

Методика проектирования пассивных полифазных фильтров

Л. Недашковский¹, В. Репин, к.т.н.²

УДК 621.3.049.774 | ВАК 2.2.2

С развитием беспроводных технологий передачи данных растет потребность в СВЧ-микросхемах, таких как квадратурные модуляторы и демодуляторы, а также фазовращатели. Важным элементом этих схем являются пассивные полифазные фильтры, способные преобразовывать гармонический дифференциальный сигнал в два гармонических дифференциальных сигнала с разностью фаз 90° в определенной полосе частот. В статье обобщается и систематизируется опыт разработки этих устройств.

ВВЕДЕНИЕ

Одними из основных блоков построения современных приемо-передающих трактов являются квадратурные модуляторы и демодуляторы, представляющие собой устройства, в которых входной полезный сигнал перемножается с ортогональными сигналами гетеродина – генератора электрических колебаний, применяемого для преобразования частот сигнала. В фазированных антенных решетках для формирования заданной диаграммы направленности используются фазовращатели – устройства, осуществляющие поворот (изменение) фазы электрического сигнала.

Важным компонентом этих устройств является пассивный полифазный фильтр, предназначенный для расщепления сигнала на синфазную и квадратурную составляющие. Это устройство представляет собой несколько последовательно соединенных каскадов, каждый из которых состоит из четырех RC-CR-цепочек.

Разработанные в 1971 году, а впервые выполненные в интегральном исполнении в 1994 году [1], полифазные фильтры продолжают активно использоваться в интегральной высокочастотной схемотехнике, поэтому совершенствование методики проектирования полифазных фильтров является актуальной задачей.

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ПОЛИФАЗНЫХ ФИЛЬТРАХ

Несмотря на простоту реализации, полифазный фильтр обладает рядом особенностей, которые необходимо учитывать при проектировании устройства. Важная задача –

исследование фильтра по ряду его параметров и разработка изделия с их оптимальным сочетанием. Разработка топологии является не менее важным этапом проектирования, поскольку на параметры устройства оказывают влияние паразитные элементы, неизбежно возникающие при интегральном размещении компонентов [2].

Полифазный расщепитель фазы основан на полифазном фильтре (ПФФ), который представляет собой разновидность RC-фильтра, формирующего на выходе пару синусоидальных сигналов, имеющих разность фаз приблизительно 90° , если на его вход подается гармонический сигнал [3, 4].

Пассивный ПФФ имеет следующие преимущества:

1. простота реализации (используются только сопротивления и емкости);
2. малая зависимость от разброса параметров при изготовлении;
3. хорошо подходит для генерации широкополосных квадратурных сигналов радиочастот (РЧ).

Тем не менее, имеется ряд недостатков:

1. ПФФ удовлетворительно работает только в ограниченном диапазоне частот и требует точного подбора номиналов резисторов и конденсаторов;
2. ПФФ является пассивным фильтром, потери которого составляют 3 дБ / каскад (обычно для компенсации ослабления применяются буферы (усилители), для высокой точности генерации квадратурного сигнала необходимо соединять три и более RC-CR-каскадов, что приводит к увеличению потребления мощности буферами);
3. ПФФ применяется на пути прохождения сигнала, тепловой шум резисторов ухудшает коэффициент шума приемника.

¹ АО «НИИМА «Прогресс», ведущий инженер; НИУ МИЭТ, ассистент, leo_ned@mail.ru.

² АО «НИИМА «Прогресс», начальник группы.

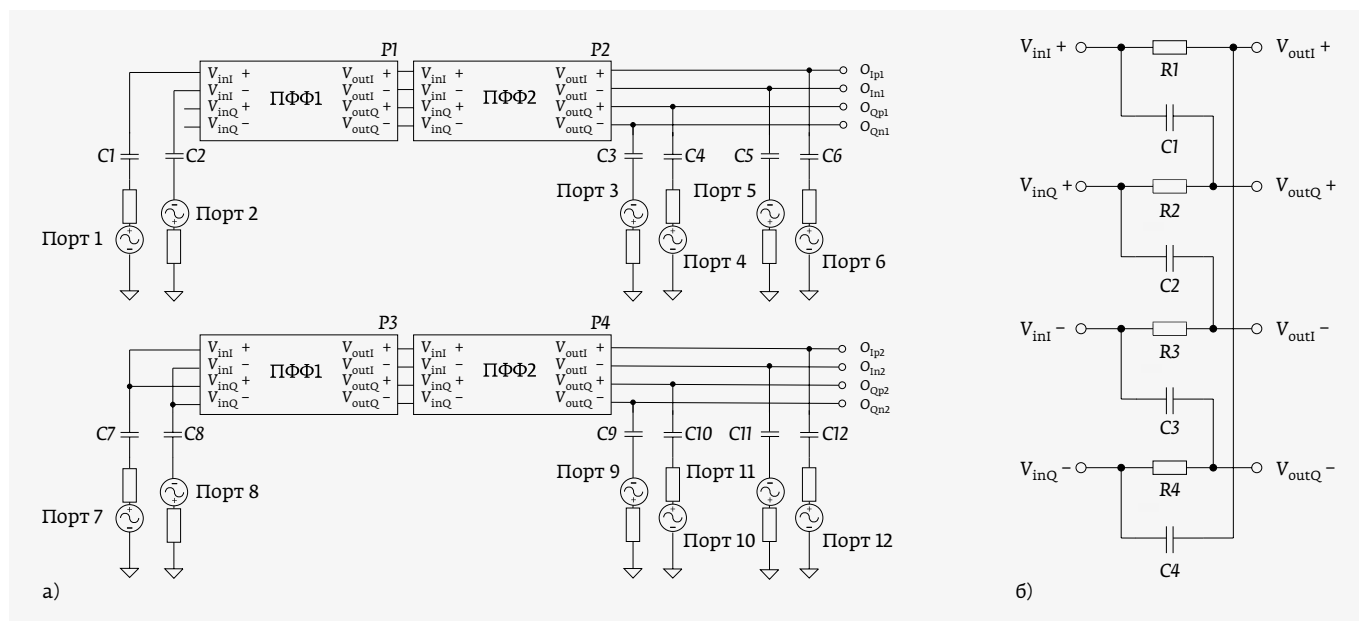


Рис. 1. Схемы подключения двухкаскадного ПФФ (а) и структура одного каскада ПФФ (б)

МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ

На основе источников [1, 4, 5, 6] и в ходе разработки полифазных фильтров для квадратурных модуляторов и демодуляторов предложена уточненная методика проектирования полифазных фильтров.

Этап 1. Выбор схемы подключения

ПФФ имеет один дифференциальный вход и два дифференциальных выхода. В зависимости от того, каким способом источник малого сигнала подключается к ПФФ, характеристики фильтра меняются.

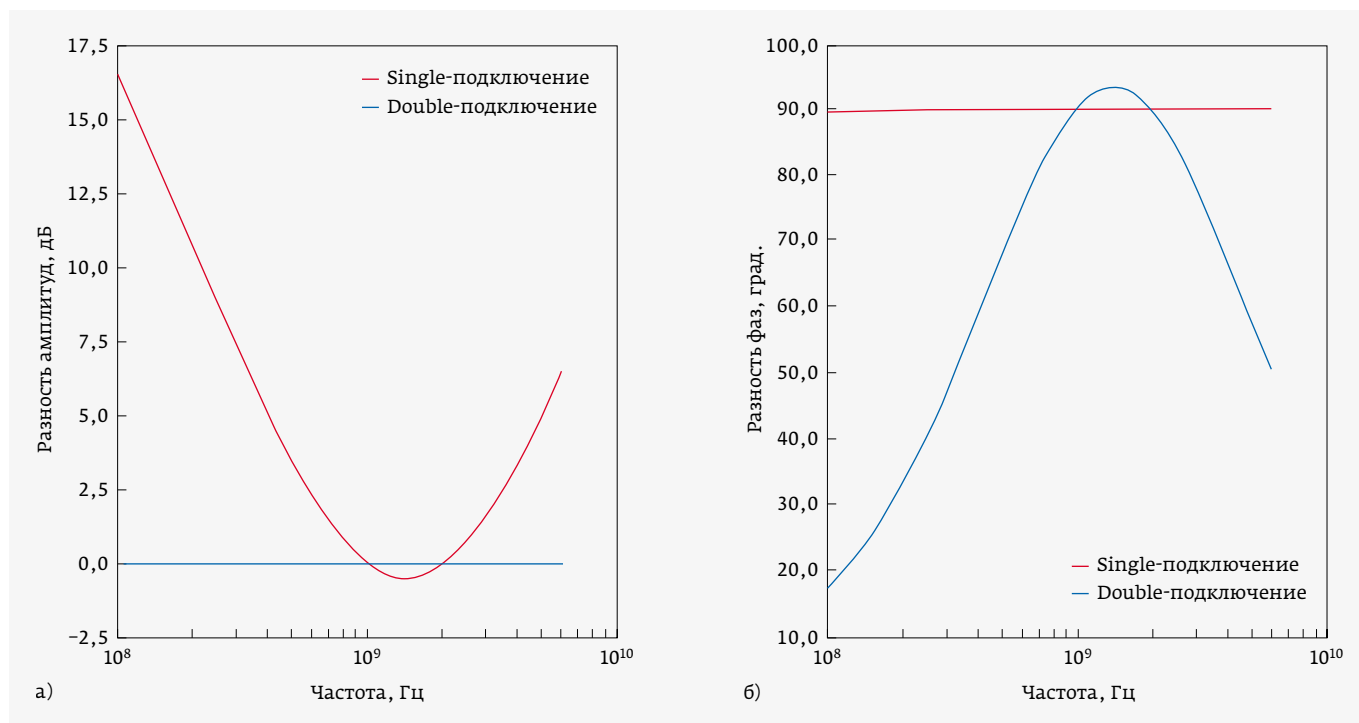
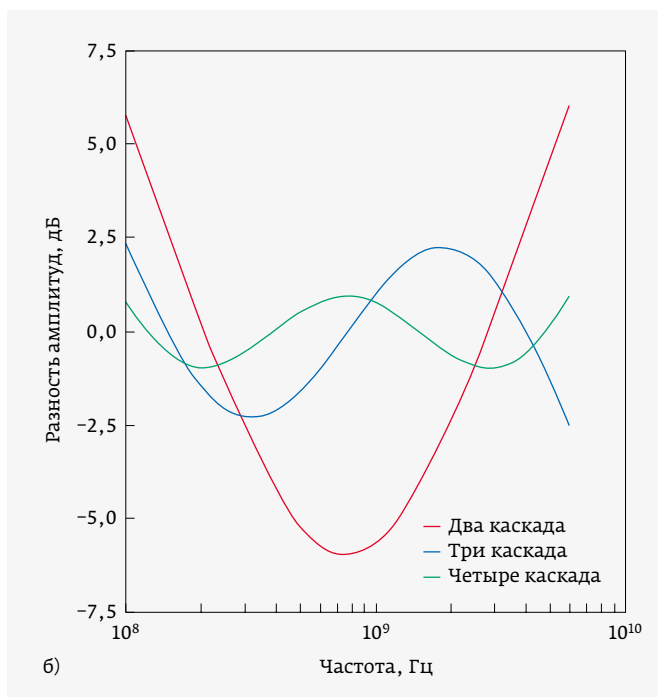
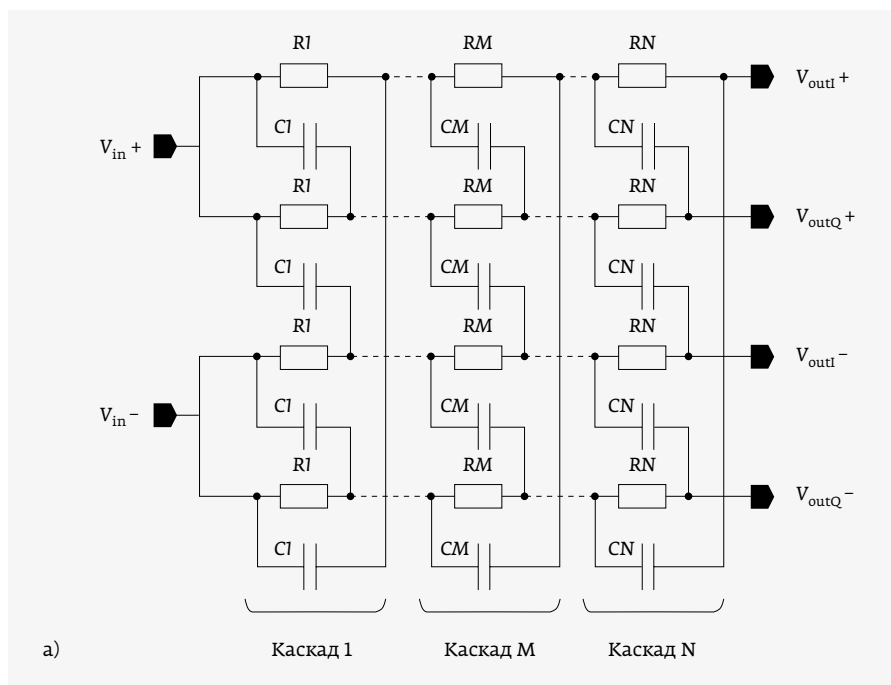


Рис. 2. Разности АЧХ (а) и ФЧХ (б) двухкаскадного ПФФ при двух вариантах подключения



На рис. 1 изображены две возможные схемы подключения. В первом случае дифференциальный сигнал подается только на один из входов, в то время как к другому ничего не подключается (single). Во втором случае один и тот же сигнал подается на оба входа (double).

Рис. 2 иллюстрирует результаты моделирования двухкаскадного ПФФ при разных вариантах подключения

(амплитудно-частотные и фазо-частотные характеристики, здесь и далее – в полулогарифмическом масштабе).

Таким образом, на данном этапе выбирается single-подключение, если стабильность фазового разбаланса приоритетнее амплитудного, или выбирается double-подключение, если стабильность амплитудного разбаланса важнее фазового [7].

В схемах, описанных в данной работе, используется single-подключение.

Этап 2. Выбор количества каскадов

Каскадирование двух и более RC-CR-цепочек позволяет выровнять амплитуды генерируемых квадратурных сигналов и расширить полосу пропускания. Количество каскадов фильтра обычно выбирается от двух до пяти, исходя из требуемых величин разбаланса амплитуд и фаз, диапазона частот и допустимого ослабления фильтра. Чем больше используется каскадов, тем шире можно получить полосу частот фильтра, но при этом и потери сигнала, проходящего через такой фильтр, значительно выше, а топология такой схемы занимает больше места на кристалле.

Этап 3. Выбор рабочих частот каскадов и расчет их элементов

Для определенности номиналы всех резисторов принимаются, например, равными 50 Ом. Тогда, зная рабочую частоту каскада, по формуле (1) можно рассчитать необходимый номинал конденсаторов:

$$f = \frac{1}{2\pi RC} \quad (1)$$

Рис. 3. Каскадирование ПФФ (а) и зависимость разбаланса амплитуды от частоты и количества каскадов (б)

Рабочая частота – такая частота, при которой амплитуды на прямом и квадратурном выходах равны (разность АЧХ является нулевой). Рабочие частоты каскадов подбираются экспериментальным путем. Результаты подбора частот и моделирования двух-, трех- и четырехкаскадного ПФФ, работающих на этих частотах, представлены в табл. 1 и на рис. 3.



АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
ЭЛЕКОНД

РАЗРАБОТКА И ПРОИЗВОДСТВО КОНДЕНСАТОРОВ

Оксидно-электролитические алюминиевые конденсаторы K50-...

Номинальное напряжение, $U_{ном}$, В,	3,2 ... 485
Номинальная емкость, $C_{ном}$, мкФ,	1,0 ... 470 000
Диапазон температур среды при эксплуатации, $T_{ср}$, °C	-60 ... 125



Объемно-пористые танталовые конденсаторы K52-...

Номинальное напряжение, $U_{ном}$, В,	3,2 ... 200
Номинальная емкость, $C_{ном}$, мкФ,	1,5 ... 60 000
Диапазон температур среды при эксплуатации, $T_{ср}$, °C	-60 ... 175



Оксидно-полупроводниковые танталовые конденсаторы K53-...

Номинальное напряжение, $U_{ном}$, В,	2,5 ... 63
Номинальная емкость, $C_{ном}$, мкФ,	0,033 ... 2 200
Диапазон температур среды при эксплуатации, $T_{ср}$, °C	-60 ... 175



Суперконденсаторы K58-...

Номинальное напряжение, $U_{ном}$, В,	2,5 ... 2,7
Номинальная емкость, $C_{ном}$, Ф,	1,0 ... 4 700
Диапазон температур среды и эксплуатации, $T_{ср}$, °C	-60 ... 65



Накопители электрической энергии на основе модульной сборки суперконденсаторов НЭЭ, МИК, МИЧ, ИТИ

Номинальное напряжение, $U_{ном}$, В,	5,0 ... 48
Номинальная емкость, $C_{ном}$, Ф,	0,08 ... 783
Диапазон температур среды при эксплуатации, $T_{ср}$, °C	-60 ... 65



Россия, 427968, Удмуртская Республика, г. Сарапул, ул. Калинина, д. 3
Тел.: (34147) 2-99-53, 2-99-89, 2-99-77, факс: (34147) 4-32-48
e-mail: elecond-market@elcudm.ru; www.elecond.ru

Таблица 1. Параметры каскадов ПФФ в эксперименте с подбором рабочих частот каскадов и результаты моделирования

Количество каскадов	Рабочие частоты каскадов f , ГГц	Номиналы резисторов R , Ом	Номиналы конденсаторов C , пФ	Разбаланс амплитуды ΔA , дБ
2	0,21	50	15,30	6,0
	2,84	50	1,12	
3	0,15	50	21,50	2,5
	0,79	50	4,10	
	4,11	50	0,78	
4	0,12	50	25,50	1,0
	0,40	50	8,20	
	1,48	50	2,12	
	4,80	50	0,65	

Этап 4. Оптимизация схемы по потерям

В [3] говорится о том, что для построения ПФФ необходимо использовать каскады с равными сопротивлениями, а емкости должны уменьшаться с геометрической прогрессией. В [1] речь идет о том, что сопротивления каскадов должны уменьшаться, причем сопротивления выходного каскада должны быть как можно ближе к 50 Ом. Среди авторов работ по проектированию ПФФ нет четкого указания на то, по какому принципу необходимо выбирать номиналы элементов. Поэтому в данной работе вводится понятие оптимизации схемы по потерям.

Для оптимизации схемы необходимо ввести подстроечные коэффициенты. В соответствии с формулой (1), если сопротивление увеличить на ту же величину, на которую уменьшилась емкость, то рабочая частота каскада не поменяется. Так, необходимо все сопротивления первого каскада умножить на коэффициент А, а все емкости этого каскада разделить на этот коэффициент. Для второго каскада используется коэффициент В и т.д. Оптимизация заключается в подборе таких значений коэффициентов, при которых ослабление сигнала окажется наименьшим.

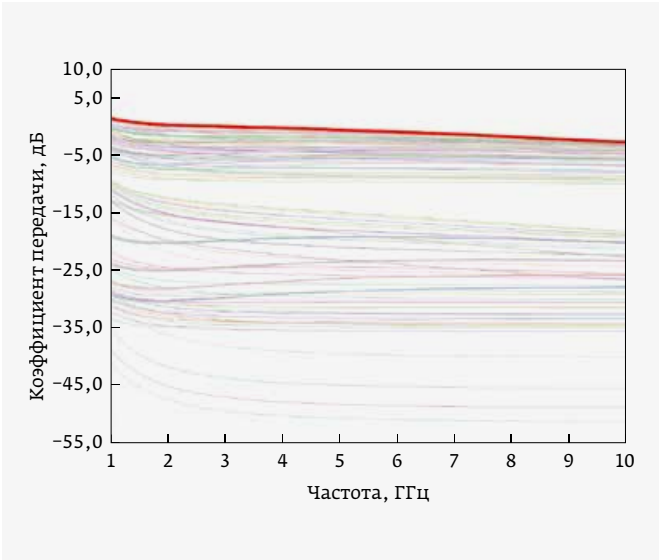


Рис. 4. Результат оптимизации схемы ПФФ по потерям с помощью параметрического анализа при вариации подстроечных коэффициентов

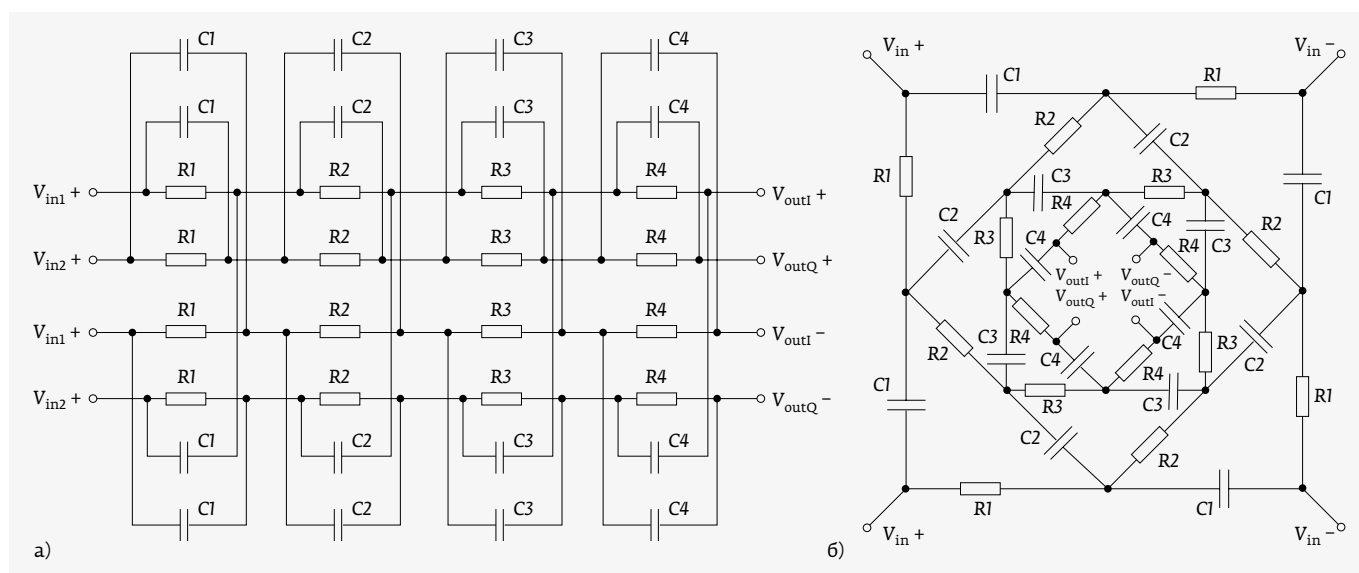


Рис. 5. Электрические схемы ПФФ для построения «прямой» (а) и «круговой» (б) топологий

Например, есть трехкаскадный ПФФ для полосы частот от 2 до 4 ГГц. В ходе параметрического моделирования такой схемы с вариацией коэффициентов A , B , C

от 0,1 до 10 определено, что наименьшими потерями схема обладает при $A=2,575$; $B=5,05$; $C=10$ (красная полужирная линия на рис. 4). Моделирование показывает,

Таблица 2. Результаты оптимизации ПФФ

№ каскада	До оптимизации (ослабление на -4,2 дБ)			После оптимизации (ослабление на -0,3 дБ)		
	Коэффициенты A, B, C	Сопротивления R , Ом	Емкости C , фФ	Коэффициенты A, B, C	Сопротивления R , Ом	Емкости C , фФ
1	1,000	100	900	2,575	258	350
2	1,000	100	550	5,050	505	109
3	1,000	100	400	10,000	1 000	40

ООО «АК Микротех»

Комплексные решения в области микросборочного и микросборочного производства
Поставка, наладка и ремонт технологического оборудования
Отработка и постановка технологических процессов
Обеспечение материалами и комплектующими

WWW.AKMICROTECH.RU +7 (499) 398 0770 SALES@AKMICROTECH.RU



что оптимизация позволяет уменьшить потери на десятки децибел. Результаты оптимизации представлены в табл. 2.

Этап 5. Выбор топологического исполнения

В зависимости от способа взаимного расположения элементов можно разработать несколько разных топологий

ПФФ. Электрические схемы на рис. 5 идентичны схеме на рис. 3а.

Размеры конденсаторов увеличиваются от последнего каскада к первому. Поэтому при «круговой» (симметричном) построении ПФФ в центре размещаются конденсаторы с самым маленьким номиналом, а внешнее кольцо образуют наиболее емкие конденсаторы первого каскада.

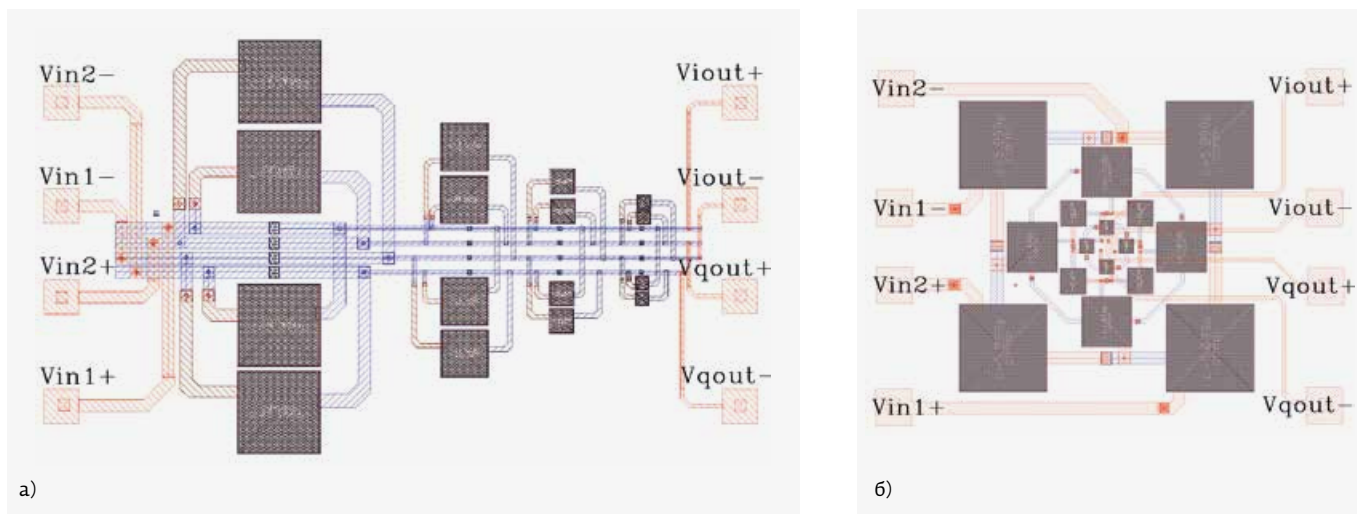


Рис. 6. «Прямая» (а) и «круговая» (б) топологии ПФФ

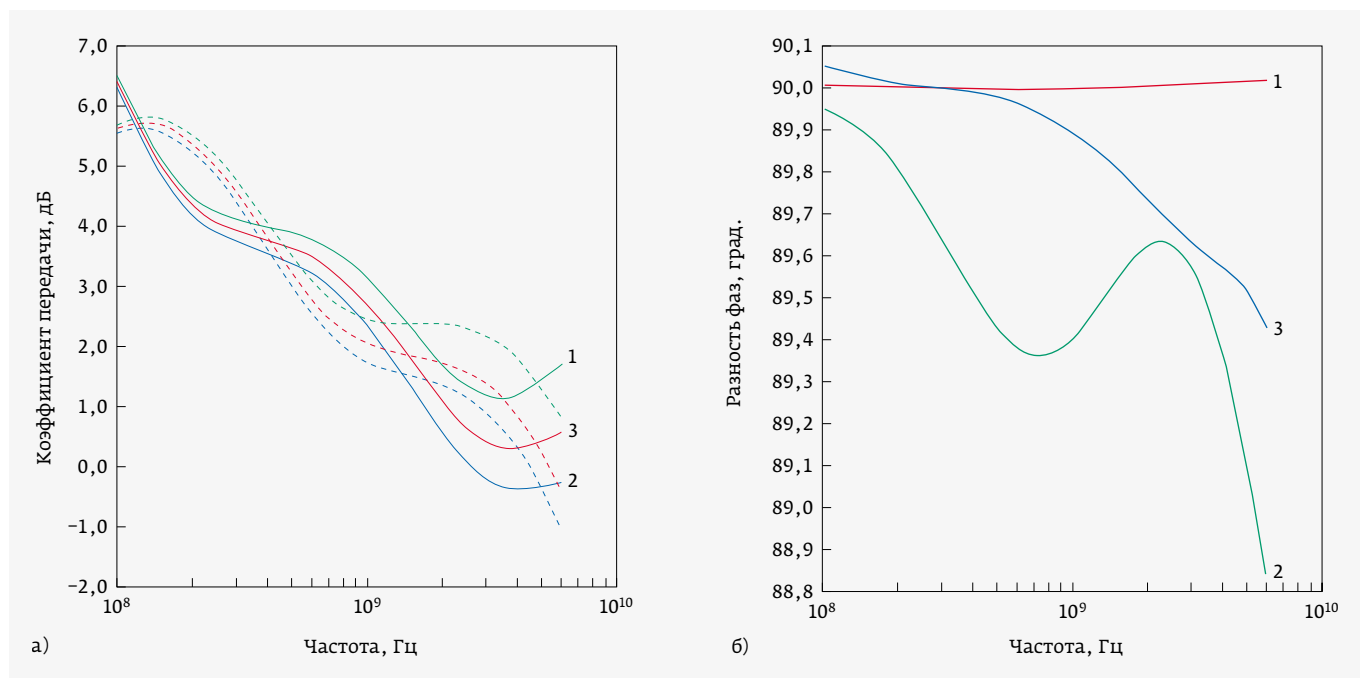


Рис. 7. АЧХ (а) и разность ФЧХ (б) ПФФ без учета паразитных элементов (1), с учетом паразитных элементов «прямой» топологии (2) и с учетом паразитных элементов «круговой» топологии (3)

ОРГАНИЗАТОР



МИНИСТЕРСТВО ОБОРОНЫ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ВЫСТАВОЧНЫЙ ОПЕРАТОР



МКВ
МЕЖДУНАРОДНЫЕ
КОНГРЕССЫ И ВЫСТАВКИ



**МЕЖДУНАРОДНЫЙ
ВОЕННО-ТЕХНИЧЕСКИЙ
ФОРУМ «АРМИЯ-2024»**

**12–18 АВГУСТА
ПАТРИОТ ЭКСПО**

www.rusarmyexpo.ru

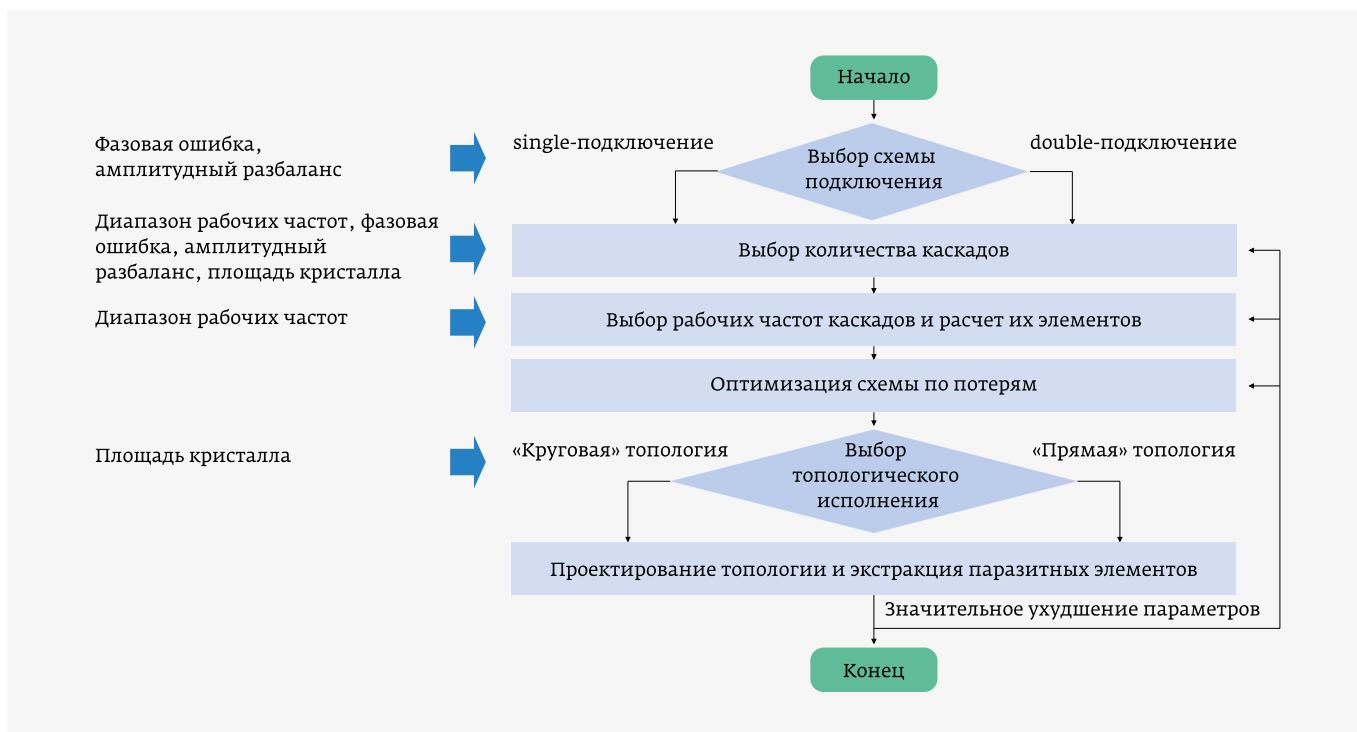


Рис. 8. Блок-схема методики проектирования пассивных ПФФ

Рис. 6 иллюстрирует две разные топологические реализации ПФФ.

После проведения экстракции паразитных сопротивлений и емкостей (RC-экстракции) проводится повторное моделирование устройства. Результаты моделирования для разных топологий представлены на рис. 7. Экстрагированные элементы «круговой» топологии оказывают меньшее влияние на характеристики ПФФ, чем элементы «прямой» топологии.

«Круговая» топология обладает центральной симметрией, поэтому сигналы проходят максимально идентичные пути. Но такая топология требует более сложной разводки для выходов. Поэтому при возможности развести шины выходных сигналов таким образом предпочтительно использование «круговой» топологии.

На рис. 8 показана блок-схема описанной методики проектирования полифазного фильтра.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье описана общая методика проектирования пассивного полифазного фильтра, объединяющая в себе методику проектирования схемотехнического решения и методику проектирования топологии. Этот результат может быть использован разработчиками схем расщепителей фазы, фазовращателей, квадратурных модуляторов и демодуляторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Zhang Z.** Analysis, design and optimization of RF CMOS polyphase filters. Doctoral dissertation, Duisburg, Essen, Univ., Diss., 2005.
2. **Лосев В.В., Недашковский Л.В., Шабардин Р.С.** Методика проектирования тракта гетеродина СВЧ квадратурных модуляторов и демодуляторов с регулируемым разбалансом // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника. 2021. № 2 (182). С. 5–9.
3. **Хоровиц П.** Искусство схемотехники / Пер. с англ. П. Хоровиц, У. Хилл. Изд. 2-е. М.: Издательство БИНОМ, 2015. 704 с.
4. **Hornak T.** Using polyphase filters as image attenuators // RF Design, 2001.
5. **Sanderson D.I.** A 5–6-GHz polyphase filter with tunable I/Q phase balance / D.I. Sanderson, R.M. Svitek, S. Raman // IEEE microwave and wireless components letters. 2004. V. 14. No. 7. PP. 364–366.
6. **Маркосян Е.С.** Исследование характеристик несимметричных пассивных полифазных фильтров // Известия вузов. Электроника. 2002. Т. 1. № 2. С. 47–54.
7. **Калёнов А.Д., Недашковский Л.В.** Исследование и разработка пассивного полифазного фильтра для работы в СВЧ-диапазоне // Микроэлектроника и информатика. 2017. Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов. М.: МИЭТ, 2017. С. 69.



УДВОЙТЕ БАЗУ
РЕАЛЬНЫХ КЛИЕНТОВ!*

XXIV МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА
**РАДИОЭЛЕКТРОНИКА
& ПРИБОРОСТРОЕНИЕ**

**25-27
СЕНТЯБРЯ
2024**

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
КВЦ ЭКСПОФОРУМ



*Радэл-2023 посетили более 15 000 специалистов
Радэл-2022 посетили 7960 специалистов



www.radelexpo.ru
(812) 718-35-37