

Программный комплекс структурного синтеза, анализа и параметрической оптимизации радиотрактов

Р. Р. Вишняков, О. В. Тихонова

Аннотация—В работе рассматривается реализация программного комплекса структурного синтеза, анализа и параметрической оптимизации линейных трактов приемных и передающих устройств. Основной описываемого программного комплекса является алгоритм, также представленный в работе. Разработанный программный комплекс предназначен для использования как дополнительный инструмент проектирования линейных трактов. В работе рассмотрены основные функциональные возможности и недостатки современных САПР, предназначенных для моделирования и проектирования линейных трактов приемных и передающих устройств. Такие САПР могут применяться при эвристическом инженерном методе проектирования. В отличие от ряда существующих современных САПР разработанный программный комплекс объединяет в себе возможности решения системотехнических и схмотехнических задач. В частности, в программе реализован синтез структурных схем линейных трактов. Основой для синтеза является адаптивная база функциональных узлов, включающая в себя набор элементов и схмотехнических решений. Автоматизированный синтез позволяет найти наиболее оптимальное структурно-элементное построение тракта. Также реализована параметрическая оптимизация узлов проектируемого линейного тракта. Параметрическая оптимизация, относящаяся к схмотехническому уровню проектирования, в описываемом алгоритме производится по критериям системотехнического уровня проектирования. Данное обстоятельство обуславливает взаимосвязь различных уровней проектирования. Корректность предложенного алгоритма подтверждается результатами работы программы, разработанной на его основе на языке MATLAB. Приведен пример расчета линейного тракта приемного модуля радиолокационного назначения.

Ключевые слова— программный комплекс, система автоматизированного проектирования, радиотракт, СВЧ-модуль.

I. ВВЕДЕНИЕ

Современный уровень развития радиотехнических

Статья получена 15 февраля 2020.

Вишняков Рустам Рустамович, аспирант каф. Радиоэлектронные системы и комплексы МИРЭА – Российского технологического университета (РТУ МИРЭА), (Vishn9-r@yandex.ru)

Тихонова Ольга Вадимовна, д.т.н., с.н.с., проф. каф. Радиоэлектронные системы и комплексы МИРЭА – Российского технологического университета (РТУ МИРЭА) (o_tikhonova@inbox.ru)

устройств во многом обусловлен появлением эффективного инструмента проектирования – радиотехнических САПР. Подобные САПР позволяют решать широкий спектр задач – от уровня разработки устройств электроники до системного уровня. При проектировании приемных и передающих устройств, в частности линейных трактов, наиболее существенным представляется применение программных пакетов схмотехнического и системотехнического расчета. Такая задача остается актуальной, поскольку при складывающейся тенденции в подходе к проектированию радиоэлектронных устройств и систем, заключающаяся в функциональном разделении приемных и передающих устройств на аналоговую и цифровую части, немалая часть результирующих характеристик определяется аналоговой частью – линейным трактом. При этом современная номенклатура базы электронных компонентов весьма обширна, что обеспечивает большое количество схмотехнических и функциональных вариантов структурного построения. Учитывая обширный комплекс требований, предъявляемых к приемным и передающим модулям при проектировании современных радиоэлектронных систем и комплексов, большую вариативность структурной и схмотехнической реализаций линейных трактов на этапе системотехнического проектирования, возникает необходимость наиболее оптимальным образом удовлетворяя всем требованиям разработать структурную схему, выбрать для применения элементную базу и схмотехнические решения. Таким образом можно выделить следующие основные задачи, стоящие перед разработчиком на этапе системотехнического проектирования:

1. выбор подходящей элементной базы;
2. синтез структурной схемы линейного тракта;
3. расчет результирующих характеристик;
4. анализ результирующих характеристик;
5. параметрическая оптимизация или структурно-элементное изменение тракта.

Такая задача на практике носит итерационный характер – на этапе разработки структурного построения разработчиком может уточняться применяемая электронная номенклатура, и наоборот, при уточнении применяемой компонентной базы и схмотехнических решений могут вноситься изменения в структурную

схему.

II. ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ САПР

Современные САПР позволяют решать все перечисленные задачи весьма эффективно. Например, пакеты Microwave Office программы AWR DE позволяют производить схемотехническое проектирование, а пакет VSS позволяет производить схемотехническое моделирование и расчет основных характеристик линейного тракта [1]. Пакет схемотехнического уровня представляет собой среду моделирования, в которой модель линейного тракта представляет собой набор связанных функциональных узлов. Для обеспечения большей универсальности среды моделирования узлы тракта представляют собой унифицированные блоки, что позволяет воспроизводить в виде модели большинство из существующих элементов. Однако это влечет за собой сложность, заключающуюся в том, что параметры, которые можно регулировать и задавать у отдельного узла, ограничены стандартным набором. Это обстоятельство не позволяет учесть отсутствующие в модели характеристики или более сложные математические зависимости характеристики узла, например, нелинейные зависимости, зависимости в виде функции многих переменных или многофункциональной зависимости. Как следствие, ряд характеристик линейного тракта в целом не поддается расчету. Также в данном пакете невозможен расчет структурный синтез схемы по заданным параметрам.

Пакет схемотехнического моделирования позволяет производить расчет основных характеристик, требуемых для расчета результирующих характеристик тракта (коэффициент передачи, коэффициент шума, ВГЛАХ и пр.). Кроме того, пакет схемотехнического уровня позволяет производить оптимизацию характеристик. Однако поскольку при оптимизации характеристик необходимо учитывать их влияние на тракт в целом, данную оптимизацию целесообразно проводить на схемотехническом уровне для конкретных выбранных структурного построения и элементной базы. Данное обстоятельство вызвано тем, что оптимизация характеристик при одном структурном построении может оказаться неудовлетворительной при другом. Иными словами, критерии оптимизации характеристик узлов должны формироваться на основе схемотехнического моделирования тракта, в котором они функционируют.

Аналогом САПР AWR DE является программа ADS и программа Genesys компании Keysight Technologies. Обе программы имеют вышеописанные уровни проектирования, схожие достоинства и недостатки.

На основании вышеизложенного краткого рассмотрения возможностей и недостатков современных САПР можно сформулировать ряд требований к разрабатываемому программному комплексу, удовлетворение которых стало бы отличительным преимуществом разрабатываемого ПО перед современными аналогичными САПР при

схемотехническом моделировании линейных трактов приемных и передающих устройств. Первой отличительной функциональной возможностью в разрабатываемом программном комплексе должна стать возможность автоматизированного синтеза структурной схемы, в том числе несколькими ветвями тракта, обеспечивающие один и или несколько входов/выходов схемы, с отдельными требованиями и критериями построения на каждую ветвь, на основе базы данных функциональных узлов. Таковыми узлами могут быть как отдельные элементы (усилители, фильтры, и пр.) так и их связи (двухканальный умножитель частоты + сумматор мощности, квадратурный смеситель + фазовращатель [2]). Наличие базы данных, обновляемых автоматически, например – с помощью данных с сайта производителя, обеспечит решение двух задач, стоящих перед разработчиком – учет максимально возможного объема элементной базы для поиска наиболее оптимального элементного состава в условиях наличия множества аналогов и поиск подходящей элементной базы для замены функционального узла в уже разработанной схеме по причине оптимизации определенного узла, по причине модернизации существующих устройств в связи со снятием с производства заданного функционального узла линейного тракта и т.д. Такая возможность автоматизированного выбора элементной базы, при которой осуществляется привязка схемотехнического уровня проектирования к актуальной и непрерывно обновляемой производителями базе данных является следующей отличительной чертой. Математические модели физических характеристик таких элементов на системном уровне зачастую представляют собой набор S-параметров в статическом режиме, без учета влияния других параметров того же функционального узла или смежных элементов, поэтому наличие более сложной математической модели, учитывающей многопараметрическую и многофункциональную взаимосвязи параметров элементов, функционирующие в тракте, их взаимовлияние, статистический характер параметров элементов позволит улучшить точность моделирования, его эффективность. Данная возможность – следующая отличительная черта предлагаемого ПО. Поскольку характеристики во многих функциональных узлах радиотрактов могут быть переменными, на этапе расчета системных характеристик может быть необходима схемотехническая (параметрическая) оптимизация с целью удовлетворения системным требованиям к радиотракту по заданным критериям оптимальности. После выбора элементной базы и параметрической оптимизации для заданного структурного построения необходимо произвести расчет результирующих характеристик радиотракта. С учетом множества вариантов реализации линейного тракта и большого количества анализируемых характеристик сравнение вариантов и выбор структурно-элементной реализации может осложнить проектирование. В разрабатываемом программном комплексе решение такой задачи должно быть автоматизировано с учетом

задаваемых пользователем требований, приоритетов и критериев к характеристикам проектируемого тракта. Для этой цели необходима формализация и обоснование критерия выбора структурно-элементной реализации линейного тракта.

В совокупности вышеописанных особенностей разрабатываемого программного комплекса проявляется взаимосвязь схмотехнического и системотехнического уровней моделирования и является преимуществом перед современными существующими САПР.

III. РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА

При составлении блок-схемы алгоритма разрабатываемого программного комплекса, направленного на решение задач системотехнического и схмотехнического моделирования, необходимо реализовать следующие задачи:

1. возможность синтеза структурной схемы (в т.ч. со множеством ветвей) по совокупности критериев;
2. учет современной элементной и схмотехнической базы;
3. учета многокритериальной зависимости;
4. возможность параметрической оптимизации;
5. возможность автоматизированной оценки варианта структурного построения и выбора наиболее оптимального решения.

В [3] для реализации программного комплекса, обладающего вышеописанными возможностями и решающий поставленные задачи, предлагается алгоритм структурного синтеза, расчета и параметрической оптимизации, представленный четырьмя последовательно реализуемыми программными блоками. Блок-схема данного алгоритма, составляющего основу описываемого ПО, представлена на рис. 1.

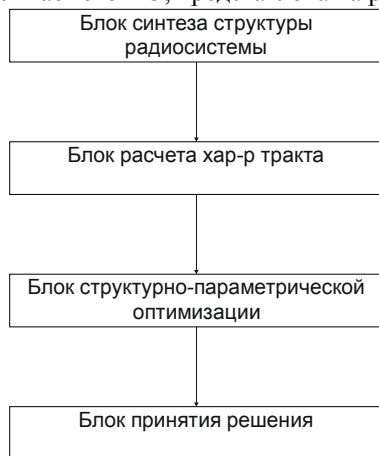


Рис. 1. Блок-схема алгоритма

В [3] приведено описание реализации каждого из блоков алгоритма, представленного блок-схемой на рис.1. В [4] приведено описание практической реализации блоков «Блок расчета характеристик тракта» и «Блок структурно-параметрической оптимизации» (рис. 1). В данных блоках реализуются одни из основных функций разрабатываемого программного комплекса – функции расчета характеристик радиотракта и параметрической оптимизации. В данном блоке программы должна быть заложена

математическая модель, позволяющая учесть многопараметрическую, многофункциональную зависимость параметров функциональных узлов тракта, а также статистический характер данных параметров. Такая математическая модель, являющаяся основой расчета, позволит улучшить точность моделирования по сравнению с существующими САПР и позволит снизить сопутствующие издержки при разработке проектируемых модулей, связанных с отклонением значения характеристик радиотракта от расчетных, в т.ч. при изменении внешних условий. Основными рассчитываемыми характеристиками, рассчитываемыми в данном блоке разрабатываемого программного комплекса, являются параметры, представленные в табл. 1.

Таблица 1. Основные рассчитываемые параметры

Обозначение	Параметр	Единица измерения
G	коэффициента усиления тракта;	дБ
NF	коэффициент шума тракта;	дБ
df	полоса пропускания промежуточной частоты;	МГц
dG	неравномерность коэффициента передачи	дБ
OP1db	однодецибелльная точка компрессии	дБм
OIP3	точка пересечения интермодуляции 3-го порядка по выходу	дБм
Pn	уровень собственных шумов	дБм/Гц
U	напряжение питания	В
I	ток потребления	А

В [4] также приведено описание реализации параметрической оптимизации с помощью метода покоординатного спуска и векторной оптимизации с помощью метода свертки критериев. В разрабатываемом ПО для устранения случая поиска локального оптимума реализованы метод Монте-Карло, для улучшения точности – метод статистического градиента. Для проверки корректности работы алгоритмов программы реализован поиск оптимума методом полного перебора с заданным малым шагом.

Согласно рассматриваемому алгоритму построения ПО (рис. 1) также необходимо реализовать «Блок синтеза структуры» и «Блок принятия решения».

Блок синтеза структуры представляет собой часть программы, в которой по заданным пользователем требованиям к схеме, на основе имеющейся элементной и схмотехнической базы, реализуется синтез структуры. Требования к схеме включают в себя требования к электрическим параметрам, технологическим (вид корпусов применяемой элементной базы, габариты), критерии оптимальности для оптимизации и принятия решения. Кроме того, на данном этапе пользователем может задаваться и сама

структурная схема для решения задач анализа либо параметрической и/или схемной оптимизации. База данных элементов должна корректироваться автоматически в зависимости от вида проектируемого устройства – передающий/приемный модуль, вид приемного/передающего устройства. Иными словами, база данных элементов должна быть адаптивной по отношению к решаемой задаче – при проектировании приемника прямого усиления нет необходимости учета смесителей, при проектировании супергетеродинных приемников с двукратным преобразованием наоборот – следует учесть к применению 2 смесителя различных диапазонов и т.д. Корректировка объема элементной базы наряду с ограничениями, накладываемыми на синтезируемую структурную схему по критериям физической реализуемости и целесообразности применения элементной базы и схемных решений позволяют уменьшить объем требуемых вычислений, ускорить работу программы и сформировать корректные структурные схемы для дальнейшего анализа и расчета.

Блок принятия решения в рассматриваемом алгоритме построения программного комплекса синтеза, анализа и оптимизации радиотрактов является заключительной частью. Он основан на комбинации методов векторной оптимизации: комбинации метода свертки критериев и метода уступок, а также комбинации метода свертки критериев и метода наименьших относительных отклонений и решает задачу выбора структурного построения, элементной базы, оптимального значения характеристик выбранных элементов на основе проведенных расчетов характеристик тракта и заданных пользователем критериев. В [4] приведено описание практической реализации метода векторной оптимизации – метода свертки критериев.

Обобщая вышеизложенные выводы, а также выводы, сделанные в [3,4], можно сформировать алгоритм для реализации программы синтеза, анализа и оптимизации радиотрактов. Алгоритм представлен блок-схемой, изображенной на рис. 2.

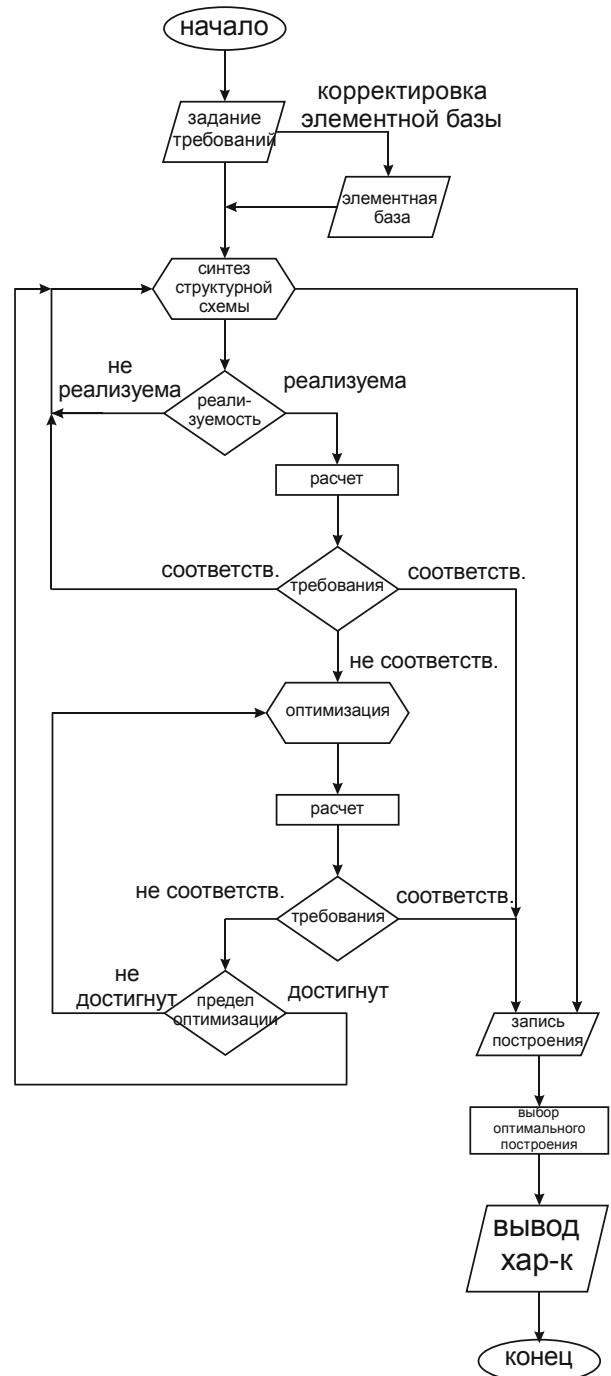


Рис. 2. Блок-схема разрабатываемого программного комплекса.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

Для проверки корректности алгоритма, представленного блок-схемой на рис. 2, на языке MATLAB была реализована программа синтеза, анализа и оптимизации линейных трактов. Работа программы рассмотрена на примере синтеза и анализа линейного тракта приемного модуля радиолокационного назначения. Основные требования, предъявляемые к разрабатываемой схеме, представлены в таблице 4.

Синтез схемы осуществлялся из ряда элементов, представленных в таблице 2.

№ п/п	Элемент	Парам-р	Знач.	Температурный коэффициент

1	CMD157P 3	G, dB	26	-0.025 dB/°C
		OP1, dBm	10,4	-0.008 dB/°C
		OIP3, dBm	22,25	-0.0033 dB/°C
		OIP2, dBm	32	-0.0033 dB/°C
		NF, dB	1,5	0.008 dB/°C
		S11	-14	-0,04 dB/°C
		S22	-14	-0,04 dB/°C
2	HMC8191	G, dB	-8,5	-0.006 dB/°C; -0.16 dB/dBm,
		OP1, dBm	6,5	0.004 dB/°C; -0.5 dB/dBm
		OIP3, dBm	25,1	0.003 dB/°C; ±0.41 dB/dBm
		OIP2, dBm	62,5	0.033 dB/°C -2.16 dB/dBm
		NF, dB	8,5	0.006 dB/°C; 0.16 dB/dBm,
		ImagRej	21	0.33 dB/dBm
		S11 RF	-26	0.013 dB/°C; 0.33 dB/dBm
		S22 IF	18	0.08 dB/°C; -2.16 dB/dBm
3	AG201-63	G, dB	11.4	-0.004 dB/°C
		OP1, dBm	6.25	0.023 dB/°C
		OIP3, dBm	19,25	0,03 dB/°C
		OIP2, dBm	25,5	0,02 dB/°C
		NF, dB	4,25	0,01 dB/°C
		S11	-14	-0,04 dB/°C
		S22	-14	-0,04 dB/°C
4	AG302-86	G, dB	16	-0,004 dB/°C
		OP1, dBm	13	0,013 dB/°C
		OIP3, dBm	26	0,013 dB/°C
		OIP2, dBm	36	0,013 dB/°C
		NF, dB	3,2	0,007 dB/°C
		S11	-26	0.013 dB/°C; 0.33 dB/dBm
		S22	18	0.08 dB/°C; -2.16 dB/dBm
5	LC-filter	G, dB	-1	
6	Switch	G, dB	-1	-0,0026 dB/°C
7	Attenuator	G,	9,67	0,034 dB/°C
8	HMC441	G, dB		
		OP1, dBm	20,5	0,006 dB/°C
		OIP3, dBm	30,5	0,004 dB/°C
		OIP2, dBm	40,5	0,004 dB/°C
9	HMC903L P3	G, dB	18	0,012 dB/°C

		OP1, dBm	14	-0.007 dB/°C
		OIP3, dBm	25	-0.0035 dB/°C
		OIP2, dBm	35	-0.0035 dB/°C
		NF, dB	1,7	0.008 dB/°C
10	HMC1113	G, dB	12	-0.005 dB/°C; -0.18 dB/dBm,
		OP1, dBm	-7	0.0038 dB/°C; -0.45 dB/dBm
		OIP3, dBm	13	0.0031 dB/°C; ±0.45 dB/dBm
		OIP2, dBm	23	0.04 dB/°C -2.2 dB/dBm
		NF, dB	1,8	0.0065 dB/°C; 0.18 dB/dBm,
		ImagRej	25	0.35 dB/dBm
11	TC1-1+	G, dB	-0,2	-0.001 dB/°C

Математические выражения, по которым производился расчет характеристик, перечисленных в таблице 3 можно найти в [5,6].

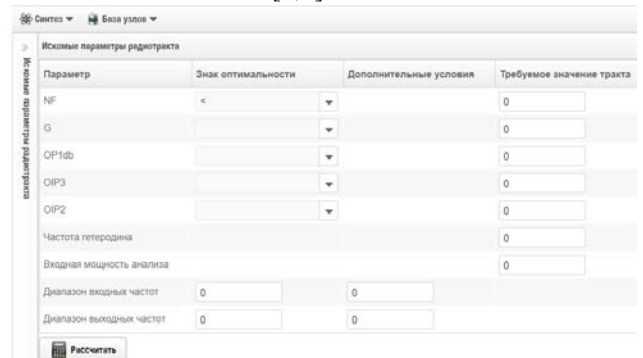


Рис. 3. Фрагмент интерфейса программы синтеза, анализа и оптимизации радиотрактов

Для реализации схемы были использованы следующие физические ограничения:

Запрет на использование класса элемента больше определенного количества раз: МШУ – не более 2 раз; смеситель – не более 1 раза; фильтры – 5 раз; аттенюаторы – 2 раза.

Запрет на определенное позиционирование элементов определённых классов: смеситель перед МШУ; УПЧ перед смесителем, МШУ; аттенюатор перед МШУ; аттенюатор после аттенюатора.

Запрет на последовательное включение элементов одного класса больше определенного количества раз: усилители – 3 раза; аттенюаторы – 1 раз; фильтры – 4 раза; МШУ – 2 раза; УПЧ – 4 раза.

По результатам работы программы было получено несколько вариантов структурного построения линейного тракта. Структурные построения приведены в табл. 3 где в качестве функциональных узлов тракта используются порядковые номера элементов из табл. 2.

уровням проектирования – системотехническому и схемотехническому и представленных отдельно в пакетах системотехнического и схемотехнического моделирования соответственно. На примере синтеза и расчета линейного тракта приемного модуля показана корректность работы алгоритма и эффективность программы, получена схема, расчетные характеристики которой полностью удовлетворяют предъявляемым требованиям.

БИБЛИОГРАФИЯ

- [1] Разевиг В. Д., Потапов Ю. В., Курушин А.А. Проектирование СВЧ-устройств с помощью Microwave Office. М.СОЛОН-Пресс, 2003, - 496 с.
- [2] Natsuoka M., Utsurogi Y., Matsuoka T., Taniguchi K. A Dual-band Image-reject Mixer for GPS with 64dB Image Rejection // Proc. IEEE Topical Conference on Wireless Communication Technology, Oct. 2003.
- [3] Вишняков Р. Р. Алгоритм структурно-параметрического синтеза радиотехнической системы. // Системы компьютерной математики и их приложения: материалы XX Международной научной конференции. Смоленск. 17-19 мая 2019 г. – Смоленск: Изд-во СмолГУ. 2019. – Вып. 20 – 423с.
- [4] Вишняков Р. Р. Программный комплекс расчета и оптимизации радиотрактов. // Сборник научных статей по материалам IV Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем» («Радиоинфоком-2019»). Москва. 13 ноября 2019 г. – М.: МИРЭА – Российский технологический университет. 2019. – 575с.
- [5] Grebennikov A. RF and microwave transmitter design / A. Grebennikov – Ed. K. Chang. Hoboken, New Jersey: Wiley, 2011. p. 816.
- [6] Qizheng G. RF system design of transceivers for wireless communications. – New York: Springer Science+Business Media, USA, 2005. – 474 p.
- [7] Программа структурного синтеза, анализа и параметрической оптимизации RF Systems Designer: [сайт]. URL: <http://rfsystemsdesigner.com>

Software for synthesis, analysis and optimization of RF circuits

R. R. Vishnyakov, O.V. Tikhonova

Abstract - The paper is devoted to considering the implementation of software for structural synthesis, analysis and parametric optimization of RF blocks of receiving and transmitting devices. The paper considers the main functionalities and disadvantages of modern CAD systems designed for modeling and designing RF blocks of receiving and transmitting devices. Unlike a number of existing modern CAD systems, the developed software package combines the capabilities of solving system level and circuit level problems. In particular, the program implements the synthesis of structural schemes of RF blocks. The basis for the synthesis is the adaptive base of functional units, which includes a set of elements and circuitry solutions. Automated synthesis allows finding the most optimal structural and element RF construction. Parametric optimization of the functional units of the designed RF blocks is also implemented. Parametric optimization related to the circuit design level in the described algorithm is performed according to the criteria of the system design level. This circumstance determines the interconnection of various levels of design. The correctness of the proposed algorithm is confirmed by the results of the program developed on its basis in the MATLAB language. An example of calculating the RF block is given.

Keywords-Software, computer-aided design system, RF circuit, RF module.

REFERENCES

- [1] Razevig V. D., Potapov Ju. V., Kurushin A.A. Proektirovanie SVCh-ustrojstv s pomoshh'ju Microwave Office. M.SOLON-Press, 2003, - 496 s.
- [2] Haruoka M., Utsurogi Y., Matsuoka T., Taniguchi K. A Dual-band Image-reject Mixer for GPS with 64dB Image Rejection // Proc. IEEE Topical Conference on Wireless Communication Technology, Oct. 2003.
- [3] Vishnjakov R. R. Algoritm strukturno-parametricheskogo sinteza radiotekhnicheskoy sistemy. // Sistemy komp'yuternoj matematiki i ih prilozheniya: materialy XX Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii. Smolensk. 17-19 maja 2019 g. – Smolensk: Izd-vo SmolGU. 2019. – Vyp. 20 – 423s.
- [4] Vishnjakov R. R. Programmnyj kompleks rascheta i optimizacii radiotraktov. // Sbornik nauchnyh statej po materialam IV Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Aktual'nye problemy i perspektivy razvitija radiotekhnicheskikh i infokommunikacionnyh sistem» («Radioinfokom-2019»). Moskva. 13 nojabrja 2019 g. – M.: MIRJeA – Rossijskij tehnologicheskij universitet. 2019. – 575s.
- [5] Grebennikov A. RF and microwave transmitter design / A. Grebennikov – Ed. K. Chang. Hoboken, New Jersey: Wiley, 2011. p. 816.
- [6] Qizheng G. RF system design of transceivers for wireless communications. – New York: Springer Science+Business Media, USA, 2005. – 474 p.
- [7] Programma strukturnogo sinteza, analiza i parametricheskoy optimizacii RF Systems Designer: [sajt]. URL: <http://rfsystemsdesigner.com>