение, $\Delta C_{шк}$ – шаг изменения параметра, $MK=1 \dots KN$ – переменное число, принимающее в цикле ДО значения от 1 до KN .

Все параметры, входящие в (2), устанавливаются пользователем программы, что позволяет проектировать НО с разными значениями переходного затухания в широкой полосе частот. Модули и фазы коэффициентов отражения нагрузок, подключенных к входам 2 и 4 (рис. 1), определяются с помощью полиномов:

$$\begin{aligned} |G_2| &= |G_{2н}| + A_1(f - f_0) + A_2(f - f_0)^2 + A_3(f - f_0)^3, \\ \Phi_2 &= \Phi_{2н} + B_1(f - f_0) + B_2(f - f_0)^2 \\ |G_4| &= |G_{4н}| + D_1(f - f_0) + D_2(f - f_0)^2 + D_3(f - f_0)^3, \\ \Phi_4 &= \Phi_{4н} + T_1(f - f_0) + T_2(f - f_0)^2 + T_3(f - f_0)^3, \end{aligned}$$

где постоянные коэффициенты задаются в исходных данных к программе.

Целевая функция и все остальные параметры, НО рассчитываются при тринадцати значениях частот, равномерно расположенных в заданной полосе. Число частот при необходимости можно увеличить. Длина одной ступени связанных линий устанавливается равной $l_{ст} = RL * \lambda_d/4$, где RL – произвольно выбранный коэффициент.

Эксперимент. Проведем расчет СВЧ ответвителя:

Таблица 1

Пример результата расчета ответвителя

	B3T=10.0	FT=1.5	DF=1.0	E=9.6	H=1.0		
	RL=0.5	BK1=0.8	BK2=0.2	K=5	SH=0.00008		
	CH1=0.1	CP2=0.3	CH3=0.8	CH4=1.2			
	VR2=0.0	A1=0.0	A2=0.0	A3=0.0			
	FH2=0.0	B1=0.0	B2=0.0	B3=0.0			
	VR4=0.0	D1=0.0	D2=0.0	D3=0.0			
	FH4=0.0	T1=0.0	T2=0.0	T3=0.0			
	CT	W	S	Y			
1	0.0474	0.9669	1.6262	9.7484			
2	0.1265	0.9663	0.9530	9.7487			
3	0.3795	0.7775	0.1723	9.8400			
4	0.5060	0.5764	0.0733	9.9572			
5	0.3795	0.7775	0.1723	9.8400			
6	0.1265	0.9663	0.9530	9.7487			
7	0.0474	0.9669	1.6262	9.7484			
	F	B3P	RPMT	RBMT	RXMT	RKCB	RKCX
1	1.0000	10.13622	0.31131	0.0	0.0	1.00	1.00
2	1.0833	9.99836	0.31629	0.0	0.0	1.00	1.00
3	1.1667	9.92232	0.31907	0.0	0.0	1.00	1.00
4	1.2500	9.89422	0.32010	0.0	0.0	1.00	1.00
5	1.3333	9.90085	0.31986	0.0	0.0	1.00	1.00
6	1.4167	9.92949	0.31880	0.0	0.0	1.00	1.00
7	1.500	9.96794	0.31740	0.0	0.0	1.00	1.00
8	1.5833	10.00472	0.31606	0.0	0.0	1.00	1.00
9	1.6667	10.02955	0.31515	0.0	0.0	1.00	1.00
10	1.7500	10.03389	0.31500	0.0	0.0	1.00	1.00
11	1.8333	10.01147	0.31581	0.0	0.0	1.00	1.00
12	1.9167	9.95877	0.31773	0.0	0.0	1.00	1.00
13	2.0000	9.87513	0.32081	0.0	0.0	1.00	1.00

FT и DF – центральная частота и полоса пропускания, в гигагерцах;

B3T и B3P – требуемое и полученное значение затухания НО, в децибелах;

CT(M) – вычислительный коэффициент связи (M=1...7);

W(M), Y(M), S(M) – ширина и длина микрополосковых линий и зазор между ними, в миллиметрах, в отдельных ступенях;

VR2, VR4 – модули коэффициентов отражения Γ_2, Γ_4 нагрузок, подключенных к выходам 2, 4 (рис. 1) на центральной частоте FT;

FH 2, FH 4 – фазы этих коэффициентов, в градусах;

CH1, CH2, CH3, CH 4 – начальное значение параметров, определяющих пределы изменения коэффициентов связи ступеней при поиске.

Представлена модифицированная схема ГА и проведена ее оценка при расчете ступенчатого направленного осветителя на связанных линиях, которая показала эффективность схемы для решения проблем попадания в локальные ямы и преждевременной сходимости. Такая модель вычислений позволяет эффективно решать задачи на многоядерных процессорах.

Заклучение. В статье представлена методика автоматизированного синтеза ступенчатого направленного осветителя на основе ГА, которая дает возможность получить одновременно практически реализуемое схмотехническое решение с учетом особенностей технологии изготовления и первоначальный вариант топологии. Описана программная среда для реализации методики. Представленный пример расчета ступенчатого направленного осветителя подтверждает ее эффективность.

Поддержка. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-37-90151.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Данильченко В.И., Курейчик В.М. Генетический алгоритм планирования размещения СБИС // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2019. – № 2 (204). – С. 75-79.
2. Лебедев Б.К., Лебедев В.Б. Планирование на основе роевого интеллекта и генетической эволюции // Известия ЮФУ. Техническиенауки. – 2009. – № 4 (93). – С. 25-33.
3. Ahmet Karli, Vasfi Emre Omurlu, Utku Buyuksahin, RemziArtar, Ender Ortak. Self tuning fuzzy PD application on TI TMS320F 28335 for an experimental stationary quadrotor. – URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6151404/> (дата обращения 23.04.2017).
4. 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.
5. 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).
6. Горяинов А.Е., Добуш И.М., Бабак Л.И. Построение параметрических моделей пассивных компонентов СВЧ монолитных интегральных схем с использованием программы Extraction-P // Доклады ТУСУР. – С. 94-99.
7. 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).
8. 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.
9. 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.
10. Bocklemann D.E. and Eisenstadt W.R. Combined Differential and Common-Mode Scattering Parameters: Theory and Simulation // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, Vol. MTT-43. – July 1995. – No. 7. – P. 520-523.
11. Kurokawa K. Power Waves and the Scattering Matrix // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. – 1965. – Vol. MTT-13, No. 2. – P. 194-202.
12. 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).
13. 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.
14. 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. Genetic-Algorithm-Based Synthesis of Low-Noise Amplifiers with Automatic Selection of Active Elements and DC Biases, European Microwave Week 2014, Rome, Italy, October. – P. 520-523.
15. 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.

16. Курейчик В.М. Гибридные генетические алгоритмы // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2007. – № 2 (77). – С. 5-12.
17. Кошевой С.Е., Дорофеев С.Ю., Бабак Л.И. Структурный синтез СВЧ-устройств на основе генетического алгоритма в системе автоматизированного проектирования INDESYS // Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участ. «Современные проблемы радиоэлектроники». – Красноярск: СФУ, 2009. – С. 421-424.
18. 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.
19. Запорожец Д.Ю., Кравченко Ю.А., Лежебоков А.А. Способы интеллектуального анализа данных в сложных системах // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. – 2013. – № 3. – С. 52-54.
20. Zhiqiang Yang, Jimin Zhang, Zhongchao Chen, Baoan Zhang. Semi-active control of high-speed trains based on fuzzy PID control // Procedia Engineering. – 2011. – Vol. 15. – P. 521-525.

REFERENCES

1. Danil'chenko V.I., Kureychik V.M. Geneticheskii algoritm planirovaniya razmeshcheniya SBIS [Genetic algorithm for VLSI placement planning], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskienauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2019, No. 2 (204), pp. 75-79.
2. Lebedev B.K., Lebedev V.B. Planirovanie na osnove roevogo intellekta i geneticheskoy evolyutsii [Planning based on swarm intelligence and genetic evolution]. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskienauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2009, No. 4 (93), pp. 25-33.
3. Ahmet Karli, Vasfi Emre Omurlu, Utku Buyuksahin, RemziArtar, Ender Ortak. Self tuning fuzzy PD application on TI TMS320F 28335 for an experimental stationary quadrotor. Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6151404/> (accessed 23 April 2017).
4. 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 TUSUR* [Proceedings of TUSUR University]. Dekabr' 2012, No. 2 (26), Part 2, pp. 104-112.
5. 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).
6. Goryainov A.E., Dobush I.M., Babak L.I. Postroenie parametricheskikh modeley passivnykh komponentov SVCh monolitnykh integral'nykh skhem s ispol'zovaniem programmy Extraction-P [Construction of parametric models of passive components of monolithic microwave integrated circuits using the Extraction-P program], *Doklady TUSUR* [Proceedings of TUSUR University], pp. 94-99.
7. 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)*.
8. 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.
9. Kokolov A.A., Dobush I.M., Sheerman 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. «EKБ 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.
10. Bocklemann D.E. and Eisenstadt W.R. Combined Differential and Common-Mode Scattering Parameters: Theory and Simulation, *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, Vol. MTT-43*, July 1995, No. 7, pp. 520-523.

11. *Kurokawa K.* Power Waves and the Scattering Matrix, *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, 1965, Vol. MTT-13, No. 2, pp. 194-202.
12. *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).
13. *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.
14. *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. Genetic-Algorithm-Based Synthesis of Low-Noise Amplifiers with Automatic Selection of Active Elements and DC Biases, European Microwave Week 2014, Rome, Italy, October*, pp. 520-523.
15. *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.
16. *Kureychik V.M.* Gibridnye geneticheskie algoritmy [Hybrid genetic algorithms], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskienauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2007, No. 2 (77), pp. 5-12.
17. *Koshevoy S.E., Dorofeev C.Yu., Babak L.I.* Strukturnyy sintez SVCh-ustroystv na osnove geneticheskogo algoritma v sisteme avtomatizirovannogo proektirovaniya INDESYS [Structural synthesis of microwave devices based on a genetic algorithm in the computer-aided design system INDESYS], *Vseros. nauch.-tekh. konf. s mezhdunar. uchast. «Sovremennye problemy radioelektorniki»* [All-Russian scientific and technical conference with international participation "Modern problems of Radioelectronics"]. Krasnoyarsk: SFU, 2009, pp. 421-424.
18. *Kokolov A.A., Dobush I.M., Sheerman 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.
19. *Zaporozhets D.Yu., Kravchenko Yu.A., Lezhebokov A.A.* Sposoby intellektual'nogo analiza dannykh v slozhnykh sistemakh [Methods of data mining in complex systems], *Izvestiya Kabardino-Balkarskogo nauchnogo tsentra RAN* [Izvestiya Kabardino-Balkar scientific center of the Russian Academy of Sciences], 2013, No. 3, pp. 52-54.
20. *Zhiqiang Yang, Jimin Zhang, Zhongchao Chen, Baoan Zhang.* Semi-active control of high-speed trains based on fuzzy PID control, *Procedia Engineering*, 2011, Vol. 15, pp. 521-525.

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

Данильченко Евгения Владимировна – Южный Федеральный университет; e-mail: lipkina@sfedu.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: +79525691761; кафедра САПР.

Данильченко Владислав Иванович – e-mail: vdanielchenko@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; 44, Nekrasovsky lane, Taganrog, 347928, Russia; phone: +79525691761; the department of computer-aided design; postgraduate.

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

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