

# ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРИЕМНОГО СВЧ-МОДУЛЯ

DOI: 10.36724/2072-8735-2020-14-5-35-45

**Вишняков Рустам Рустамович,**  
Российский технологический университет (РТУ МИРЭА),  
Москва, Россия, [Vishn9-r@yandex.ru](mailto:Vishn9-r@yandex.ru)

**Ключевые слова:** программный комплекс,  
система автоматизированного проектирования,  
радиотракт, СВЧ-модуль, метод  
проектирования

Рассматривается системотехнический этап проектирования приемного СВЧ-модуля радиолокационного назначения. Проведено сравнение результатов моделирования и расчетов, полученных с помощью двух различных программ – программного комплекса структурного синтеза, анализа и параметрической оптимизации (RF Systems Designer) и пакета VSS программы AWR DE. Отличительной особенностью программного комплекса RF Systems Designer является наличие возможности автоматического синтеза и параметрической оптимизации структурных схем линейного тракта. В работе рассматриваются два различных метода проектирования линейных трактов. Первым методом проектирования является инженерный эмпирический метод с использованием современных САПР. Вторым методом проектирования основан на применении описываемого программного комплекса. Целью работы является подтверждение корректности реализованных в программном комплексе алгоритмов структурного синтеза, параметрической оптимизации и принятия решения, математических моделей, соотношений и формул путем сравнения результатов, полученных различным путем. Показана корректность результатов расчетов программного комплекса путем сравнения с результатами расчетов в программе AWR DE. Показано, что при использовании описанного программного комплекса, благодаря реализованным в нем методам и алгоритмам синтеза и анализа, экономия времени принятия решения о выборе элементного, схемного и структурного построения составляет три порядка.

#### Информация об авторе:

**Вишняков Рустам Рустамович,** аспирант каф. Радиоэлектронные системы и комплексы МИРЭА – Российского технологического университета (РТУ МИРЭА), Москва, Россия

#### Для цитирования:

Вишняков Р.Р. Проектирование приемного СВЧ-модуля // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2020. Том 14. №5. С. 35-45.

#### For citation:

Vishnyakov R.R. (2020) Design of receiver RF module part. *T-Comm*, vol. 14, no.5, pp. 35-45. (in Russian)

С развитием электроники, вычислительных средств, алгоритмов обработки усиливается тенденция к функциональному разделению приемных и передающих устройств на две части – аналоговую и цифровую. Многие задачи передачи, приема и обработки радиосигналов в современных радиосистемах лучше и проще решаются в цифровом виде (детектирование, эквалайзинг, адаптивная фильтрация и др.). Многие свойства приемников/передатчиков определяются характеристиками линейного тракта: чувствительность по основному каналу приема/выходная мощность, избирательность по основному каналу приема/уровень внеполосного излучения, рабочие частотный и динамический диапазоны и др. Таким образом, построение линейного тракта и совершенствование его характеристик является важной и актуальной задачей при проектировании современных приемных и передающих устройств радиоэлектронных систем.

На сегодняшний день уровень развития электроники предоставляет разработчикам большую вариативность элементной, схемотехнической и структурной реализации линейных трактов. В тоже время с ростом сложности современных радиоэлектронных комплексов увеличивается количество нормируемых параметров. Поэтому проектирование структурной схемы, удовлетворяющей совокупности требований технического задания наиболее оптимальным образом при наличии большого количества вариантов элементной, схемной и структурной реализаций представляется трудоемким, а отсутствие критериев оптимальности и формализации способов проектирования осложняет процесс построения, анализа и сравнения различных структурных схем линейных трактов.

Для решения вышеописанной задачи можно использовать программный комплекс структурного синтеза, анализа и параметрической оптимизации [1] (RF Systems Designer), который позволяет автоматически синтезировать и выбрать наиболее оптимальную схему по заданным пользователем критериям оптимальности. Применение данной программы далее рассмотрено на примере разработки линейного тракта приемного модуля радиолокационного назначения двумя способами – с помощью пакета VSS программы AWR DE и с помощью программного комплекса RF Systems Designer.

### Расчет схемы с помощью программы AWR DE

В таблице 1 представлены требования к электрическим характеристикам проектируемого линейного тракта супергетеродинного приемника радиолокационного назначения.

Для определения структурной схемы радиотракта необходимо определить элементный состав и схемные решения. Одновременное решение задачи определения структурного облика и элементного состава является достаточно сложным процессом, в основном осуществляется инженерным интуитивным и эвристическим методами и напрямую определяется опытом разработчика. При выборе определенной элементной базы и составлении из нее структурной схемы ряд ее параметров может не удовлетворять требованиям технического задания. Поэтому может потребоваться корректировка элементной базы, схемных решений, что в свою очередь может привести к необходимости корректировки или изменения структурной схемы.

### Требуемые электрические характеристики линейного тракта

Параметр	Требуемое значение	
	Не менее	Не более
Диапазон рабочих частот $f_H - f_B$ , ГГц	14	14,5
Коэффициент передачи G, дБ	32,5	32,5
Коэффициент шума NF, дБ		5
Полоса фильтра промежуточной частоты по уровню минус 3 дБ $\Delta f$ , МГц	40	10
Неравномерность коэффициента передачи по частоте $\Delta G$ , дБ		2
Избирательность по зеркальному каналу приема в полосе ПЧ, дБ	20	
Верхняя граница линейности амплитудной характеристики по выходу (по компрессии 1дБ) OIP1дБ, дБм	Минус 21	
Точка пересечения интермодуляции 3-го порядка по выходу OIP3, дБм	25	
Точка пересечения интермодуляции 2-го порядка по выходу OIP2, дБм	35	
Уровень собственных шумов $P_{noise}$ , дБм/Гц		Минус 100
Напряжение питания U, В		5
Ток потребления I, мА		1000
Частота гетеродина $f_{LO}$ , ГГц	14,075	14,575
Входная мощность сигнала гетеродина $P_{LO}$ , дБм	15	2

Решение задачи структурного синтеза является итеративным: первым шагом является анализ элементной базы и возможных схемных решений на предмет возможности построения схемы, удовлетворяющей требованиям технического задания, вторым шагом является составление структурной схемы из выбранных элементов и схемных решений, третьим шагом является анализ характеристик полученной схемы радиотракта и корректировка элементного состава и/или структурного построения. При этом можно выделить два способа проектирования линейного тракта:

1. Эскизное проектирование структуры тракта, оценка требований к каждому элементу и поиск элементной базы (метод от общего к частному);

2. Поиск ключевых элементов тракта и дополнение выбранных функциональных узлов недостающими узлами таким образом, чтобы характеристики линейного тракта удовлетворяли предъявляемым требованиям (метод от частного к общему).

Поскольку процесс разработки схемы итеративен при использовании любого из подходов проектирования, для первой итерации всегда необходимо определить первое приближение или начальные условия. При первом подходе начальным приближением может стать структурная схема, составленная исходя из схем-аналогов, функционально схожих схем. При втором подходе начальным условием могут быть функциональные узлы, чьи характеристики наименее или наиболее значимы, а, следовательно, данные функциональные узлы могут быть заложены в схему уже в самом начале ее проектирования.

В соответствии со вторым описанным методом проектирования была подобрана современная элементная база и составлена схема, представленная на рис. 1.

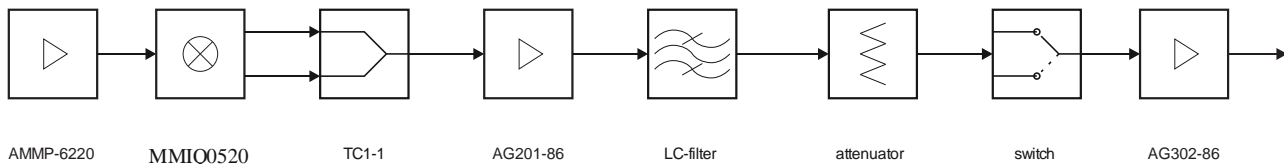


Рис. 1. Структурная схема, полученная с помощью эмпирического инженерного метода

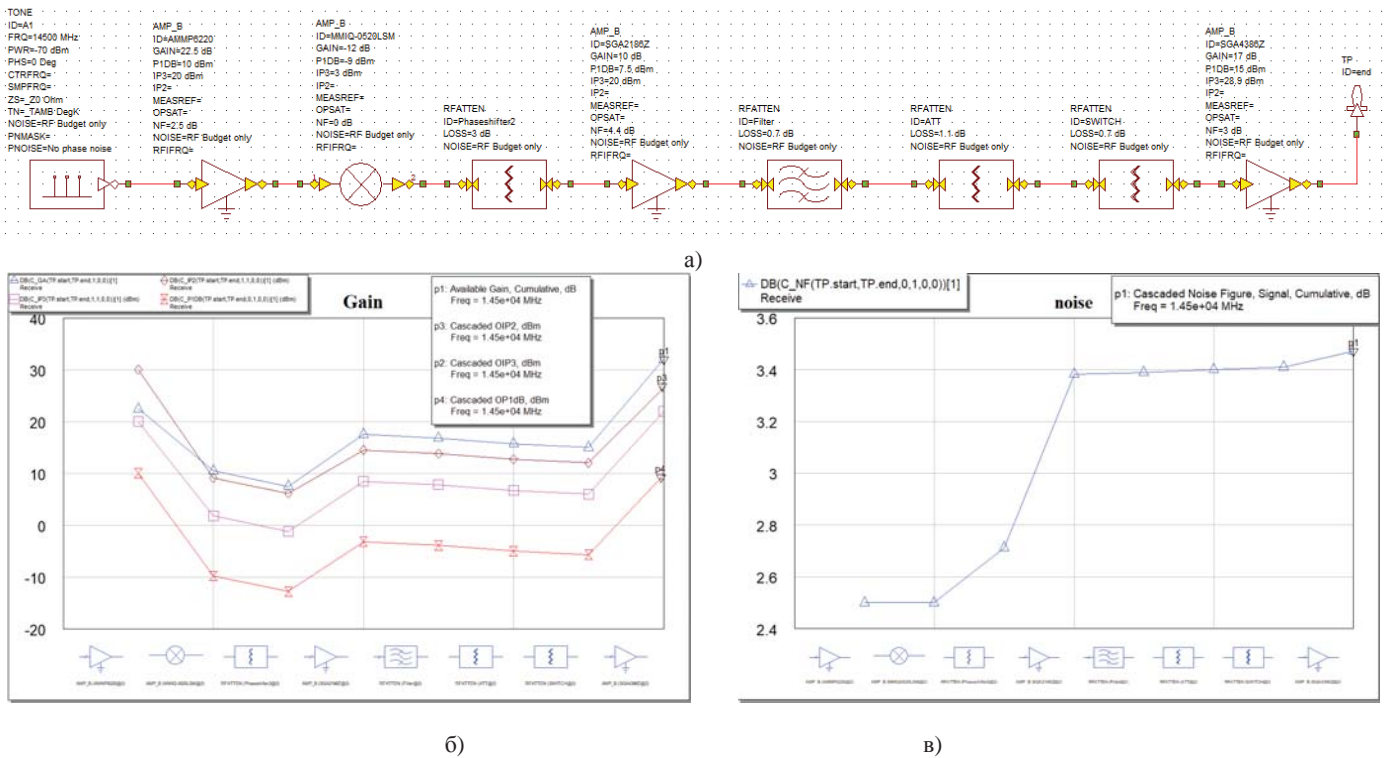


Рис. 2. Результаты расчета схемы в программе AWR DE: а) рассчитываемая схема; б) значения параметров G, OP1dB, OIP2, OIP3; в) значение параметра NF

Результаты расчетов, полученных с помощью современной САПР, приведены на рис. 2 и в табл. 5 [2].

Представленный классический подход к проектированию схемы является трудоемким, требует анализа множества, в т. ч. промежуточных, вариантов построения схем, требует учета совокупности характеристик и большого количества элементной базы на каждом этапе. При любом из подходов к проектированию – от частного к общему или от общего к частному, метод инженерного подбора схемы очень чувствителен к начальным условиям, поскольку неправильная оценка начальной структурной схемы при первом методе, или задание неправильных требований к характеристикам ключевых элементов при использовании второго метода может привести к нереализуемости схемы, что потребует повторного цикла проектирования с другими начальными условиями. Другими словами, неправильный выбор начальных условий – выбор структурной схемы или выбор наиболее/наименее значимых элементов, полностью определяемых опытом разработчика, может привести к отсутствию сходимости у итеративного процесса проектирования линейного тракта. Под сходимостью в данном случае понимается составление схемы, удовлетворяющей требованиям

технического задания. При этом отсутствие формальных критериев не позволяет говорить о рациональности принятых решений, выбранной элементной базе, вида структурного построения и их оптимальности, а, следовательно, об оптимальности результирующих характеристик линейного тракта.

В программе RF Systems Designer синтез структурных схем выполняется автоматически с учетом критериев оптимизации и принятия решения, определяемых пользователем. Далее будет рассмотрен вариант реализации линейного тракта с помощью данной программы.

### Расчет с помощью программного комплекса

Основной алгоритм работы программного комплекса синтеза, анализа и параметрической оптимизации структурных схем линейного тракта описан в работах [1,3]. Блок-схема работы программы приведена на рис. 3. Функционально программу можно представить несколькими связанными и последовательно выполняемыми этапами. На рисунке 3 данные этапы выделены пунктиром и пронумерованы в порядке их выполнения.

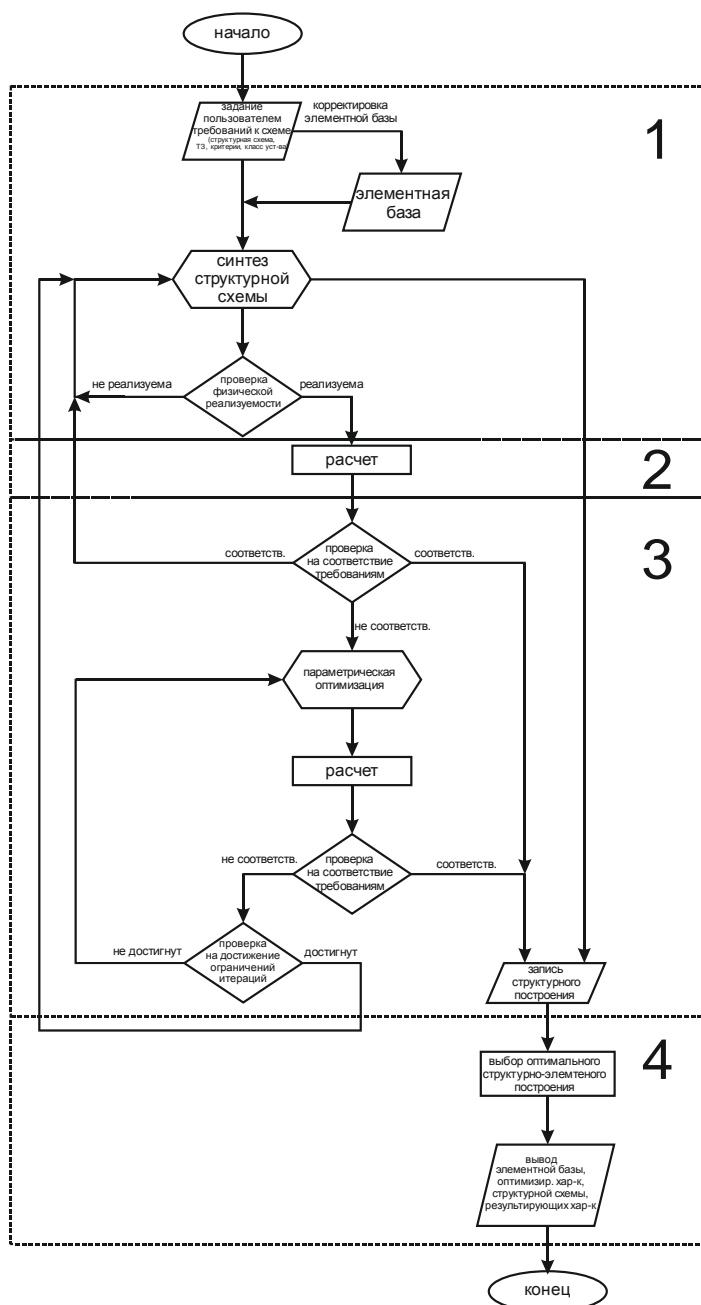


Рис. 3. Блок схема программы RF Systems Designer

### Синтез структурной схемы

Первым этапом является синтез структурной схемы тракта, в которой по заданным пользователем требованиям к схеме, на основе имеющейся элементной и схмотехнической базы, производится синтез структуры. Требования к схеме могут включать в себя требования к электрическим параметрам, технологическим (вид корпусов применяемой элементной базы, габариты), критерии оптимальности для оптимизации и принятия решения. 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 даль-

нейшего анализа и расчета. Синтез схем осуществляется методом полного перебора всех возможных вариантов построения, что гарантирует оптимальность синтезируемой схемы среди всех возможных реализаций схем при заданной элементной базе.

Для автоматического синтеза схем в описываемом программном комплексе необходимо определить базу функциональных узлов, из которых будет синтезироваться схема. Данная база может быть не ограничена в количестве элементов, однако для ускорения работы программы элементная база, из которой производится автоматический синтез, адаптивна. Таким образом, даже при наличии большого количестве неподходящих элементов в начальной базе функциональных узлов программа автоматически сформирует базу из элементов потенциально подходящих для формирования структурной схемы линейного тракта на основе требований технического задания. Для решаемой задачи построения схемы по заданному техническому заданию в качестве базы данных были использованы элементы, перечисленные в табл. 2.

Поскольку программой могут быть синтезированы схемы структурные реализации, чьи результирующие характеристики формально удовлетворяют требованиям технического задания, но не имеют физической реализуемости, практической целесообразности либо не подходят по другим причинам, в программе после структурного синтеза производится проверка на физические ограничения.

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; аттенуаторы – 2 раза.
- Запрет на определенное позиционирование элементов определённых классов: смеситель перед МШУ; УПЧ перед смесителем, МШУ; аттенуатор перед МШУ; аттенуатор после аттенуатора.

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

### Расчет характеристик линейного тракта

Поскольку основной решаемой задачей в данной работе является разработка тракта с характеристиками, удовлетворяющие требованиям технического задания (табл. 1), в программе должна быть реализована возможность расчета всех нормируемых параметров. Далее будут рассмотрены основные соотношения, математические модели и формулы, по которым программой производится расчет. Данная функциональная часть в представленном алгоритме реализуется на этапе 2.

Формула, описывающая коэффициент шума каскадного соединения  $N$ -го количества функциональных узлов с коэффициентами передачи  $K_j$  и коэффициентами шума  $F_i$  описывается выражением [4]:

$$F_{\Sigma} = F_1 + \frac{F_2 - 1}{K_1} + \frac{F_3 - 1}{K_1 \cdot K_2} + \dots + \frac{F_N - 1}{K_1 \cdot K_2 \cdot \dots \cdot K_{N-1}} = F_1 + \sum_{i=2}^N \frac{F_i - 1}{\prod_{j=1}^{i-1} K_j}, \quad (1)$$

где  $F_{\Sigma}$  – коэффициент шума тракта.

Таблица 2

Элементная база для синтеза структурной схемы

№ п/п	Элемент	Параметр	Значение	Температурный коэффициент		
1	CMD157P3	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	32,5	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		
		QPA2735		G, dB	26	-0.013 dB/°C
				OP1, dBm	18	-0.008 dB/°C
OIP3, dBm	24			-0.0033 dB/°C		
OIP2, dBm	31			-0.0033 dB/°C		
NF, dB	1,1			0.008 dB/°C		
AMMP-6220		S11	-15	-0.04 dB/°C		
		S22	-24	-0.04 dB/°C		
		G, dB	26	-0.025 dB/°C		
		OP1, dBm	10,4	-0.008 dB/°C		
		OIP3, dBm	22,25	-0.0033 dB/°C		
MMIQ0520HSM		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		
		G, dB	-14	-0.0045 dB/°C; -0.16 dB/dBm,		
		OP1, dBm	-3	0.0038 dB/°C; -0.5 dB/dBm		
		OIP3, dBm	25	0.002 dB/°C; -0.41 dB/dBm		
		OIP2, dBm	31,5	0.033 dB/°C -2.16 dB/dBm		
		NF, dB	15	0.006 dB/°C; 0.16 dB/dBm,		
		ImagRej	21	0.33 dB/dBm		
3	AG201-63	S11 RF	-26	0.013 dB/°C;0.33 dB/dBm		
		S22 IF	18;	0.08 dB/°C;-2.16 dB/dBm		
		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		
4	AG302-86	S11	-14	-0,04 dB/°C		
		S22	-14	-0,04 dB/°C		
		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		
5	LC-filter	S11	-26	0.013 dB/°C;0.33 dB/dBm		
		S22	18;	0.08 dB/°C;-2.16 dB/dBm		
		G, dB	-1	-0.0002 dB/°C		
6	Switch	G, dB	-1	-0,0026 dB/°C		
7	Attenuator	G,	9,67	0,034 dB/°C		
8	HMC441	G, dB	17	-0.0038 dB/°C		
		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	HMC903LP3E	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,		
11	TC1-1+	ImagRej	25	0.35 dB/dBm		
		G, dB	-0.5	-0.0002 dB/°C		

Точка пересечения интермодуляций третьего порядка по выходу тракта, представляющего собой каскадное соединение  $N$ -го количества функциональных узлов с коэффициентами передачи  $K_j$  и значениями точки пересечения интермодуляций по выходу  $OIP3_i$  определяется выражением [5]:

$$OIP3_{\Sigma} = \frac{1}{\frac{1}{OIP3_N} + \sum_{i=N-1}^1 \frac{1}{OIP3_i} \cdot \frac{1}{\prod_{j=1}^i K_j}}, \quad (2)$$

где  $OIP3_{\Sigma}$  – точка пересечения интермодуляций третьего порядка по выходу тракта.

Точка пересечения интермодуляций второго порядка по выходу тракта, представляющего собой каскадное соединение  $N$ -го количества функциональных узлов с коэффициентами передачи  $K_j$  и значениями точки пересечения интермодуляций второго порядка по выходу  $OIP2_i$  определяется выражением [5]:

$$OIP2_{\Sigma} = \frac{1}{\left( \frac{1}{\sqrt{OIP2_N}} + \sum_{i=N-1}^1 \frac{1}{\sqrt{OIP2_i}} \cdot \frac{1}{\prod_{j=1}^i \sqrt{K_j}} \right)^2}, \quad (3)$$

где  $OIP2_{\Sigma}$  – точка пересечения интермодуляций второго порядка по выходу тракта.

Мощность шумов на выходе тракта можно определить по выражению (4) [6]:

$$P_{noise} = k \cdot T_0 \cdot df \cdot (F_1 - 1) + \sum_{i=2}^N \frac{k \cdot T_0 \cdot df \cdot (F_i - 1)}{\prod_{j=1}^i K_j}, \quad (4)$$

где  $P_{noise}$  – мощность шумов на выходе тракта;  $k$  – постоянная Больцмана,  $k=1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К;  $T_0$  – абсолютная температура;  $df$  – полоса частот.

Верхняя граница линейности амплитудной характеристики  $OPI dB_{\Sigma}$  (ВГЛАХ) по критерию однодецибелльной компрессии по выходу каскадного соединения  $N$ -го количества функциональных узлов с коэффициентами передачи  $K_i$  и значениями точки однодецибелльной компрессии усиления  $OPI dB_i$  определяется рекуррентным выражением (5) [7]:

$$OPI dB_{\Sigma} = \frac{1}{\frac{1}{|OPI dB_{\Sigma, N-1} \cdot K_i|^2} + \frac{1}{|OPI dB_i|^2}}, \quad (5)$$

$2 \cdot Z_{load}$

где  $OPI dB_{\Sigma}$  точка однодецибелльной компрессии усиления тракта из  $N$  каскадов по выходу;  $OPI dB_{\Sigma, N-1}$  – точка однодецибелльной компрессии усиления тракта из  $N-1$  каскадов по выходу.

Избирательность приемника по зеркальному каналу можно определить по выражению (7) [6]:

$$A = \frac{K_{f_0}}{K_{f_{img}}}, \quad (6)$$

где  $U_{блок}$  – амплитуда сигнала на выходе приемника при действии помехи на входе;  $U_{вых}$  – амплитуда сигнала на выходе приемника при отсутствии помехи на входе.

Суммарный ток потребления схемы  $I_{total}$  рассчитывается как сумма токов потребления отдельных функциональных узлов  $I_i$ .

$$I_{total} = \sum_{i=1}^N I_i \quad (7)$$

### Оптимизация характеристик линейного тракта

Для оптимизации синтезируемых схем, являющихся вариантами для окончательного выбора линейного тракта программой на четвертом этапе, на третьем этапе производится параметрическая оптимизация. В качестве методов многопараметрической оптимизации в программном комплексе RF Systems Designer используется комбинация методов интервального перебора либо Монте-Карло и либо симплексного метода, методов статистического градиента или покоординатного спуска. Комбинация различных методов позволяет снизить вероятность схождения результатов оптимизации к локальному экстремуму, поскольку большинство методов многопараметрической оптимизации позволяют определить экстремум, локализуемый рядом с начальной точкой.

В случае, если для определения расположения окрестности глобального экстремума оптимизируемой функции используется метод интервального перебора, то программой выбираются координаты начальной точки в некоторой окрестности принадлежащей области определения функции, затем координаты экстремума определяются с помощью уточняющих симплексного метода, методов статистического градиента либо покоординатного спуска. Затем окрестность начальной точки меняется и производится повторный поиск экстремума с помощью уточняющих методов оптимизации. Поскольку сходимость, а, следовательно, количество итераций и ресурсозатратность определяются видом оптимизируемой функции, ее размерностью, крутизной в окрестности экстремума, которые заранее неизвестны, определить наиболее подходящий уточняющий метод оптимизации с точки зрения вышеупомянутых критериев не представляется возможным. Для увеличения точности и достоверности оптимизации рекомендуется использовать поочередно оба из предлагаемых уточняющих методов.

Если для поиска экстремума используется комбинация метода Монте-Карло и любого из уточняющих методов, начальные условия для уточняющих методов выбираются как результаты оптимизации с помощью метода Монте-Карло [8-10].

В данной работе используется комбинация метода Монте-Карло с погрешностью определения точки экстремума  $\varepsilon=0,01$  и вероятности ее определения  $P=0,99$  и метода покоординатного спуска с пределом на оптимизацию по критерию достижения относительной точности  $\varepsilon=0,01$ . Блок-схема используемого алгоритма многопараметрической оптимизации приведена на рис. 4.

В качестве основных варьируемых параметров были взяты следующие параметры: КСВн по входу и выходу элементов 1, 2, 7 (табл. 2), коэффициент передачи элементов 3, 4, 6, полоса фильтра (элемент 6) напряжение питания элементов 3,4.

Краткое описание последовательности действий в соответствии с представленной блок-схемой алгоритма представлено ниже.

1. Первым шагом оптимизации методом Монте-Карло является разбиение области определения целевой функции  $F(\Lambda)$  на элементарные  $i$ -мерные объемы в соответствии с заданной точностью оптимизации  $\varepsilon$  с гранями элементарных объемов  $\Delta \lambda_i$ .

$$\Delta\lambda_i = \varepsilon \cdot (\lambda_{i, \max} - \lambda_{i, \min}),$$

где  $\lambda_{i, \max}$  – максимальное значение параметра  $\lambda_i$ ;  
 $\lambda_{i, \min}$  – минимальное значение параметра  $\lambda_i$ .

Также задается вероятность определения экстремума  $P$ .

2. Далее производится генерация массива  $N = \{n_1, n_2, \dots, n_M\}$  размерностью  $N$  (количество оптимизируемых параметров) случайных натуральных чисел имеющих равномерное распределение плотности вероятности в диапазоне  $(0, \frac{1}{\varepsilon}]$ .

3. По полученном массивам элементарных объемов и случайных чисел формируется точка  $M_1 = \{ \Delta\lambda_1 \cdot n_1, \Delta\lambda_2 \cdot n_2, \dots, \Delta\lambda_i \cdot n_i \}$ , рассчитывается значение целевой функции в этой точке  $F(M_1)$ . За точку экстремума принимается точка  $M_1$

4. Процедура шагов 2-3 повторяется  $K$  раз

$$K = \frac{\log(1 - P)}{\log(1 - V_0)},$$

где  $P$  – заданная вероятность нахождения точки экстремума;  
 $V_0$  – элементарный объем целевой функции

$$V_0 = \prod_{i=1}^N \frac{\Delta\lambda_i}{\lambda_{i, \max} - \lambda_{i, \min}}$$

5. За точку экстремума принимается точка  $M_{opt}$  вектора точек  $M = \{M_1, M_2, \dots, M_K\}$  размерностью  $K$  в которой значение целевой функции  $F(\Lambda)$  функции наибольшее.

Для этапа оптимизации методом покоординатного спуска последовательность действий представлена ниже.

1. Первым шагом оптимизации методом покоординатного спуска является расчет значения целевой функции в начальной точке, полученной с помощью метода Монте-Карло как точки экстремума.

$$M_0 = F(\Lambda_0), \Lambda_0 = \{ \lambda_{01}, \dots, \lambda_{0R} \}, \Lambda \in D,$$

где  $D$  –  $R$ -мерное пространство параметров  $\lambda_i$

3. Далее вычисляется значение целевой функции в окрестности параметра  $\lambda_{j0}$ . Для этого вычисляется значение функции в точках

$$M_{01-\Delta} = \{ \lambda_{01} - \Delta, \lambda_{02}, \dots, \lambda_{0R} \} \text{ и}$$

$$M_{01+\Delta} = \{ \lambda_{01} + \Delta, \lambda_{02}, \dots, \lambda_{0R} \},$$

где  $\Delta\lambda_i = \Delta \cdot (\lambda_{i, \max} - \lambda_{i, \min})$

4. Вычисленные значения целевой функции в точках  $M_{01-\Delta}$  и  $M_{01+\Delta}$  сравниваются, и если выполняются условия

$$\Lambda \in D \tag{8}$$

$$\frac{M_{01\pm\Delta} - M_0}{M_0} < \varepsilon \tag{9}$$

5. За начальную точку  $M_0$  принимается точка  $M_{01-\Delta}$  и  $M_{01+\Delta}$ . В противном случае начальная точка остается без изменений.

6. Далее вычисляется значение целевой функции в окрестности следующего параметра  $\lambda_{20}$ .

7. Пункты 2-4 повторяются для всего вектора параметров  $\Lambda = \{ \lambda_1, \dots, \lambda_R \}$ .

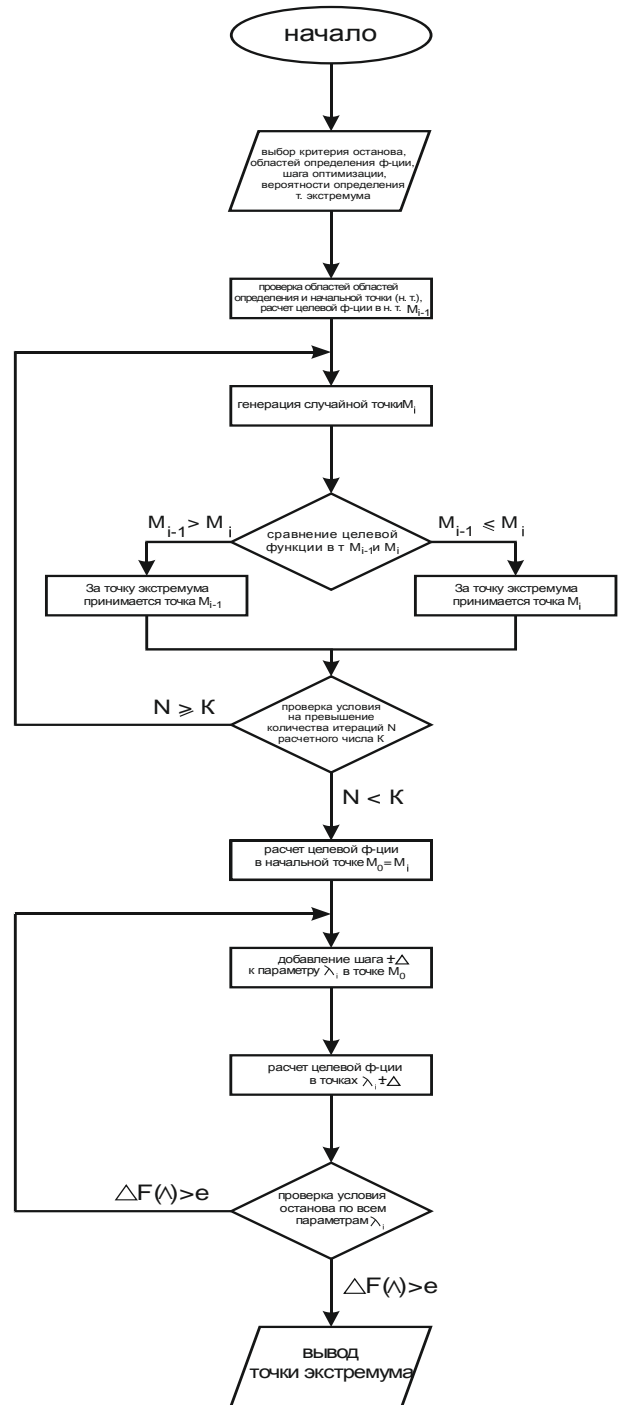


Рис. 4. Блок-схема используемого метода многопараметрической оптимизации

**Выбор элементного, схемного и структурного построения линейного тракта**

Выбор наиболее подходящего элементного, схемного и структурного построения схемы в описываемой программе осуществляется с помощью методов векторной оптимизации после параметрической оптимизации на четвертом этапе представленного алгоритма. Следует отметить, что целевой оптимизируемой функцией является функция  $F(\Lambda)$ . Выбор данной функции зависит от выбранного метода векторной оптимизации.

В данном программном комплексе для аналитической записи выражения целевой функции используется метод свертки критериев [11]. Данный метод позволяет обобщить единым математическим соотношением различные характеристики линейного тракта.

Пользователем на основании требований к приемно-передающему устройству, устанавливается приоритет на каждый параметр. В соответствии с определенной пользователем приоритетностью рассчитывается значение целевой функции  $F(\Lambda)$  по соотношению (10)

$$F(\Lambda) = m = \sum_{i=1}^R \alpha_{i,k} \cdot \lambda_i \quad (10)$$

где  $F(\lambda_i)$  – целевая функция оптимизации;  $m$  – значение целевой функции;  $R$  – количество параметров;  $\alpha_{i,k}$  – весовой коэффициент  $k$ -го ранга  $i$ -го параметра;  $\lambda_i$  – нормированное значение  $i$ -го параметра к оптимальному значению.

$$\lambda_i = \frac{\lambda_{in} - \lambda_{i,opt}}{\lambda_{i,max} - \lambda_{i,min}} \quad (11)$$

где  $\lambda_{in}$  – значение  $i$ -го параметра;  $\lambda_{i,opt}$  – требуемое техническим заданием значение  $i$ -го параметра;  $\lambda_{i,min}$  – минимальное значение  $i$ -го параметра  $\lambda_{i,max}$  – максимальное значение  $i$ -го параметра

$$\alpha_k = \frac{\alpha'_k \cdot M_k}{\sum_{k=1}^N \alpha'_k \cdot M_k} \quad (12)$$

где  $\alpha'_k$  – весовой коэффициент  $k$ -го ранга;  $M_k$  – количество параметров  $k$ -го ранга.

$$\alpha'_k = \frac{\int_0^k f(k)dk}{\int_0^{k-1} kdk} \quad (13)$$

где  $f(k)$  – функция распределения весовых коэффициентов в зависимости от ранга параметра;  $k$  – номер ранга.

Таким образом, для синтеза схемы программным комплексом пользователю необходимо задать приоритетность параметров, в соответствии с которой программой будет произведена параметрическая оптимизация тракта. Для решения поставленной задачи синтеза линейного тракта была задана приоритетность параметров, приведенная в табл. 3.

После проведения синтеза, расчета и оптимизации ряда схем линейного тракта программным комплексом определяются схемы, удовлетворяющие техническим требованиям и среди данного ряда, определяются наиболее оптимальные по критериям принятия решения.

Для принятия решения в данном программном комплексе используются методы векторной оптимизации – метод свертки критериев, метод уступок, наименьшего отклонения либо их комбинация. Комбинация методов позволяет снизить вероятность появления в результатах работы программы нецелесообразного построения схемы, а также упростить выбор схемы и принятие решения об элементном, функциональном и структурном построениях схемы пользователем, поскольку каждый из приведенных методов векторной оптимизации обладает недостатками.

Метод свертки критериев при наличии варианта построения схемы с большим значением одного параметра и средней или малой величине остальных параметров может определить данный вариант как наиболее оптимальный по величине целевой функции  $F(\Lambda)$ . Однако при этом очевидно, что с точки зрения оптимизации всего ряда характеристик максимизация (или минимизация) одного параметра не является оптимальным решением.

Поэтому данный метод оптимизации наиболее целесообразно комбинировать с методами уступок или наименьших отклонений. В первом из них существует приоритетность одних параметров перед другими в соответствии с заданными пользователем коэффициентами. При таком подходе значение характеристики какого-либо из вариантов считается более оптимальным в случае, если уступка в значении более значимой характеристики не превышает значения, определяемого пропорционально выбранным пользователем весовых коэффициентов параметров.

В методе наименьших отклонений наиболее оптимальным считается решение, при котором квадрат отклонения характеристик от медианного значения по всей совокупности характеристик рассматриваемого варианта реализации линейного тракта минимален. Однако при таком подходе не учитывается сама величина медианного значения оптимальности совокупности характеристик. При этом под значением оптимальности характеристик понимается значение характеристик относительно требуемых техническим заданием. Кроме того, метод последовательных уступок и метод наименьших отклонений нечувствительны к небольшим изменениям абсолютной величины оптимизируемых характеристик.

Таким образом, если необходимо достичь максимального (минимального) абсолютного значения какого-либо из ведущих критериев следует использовать метод свертки критериев, в случае если среди рассматриваемых вариантов реализации схемы необходимо обеспечить учет совокупности характеристик тракта необходимо использовать метод последовательных уступок или метод наименьших отклонений.

Применительно к решаемой задаче построения тракта следует отметить, что наиболее целесообразным представляется комбинация метода свертки критериев и одного из методов последовательных уступок или наименьших отклонений. Таким образом, первичная оценка вариантов построения схемы осуществляется с помощью абсолютного значения нормированных характеристик тракта с помощью метода свертки критериев, затем выбор уточняется с помощью одного из методов векторной оптимизации по относительному нормированному значению характеристик. В данной работе в качестве второго метода векторной оптимизации в комбинации методов используется метод последовательных уступок.

Метод уступок заключается в следующем.

1. Каждому из учитываемых параметров  $\lambda_i$  присваивается коэффициент приоритетности  $k$ ;
2. затем осуществляется сортировка вариантов построения схем по параметру с наивысшим коэффициентом приоритетности  $k$ ;
3. следующим шагом осуществляется сортировка вариантов построения схем по параметрам  $\lambda_i$  с коэффициентом



приоритетности  $k+1$ , со следующим ограничением на сортировку:

вариант  $n$  оптимальнее варианта  $m$  по значению параметра  $\lambda_{k+1}$  варианта  $n$  если выполняется условие:

$$\lambda_{k+1, n} > \lambda_{k+1, m} \text{ и } \frac{\lambda_{k, m} - \lambda_{k, n}}{\lambda_{k, m}} < \alpha_k$$

$$\alpha_k = \frac{\int_k^{k+1} f(k) dk}{\int_0^N k dk} \quad (12)$$

$N$  – количество параметров где  $f(k)$  – функция распределения весовых коэффициентов в зависимости от ранга параметра;  $k$  – текущий коэффициент приоритетности.

4. на шаге  $i$  для определения более оптимального построения из вариантов  $n$  и  $m$  по параметру  $k$ -го коэффициента приоритетности производится проверка условий:

$$\lambda_{k+i, n} > \lambda_{k+i, m} \text{ и } \bigcap_{a=0}^{i-1} \left( \frac{\lambda_{k+a, m} - \lambda_{k+a, n}}{\lambda_{k+a, m}} < \alpha_{k+a} \right) \quad (13)$$

Иными словами, в описанном методе производится последовательная сортировка параметров с уступкой в предыдущих параметрах, определяемой расставленными коэффициентами приоритетности параметров – минимальная уступка для параметров с наивысшим приоритетом, максимальная уступка для параметров с низким приоритетом.

Для выбора наиболее оптимального структурного построения и принятия решения с помощью комбинации методов свертки критериев и метода уступок была задана приоритетность рассчитываемых параметров, представленная в табл. 3.

Таблица 3

**Выбранная приоритетность параметров синтезируемого тракта**

Обозначение	Параметр	Критерий
G	коэффициент усиления тракта;	1
NF	коэффициент шума тракта;	2
OP1db	однодцибельная точка компрессии	3
OIP3	точка пересечения интермодуляции 3-го порядка по выходу	4
OIP2	точка пересечения интермодуляции 2-го порядка по выходу	5

**Результаты расчетов**

Результатом работы программы является ряд структурных построений линейного тракта, представленных в табл. 4 в порядке убывания оптимальности по ранее описанным критериям.

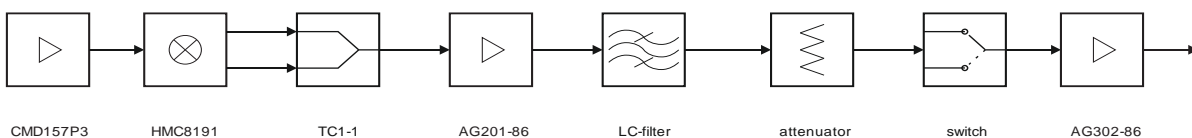


Рис. 5. Структурная схема линейного тракта, полученная с помощью программного комплекса

Таблица 4

**Варианты реализации схемы линейного тракта**

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	
1	1	2	11	3	5	7	6	
2	1	2	11	3	5	6	4	
3	1	11	5	6	3	4	7	
4	1	2	11	3	5	7	6	
5	1	1	2	11	3	7	6	
6	1	1	2	11	4	4	5	
7	2	11	3	4	5	6	7	
8	1	11	7	3	5	6	7	
9	9	2	11	5	6	3	4	
10	9	2	11	3	5	6	4	

Наиболее оптимальной по введенным ранее критериям синтезированной схемой является схема №1 в табл. 4. Структурная схема представлена на рис. 5.

В таблице 5 приведены расчетные характеристики линейных трактов, схемы которых получены двумя различными способами.

Таблица 5

**Характеристики трактов по результатам проектирования**

Параметр	Требуемое значение		Результат классического подхода		Результат, полученный с помощью программного комплекса	
	Не менее	Не более	Не менее	Не более	Не менее	Не более
Диапазон рабочих частот, ГГц	14	14,5	14	14,5	14	14,5
Коэффициент передачи, дБ	32,5	32,5	32	32	32,2	32,8
Коэффициент шума, дБ		5	3,47	3,47	2,32	2,32
Полоса фильтра промежуточной частоты по уровню минус 3 дБ, МГц	40	100		200	45	50
Неравномерность коэффициента передачи по частоте, дБ		2		2,5		1,5
Избирательность по зеркальному каналу приема в полосе ПЧ, дБ	17		20			25
Верхняя граница линейности амплитудной характеристики по входу (по компрессии 1дБ), дБм	Минус 21		Минус 21		Минус 19	
Точка пересечения интермодуляции 3-го порядка по выходу, дБм	20		22		21,37	
Точка пересечения интермодуляции 2-го порядка по выходу, дБм	25		26		25,46	
Уровень собственных шумов, дБм/Гц		Минус 100		Минус 138		Минус 139
Напряжение питания, В		5		5		4,5
Ток потребления, мА		1000		1050		975
Входная мощность сигнала гетеродина, дБм	15	20	15	17	15	17

Как видно из табл. 5, характеристики тракта после проведения оптимизации удовлетворяют предъявляемым требованиям. Полученные результаты свидетельствуют о корректной работе алгоритма и реализованном на его основе математическом комплексе.

При сравнении результатов, полученных в данной работе, видно, что элементное, схемное и структурное построение разработанных схем во многом схожи, однако поскольку программный комплекс позволяет учесть большее количество вариантов реализации и сравнить их по всем требуемым параметрам, схема, полученная с помощью программы RF Systems Designer, обладает лучшими характеристиками.

При проектировании линейного тракта инженерным методом с помощью современных САПР для поиска и подбора подходящих элементов, составления из них схемы, промежуточных расчетов и внесения корректировок в данном примере потребовалось 80 часов. Для решения аналогичной задачи с помощью представленной программы без учета времени на внесение базы данных, представляющей собой большой набор как подходящих так и неподходящих элементов с учетом введенных физических ограничений потребовался анализ 4382 вариантов схем, с оптимизацией каждой схемы со средним количеством интеграций 102626. Среднее время выполнения синтеза и анализа одной схемы с приведенным средним количеством итераций оптимизации при использовании компьютера с 64-разрядным процессором Intel(R)Core(TM) i7-8700 CPU@ 3,20 GHz и оперативной памятью 16 Гб составляет 74,2 мс. Таким образом, общее затраченное время на синтез схемы линейного тракта составило 5 мин. 25 с. Метод проектирования с использованием программы RF Systems Designer позволил сократить время на составление схемы линейного тракта в 921 раз или почти на три порядка.

Для получения корректных и удовлетворительных результатов работы программного комплекса необходимо задание следующих начальных условий:

1. Подходящая по основным параметрам (частотный диапазон, напряжения питания и т.д.) элементная и функциональная база, с исчерпывающей информацией о характеристиках элементов, функциональных узлов, включающая в себя функциональные зависимости переменных характеристик, области их определения и значения. При этом, чем больше и разнообразнее данная база, тем больше вероятность успешного синтеза схемы, удовлетворяющей предъявляемым требованиям.

2. Корректный выбор методов параметрической оптимизации, их комбинации, параметров методов, а также корректное задание критериев оптимизации. При выборе метода оптимизации следует учитывать, что во избежание использования программой локального экстремума целевой функции необходимо использовать комбинацию методов. Для увеличения достоверности полученных результатов рекомендуется сравнивать результаты, полученные с помощью различных комбинаций методов. При этом, чем больше в базе данных элементов, чьи характеристики могут быть оптимизированы, тем строже требование к проверке результатов различными комбинациями методов, поскольку, чем больше оптимизируемых переменных, тем менее гладкое и монотонное поведение целевой функции оптимизации. Кроме того, важным условием является корректное задание критериев оптимизации. Например, задание одинакового коэффициента приоритетности параметрам, находящихся в противоречии друг с другом (улучшение одного из них приводит к ухудшению другого), может привести к отсутствию оптимума ни по одному из параметров схемы.

В случае, если существует ряд параметров, которые должны находиться в заданном узком диапазоне значений, наивысший коэффициент приоритетности следует отнести таким параметрам, поскольку при задании наивысшего приоритета другим параметрам программа максимизирует (минимизирует) такие параметры, однако параметры, которые должны находиться в заданных пределах могут не удовлетворять предъявляемым требованиям и такая структурная схема в дальнейшем программой учитываться не будет.

3. Корректное задание методов векторной оптимизации при принятии решения о выборе структурной схемы и критериев метода. Во избежание вывода конечных результатов с нецелесообразными значениями характеристик тракта рекомендуется применение комбинации методов векторной оптимизации, в частности метода свертки критериев и одного из методов наименьших отклонений или метода последовательных уступок. В общем случае, коэффициенты приоритетности для оптимизации схем и принятия решения могут быть различными, например, параметрическая оптимизация синтезируемых схем может быть проведена по критерию минимума коэффициента шума, а выбор наиболее оптимальной синтезированной схемы – по критерию максимума динамического диапазона. В данной функциональной части программы рекомендуется выбирать параметр оптимизации, который является оппозитным по отношению к параметру, выбранного ведущим при параметрической оптимизации. Таким образом, данная функциональная часть программы позволяет выбрать наилучшую схему по параметру  $N$  среди  $k$ -го количества схем с наименьшим параметром  $M$ .

4. Необязательным, но дополнительным начальным условием для программы, может являться дополнение физических ограничений, определения класса проектируемого устройства, определение класса элементов и функциональных узлов при необходимости. Введение физических ограничений позволяет уменьшить ресурсозатратность программы за счет уменьшения времени на синтез, расчет и оптимизацию схем.

При выполнении описанных рекомендаций программа позволяет синтезировать схему линейного тракта приемного или передающего устройства с наиболее оптимальными характеристиками среди всех возможных схем с заданной элементной и функциональной базой по заданным критериям оптимальности совокупности характеристик. Совпадение результатов проектирования, проведенных в настоящей работе различными способами свидетельствует о том, что используемые в программном комплексе методы корректны, а реализованные на их основе алгоритмы корректны и позволяют решать задачу структурного синтеза, анализа и параметрической оптимизации радиотрактов.

### Заключение

В данной работе приведено описание двух методов проектирования линейных трактов на основанных на различных САПР на примере разработки линейного тракта приемного модуля радиолокационного назначения. Рассмотрено применение программы AWR DE и разработанного на языке MATLAB программы RF Systems Designer. Наиболее существенным с точки зрения метода проектирования представляется то, что в отличие от существующих современных САПР, таких AWR DE, ADS или Genesys, представленный

программный комплекс позволяет автоматизировать синтез и анализ структурных схем линейных трактов. В тоже время наиболее существенным отличием с точки зрения результатов проектирования данных трактов является то, что представленный программный комплекс позволяет получить их структурно-элементное построение с наиболее оптимальными значениями каждой из требуемых результирующих характеристик по заданным критериям при заданной элементной и функциональной базе. 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.

### Литература

1. 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. 20-22. 28 с.
2. Разевиг В.Д., Потапов Ю.В., Курушин А.А. Проектирование СВЧ-устройств с помощью Microwave Office. М.: СОЛОН-Пресс, 2003. 496 с.
3. 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. С. 55-59 с.
4. Friis H.T. Noise Figure of Radio Receivers // Proc. IRE, vol. 32, pp. 419-422, July 1944.
5. Qizheng G. RF System Design of transceivers for wireless communications. New York: Springer Science+Business Media, USA, 2005. 474 p.
6. Grebennikov A. RF and microwave transmitter design. Ed. K. Chang. Hoboken, New Jersey: Wiley, 2011. P. 816.
7. Pozar D.M. Microwave Engineering, Third Edition. John Wiley & Sons, Inc., 2012. 720 p.
8. Parkinson A.R., Balling R.J., Hedengren J.D. Optimization Methods for Engineering Design. Applications and Theory. Provo, Utah, USA: Brigham Young University, 2013. 208 p.
9. Nelder J.A., Mead R. A simplex method for function minimization // Computer Journal. 7.4 1965, 11.4 – 11.12 p.
10. Минаков А.И. Сравнительный анализ некоторых методов случайного поиска и оптимизации // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Самара. №2, 1999. С. 286-293.
11. Машунин Ю.К. Методы и модели векторной оптимизации. М.: Наука, 1986. 144 с.

### DESIGN OF RECEIVER RF MODULE PART

Rustam R. Vishnyakov, MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia, Vishn9-r@yandex.ru

#### Abstract

In this paper system-engineering stage of design of the receiving RF module for radar is considered. The results of modeling and calculations are compared using two different programs - the software package for structural synthesis, analysis and parametric optimization (RF Systems Designer) and VSS package of the AWR DE software. A distinctive feature of the RF Systems Designer software is the ability to automatically synthesize and parametrically optimize the structural schemes of a receiver/transmitter RF module. Two different methods of RF modules design are considered. The first one is an engineering empirical method with applying modern CAD software. The second design method is basing on the application of the described software. The aim of this paper is the confirmation of the correctness of structural synthesis algorithms, parametric optimization and decision making, mathematical models, results and formulas implemented in above mentioned software by comparing of the results which are obtained in various ways. Accuracy of the calculations results which are obtained by using RF Systems Designer is confirmed by comparing with the calculations results of using AWR DE software. It is shown that when using the RF Systems Designer, due to methodology and the synthesis and analysis algorithms which are implemented in this software the time saving of decision making on the choice of elemental, circuit and structural design is three orders.

**Keywords:** software, computer-aided design system, RF circuit, RF module, design method.

#### References

1. Vishnyakov R.R. (2019). Structural and parametric synthesis algorithm of radio system. *Proceedings of the XX annual meeting "Computer mathematics systems and their applications"*. Vol. 20. Smolensk. May 17-19, 2019, pp. 22-28.
2. Razevig V.D., Potapov Y.B., Kurushin A.A. (2003). *Designing Microwave Devices Using Microwave Office*. Moscow: SOLON-Press, 2003. 496 p.
3. Vishnyakov R.R. (2019). Software for calculation and optimization of RF-blocks characteristics. *Proceedings of the IV annual meeting "Actual problems and prospects of development of radio engineering and infocommunication systems" ("Radioinfocom-2019")*. Moscow. November 13, 2019. Moscow: MIREA – Russian Technological University, pp. 55-59.
4. Friis H.T. (1944). Noise Figure of Radio Receivers. *Proc. IRE*. Vol. 32, pp. 419-422.
5. Qizheng G. (2005). *RF System Design of transceivers for wireless communications*. New York: Springer Science+Business Media, USA. 474 p.
6. Grebennikov A. (2011). *RF and microwave transmitter design*. Ed. K. Chang. Hoboken, New Jersey: Wiley. 816 p.
7. Pozar D.M. (2012). *Microwave Engineering*, Third Edition. John Wiley & Sons, Inc. 720 p.
8. Parkinson A.R., Balling R.J., Hedengren J.D. (2013). *Optimization Methods for Engineering Design*. Applications and Theory. Provo, Utah, USA: Brigham Young University. 208 p.
9. Nelder J.A., Mead R. (1965). A simplex method for function minimization. *Computer Journal*. 7.4, pp. 11.4-11.12.
10. Minakov A.I. (1999). Comparison of different random search and optimization Techniques. *Proceedings of the Samara scientific center of the Russian Academy of Sciences*. Samara. No.2, pp. 286-293.
11. Mashunin Y.K. (1986). *Methods and models of vectoring optimizations*. Moscow: Science. 144 p.