

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ИНСТИТУТ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ  
И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Кафедра «Радиоэлектроника и телекоммуникации»

## **РАДИОФОТОНИКА В СИСТЕМАХ 5G**

**Учебно-методическое пособие**  
по выполнению лабораторного практикума  
и проведению практических занятий по дисциплине  
для обучающихся очной и заочной форм обучения направления  
11.04.02 «Информационные технологии и системы связи»

Севастополь  
СевГУ  
2025

**УДК 621.396.94:621.383(076.5)**

**ББК 32.884:32.854я73**

**P154**

**Р е ц е н з е н т :**

**И. Л. Афонин** - д-р. техн. наук, профессор

**Ответственный за выпуск:**

**И. Л. Афонин** - д-р техн. наук, профессор,  
заведующий кафедрой «Радиоэлектроника и телекоммуникации»

*Составители:* В. В. Головин, Ю.Н. Тыщук

**P154      Радиофотоника в системах 5G :** учебно-методическое пособие по выполнению лабораторного практикума и проведению практических занятий по дисциплине для обучающихся очной и заочной форм обучения направления 11.04.02 «Информационные технологии и системы связи» / Севастопольский государственный университет, Институт радиоэлектроники и интеллектуальных технических систем, кафедра «Радиоэлектроника и телекоммуникации» ; сост.: В. В. Головин, Ю. Н. Тыщук. – Севастополь : СевГУ, 2025. – 87 с. – Текст : электронный.

Целью пособия является оказание помощи студентам очной и заочной форм обучения в подготовке и выполнении заданий лабораторного практикума по дисциплине «Радиофотоника в системах 5G», а также в получении ими теоретических знаний и приобретении практических навыков построения устройств радиофотоники, предназначенных для использования в составе оборудования базовых станций и абонентских терминалов телекоммуникационных систем 5G.

УДК 621.396.94:621.383(076.5)

ББК 32.884:32.854я73

Рассмотрено и рекомендовано к изданию на заседании кафедры «Радиоэлектроника и телекоммуникации», протокол № 5 от 12 ноября 2024 г.

© Головин В. В., Тыщук Ю.Н., сост., 2025

© ФГАОУ ВО «Севастопольский  
государственный университет», 2025

## СОДЕРЖАНИЕ

|                                                                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ВВЕДЕНИЕ .....                                                                                                | 5  |
| 1. Программные средства моделирования устройств радиوفотоники .....                                           | 6  |
| 1.1. Физическая эквивалентная модель полупроводникового лазера VICSEL и pin-фотодиода .....                   | 6  |
| 1.2. Физическая эквивалентная модель электрооптического модулятора Маха-Цандера .....                         | 13 |
| 1.3. Физическая эквивалентная модель электроабсорбционного модулятора ...                                     | 17 |
| 1.4. Физические эквивалентные модели многочастотных линий задержки на основе Брэгговских решеток .....        | 18 |
| 2. Лабораторная работа № 1. Сверхширокополосный радиофотонный СВЧ-фазовращатель .....                         | 20 |
| 2.1. Цель работы .....                                                                                        | 20 |
| 2.2. Описание модели радиофотонного фазовращателя .....                                                       | 20 |
| 2.3. Порядок выполнения работы .....                                                                          | 24 |
| 2.4. Вопросы для подготовки к защите работы .....                                                             | 27 |
| 3. Лабораторная работа № 2. Радиофотонный генератор гармонических колебаний .....                             | 28 |
| 3.1. Цель работы .....                                                                                        | 28 |
| 3.2. Описание модели радиофотонного генератора .....                                                          | 28 |
| 3.3. Порядок выполнения работы .....                                                                          | 34 |
| 3.4. Вопросы для подготовки к защите работы .....                                                             | 41 |
| 4. Лабораторная работа № 3. Моделирование радиофотонного смесителя в САПР AWR DE .....                        | 43 |
| 4.1. Цель работы .....                                                                                        | 43 |
| 4.2. Описание модели радиофотонного смесителя .....                                                           | 43 |
| 4.3. Порядок выполнения работы .....                                                                          | 45 |
| 4.4. Вопросы для подготовки к защите работы .....                                                             | 49 |
| 5. Лабораторная работа № 4. Моделирование радиофотонного умножителя частоты ММВ диапазона в САПР AWR DE ..... | 50 |
| 5.1. Цель работы .....                                                                                        | 50 |
| 5.2. Описание модели радиофотонного умножителя частоты .....                                                  | 50 |
| 5.3. Порядок выполнения работы .....                                                                          | 62 |
| 5.4. Вопросы для подготовки к защите работы .....                                                             | 63 |

|                                                                                                                                                         |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 6. Лабораторная работа № 5. Моделирование радиотонной диаграммообразующей схемы $1 \times 8$ линейной фазированной антенной решетки в САПР AWR DE ..... | 65 |
| 6.1. Цель работы .....                                                                                                                                  | 65 |
| 6.2. Описание модели радиотонной диаграммообразующей схемы фазированной антенной решетки .....                                                          | 65 |
| 6.3. Порядок выполнения работы .....                                                                                                                    | 77 |
| 6.4. Вопросы для подготовки к защите работы .....                                                                                                       | 83 |
| Библиографический список .....                                                                                                                          | 85 |
| Приложение А. Образец оформления титульного листа отчета по лабораторной работе .....                                                                   | 87 |

## ВВЕДЕНИЕ

В данную методическую разработку включены лабораторные работы, которые выполняются с применением САПР NI AWR Design Environment (AWR DE).

Методические рекомендации содержат следующие разделы: цель работы; описание моделей проектируемых систем и их характеристик; порядок выполнения работы; контрольные вопросы для допуска к выполнению и подготовки к защите работы.

**Лабораторные работы выполняются каждым обучающимся индивидуально.**

Подготовка к выполнению каждой лабораторной работы предполагает изучение теоретического материала, как приведённого в методическом пособии, так и сведений из лекционного курса по дисциплине «Радиофотоника в системах 5G», а также из рекомендованной учебной литературы по дисциплине [1—3].

Исследования проводятся на основании индивидуальных исходных данных, выбираемых обучающимся из соответствующих таблиц.

Результаты исследований оформляются в виде единого отчёта согласно утверждённым требованиям [4]. Отчёт должен иметь титульный лист и содержать следующие разделы:

- цель работы;
- описание модели исследуемого устройства;
- результаты моделирования;
- анализ полученных результатов исследований;
- выводы по лабораторной работе.

Образец оформления титульного листа отчёта по лабораторной работе показан в Приложении А.

## 1. ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА МОДЕЛИРОВАНИЯ УСТРОЙСТВ РАДИОФОТОНИКИ

### 1.1. Физическая эквивалентная модель полупроводникового лазера VICSEL и pin-фотодиода

В [3] представлены разработанные эквивалентные электрические схемы лазерного полупроводникового диода VICSEL. Рассмотрены следующие два варианта эквивалентных схем.

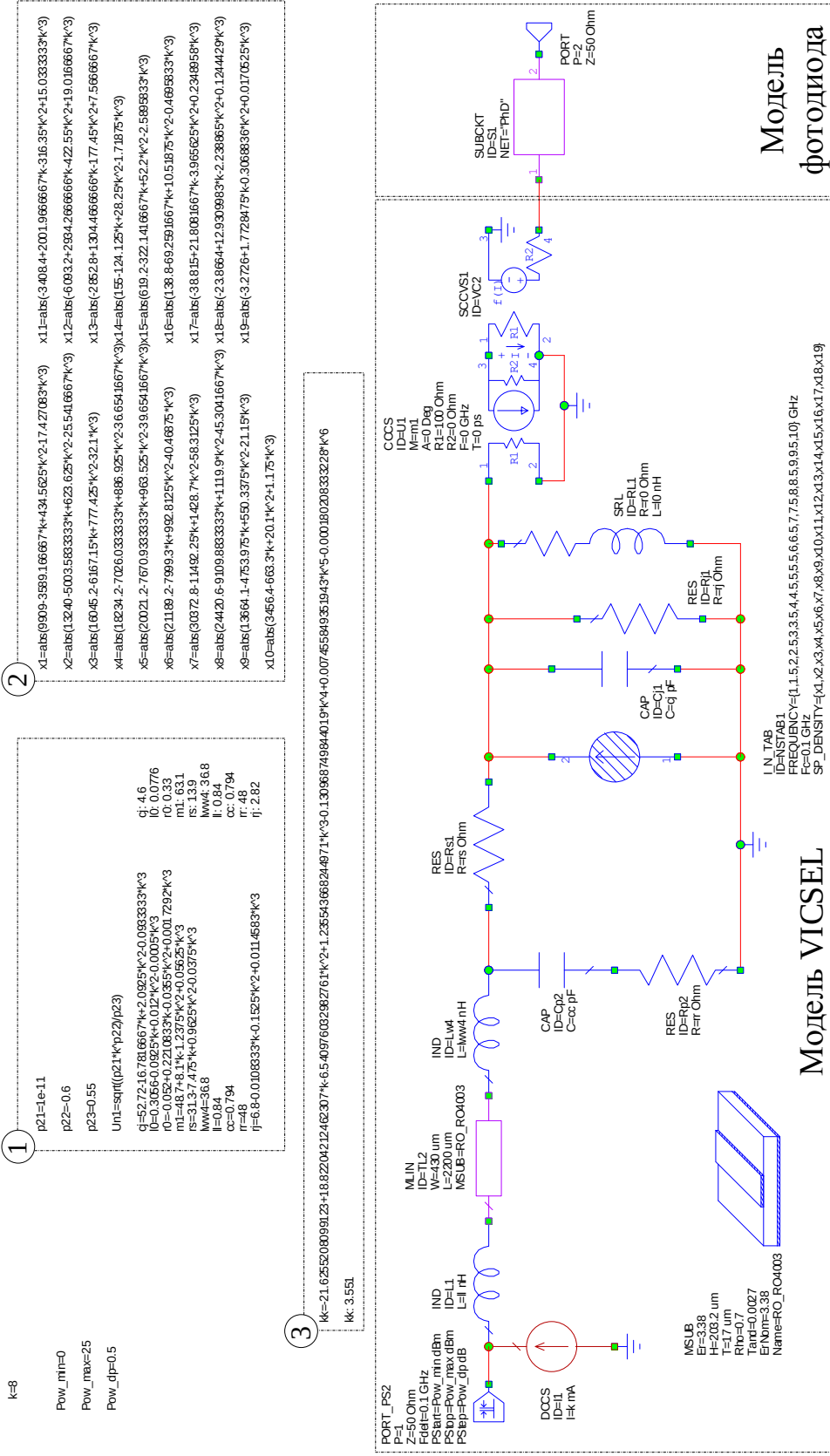
**Схема № 1** (рис. 1.1) включает активные и реактивные составляющие эквивалентной радиочастотной цепи лазера (группа переменных «1»), учитывающие особенности структуры полупроводниковых слоев и СВЧ-топологии электродов.

В структуру схемы включены модули САПР CCCS (управляемый ток источник тока) и SCCVS (нелинейно управляемый ток источник напряжения), которые позволяют реализовать модель ватт-амперной характеристики (ВтАХ) реального полупроводникового лазерного диода. Частотно-модуляционная характеристика модели лазерного диода зависит от заданной рабочей точки на ВтАХ, определяемой током смещения, который задается переменной «k» в диапазоне 4 — 10 мА. Полином, описывающий ВтАХ лазерного диода, задается в модуле SCCVS набором коэффициентов, значения которых рассчитываются в группе переменных «2». Калибровка уровня выходного сигнала схемы производится с помощью переменной «kk» в модуле CCCS (группа переменных «3»). Калибровка модели лазера производится с учетом включения в выходном тракте волоконно-оптической схемы фотодетектора, для которого разработана эквивалентная электрическая схема, показанная на рис. 1.2. В схеме на рис. 1.1 модель фотодетектора используется как подсхема SUBCKT «PhD». Калибровка схемы № 1 производилась по результатам предварительных измерений характеристик лазерного диода, на основании которых и была реализована представленная нелинейная имитационная эквивалентная электрическая модель диода.

Отношение сигнал/шум в относительно коротких волоконно-оптических линиях, повсеместно используемых в радиофотонике, определяется, главным образом, относительным шумом интенсивности (RIN) лазера, который преобразуется в дробовой шум на выходе фотодетектора. В рабочем диапазоне СВЧ уровень RIN современных лазеров составляет  $-160$  —  $-140$  дБ/Гц. Согласно теории, уровень RIN растёт по мере увеличения частоты модуляции. В схеме на рис. 1.1 RIN задается с помощью модуля I\_N\_TAB — таблично задаваемого частотно-зависимого источника спектральной плотности тока шума.

Выходным сигналом схемы, показанной на рис. 1.1, является СВЧ сигнал, являющийся квазиоптическим (без заполнения несущей оптической частотой), что несколько ограничивает возможности ее применения.

Ток смещения: 4, 6, 8, 10 mA



Ток смещения: 4, 6, 8, 10 мА

I=8

MMF=288.8780038 488851+310.4900534 703475%+141.4488317 786388%+2+35.3059504 1128703%+3-5.2132497 35629175%+4+0.45551107 7070183%+5-0.0218166 6448805%+6+0.0004420 634332%+7

Model:

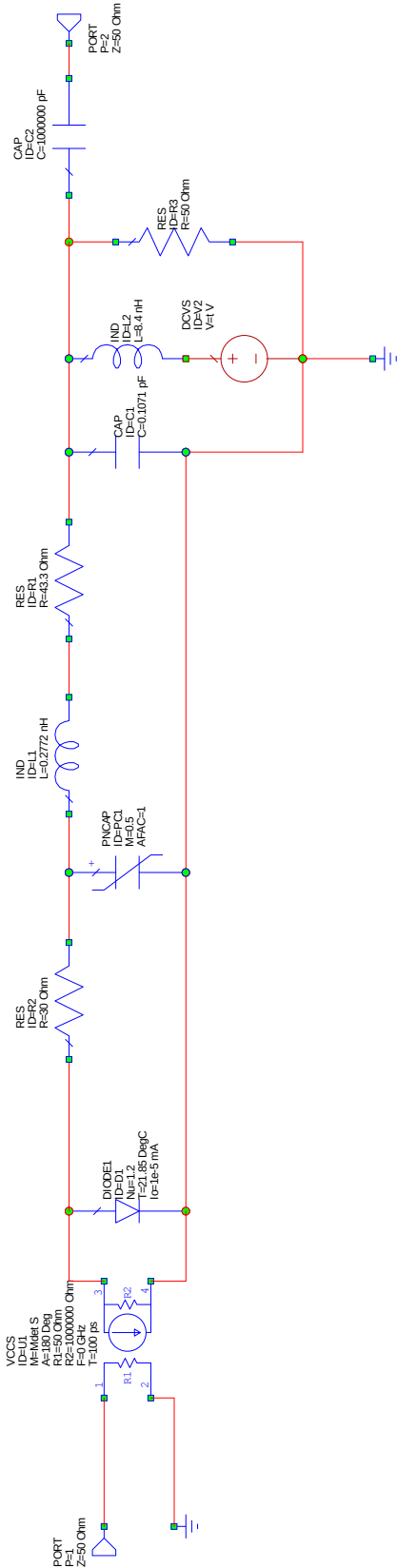


Рисунок 1.2 — Эквивалентная электрическая схема фотодиода

На рис. 1.3 показаны ненормированные частотно-модуляционные характеристики имитационной эквивалентной модели лазера. На рис. 1.4 показаны частотные характеристики RIN имитационной эквивалентной модели лазера.

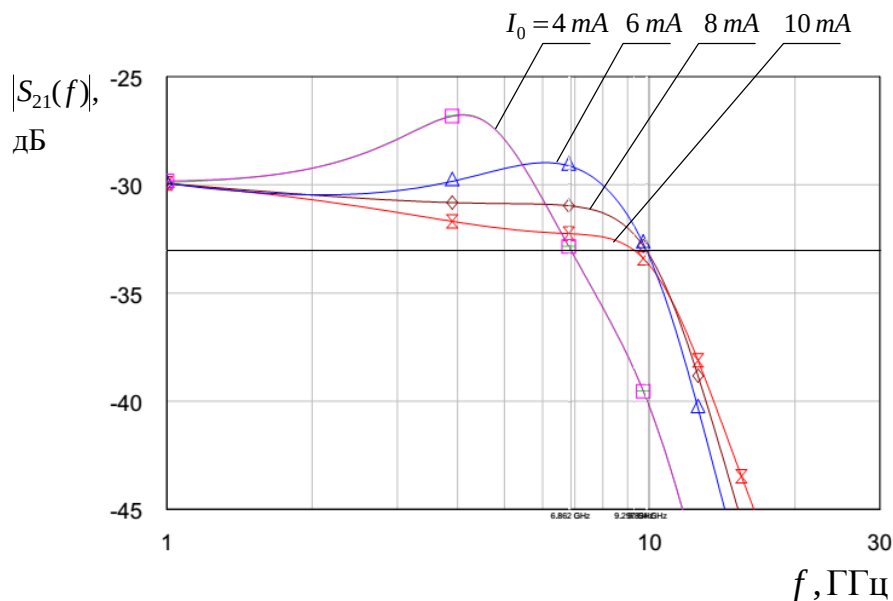


Рисунок 1.3 — Ненормированные частотно-модуляционные характеристики имитационной эквивалентной модели лазера

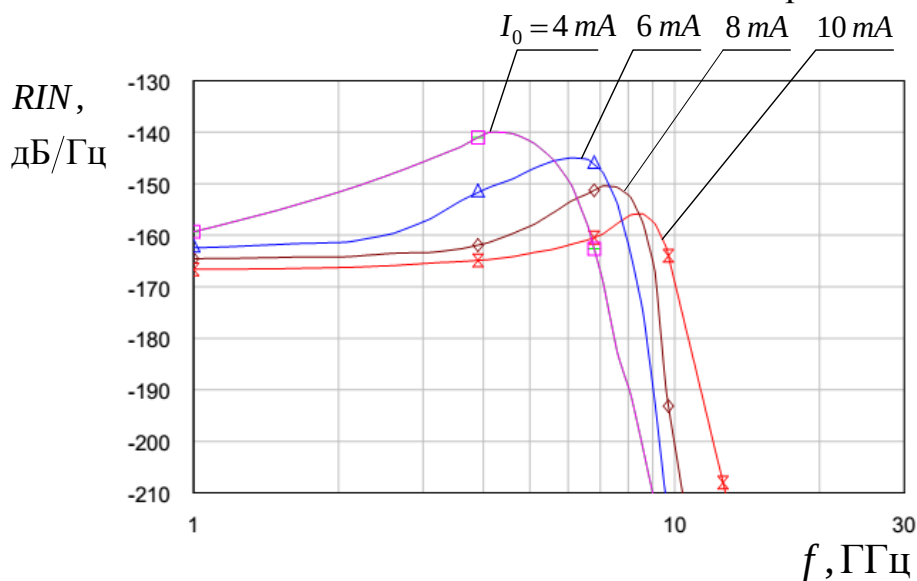


Рисунок 1.4 — Частотные характеристики RIN имитационной эквивалентной модели лазера

**Схема № 2** (рис. 1.5) — физическая эквивалентная электрическая модель полупроводникового лазера с прямой модуляцией по интенсивности реальной оптической несущей.

В модели лазера с квазиоптической несущей ее зависимость от температуры введена с помощью дополнительного источника гармонического сигнала. Основной ( $f_{\text{optic}} - 1000$  ГГц, порт 1) и дополнительный ( $\Delta f_t + 1000$  ГГц, порт 4) тона подаются на диод, выполняющий роль перемножителя сигналов.

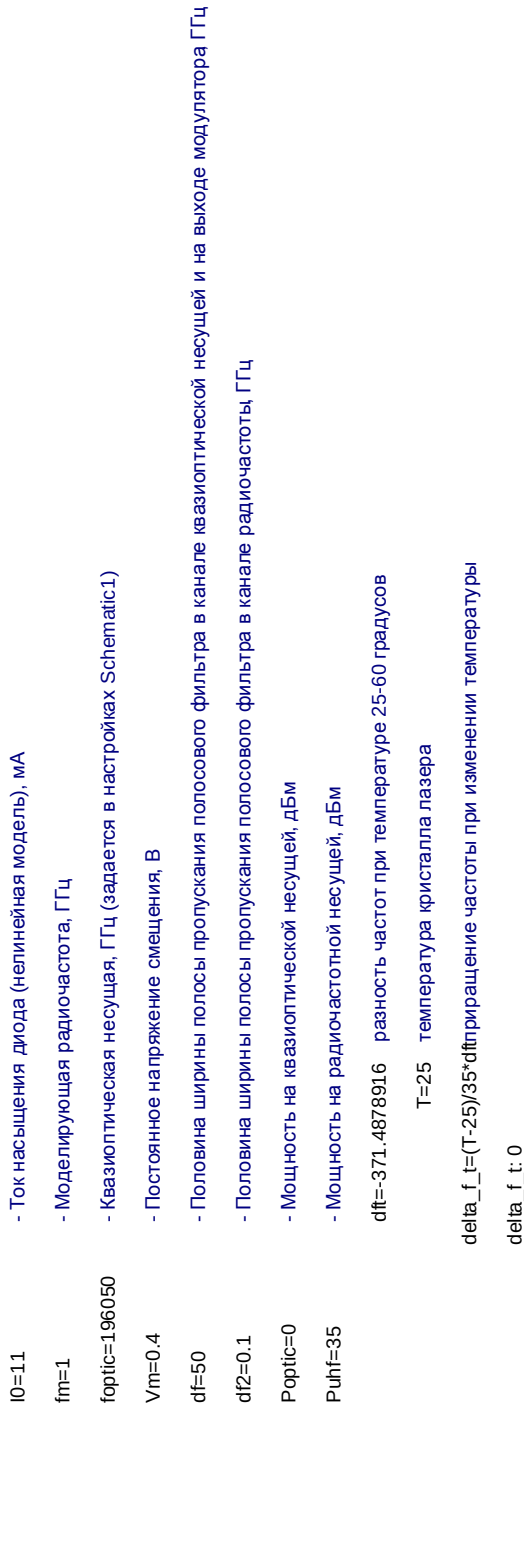


Рисунок 1.5 — Физическая эквивалентная электрическая модель полупроводникового лазера с прямой модуляцией по интенсивности реальной оптической несущей

Значение частоты вспомогательного тона зависит от множителя  $\delta f_t$ , описывающего температурную зависимость квазиоптической несущей лазера. Полоса частот выходного фильтра также корректируется с учетом множителя  $\delta f_t$ . Для качественного подавления ненужных комбинационных составляющих задана существенная фиксированная разница значений частот двух тонов, формирующих частоту оптической несущей.

Подсхема SUBCKT «Schematic 2» содержит модель физической эквивалентной схемы радиочастотных и шумовых характеристик полупроводникового лазера (см. рис. 1.1).

Пример измеренного в САПР амплитудного спектра на выходе модели лазера показан на рис. 1.6.

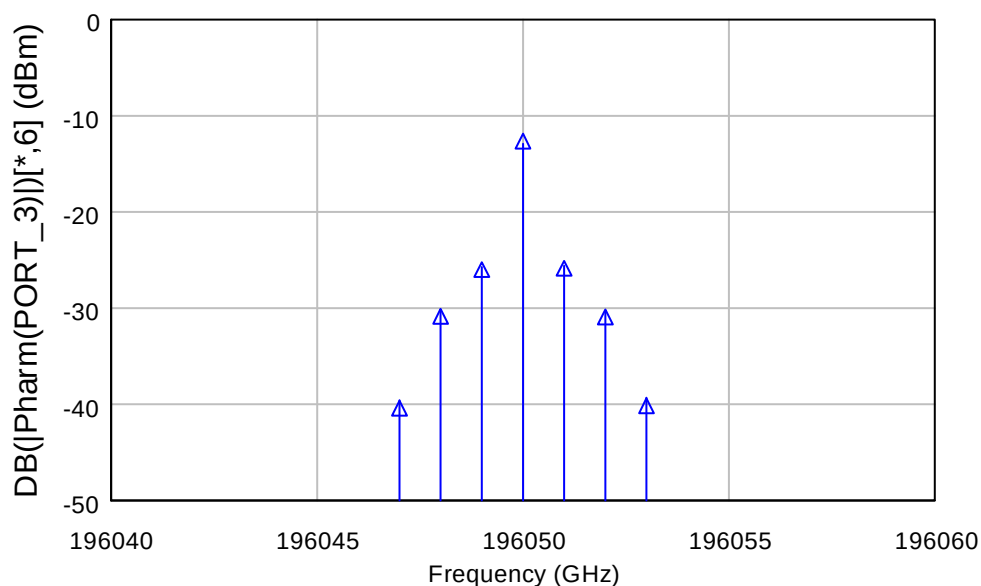


Рисунок 1.6 — Пример измеренного в САПР амплитудного спектра на выходе модели лазера

**Схема № 3** (рис. 1.7) применяется в сложных моделях, где требуется задействовать много задающих гармонических сигналов, «тонов», что связано с большими вычислительными нагрузками.

В этом случае для реализации модели лазерного диода с квазиоптической несущей оптической несущей применяется упрощенная схема источника, в виде модуля с шумовой характеристикой лазера («RIN-модуль»), показанной на рис. 1.5. Шумовая характеристика реализована симметрично справа и слева относительно оптической несущей. Мощность оптического сигнала рассчитывается исходя из заданного тока накачки.

Данная модель применима для случаев, когда лазерный диод работает в линейном режиме — без модуляции или на линейном участке ВТАХ в случае прямой модуляции интенсивности излучения.

Ток смещения: 4, 6, 8, 10 мА

 $k=10$ 

Мощность излучения лазера, дБм

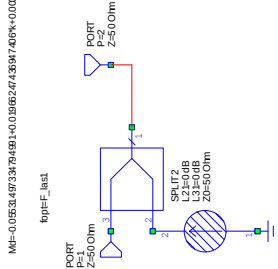
$$k1=k^*1e-3$$
$$P11=0.000085043857837-0.24960023340361956*K1+117.10562623380095*K1^2-10427.909195022516*K1^3+419637.908180922*K1^4-6751162.559396238*K1^5$$
$$P_{\text{laser}} = 10^* \log_{10}(P_{11/0.001})$$
[illegible]

Рисунок 1.6 — Эквивалентная электрическая схема шумовой характеристики лазера на частоте оптической несущей

## 1.2. Физическая эквивалентная модель электрооптического модулятора Маха-Цандера

Поскольку в разделе «Schematic» AWR DE доступны широкие возможности для нелинейного моделирования микроволновых устройств с учетом различных видов планарных топологий и развитой элементной базы активных и пассивных компонентов при минимальных затратах машинного времени, то оптимальным подходом является разработка модели модулятора Маха-Цандера (ММЦ) в этом разделе САПР. Кроме того, для сохранения функциональных возможностей модели модулятора необходимо обеспечить его совместную работу в РЧ- и оптическом диапазонах.

Базовым элементом новой нелинейной модели ММЦ является фазосдвигающая ячейка (ФСЯ), ФЭС которой представлена на рис. 1.6. В схеме на вход библиотечной модели циркулятора CRC через библиотечную модель сумматора мощностей SPLIT2 подаются сигналы на радиочастоте (Вход 1) и на оптической частоте (Вход 2). При этом напряжение РЧ-сигнала управляет нелинейной емкостью библиотечной модели переменного конденсатора VRCTR, зависимость которой задается в табличной форме, изменяя вносимый фазовый сдвиг. На выходе циркулятора установлена библиотечная модель диплексера DPLEXF, выделяющая только составляющую на оптической частоте, модулированную по фазе.

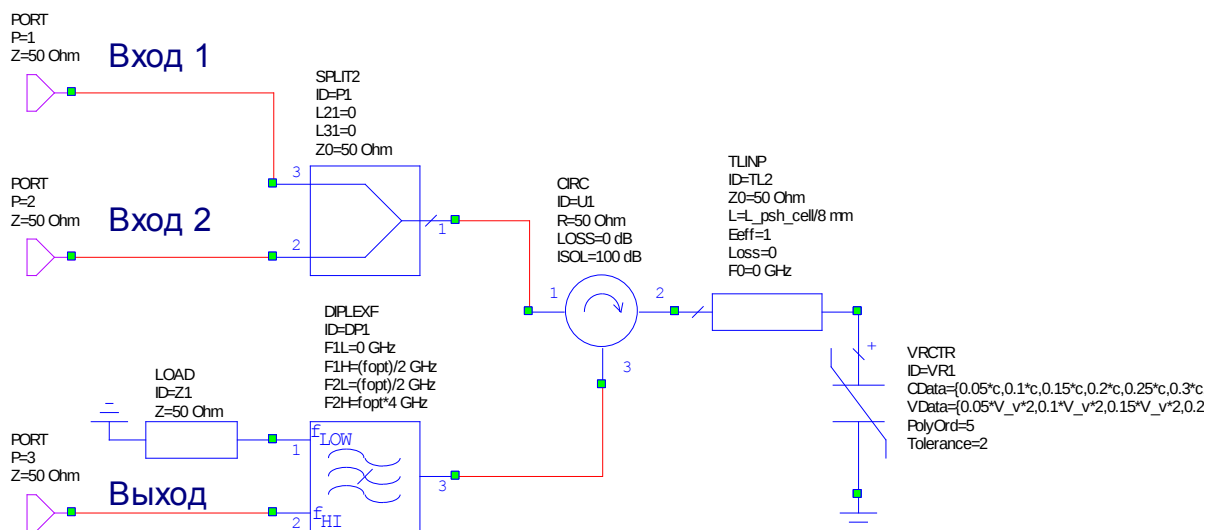


Рисунок 1.6 — Схема модели фазосдвигающей ячейки

Анализ функционирования различных библиотечных элементов AWRDE показал, что оптимальным техническим решением при разработке схемы ФСЯ является использование данной модели управляемого напряжением конденсатора. Принцип работы такого элемента поясним на примере рис. 1.7, где рассмотрен режим работы линии передачи, нагруженной на емкостную нагрузку.

$$l = \frac{1}{k} \arctg(\rho\omega C)$$

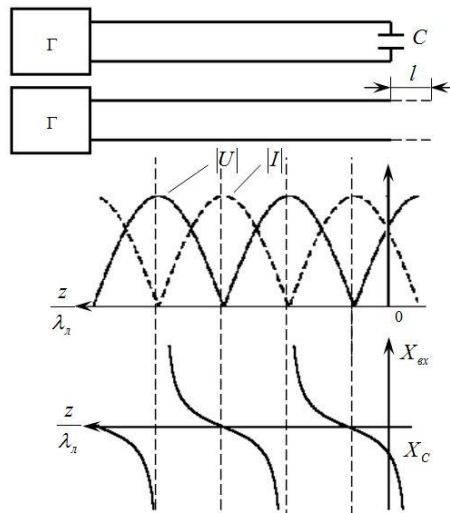


Рисунок 1.7 — Пояснение принципа работы фазосдвигающей цепочки

На рисунке падающая со стороны генератора  $\Gamma$  волна полностью отражается от реактивной нагрузки и получает на ней набег фазы, который в распределениях напряжения и тока вызывает смещение пучности напряжения и узла тока из точки подключения нагрузки на величину, пропорциональную емкости нагрузки. Это эквивалентно увеличению длины линии передачи на величину  $l$ , определяемую по формуле

$$l = \frac{1}{k} \arctg(\rho\omega C), \quad (1.1)$$

где  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  — волновое число;  $\rho$  — волновое сопротивление линии передачи;  $\lambda$  — длина волны оптического излучения;  $\omega = 2\pi f$  — оптическая круговая частота. Из рис. 1.7 и формулы (1.1) следует:

- набег фазы  $kl$  в общем случае нелинейно зависит от емкости и является ее периодической функцией;
- допустимый диапазон изменения емкости ограничен относительно небольшим линейным участком изменения вносимой фазы  $kl$  и диапазоном изменения входного сопротивления линии передачи, нагруженной емкостью;
- для расширения пределов требуемого квазилинейного управления фазовым сдвигом, вносимым ФСЯ, необходимо использовать несколько последовательно включенных ФСЯ, работающих на линейном участке зависимости, определяемой (1.1).

Для иллюстрации на рис. 1.8 показаны расчетные зависимости сдвига фазы квазиоптического сигнала от управляющего напряжения при типичном значении  $U_\pi = 4$  В для разной длины цепочки ФСЯ. С целью сравнения на том же рисунке приведена предельная линейная теоретическая зависимость (1.1). Из рисунка видно, что одна ФСЯ (кривая (1)) обеспечивает примерную линейность управления сдвигом фаз квазиоптического сигнала лишь в небольших пределах изменений фазы (около  $90^\circ$ ). Увеличение числа последовательных ФСЯ до четырех (кривая (2)) приводит к значительному расширению (примерно до  $300^\circ$ ) квазилинейного участка фазовой характеристики.

На основе описанной выше схемы ФСЯ была разработана показанная на

рис. 1.8 эквивалентная схема фазового модулятора (ФМ) в плече ММЦ. Модель ФМ является нелинейной, что соответствует реальным характеристикам этих устройств. В модуляторе количество ячеек увеличено до 4 для обеспечения квазилинейной перестройки вносимого сдвига фаз в пределах более  $180^\circ$ , типично требуемого для работы ММЦ. Результирующий фазовый сдвиг формируется в фазовом модуляторе как алгебраическая сумма сдвигов фаз, полученных в каждой из ячеек, поскольку сигнал на оптической частоте последовательно проходит через все ФСЯ.

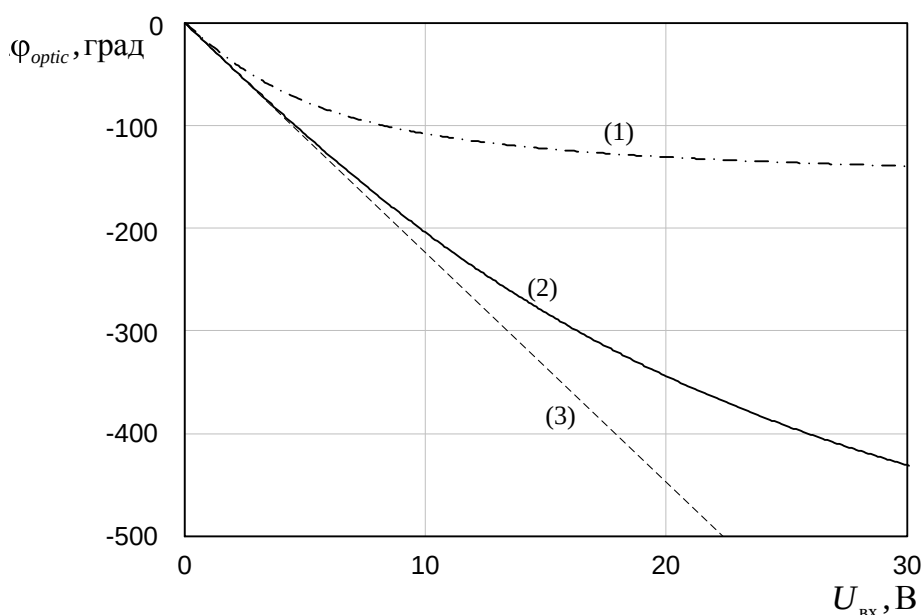


Рисунок 1.7 — Зависимость сдвига фаз квазиоптического сигнала от управляющего напряжения: (1) — одна ФСЯ; (2) — 4 ФСЯ; (3) — линейная теоретическая зависимость  $\Delta\phi = U_{ВХ} \frac{180}{U_{\pi}}$

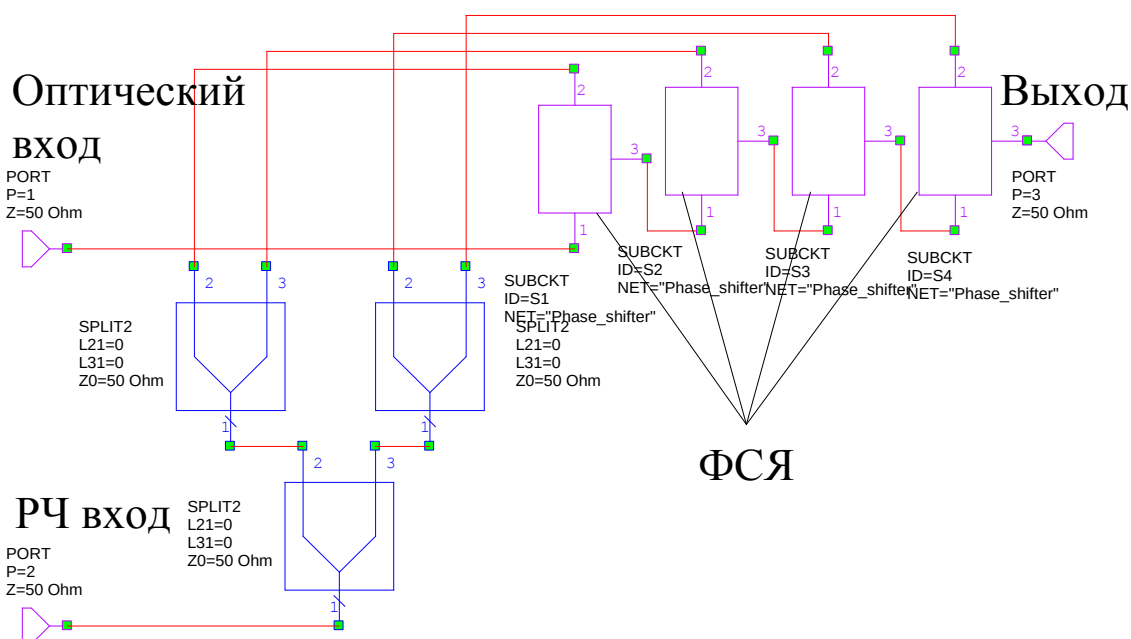


Рисунок 1.8 — Эквивалентная электрическая модель фазового модулятора, реализованная на четырех фазосдвигающих ячейках

На основании описанных выше входящих схем разработана результирующая эквивалентная схема ММЦ, вариант которой с ФМ в каждом из двух плеч представлен на рис. 1.9.

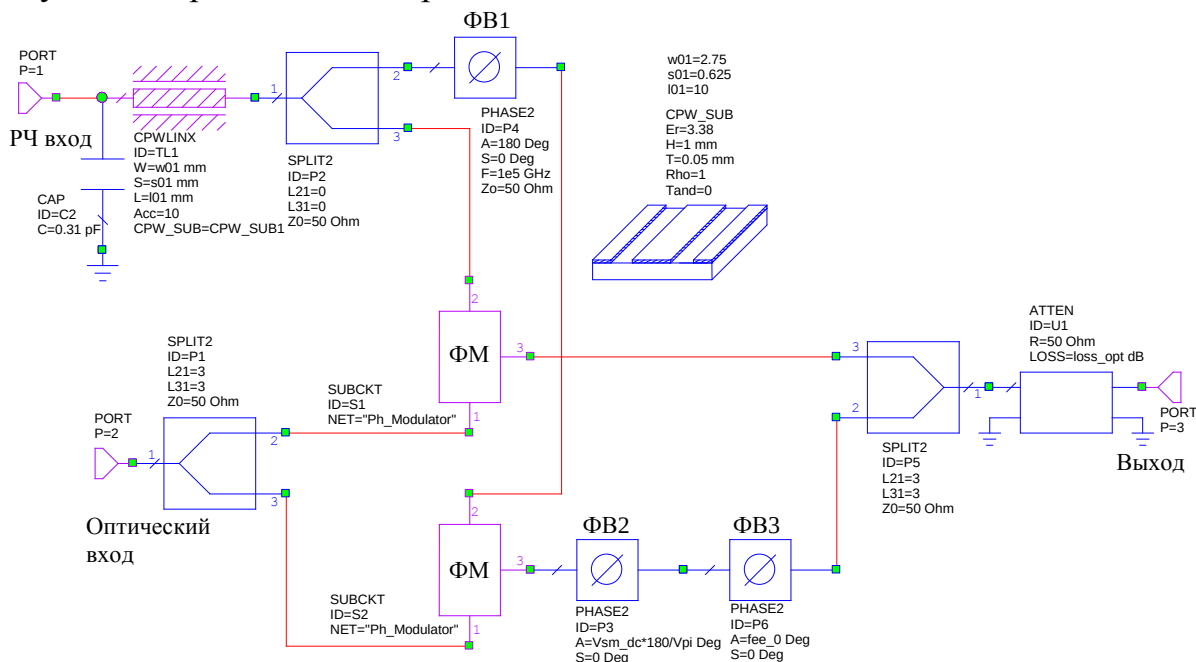


Рисунок 1.9 — Эквивалентная нелинейная электрическая модель ММЦ

В схеме разнополярность модулирующих напряжений для двух ФМ ММЦ обеспечивается библиотечной моделью фазовращателя ФВ1. Рабочая точка на передаточной характеристике ММЦ задается постоянным напряжением смещения  $U_{см}$ , значение которого в модели пересчитывается с учетом заданного полуволнового напряжения  $U_{\pi}$  в сдвиг фаз фазовращателя ФВ2  $\varphi_{ps2}$  по формуле  $\varphi_{ps2} = U_{см} \frac{180}{U_{\pi}}$ , град. Назначение моделей фазовращателя ФВ3 и аттенюатора

ATTEN на выходе схемы состоит в калибровке передаточной характеристики ММЦ в ходе экспериментальной верификации. Аттенюатор определяет потери, вносимые по оптическому сигналу в тракте модулятора, а ФВ3 — сдвиг передаточной характеристики ММЦ по оси управляющего напряжения, определяемый задержкой оптического сигнала в тракте модулятора. Для анализа характеристик ММЦ в радиочастотном диапазоне к выходу его схемы (Port 3) подключается модель фотодетектора (см. рис. 1.2). Учет сосредоточенной входной емкости модулятора по управляющему входу и распределенной электромагнитной связи между СВЧ и оптическими полями осуществляется при помощи библиотечных моделей CAP постоянного конденсатора и копланарной СВЧ линии передачи CPWLINK, размеры и взаимоположение проводников и параметры которой соответствуют реальному ММЦ. Оба этих элемента определяют полосу модуляции ММЦ.

На рис. 1.10 показаны результаты численного моделирования передаточной характеристики разработанной модели ММЦ после калибровки по паспортным данным (полуволновое напряжение, начальная фаза, полоса модуляции и т.д.) серийного ММЦ типа MXER-LN, Photline Technologies,

Франция и экспериментальная характеристика данного прибора. Высокая степень совпадения свидетельствует о корректности разработанной модели ММЦ.

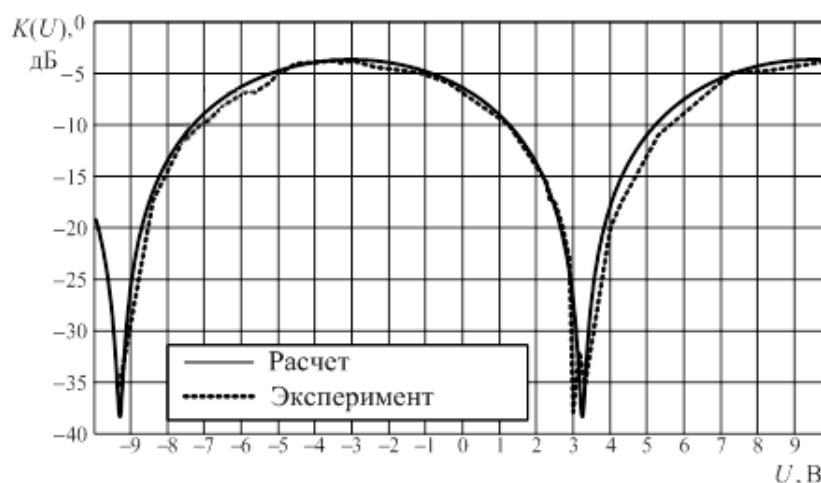


Рисунок 1.10 — Теоретическая и экспериментальная передаточные характеристики ММЦ

### 1.3. Физическая эквивалентная модель электроабсорбционного модулятора

На практике в устройствах радиофотоники для реализации внешней модуляции широко используются электроабсорбционные модуляторы (ЭАМ). Физическая эквивалентная электрическая модель ЭАМ в САПР AWR DE показана на рис. 1.11.

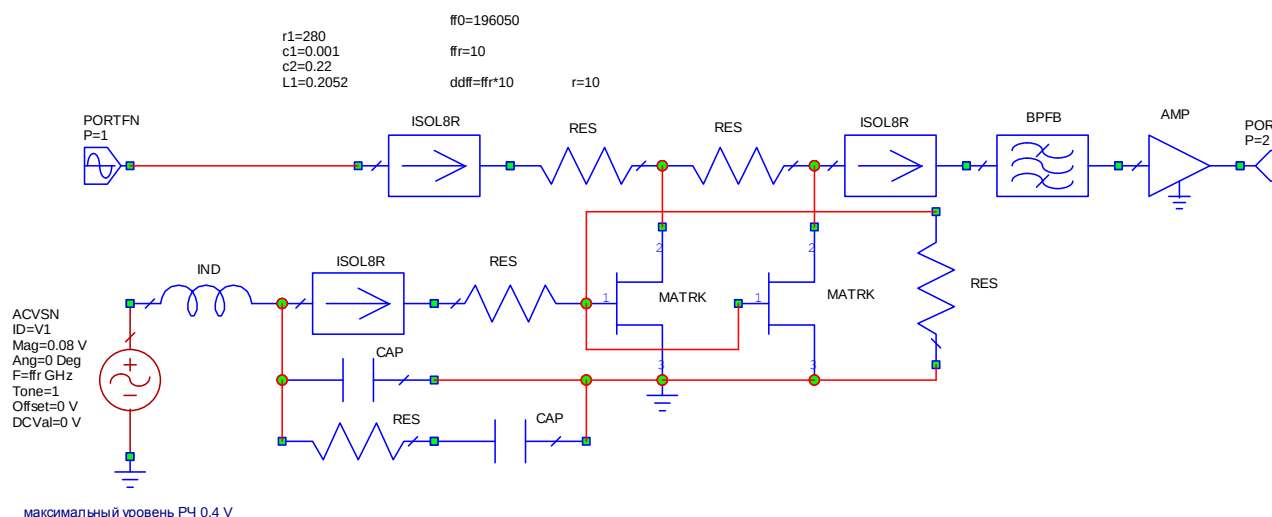


Рисунок 1.11 — Физическая эквивалентная электрическая модель электроабсорбционного модулятора в САПР AWR DE

В данной схеме воспроизведен механизм модуляции оптического сигнала по интенсивности с учетом нелинейности этого процесса. На порт 1 подается

оптическая несущая с заданной мощностью. Источник гармонического напряжения ACVSN формирует моделирующий радиосигнал. Детектирование оптического моделированного сигнала осуществляется с помощью эквивалентной модели фотодиода SUBCKT «PhD».

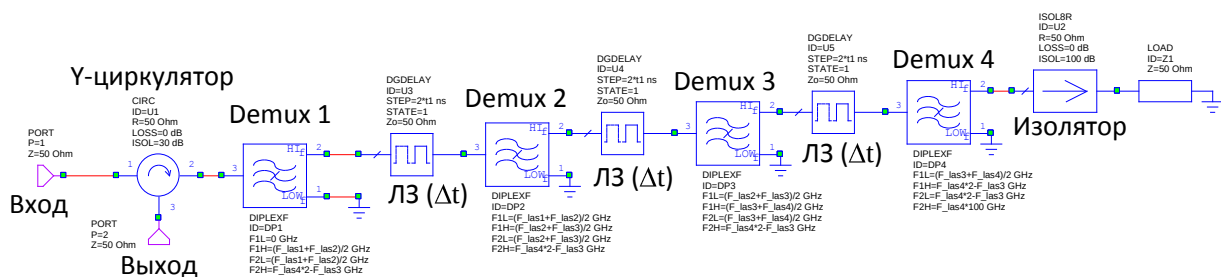
#### 1.4. Физические эквивалентные модели многочастотных линий задержки на основе Брэгговских решеток

Для построения современных радиотехнических комплексов со сложным разветвленным трактом, таких как диаграммообразующие схемы фазированных антенных решеток, на основе гибридного оптоэлектронного тракта одним из составных элементов волоконно-оптического интерфейса может использоваться Брэгговская решетка (БР). Для обеспечения требуемого фазового распределения в раскрыве антенны необходима Брэгговская решетка, состоящая из нескольких последовательных участков, каждый последующий из которых обеспечивает отражение падающих волн с более высокой частотой.

В среде *Schematic* в *AWR DE* разработаны эквивалентные схемы, моделирующие работу многоволновой Брэгговской решетки (рис. 1.12).

Обе модели предполагают, что на вход БР поступает групповой сигнал, содержащий четыре сигнала на частотах оптического диапазона  $f_{las1}$ ,  $f_{las2}$ ,  $f_{las3}$ ,  $f_{las4}$  ( $f_{las1} < f_{las2} < f_{las3} < f_{las4}$ ). Особенности распространения сигналов на неоднородностях брэгговских решеток описываются диплексорами, которые разделяют групповой сигнал и выделяют на выходах «Low<sub>f</sub>» и «Hi<sub>f</sub>» частоты, указанные в табл. 1.1.

а)



б)

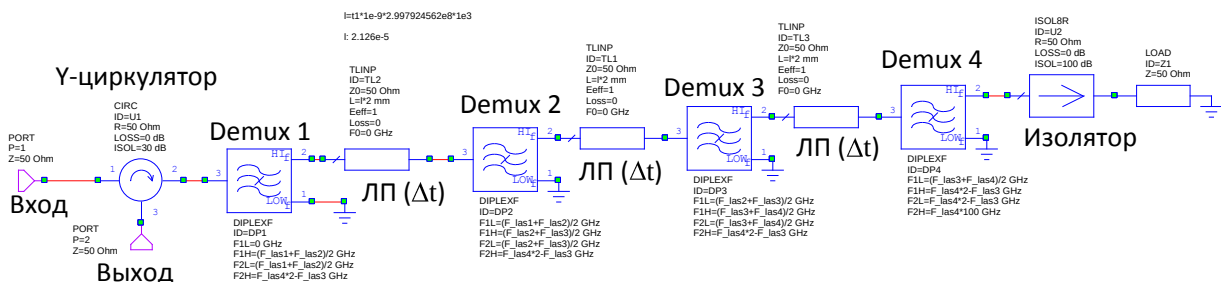


Рисунок 1.12 — Физические эквивалентные схемы многоволновой Брэгговской решетки, реализованные на линиях задержки (а) и на моделях линий передачи (б)

Таблица 1.1 — Частоты каналов диплексеров

| Диплексер                   | Demux 1           | Demux 2           | Demux 3           | Demux 4                      |
|-----------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------------------|
| Частоты «Low <sub>f</sub> » | $f < f_{las2}$    | $f < f_{las3}$    | $f < f_{las4}$    | $f < f_{las4} + \delta f$    |
| Частоты «Hi <sub>f</sub> »  | $f \geq f_{las2}$ | $f \geq f_{las3}$ | $f \geq f_{las4}$ | $f \geq f_{las4} + \delta f$ |

Выделенные в каналах диплексеров «Low<sub>f</sub>» сигналы отражаются от короткого замыкания, распространяются в сторону Y-циркулятора и объединяются на выходе схемы. Причем, каждый из сигналов проходит разное расстояние в схеме и получает различную временную задержку. В схеме отрезки регулярных линий передачи описываются или линиями задержки (ЛЗ) (рис. 1.12, а) или моделями отрезков линий передачи (рис. 1.12, б), которые не привязаны к какому-либо конкретному типу линии. На выходе схемы задержки четырех рабочих длин волн принимает значения, указанные в табл. 1.2.

Таблица 1.2 — Временные задержки рабочих длин волн

| Длина волны        | $\lambda_1$ | $\lambda_2$ | $\lambda_3$ | $\lambda_4$ |
|--------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Временная задержка | 0           | $2\Delta t$ | $4\Delta t$ | $6\Delta t$ |

## 2. Лабораторная работа № 1. Сверхширокополосный радиофотонный СВЧ-фазовращатель

### 2.1. Цель работы

Целью работы является: исследовать различные схемы построения радиофотонных схем СВЧ-фазовращателей и исследование их в САПР AWR DE с применением разработанных физических эквивалентных электрических схем оптоэлектронных компонентов.

### 2.2. Описание модели радиофотонного фазовращателя

В работах [5, 6] предложены методы построения СВЧ фазовращателей на основе оптоэлектронных компонентов, отличающиеся широкой полосой рабочих частот (от 2 до 16 ГГц в [5] и от 10 до 40 ГГц в [6]) с малыми изменениями фазового сдвига в пределах всей полосы, диапазоном перестройки вносимого фазового сдвига в пределах  $0^\circ$  —  $360^\circ$ , простотой управления и высокой линейностью перестройки фазы, относительной простотой конструктивного исполнения и относительно небольшими вносимыми потерями.

Рассмотрим физическую эквивалентную электрическую модель фазовращателя, описанного в [5], реализованную в САПР AWR DE.

Структурная схема фазовращателя показана на рис. 2.1, где введены обозначения: ФМ — оптические фазовые модуляторы; ОФВ — оптический фазовращатель; ФД — фотодетектор;  $U_{b1}$ ,  $U_{b2}$ ,  $U_{b3}$  — постоянные напряжения смещения;  $U_{pч}$  — радиосигнал.

Структурно фазовращатель реализован по типовой схеме квадратурного однополосного модулятора, в которой используются два амплитудных электрооптических модулятора, на которые радиосигнал подается в квадратуре, и в один из каналов с помощью блока ОФВ вводится дополнительный квадратурный фазовый сдвиг.

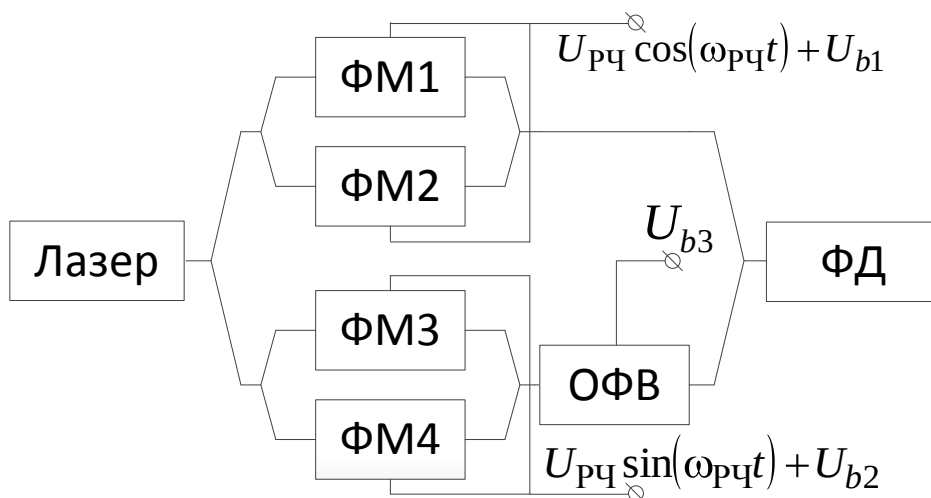


Рисунок 2.1 — Структурная схема фазовращателя [5]

В [5] для построения фазовращателя использованы электрооптические модуляторы Маха-Цандера (ММЦ) и возможность управления фазой радиосигнала в данной схеме обусловлена выбором в определенном соотношении постоянных напряжений смещения  $U_{b1}$ ,  $U_{b2}$ ,  $U_{b3}$ :

$$U_{b1} = U_{\pi} \frac{2\varphi - \pi}{4\pi}; U_{b2} = U_{\pi} \frac{\varphi - \pi}{2\pi}; U_{b3} = \frac{U_{\pi}}{2},$$

где  $U_{\pi}$  — напряжение полуволнового смещения ММЦ;  $\varphi$  — требуемый фазовый сдвиг радиосигнала.

Ключевыми элементами эквивалентной электрической схемы оптоэлектрического фазовращателя являются ММЦ, реализованные на соответствующих парах оптических ФМ.

Для электрооптического ММЦ в САПР AWR Microwave Office была разработана эквивалентная электрическая схема, корректность которой проверена по результатам экспериментальных исследований.

С учетом созданной модели ММЦ разработана физическая эквивалентная электрическая схема фазовращателя РФФ-1, показанная на рис. 2.2.

В состав проекта в САПР AWR DE для реализации данной модели реализованы вспомогательные компоненты:

- проект лазера (Схема № 3) — файл «Laser\_model\_3.sch»;
- проект фазосдвигающей секции (ФСС) — файл «Phase\_shifter.sch»;
- проект фазового модулятора (ФМ) — файл «Ph\_Modulator.sch»;
- проект фотодетектора — файл «PhD.sch»;
- проект схемы для частотной селекции протектированного выходного СВЧ-сигнала на фоне побочных спектральных компонент оптического диапазона, которые должны быть удалены с выхода эквивалентной схемы фотодиода, — файл «Output signal selector.sch»;
- файл с описанием S-параметров частотно-избирательного делителя, который «отчищает» спектр оптического сигнала от побочных спектральных СВЧ-составляющих, обусловленных спецификой построенной эквивалентной схемы оптического тракта, — файл «freq\_splitter.s2p»;
- файл с описанием «Глобальных переменных», которые используются в разных подсхемах проекта — файл «Global Definitions.ieq».

Все эти компоненты необходимо импортировать в соответствующие разделы формируемого дерева проекта, как показано на рис. 2.3.

Настройка измерения модуля и фазы выходного СВЧ сигнала РФФ-1 реализуется с применением анализатора спектральных составляющих выходного напряжения, как показано на рис. 2.4.

Примеры моделирования в САПР AWR DE зависимости амплитуды и фазы выходного сигнала РФФ от управляющих напряжений показаны на рис. 2.5.

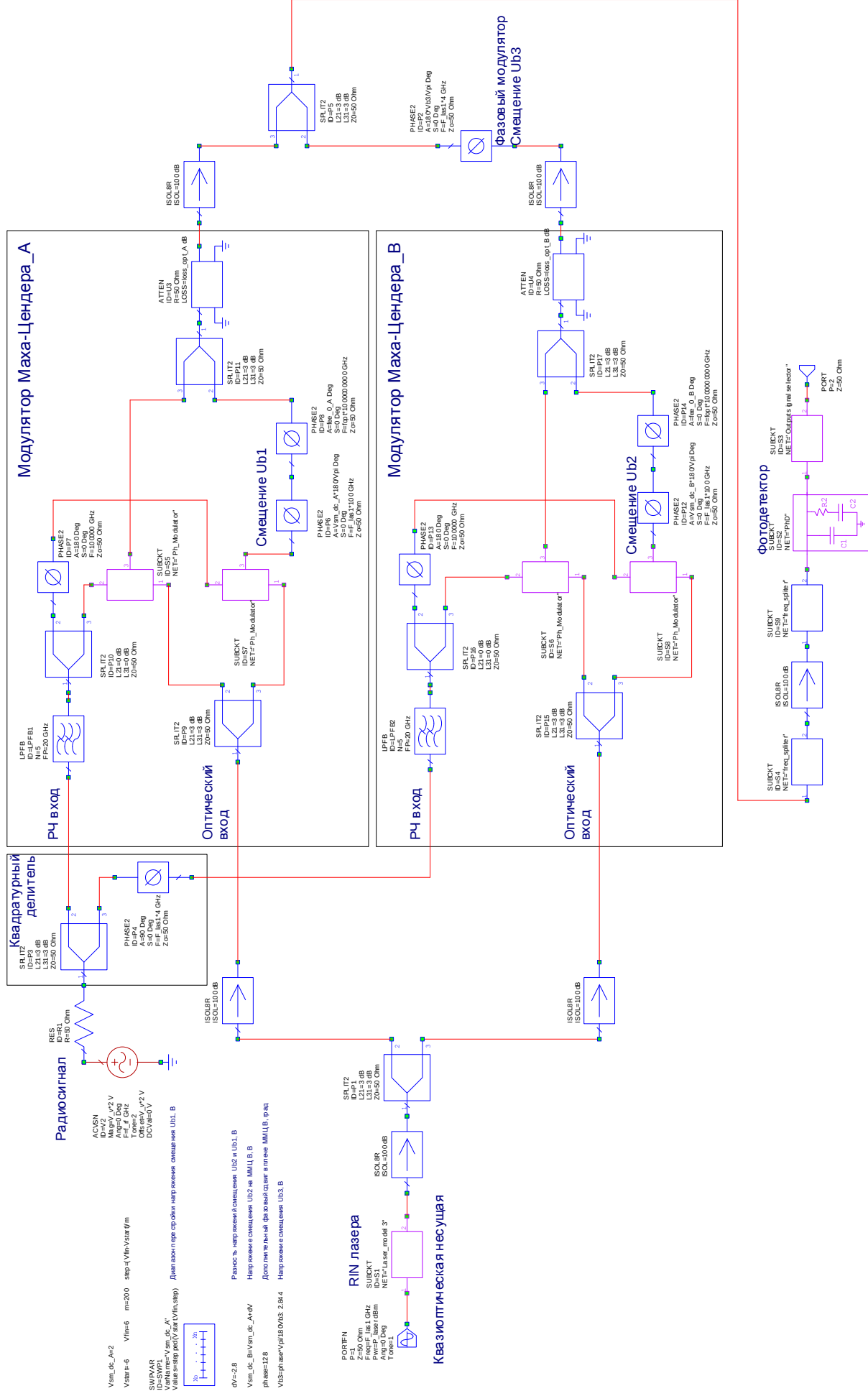


Рисунок 2.2 — Физическая эквивалентная электрическая схема фазовращателя РФФ-1

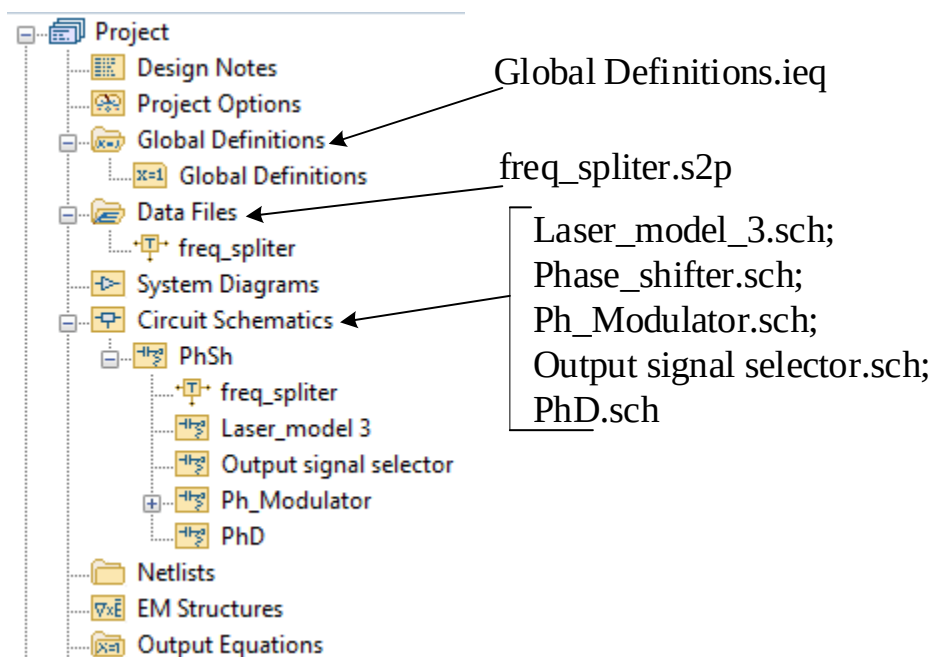


Рисунок 2.3 — Импорт вспомогательных файлов в дерево проекта РФФ

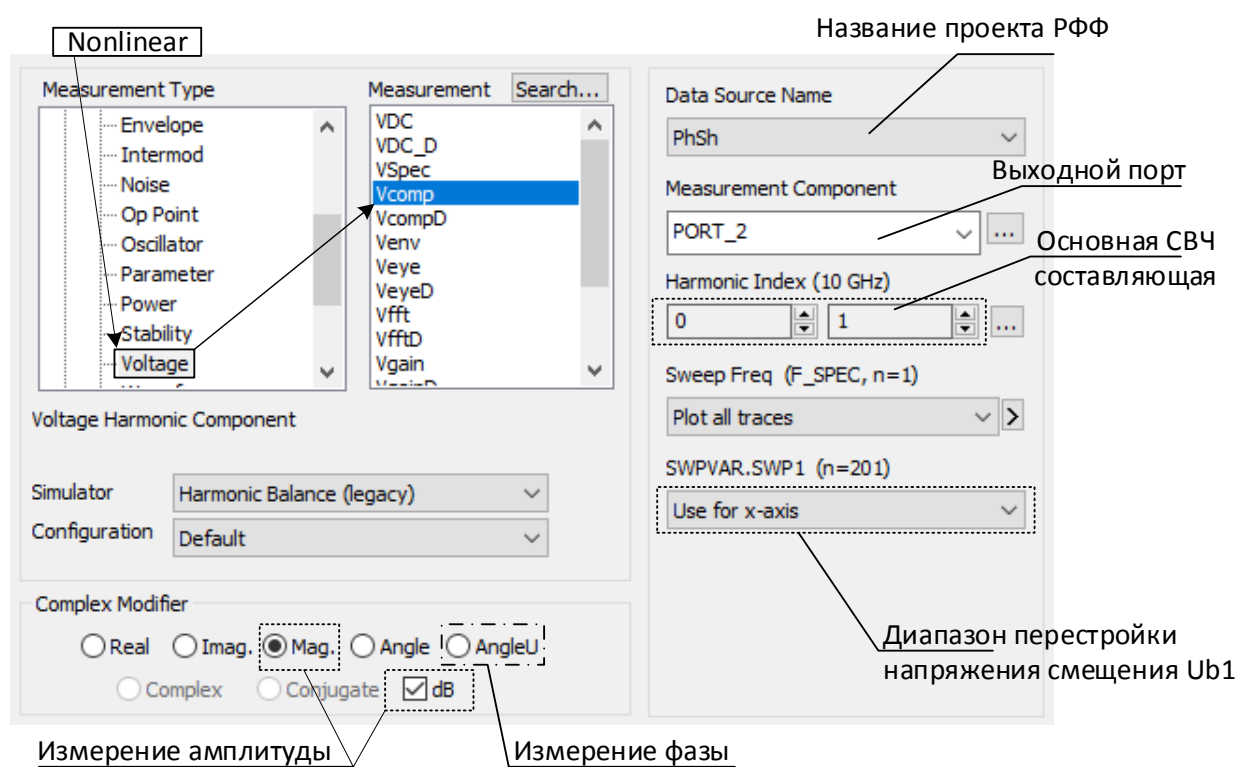


Рисунок 2.4 — Настройка измерения модуля и фазы выходного СВЧ сигнала РФФ

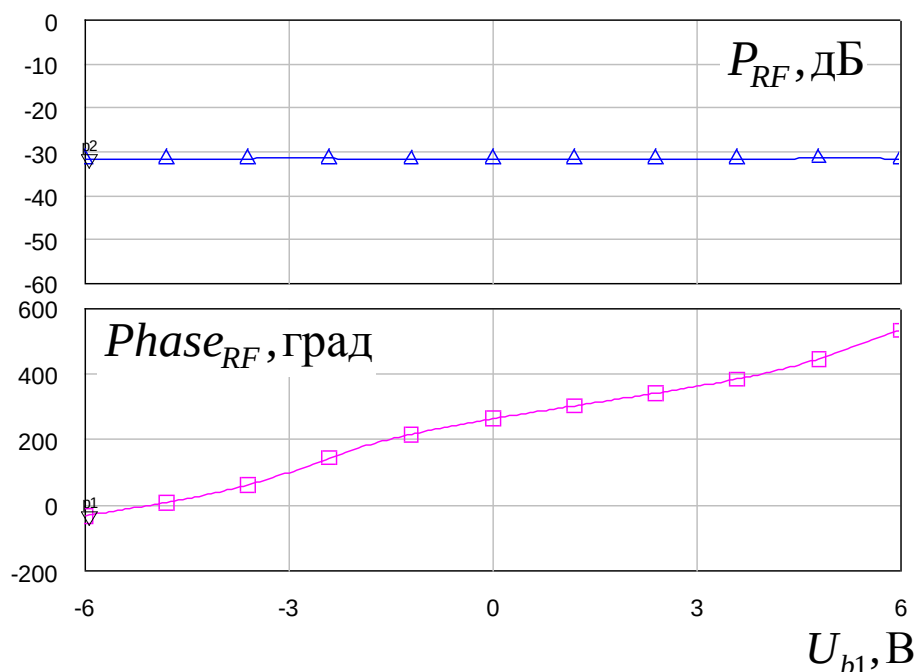


Рисунок 2.5 — Зависимость уровня и сдвига фазы выходного радиосигнала от напряжений смещений  $U_{b1}, U_{b2}, U_{b3}$  при:  $U_{b2} = U_{b1} - 2,8$  В и  $U_{b3} = 2,844$  В; напряжение полуволнового смещения модуляторов Маха-Цандера  $U_{\pi} = 4$  В; уровень мощности входного радиосигнала  $P_{RFinput} = 0$  дБм

### 2.3. Порядок выполнения работы

Исходные данные для моделирования физической эквивалентной электрической схемы радиофотонного фазовращателя РФФ-1 приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1 — Исходные данные для моделирования физической эквивалентной электрической схемы радиофотонного фазовращателя

| N                     | 0     | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     |
|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $P_{RF\ input}$ , дБм | -5    | -3    | 0     | 2     | 3     | -5    | -3    | 0     | 2     | 3     |
| $f_{СВЧ}$ , ГГц       | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    | 11    | 12    | 13    | 14    |
| $f_{optic}$ , ТГц     | 193,7 | 193,5 | 193,3 | 193,1 | 192,9 | 192,7 | 192,5 | 192,3 | 192,1 | 191,9 |
| $\Delta\phi$ , град.  | 45    | 75    | 90    | 120   | 150   | 180   | 200   | 220   | 250   | 270   |

Примечание: N — последний номер зачетной книжки обучающегося;  $P_{RF\ input}$  — мощность входного СВЧ-сигнала;  $f_{СВЧ}$  — частота СВЧ-сигнала;  $f_{optic}$  — частота оптической несущей;  $\Delta\phi$  — сдвиг фазы выходного СВЧ-сигнала в диапазоне перестройки этой фазы под управлением напряжения смещения.

**Задание 1.** В САПР AWR DE собрать модель радиофотонного СВЧ-фазовращателя, представленную на рис. 2.2. Перечень необходимых для

построения модели вспомогательных файлов приведен в п. 2.1, место импорта этих файлов в дерево проекта показано на рис. 2.3.

В настройках проекта фиксируется одна, указанная в исходных данных рабочая частота. Пример настройки частоты проекта для случая  $f_{\text{СВЧ}} = 10$  ГГц показан на рис. 2.6.

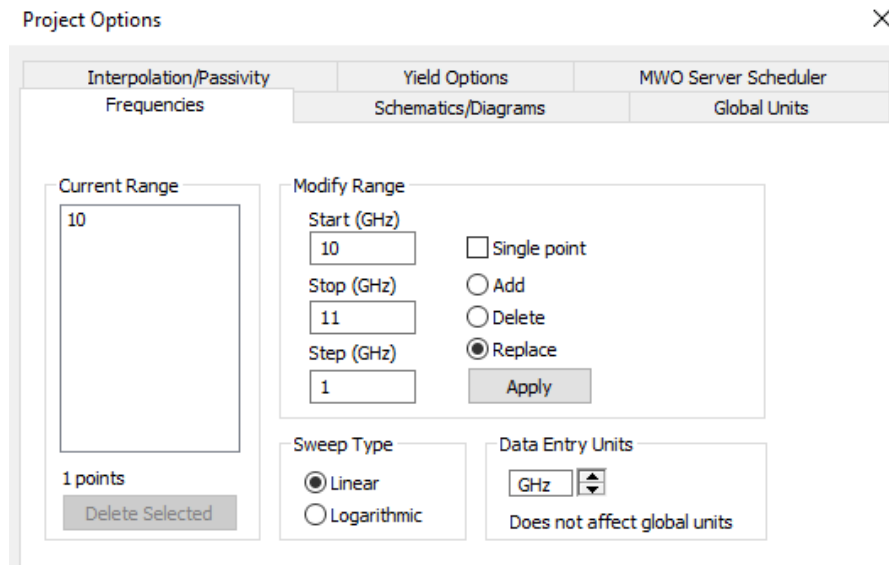


Рисунок 2.6 — Пример настройки частоты проекта для случая  $f_{\text{СВЧ}} = 10$  ГГц

**Задание 2.** Построить зависимости амплитуды и фазы выходного сигнала от управляющих напряжений ( $U_{b1}$ ,  $U_{b2}$ ,  $U_{b3}$ ).

В модели РФФ для настройки диапазона изменения напряжения смещения  $U_{b1}$  введён блок SWPVAR с определенными настройками, показанными на рис. 2.7.

Vsm\_dc\_A=2

Vstart=-6    Vfin=6    m=200    step=(Vfin-Vstart)/m

SWPVAR

ID=SWP1

VarName="Vsm\_dc\_A"

Values=stepped(Vstart,Vfin,step)    Диапазон перестройки напряжения смещения  $U_{b1}$ , В

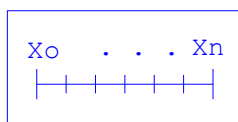


Рисунок 2.7 — Модуль настройки диапазона изменения значения переменной, задающей напряжение смещения  $U_{b1}$

Это позволяет исследовать характеристики выходного сигнала фазовращателя, как показано на рис. 2.4 и 2.5.

**Задание 3.** Проанализировать нелинейные свойства РФФ — провести анализ второй и третьей интермодуляционных составляющих в спектре выходного сигнала.

Выбрать значение  $U_{b1}$ , при котором фаза выходного СВЧ-сигнала увеличилась на  $\Delta\varphi$  относительно начального значения на графиках, построенных в п. 2.3.2.

Отключить блок SWPVAR и задать присвоить Vsm\_dc\_A выбранное значение напряжения  $U_{b1}$ .

Изменить свойства входного порта, сделав его двухтональным и задав режим с перестройкой мощности, как показано на рис. 2.8,а. Задать частотный интервал между несущими 5 МГц.

Настроить численно входной двухтональный порт как показано на рис. 2.8,б.

В настройках генератора гармонического напряжения ACVSN изменить номер тона с 2 на 3, как показано на рис. 2.8,в.

Выполнить измерения уровня мощности выходного сигнала, используя средства измерения для типа измеряемой величины «Power» (мощность), измеряемой величины «Pcom» (компоненты спектра по мощности). Настройки выполняются аналогично показанным на рис. 2.4 с тем отличием, что:

- выбираются «Power» — «Pcom»;
- выбирается в качестве перестраиваемой переменной («Use for x-axes») вкладка с мощностью входного порта;
- поочередно настраиваются индексы гармоник «Harmonic Index» для трех значений частот:  $f_{\text{СВЧ}}$  (первая гармоника, индексы «0»-«0»-«1»), 0,01 ГГц (вторая интермодуляционная составляющая, индексы «-1»-«1»-«0»),  $f_{\text{СВЧ}} - 0,01$  (третья интермодуляционная составляющая, индексы «1»-«-1»-«1») и для каждого случая применяются настройки для построения каждого из трех графиков в одной системе координат.

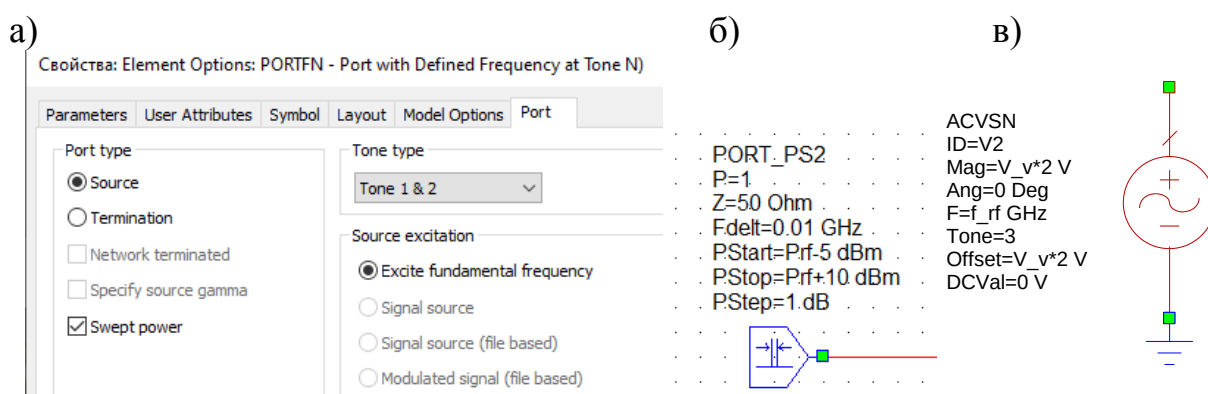


Рисунок 2.8 — Настройки входного порта для измерения интермодуляционных искажений в фазовращателе (а), численные настройки двухтонального порта (б) и изменение в настройках «оптического» источника

## **2.4. Вопросы для подготовки к защите работы**

- а) Как в проекте AWR DE задать диапазон частот или установить одну рабочую частоту?
- б) Какие типы портов реализованы в AWR DE?
- в) Опишите настройки двухтонального порта.
- г) Как в AWR DE можно ввести в схему источник гармонических колебаний?
- д) Как в AWR DE импортируются и экспортируются элементы дерева проекта?
- е) Как в AWR DE настраивается измерение модуля и фазы составляющих спектра по напряжению?
- ж) Как в AWR DE настраивается диапазон изменения переменной, введенной в проект?
- з) Опишите физическую эквивалентную электрическую схему электрооптического модулятора Маха Цандера, реализованную в данном проекте.
- и) Опишите принцип построения радиофотонного фазовращателя, реализованного в данном проекте.
- к) Проанализируйте характеристики РФФ, полученные в результате моделирования разработанной его схемы.
- л) Проанализируйте полученные характеристики по второй и третьей интермодуляционным составляющим в спектре выходного сигнала.

### 3. Лабораторная работа № 2. Радиофотонный генератор гармонических колебаний

#### 3.1. Цель работы

Целью работы является: исследовать схему радиофотонного генератора гармонических колебаний, реализованную в САПР AWR DE с применением разработанных физических эквивалентных электрических схем оптоэлектронных компонентов.

#### 3.2. Описание модели радиофотонного генератора

Принцип действия автогенераторов основан на применении в усилителе положительной обратной связи (ПОС). Из теории линейных усилителей следует, что комплексный коэффициент передачи усилителя, охваченного обратной связью,  $K(j\omega_r)$  определяется соотношением [7]

$$K(j\omega_r) = \frac{K_y(j\omega_r)}{1 - K_y(j\omega_r)K_{OC}(j\omega_r)}, \quad (3.1)$$

где  $K_y(j\omega_r)$  — комплексный коэффициент передачи усилителя без обратной связи;  $K_{OC}(j\omega_r)$  — комплексный коэффициент передачи цепи обратной связи.

В случае чисто положительной обратной связи, при которой фазовый сдвиг, вносимый усилителем и цепью обратной связи равен нулю, либо кратен  $2\pi n$ . При этом произведение  $K_y(j\omega_r)K_{OC}(j\omega_r)$  является чисто действительной и положительной величиной, а знаменатель в (3.1) будет меньше единицы, что приводит к увеличению коэффициента усиления  $K(\omega)$ . При выполнении равенства  $K_y(j\omega_r)K_{OC}(j\omega_r) = 1$ , знаменатель в (3.1) обращается в нуль и коэффициент усиления  $K(\omega)$  становится бесконечно большой величиной, что свидетельствует о потере устойчивости и возникновении автоколебаний.

Форма возникающих автоколебаний определяется свойствами системы. Для формирования гармонического процесса система должна быть узкополосной. Это необходимо для выделения из спектра тока, протекающего через нелинейный элемент усилителя, только одной составляющей нужной частоты. Поэтому автогенератор гармонического колебания (автогенератор) в своей структурной схеме (рис. 3.1) должен содержать резонансный усилитель (РУ) и цепь ПОС.

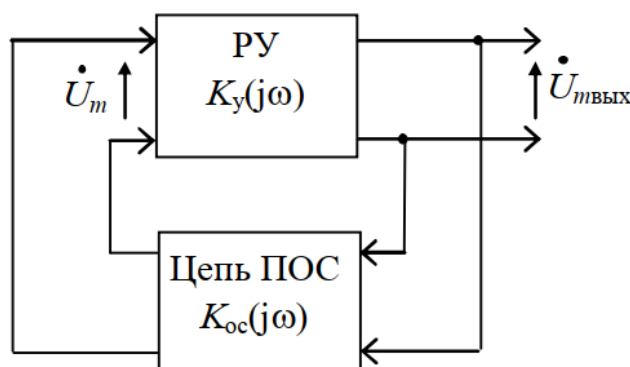


Рисунок 3.1 — Кольцевая схема автогенератора

Резонансный усилитель обеспечивает наряду с усилением узкополосную фильтрацию, а цепь ПОС обеспечивает синфазную подачу сигнала с выхода усилителя на его вход. При этом образуется так называемая кольцевая схема (рис. 3.1).

Стационарный режим автоколебаний — это такой режим, при котором параметры колебания (амплитуда, частота и начальная фаза) неизменны во времени. Этот режим также называют установившимся режимом.

В стационарном режиме автогенератор можно рассматривать как нелинейный резонансный усилитель, на вход которого подается гармоническое колебание частотой генерации  $\omega_r$  с его выхода. Комплексные коэффициенты передачи усилителя в стационарном режиме на частоте генерации  $K_y^{ct}(j\omega_r)$  и цепи обратной связи  $K_{oc}(j\omega_r)$  должны удовлетворять условию

$$K_y^{ct}(j\omega_r) K_{oc}(j\omega_r) = 1. \quad (3.2)$$

Представим выражение (3.2) в показательной форме

$$K_y^{ct}(j\omega_r) K_{oc}(j\omega_r) = K_y^{ct}(\omega_r) K_{oc}(\omega_r) \exp(j[\varphi_y(\omega_r) + \varphi_{oc}(\omega_r)]) = 1. \quad (3.3)$$

Из (3.3) формулируются два условия возникновения стационарных гармонических автоколебаний:

— условие баланса амплитуд

$$K_y^{ct}(\omega_r) K_{oc}(\omega_r) = 1;$$

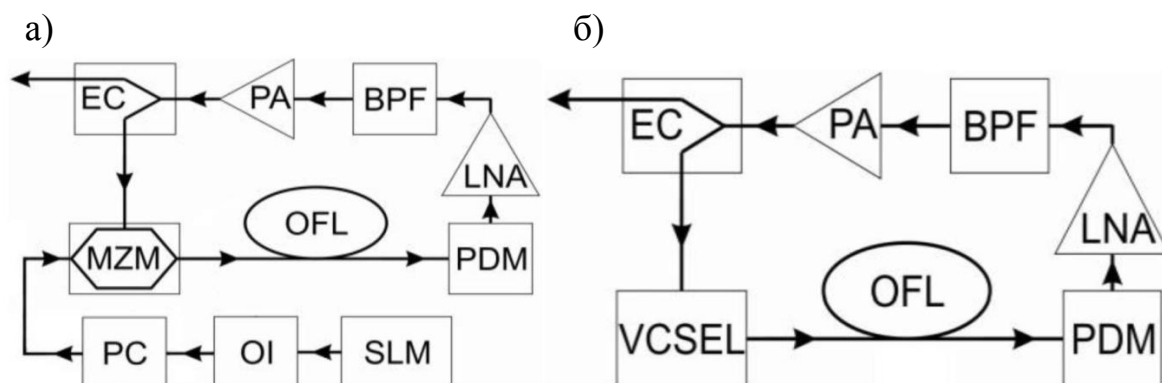
— условие баланса фаз

$$\varphi_y^{ct}(\omega_r) + \varphi_{oc}(\omega_r) = 2\pi n,$$

где  $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

Физический смысл состоит в том, что на частоте генерации в стационарном режиме обратная связь должна быть чисто положительной (баланс фаз), а глубина обратной связи должна обеспечить полную компенсацию потерь в контуре (баланс амплитуд). Условие баланса амплитуд позволяет определить амплитуду генерируемых колебаний в стационарном режиме, а условие баланса фаз — частоту этих колебаний.

Радиофотонные генераторы (РФГ) представляет собой автогенератор стационарных гармонических колебаний и являются наглядным примером практической значимости радиофотонных устройств [8]. РФГ представляет перспективное направление развития высокостабильных радиочастотных генераторов в диапазоне частот от сотен МГц до сотен ГГц [9]. Ключевым преимуществом РФГ по сравнению с традиционными радиочастотными и микроволновыми генераторами является достижимая более высокая спектральная чистота [8]. На рис. 3.2 представлены типичные структурные схемы РФГ с внешним электрооптическим модулятором Маха-Цандера (MZM) или на основе поверхностно излучающий лазер с вертикальным резонатором (VCSEL).



SLM -полупроводниковый лазерный модуль, OFL- волоконно-оптический канал связи, PDM - модуль фотоприемника, OI - оптический изолятор, PC - контроллер поляризации, LNA - радиочастотный малошумящий усилитель, BPF - перестраиваемый полосно-пропускающий фильтр, PA - усилитель мощности, EC - электрический ответвитель, MZM – модулятор Маха-Цандера, VCSEL – поверхностно излучающий лазер с вертикальным резонатором

Рисунок 3.2 — Схемы РФГ на основе внешнего ММЦ (а) и LW-VCSEL (б).

РФГ состоит из двух основных секций: оптической и электрической. Оптическая секция включает в себя полупроводниковый лазерный модуль (SLM), MZM, волоконно-оптический кабель (OFL) и модуль фотоприемника (PDM). Для обеспечения надежной работы РФГ с низким уровнем лазерного шума и малыми потерями в оптической части в схему введены оптический изолятор (OI) и контроллер поляризации (PC). Электрическая часть включает в себя малошумящий усилитель (LNA), перестраиваемый полосовой фильтр (BPF), усилитель мощности (PA) и электрический соединитель (EC). Принцип действия РФГ основан на преобразовании энергии непрерывного оптического излучения, испускаемого лазерным источником, в периодические дискретные всплески энергии в радиочастотном диапазоне. Для достижения этой цели MZM управляется оптоэлектронным контуром с положительной обратной связью. Текущая несущая частота РФГ в радиочастотном диапазоне определяется шириной полосы пропускания, в то время как общее время накопления энергии зависит от задержки в волокне. Регулируя длину волокна и коэффициент усиления LNA и PA, можно обеспечить для данной схемы баланс амплитуды и фазы, необходимый для самоподдерживающихся колебаний.

Электрическая схема РФГ на базе VCSEL (рис. 3.2,б) аналогична схеме РФГ на рис. 3.2,а, за исключением того, что в оптической части VCSEL модулируется непосредственно током накачки от EC, что значительно упрощает структуру генератора.

Согласно схеме построения РФГ на основе VCSEL (рис. 3.2,б), в САПР AWR DE разработана нелинейная физическая эквивалентная электрическая схема РФГ, показанная на рис. 3.3.

Данная физическая эквивалентная электрическая модель РФГ позволяет исследовать его характеристики в режиме уже установившихся автоколебаний.

L=165                      Длина оптоволокну, м  
q=1.46\*10<sup>9</sup>/(3\*8)    q: 80.3  
LL=0.2\*1000            LL: 0.033  
t<sub>flb</sub>=q                      Время задержки, нс

f<sub>gen</sub>=25                    Центральная частота ВРФ, ГГц

df=(1+(12.59)\*(\_ge n-2.5))/(2\*1e-3)    Половина полосы пропускания ВРФ, ГГц  
df1=0.010

G\_LNA=15                LNA KУ, дБ  
NF\_LNA=2.5             LNA Коэффициент шума, дБ  
P1dB\_LNA=35           LNA Точка компрессии по уровню 1 дБ, дБ

G\_PA=24                КУ усилителя мощности, дБ  
NF\_PA=20              Коэффициент шума усилителя мощности, дБ  
P1dB\_PA=55            Точка компрессии по уровню 1 дБ УМ, дБ

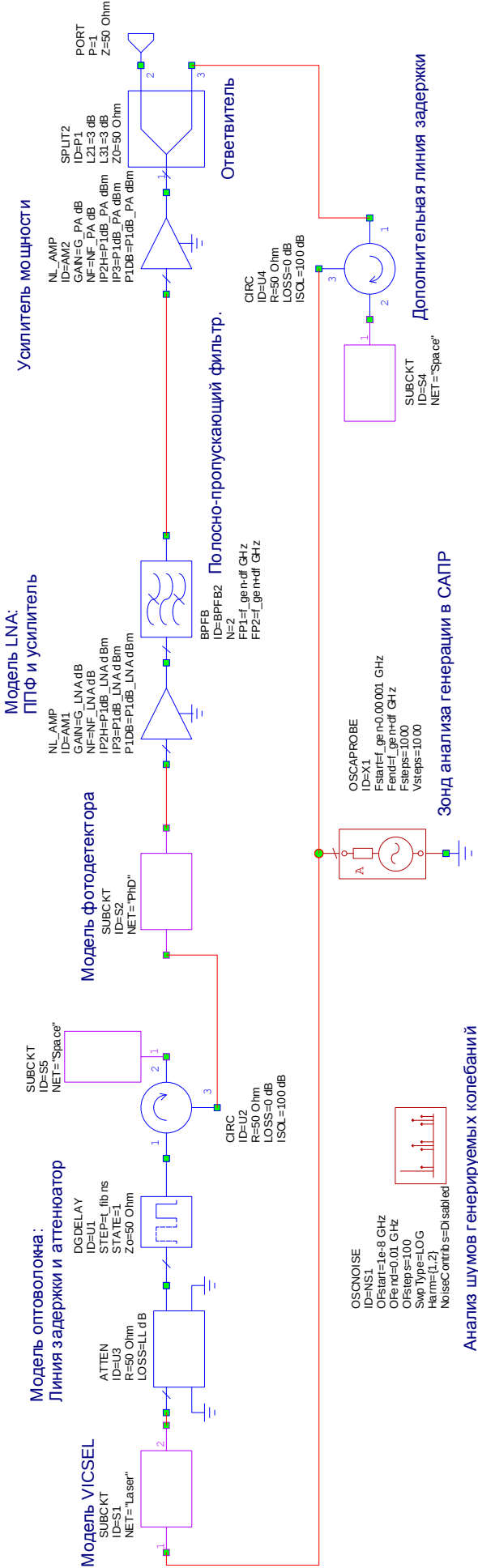


Рисунок 3.3 — Физическая эквивалентная электрическая схема РФГ

Модель РФГ не содержит квазиоптической несущей в явном виде, однако для пары лазер-фотодетектор откалиброван коэффициент преобразования (коэффициент передачи с СВЧ-входа VICSEL лазера на СВЧ выход pin-фотодиода).

Предлагаемая модель относится к классу так называемых неструктурированных моделей. Преимуществом модели является возможность извлечения линейных или нелинейных характеристик эквивалентной электрической схемы РФГ. Достоверность моделирования с помощью инструмента САПР основана на предложенном методе эквивалентного напряжения [10], который использует сходные слабо нелинейные зависимости напряжения от тока в электрической цепи (например, в нелинейном резисторе) и оптической мощности от тока в малосигнальной области ВtАХ полупроводникового лазера. Аналогично, существует сопоставимая зависимость между прямой вольт-амперной характеристикой электрического диода и графиком фототока оптической мощности фотодиода.

Структурная схема на рис. 3.3 включает в себя цепочку подсхем, представляющих (слева направо):

- характеристики LW-VCSEL в диапазоне модулирующего СВЧ-сигнала;
- два блока, описывающие свойства отрезка оптоволоконной линии: временную задержку и оптические потери OFL;
- вспомогательные блоки «Sрасе», которые позволяют учесть временные задержки, возникающие в элементах тракта РФГ, помимо оптоволоконной линии задержки;
- модель фотодиода PDM;
- нелинейное усиление и полоса пропускания малошумящего усилителя (LNA);
- полосно-пропускающий фильтр (BPF);
- нелинейный усилитель мощности PA;
- ответвитель мощности (EC);
- зонд «OSCAPROBE» для запуска генерации в схеме с цепью обратной связи.

С использованием модели может быть выполнен ряд расчетов спектральных и фазовых шумовых характеристик РФГ на основе LW-VCSEL.

Для настройки работы РФГ на заданной сверхвысокой частоте требуется проанализировать условие баланса амплитуд и баланса фаз автогенератора.

Для анализа выполнения условий возникновения автоколебаний на заданной частоте, модель РФГ необходимо дополнить специальным компонентом «OSCTEST», который включается в разрыв цепи обратной связи РФГ, как показано на рис. 3.4.

$L=165$       Длина оптоволокну, м  
 $q=1.46 \cdot 10^9 / (3e8)$      $q$ :  
 $LL=0.2 \cdot L / 1000$      $LL$ :  
 $t_{\text{flb}}=q$       Время задержки, нс  
 $f_{\text{gen}}=25$       Центральная частота ВРГ, ГГц  
 $df=(1+(12.5/q) \cdot ((\text{gen} \cdot 2.5)) / 2 \cdot 1e-3)$     Половина полосы пропускания ВРГ, ГГц  
 $df1=0.010$

$G\_LNA=15$       LNA КУ, дБ  
 $NF\_LNA=2.5$     LNA Коэффициент шума, дБ  
 $P1dB\_LNA=35$  LNA Точка компрессии по уровню 1 дБ, дБ

$G\_PA=24$       КУ УМ, дБ  
 $NF\_PA=20$       Коэффициент шума УМ, дБ  
 $P1dB\_PA=55$     Точка компрессии по уровню 1 дБ УМ, дБ

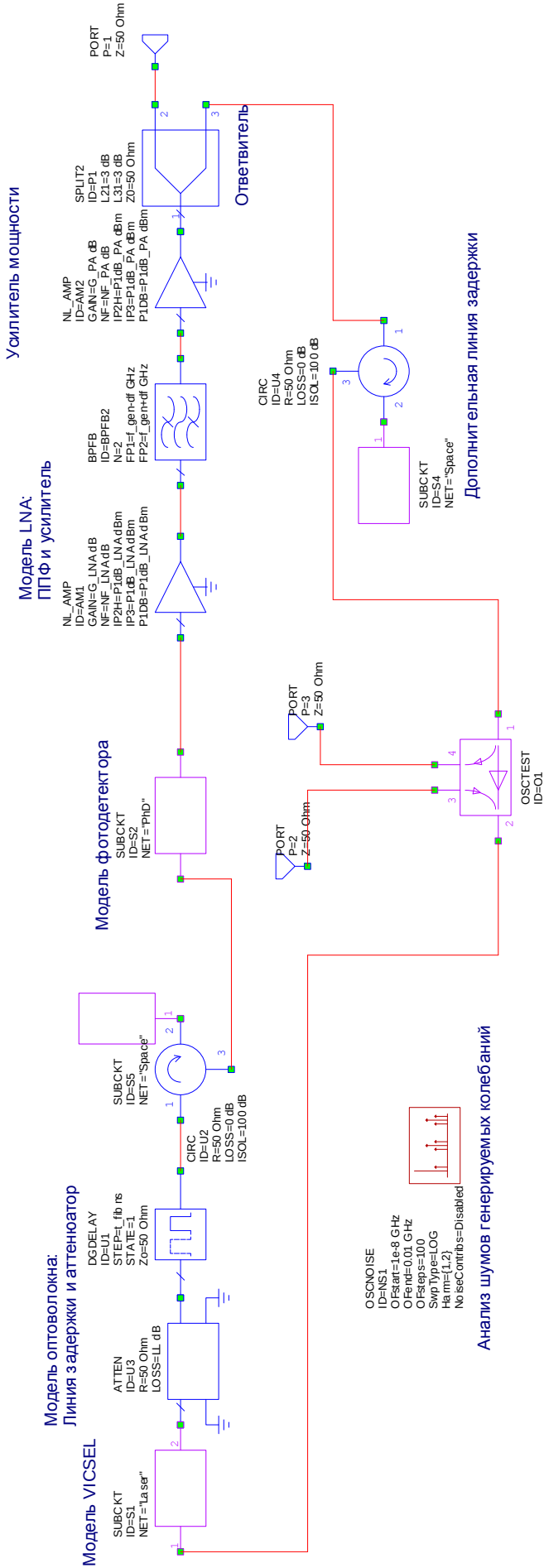


Рисунок 3.4 — Физическая эквивалентная электрическая схема РФГ с включенным измерительным модулем OSCTEST

### 3.3. Порядок выполнения работы

Исходные данные для моделирования физической эквивалентной электрической схемы радиопотонного генератора (РФГ) приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1 — Исходные данные для моделирования физической эквивалентной электрической схемы радиопотонного генератора

| N                      | 0   | 1   | 2   | 3   | 4 | 5   | 6   | 7 | 8 | 9 |
|------------------------|-----|-----|-----|-----|---|-----|-----|---|---|---|
| $f_{\text{СВЧ}}$ , ГГц | 3,5 | 4,2 | 5,5 | 6,5 | 7 | 8,6 | 5,5 | 6 | 7 | 8 |

Примечание: N — последний номер зачетной книжки обучающегося;  $f_{\text{СВЧ}}$  — частота генерируемого СВЧ-сигнала.

**Задание 1.** Собрать схему РФГ и настроить режим генерации по анализу баланса амплитуд и фаз.

В САПР AWR DE в разделе дерева проекта в разделе «Circuit Schematics» создать проект с названием «Generator\_1».

В дерево проекта импортировать подсхемы и данные:

— в раздел «Global Definitions» импортировать файл «Global Definitions.ieq»;

— в раздел «Circuit Schematics» импортировать файлы моделей:

- «Laser.sch» — модель лазера;
- «PhD.sch» — модель фотодиода;
- «Space.sch» — модуль калибровки, учитывающий обобщённую временную задержку в тракте генератора, за исключением волоконно-оптической линии задержки.

Собрать модель РФГ, показанную на рис. 3.3 — с включенным измерительным модулем OSCTEST.

В свойствах блока OSCTEST в разделе вторичных параметров, которые можно включить кнопкой , следует установить частоту  $f_c$  больше  $f_{\text{СВЧ}}$ , например 30 ГГц.

Для корректной настройки проекта РФГ, реализованного по схеме на рис. 3.3, необходимо задать настройки очень узкий диапазон частот для моделирования, выбрав в всплывающем меню проекта пункт «Options», как показано на рис. 3.4.

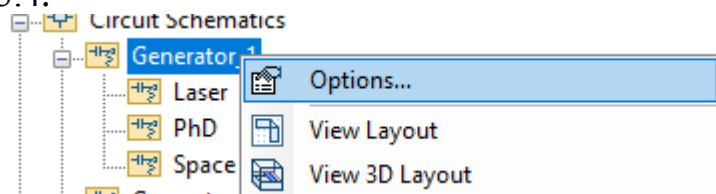


Рисунок 3.5 — Выбор меню настроек проекта «Generator 1»

Далее, например, для настройки устойчивой генерации на частоте 5 ГГц, диапазон перестройки частоты задавался как показано на рис. 3.6.

Для анализа баланса амплитуд и баланса фаз используется измерение S-параметров, а именно — модуля и фазы коэффициента передачи  $S_{32}$ . Окно настройки показано на рис. 3.7.

**Current Range**

4.995  
4.99501  
4.99502  
4.99503  
4.99504  
4.99505  
4.99506  
4.99507  
4.99508  
4.99509  
4.9951

1001 points  
Delete Selected

**Modify Range**

Start (GHz): 4.995  
Stop (GHz): 5.005  
Step (GHz): 0.00001

☐ Single point  
☐ Add  
☐ Delete  
☒ Replace

Apply

**Sweep Type**

☒ Linear  
☐ Logarithmic

**Data Entry Units**

GHz  
Does not affect global units

Рисунок 3.6 — Настройка диапазона частот для анализа устойчивости генерации РФГ на частоте 5 ГГц

a)

**Measurement Type**

Linear

**Measurement**

ABCD  
CMRR  
G  
H  
S  
SDeltaM  
SDeltaP  
SModel  
SModelRC  
S\_TERM  
S\_TERM\_2P  
S\_TERM\_3

**Data Source Name**

Generator 1

**To Port Index**

3

**From Port Index**

2

**Sweep Freq (FDOC, n=10001)**

Use for x-axis

**Scattering Coefficients (S Parameters)**

Simulator: Default Linear  
Configuration: Default

**Complex Modifier**

☐ Real ☐ Imag. ☒ Mag. ☐ Angle ☐ AngleU  
☐ Complex ☐ Conjugate ☒ dB

b)

**Measurement Type**

Linear

**Measurement**

ABCD  
CMRR  
G  
H  
S  
SDeltaM  
SDeltaP  
SModel  
SModelRC  
S\_TERM  
S\_TERM\_2P  
S\_TERM\_3

**Data Source Name**

Generator 1

**To Port Index**

3

**From Port Index**

2

**Sweep Freq (FDOC, n=10001)**

Use for x-axis

**Scattering Coefficients (S Parameters)**

Simulator: Default Linear  
Configuration: Default

**Complex Modifier**

☐ Real ☐ Imag. ☐ Mag. ☒ Angle ☐ AngleU  
☐ Complex ☐ Conjugate ☒ dB

Рисунок 3.7 — Настройка измерений модуля и фазы коэффициента передачи  $K_y^{\text{ct}}(j\omega_r)$   $K_{0C}(j\omega_r)$  — параметра  $S_{32}$

Анализируя графики модуля и фазы коэффициента передачи  $S_{32}$ , построенные по описанию на рис. 3.7, выполнить настройку схемы РФГ так, чтобы для него на заданной частоте и в некотором диапазоне около нее выполнялись условия баланса амплитуд и фаз.

Для этой настройки модели РФГ следует инструментом «Tune tool» выделить в модели РФГ переменные «L», «G\_LNA» и «G\_PA».

Переменные «G\_LNA» и «G\_PA» позволяют настроить баланс амплитуд.

Переменная «L» позволяет скорректировать баланс фаз.

В рассматриваемом диапазоне частот с увеличением значения переменной «L» растет плотность точек на оси частот, для которых аргумент  $S_{32}$  равен нулю. Это характеризует возможную сетку генерируемых частот с соответствующим шагом перестройки.

Примеры характеристик настроенной модели РФГ на рабочей частоте 5 ГГц показаны на рис. 3.8, 3.9.

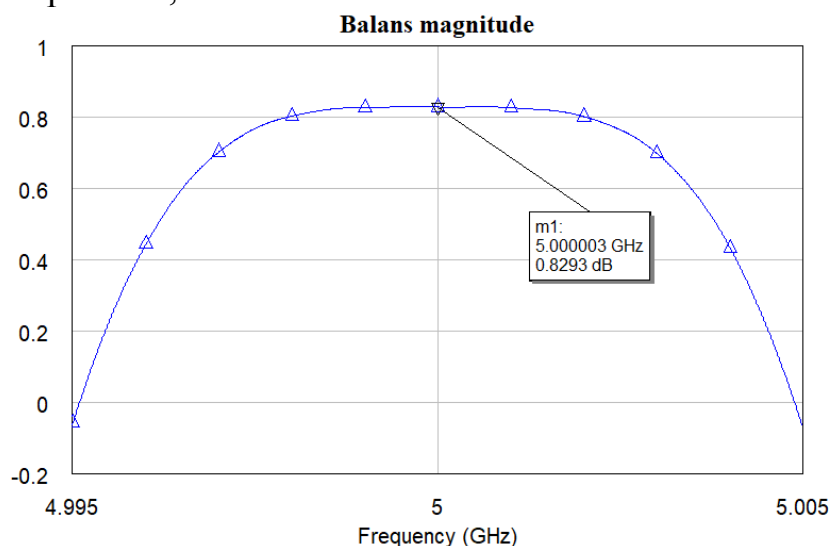


Рисунок 3.8 — График баланса амплитуд для схемы РФГ

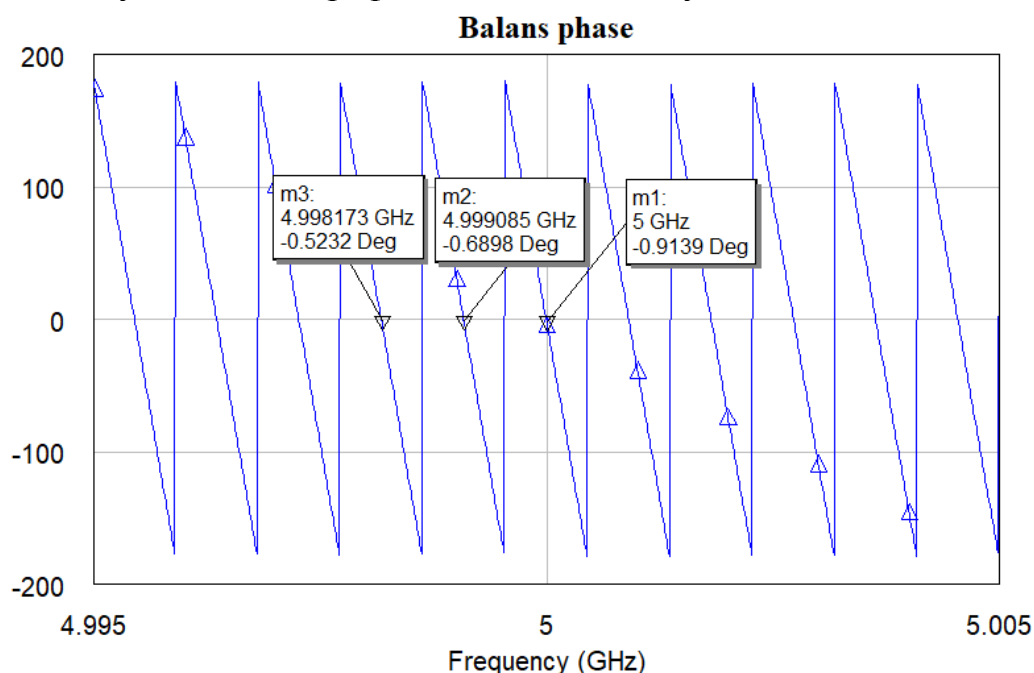


Рисунок 3.9 — График баланса фаз для схемы РФГ

**Задание 2.** Проанализировать фазовые шумы РФГ и выполнить системное моделирование спектра генерируемых колебаний.

В дереве проекта САПР создать дубликат разработанного проекта «Generator\_1». Этом дубликат проекта назвать «Generator\_1\_2». Изменить схему проекта Generator\_1\_2 согласно модели, показанной на рис. 3.2:

- удалить модуль «OSCTEST»;
- добавить зонд «OSCAPROBE» для запуска генерации в схеме с цепью обратной связи; настройки зонда показаны на рис. 3.2.

Настроить модуль «OSCNOISE» как показано на рис. 3.8.

```
.OSCNOISE
.ID=NS1
.OFstart=1e-8 GHz
.OFend=0.01 GHz
.OFsteps=100
.SwpType=LOG
.Harm={1,2}
.NoiseContribs=Disabled
```

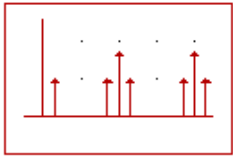


Рисунок 3.8 — Настройки модуля «OSCNOISE»

Для схемы «Generator\_1\_2» выполнить моделирование фазового шума.

Окно настройки моделирования фазового шума генератора показано на рис. 3.9.

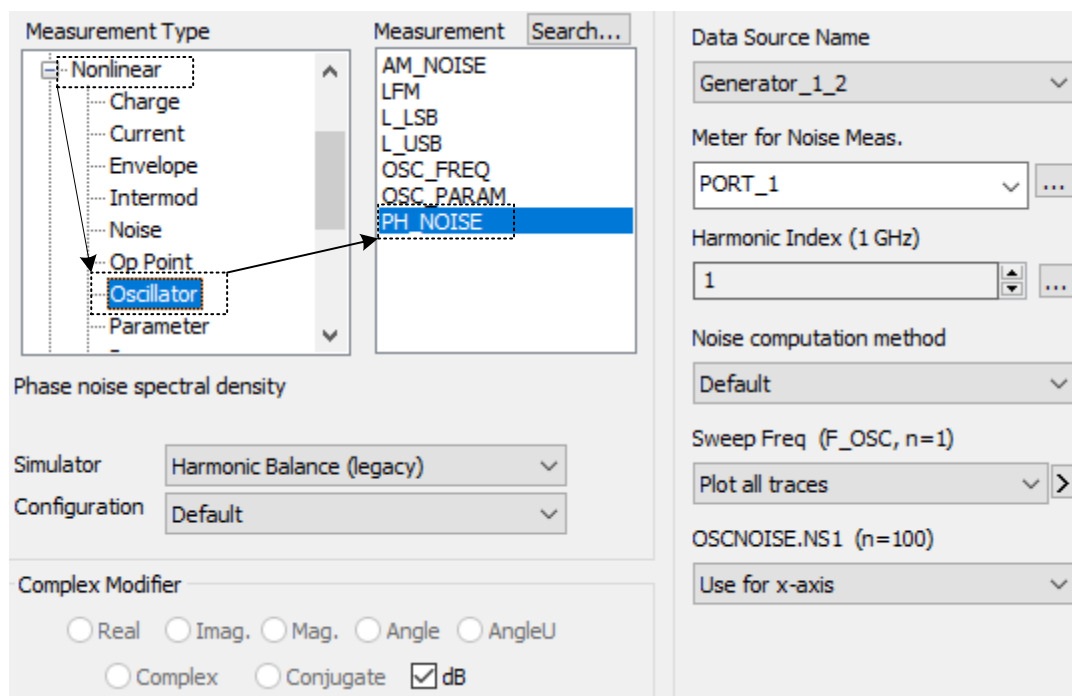


Рисунок 3.9 — Окно настройки моделирования фазового шума генератора

Для выполнения системного моделирования характеристик разработанной схемы РФГ, в дереве проекта в разделе «System Diagrams» создать новый

системный проект с названием «Analysis of the generator spectrum», как показано на рис. 3.10.

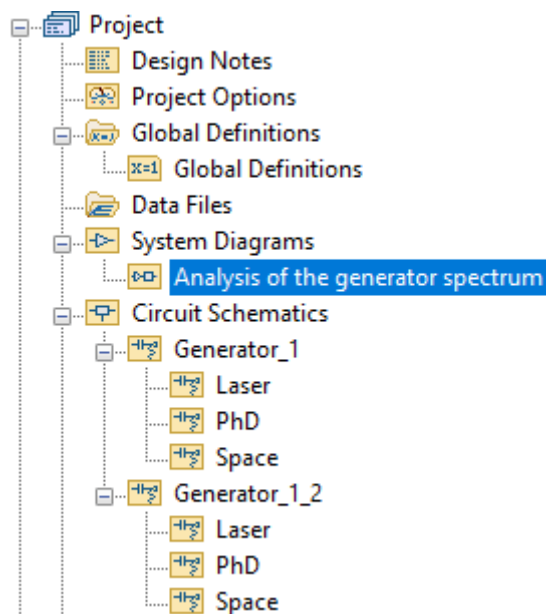


Рисунок 3.10 — Вид дерева проекта с добавленной системной моделью

В окне системного проекта добавить подсхему генератора **OSC\_S**. Путь к элементу: **Elements — System Blocks — Subcircuits — OSC\_S — Generator\_1\_2**.

Системная модель РФГ показана на рис. 3.11. В модели к выходу модуля OSC\_S подключен измерительный зонд «Test point», вызываемый кнопкой  в верхнем меню интерфейса САПР. Настройки модуля OSC\_S показаны на рис. 3.12.

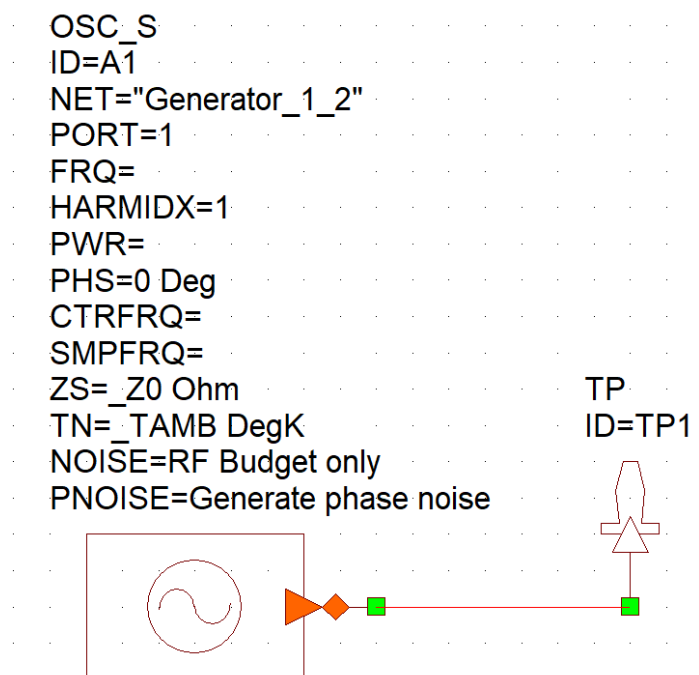


Рисунок 3.11 — Модель «Analysis of the generator spectrum»

| Name    | Value                | Unit |
|---------|----------------------|------|
| ID      | A1                   |      |
| NET     | "Generator_1_2"      |      |
| PORT    | 1                    |      |
| FRQ     |                      | GHz  |
| HARMIDX | 1                    |      |
| PWR     |                      | dBm  |
| PHS     | 0                    | Deg  |
| CTRFRQ  |                      | GHz  |
| SMPFRQ  |                      | GHz  |
| ZS      | _Z0                  | Ohm  |
| TN      | _TAMB                | DegK |
| NOISE   | RF Budget only       |      |
| PNOISE  | Generate phase noise |      |

Рисунок 3.13 — Окно настроек модуля OSC\_S

Наведите курсор мыши на треугольник выхода модуля OSC\_S , двойным нажатием откройте меню параметров порта и выберите тип порта, как показано на рис. 3.14.

Node data type

☐ Unset

☐ Real data

☒ Complex or Complex Envelope

☐ Digital

☐ Fixed point (automatically set)

Рисунок 3.14 — Выбор типа порта модуля OSC\_S

Настройте параметры («Options») системного проекта «Analysis of the generator spectrum» как показано на рис. 3.15, 3.16.

Basic RF Options RF Frequencies Advanced Internal Settings RFI/RFB Settings

Reset Defaults

Reset Selected

View Defaults

**Basic**

**Simulation Bandwidth Options**

Sampling Frequency Span **0.02 GHz**

Oversampling Rate **2000**

**Stopping Options**

Use Simulation Stop Time ☐

Simulation Stop Time 1000 ns

**Measurement Options**

Use RBW/NFFT Auto

RBW (Resolution Bandwidth) 0.001 GHz

NFFT (Number of FFT bins) 1000

Use VBW/NAVG Auto

VBW (Video Bandwidth) 0.001 GHz

NAVG (Number of Averages) 10

V\_SPEC Phase Threshold -150

PWR\_MEAS RMS or Peak RMS

PWR\_SPEC RMS or Peak RMS

Рисунок 3.15 — Настройка параметров системного проекта «Analysis of the generator spectrum» во вкладке «Basic»

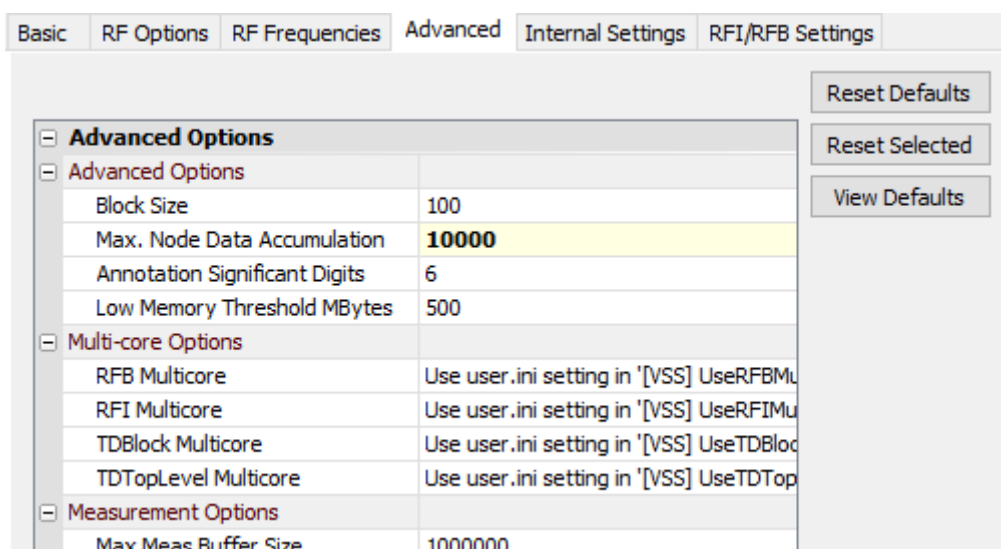


Рисунок 3.15 — Настройка параметров системного проекта «Analysis of the generator spectrum» во вкладке «Advanced»

Построить спектр генерируемых колебаний РФГ, воспользовавшись настройками окна модификаций измерений для вкладки исходной типа измерений «System», как показано на рис. 3.16.

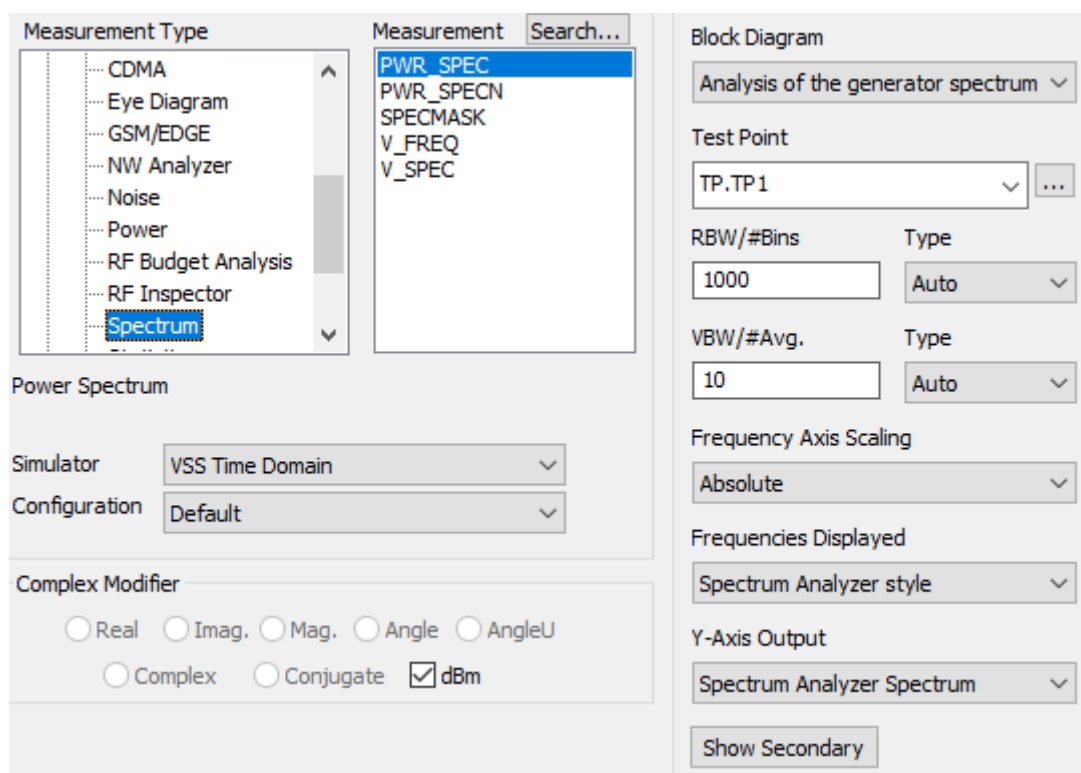


Рисунок 3.16 — Настройки окна системного моделирования спектра генерируемых колебаний РФГ

Запустить системное моделирование, нажав на кнопку  («Run/Stop system Simulator»). Через несколько секунд остановите системное моделирование, нажав на ту же кнопку . Пример результатов системного моделирования для частоты 5 ГГц показан на рис. 3.17.

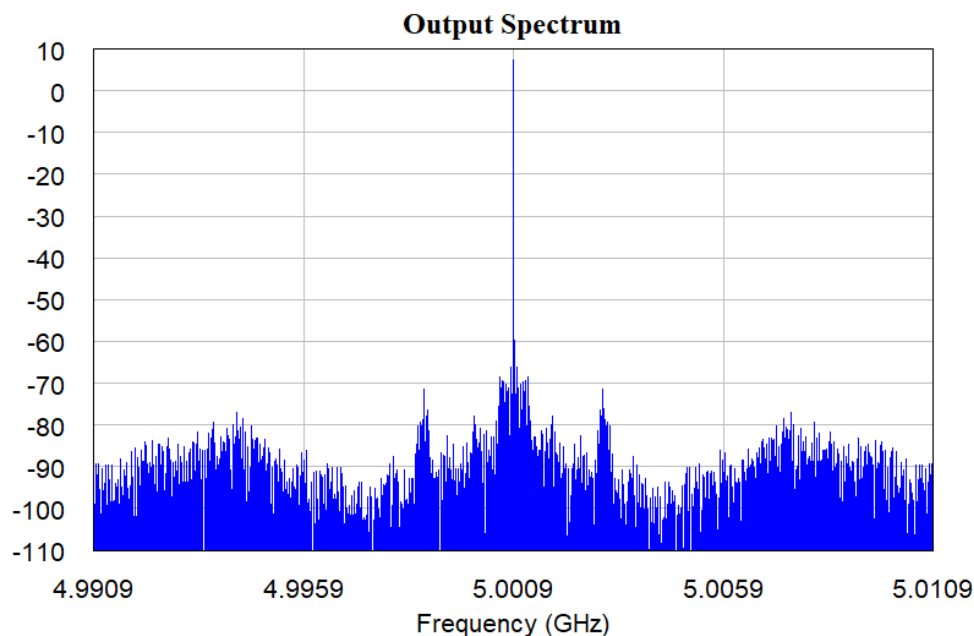


Рисунок 3.17 — Пример результатов системного моделирования для частоты 5 ГГц

**Задание 3.** Оформить результаты выполнения заданий 1, 2 в виде отчета.

По каждому заданию в отчете должны быть представлены:

- варианты реализованных схем РФГ для выполнения требуемых измерений на заданной в исходных данных частоте генерации;
- графики смоделированных характеристик РФГ;
- анализ полученных характеристик РФГ;
- общие выводы по работе.

### 3.4. Вопросы для подготовки к защите работы

а) Опишите условия баланса амплитуд и фаз для формирования устойчивой генерации в резонансном усилителе, охваченном петлей обратной связи.

б) Опишите структурную схему РФГ с внешним электрооптическим модулятором Маха-Цандера.

в) Опишите структурную схему РФГ на основе поверхностно излучающего лазера с вертикальным резонатором (VCSEL).

г) Опишите особенности схемы проекта в AWR DE, позволяющей проанализировать выполнение условий баланса амплитуд и фаз в схеме РФГ с петлей обратной связи.

д) Опишите особенности реализации схемы в AWR DE для проекта РФГ с петлей обратной связи, когда САПР «понимает», что в результате работы схемы происходит устойчивая генерация гармонических колебаний.

е) Опишите настройки измерений при анализе выполнения условий устойчивой генерации по амплитуде и фазе.

ж) Опишите модуль AWR DE, позволяющий промоделировать фазовые шумы РФГ.

- з) Опишите порядок настройки измерений фазового шума разработанной схемы РФГ.
- и) Опишите системную модель РФГ, реализованную в разделе «System» САПРа AWR DE.
- к) Опишите настройки системной модели РФГ.
- л) Проанализируйте результаты системного моделирования (во временной области) модели РФГ.

## 4. Лабораторная работа № 3. Моделирование радиофотонного смесителя в САПР AWR DE

### 4.1. Цель работы

Целью работы является: исследовать физическую эквивалентную электрическую схему радиофотонного смесителя средствами САПР AWR DE.

### 4.2. Описание модели радиофотонного смесителя

Прогресс в разработке решений в области радиофотоники в основном следует за прогрессом в создании недорогих и энергоэффективных оптико-электронных устройств в области телекоммуникаций, радиолокации и радиоэлектронной борьбы. Научно-исследовательские работы в области радиофотоники сосредоточены на системных архитектурах, позволяющих эффективно генерировать и обрабатывать сигналы в фотонной области. Одной из важных областей обработки сигналов является оптоэлектронное преобразование частоты СВЧ-поднесщей.

Надежный перенос спектра СВЧ-сигнала достигается за счет нелинейных преобразований в оптоэлектронных устройствах. На сегодняшний день нелинейное преобразование выполняется в нескольких архитектурах оптоэлектронных смесителей, использующих прямую модуляцию лазера [11], внешнюю модуляцию пассивного электрооптического модулятора [12], полупроводниковый оптический усилитель [13], р-і-п фотоприемник [14] и их комбинацию компоненты [13]. Общими недостатками этих устройств являются высокая стоимость и низкая эффективность преобразования по сравнению с электронными аналогами. Проанализировав приведенные выше публикации, мы пришли к выводу, что в случае применения радиофотонных технологий наиболее экономичным методом является прямая модуляция интенсивности полупроводникового лазера, особенно при использовании недорогого и энергоэффективного излучателя в виде длинноволнового лазера с вертикальным резонатором с поверхностным излучением (LW-VCSEL) [15].

На рис. 4.1 показана типичная структурная эквивалентная электрическая схема смесителя с полупроводниковым лазером LW-VCSEL в качестве нелинейного элемента. Входные радиочастотный сигнал (RF) и сигнал гетеродина (LO) складываются в сумматоре мощности (PC) и непосредственно модулируют излучаемую мощность VCSEL. Оптическое излучение, модулированное комплексным сигналом RF+LO, регистрируется р-і-п фотодиодом (PD). Выходной электрический сигнал промежуточной частоты (IF) выделяется с помощью полосового фильтра (BPF).

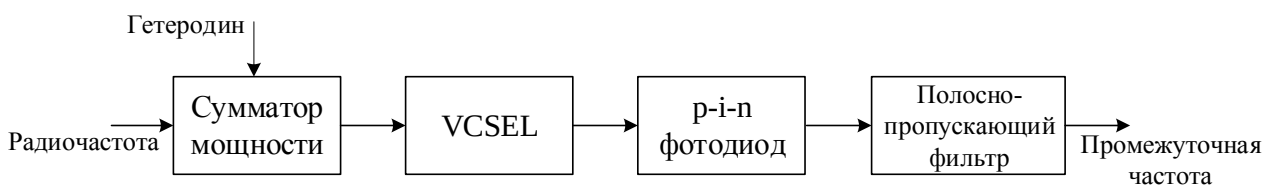


Рисунок 4.1 — Структурная схема радиофотонного смесителя

Имитационная эквивалентная электрическая модель радифотонного смесителя (РФС), реализованная в САПР AWR DE, показана на рис. 4.2.

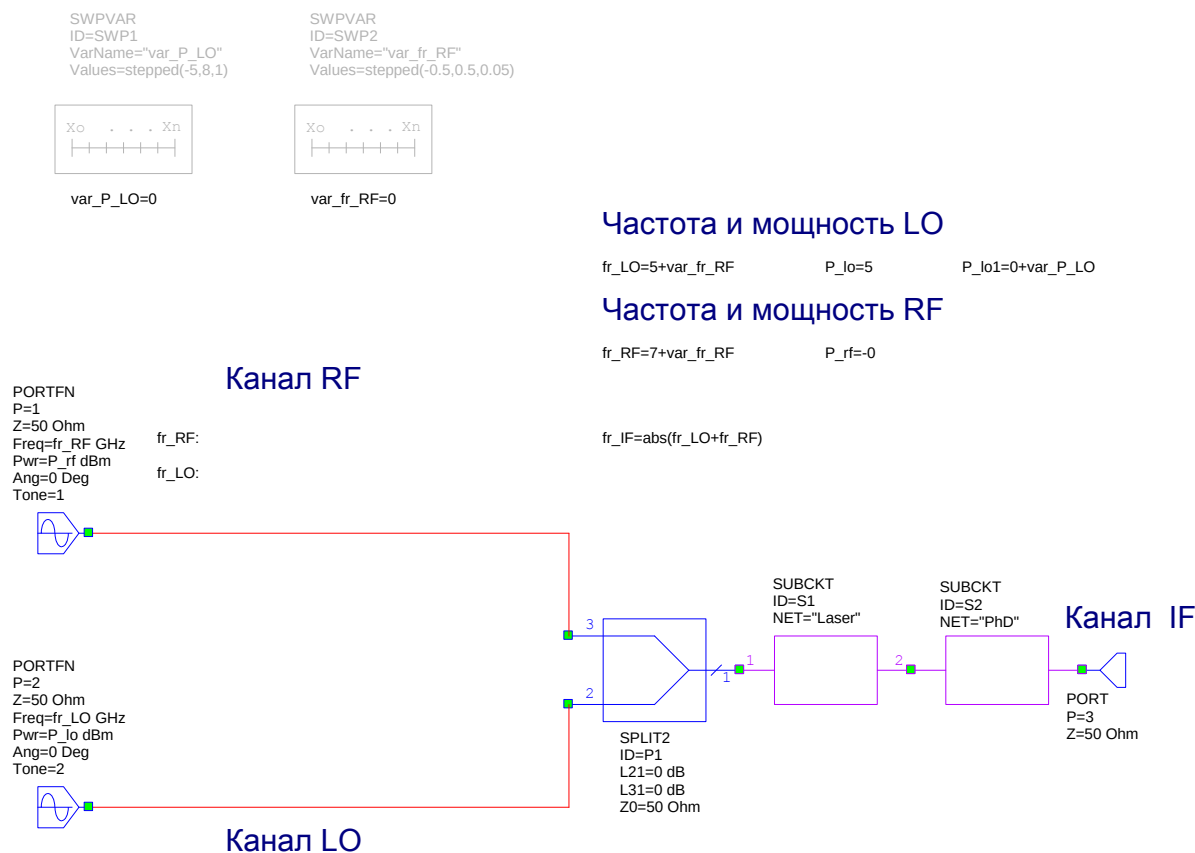


Рисунок 4.2 — Имитационная эквивалентная электрическая модель радифотонного смесителя

В представленной модели используются два гармонических порта:

- тон 1 (порт № 1) — с частотой радиосигнала;
- тон 2 (порт № 2) — с частотой гетеродина.

Сдвиг между радиочастотой и частотой гетеродина не изменяется и определяет величину разностной промежуточной частоты.

В модели в неактивном состоянии введены модули «SWPVAR», которые позволяют задать диапазон перестройки переменных:

- var\_P\_LO — изменение мощности гетеродина;
- var\_fr\_RF — изменение радиочастоты

В модели РФС используются подсхемы:

- «Laser» — физическая эквивалентная электрическая модель VCSEL;
- «PhD» — физическая эквивалентная электрическая модель pin-фотодиода.

Пример спектра интермодуляционных составляющих на выходе фотодиода без применения фильтра показан на рис. 4.3.

Частота RF — 1 ГГц, частота LO — 1,5 ГГц, частота IF — 2,5 ГГц.  
Энергетические параметры схемы:

- ток постоянного смещения для рабочей точки на ВТАХ лазера  $I_0=4\text{мА}$ ;
- мощность сигнала RF  $P_{rf}=6\text{ дБм}$ ,
- мощность сигнала LO  $P_{lo}=6\text{ дБм}$ .

Коэффициент преобразования для данного примера составил  $-30,5\text{ дБ}$ .

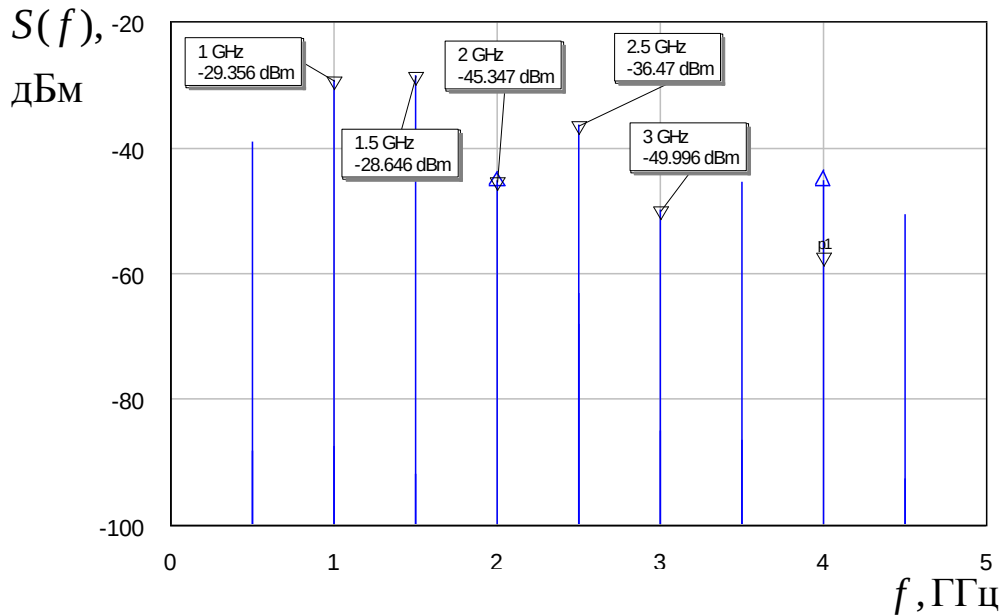


Рисунок 4.3 — Спектра интермодуляционных составляющих на выходе фотодиода

### 4.3. Порядок выполнения работы

Исходные данные для моделирования физической эквивалентной электрической схемы радиофотонного смесителя (РФС) приведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1 — Исходные данные для моделирования физической эквивалентной электрической схемы радиофотонного смесителя

|                |   |   |    |    |   |     |     |     |    |     |
|----------------|---|---|----|----|---|-----|-----|-----|----|-----|
| N              | 0 | 1 | 2  | 3  | 4 | 5   | 6   | 7   | 8  | 9   |
| $f_{RF}$ , ГГц | 1 | 2 | 6  | 7  | 1 | 5,5 | 2,5 | 7   | 7  | 6   |
| $f_{IF}$ , ГГц | 8 | 6 | 12 | 13 | 7 | 1   | 7   | 1,5 | 14 | 0,5 |

Примечание: N — последний номер зачетной книжки обучающегося;  $f_{RF}$  — частота радиосигнала,  $f_{IF}$  — промежуточная частота, выходной сигнала смесителя.

**Задание 1.** Собрать и отладить схему РФС.

В САПР AWR DE в разделе дерева проекта в разделе «Circuit Schematics» создать проект с названием «Mixer».

В дерево проекта импортировать подсхемы и данные:

- в раздел «Global Definitions» импортировать файл «Global Definitions.ieq»;

- в раздел «Circuit Schematics» импортировать файлы:

- «Laser.sch» — модель лазера;
- «PhD.sch» — модель фотодиода.

Собрать модель РФС, показанную на рис. 4.1.

В разделе «Global Definitions» настраиваемая переменная «Mdet» (параметр калибровки коэффициента передачи эквивалентной электрической схемы фотодиода) задается с учетом выбранного значения постоянного тока накачки лазера:

— для  $I_0=14$  мА,  $Mdet=0,44$  (задано по умолчанию);

— для  $I_0=16$  мА,  $Mdet=0,9$ .

В настройках проекта «Project Options» задать одну частоту, равную 0,5 ГГц, как показано на рис. 4.4.

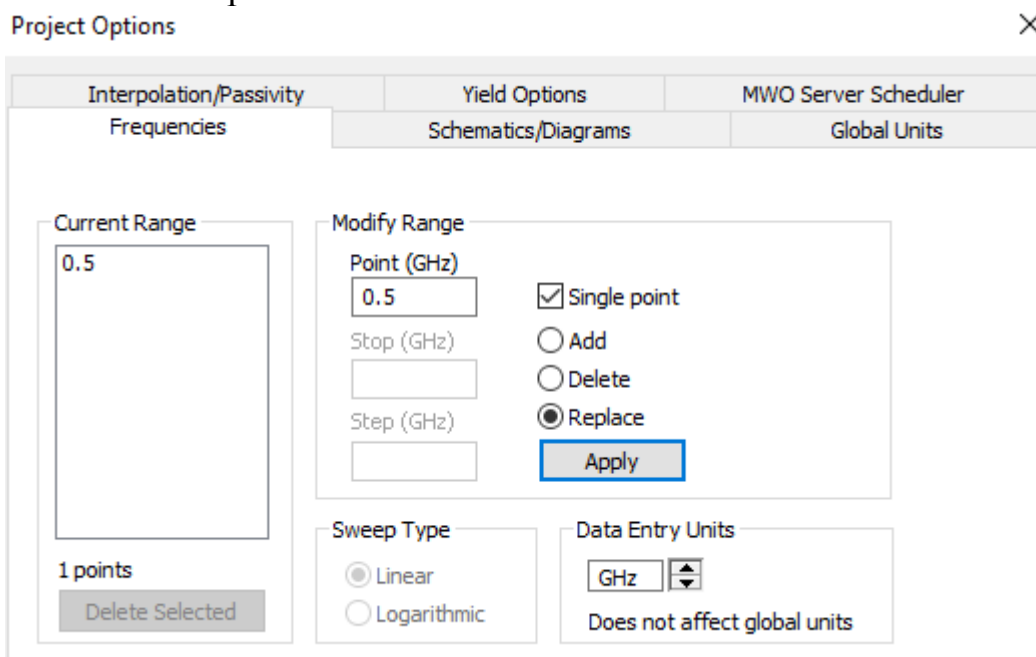


Рисунок 4.4 — Настройка шага частотной сетки для моделирования

Для  $I_0=14$  мА и  $P_{rf}=-20$  дБм,  $P_{lo}=6$  дБм построить график спектра по мощности на выходе фотодиода, используя окно настройки измерений, показанное на рис. 4.5.

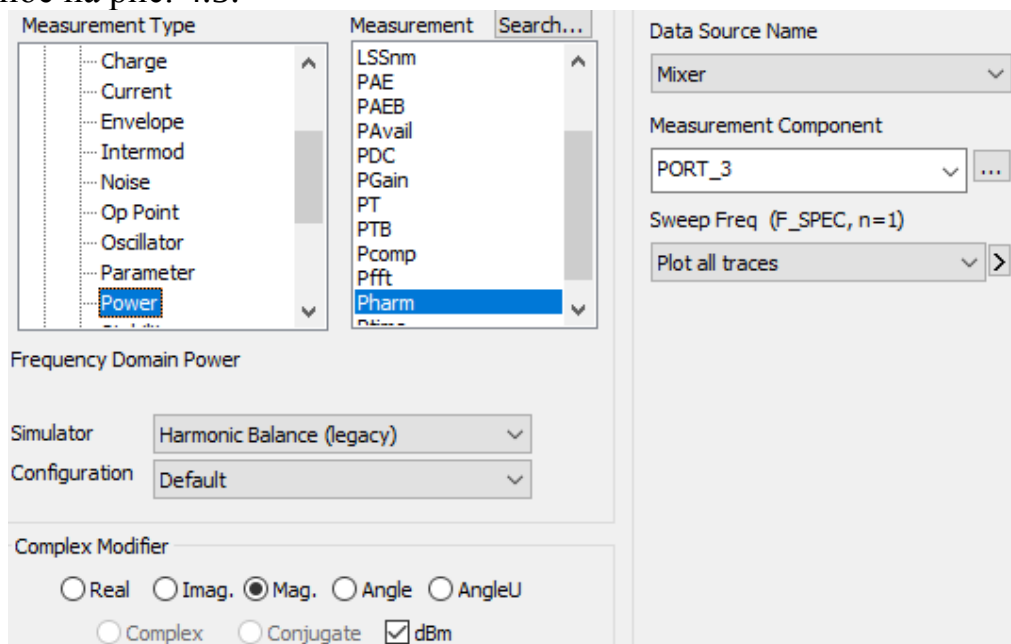


Рисунок 4.5 — Окно настройки измерений спектра по мощности

## Задание 2. Исследовать характеристики РФС.

а) Задать  $P_{rf} = -5$  дБм. Настроить переменную  $Mdet=0,44$  (задано по умолчанию) — для  $I_0=14$  мА.

С помощью команды «Toggle Enable» (вызывается при наведении на объект правой кнопкой мыши) перевести блок «SWPVAR» для переменной  $var\_P\_LO$  в активное состояние. Диапазон перестройки мощности гетеродина от  $-5$  до  $8$  дБм с шагом  $1$  дБм. В модели предусмотрен набор переменных, показанный на рис. 4.6, где отмечены варианты представления переменной  $P\_lo$  (мощность сигнала гетеродина, дБм), используемой как постоянная или переменная величина. Отключенная переменная имеет бледный серый цвет. Активация или отключение переменной производится командой «Toggle Enable».



Рисунок 4.6 — Активная и неактивная форма представления переменной  $P\_lo$

Активируйте перестраиваемую переменную  $P\_lo$  и отключите фиксированную переменную  $P\_lo$ .

Построить график зависимости уровня мощности на частоте IF от переменной мощности гетеродина, воспользовавшись окном настройки измерений, показанным для случая понижающего преобразования частоты на рис. 4.7.

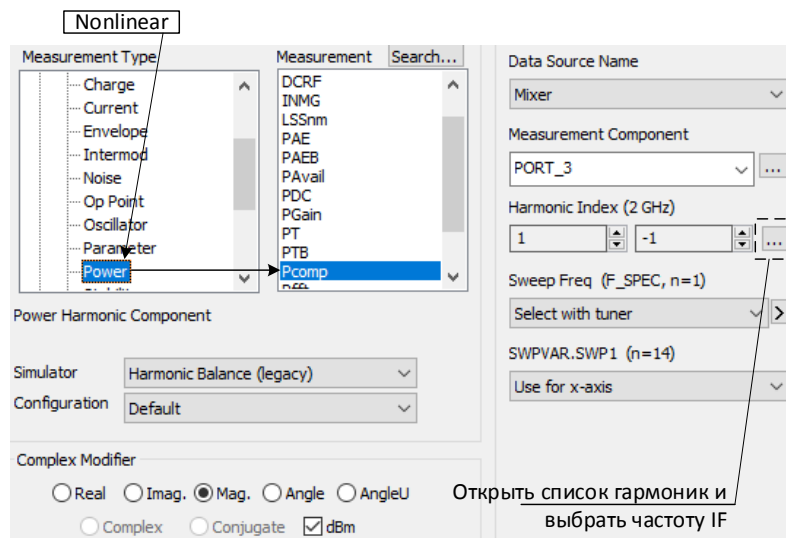


Рисунок 4.7 — Настройка графика зависимости уровня выходного сигнала от мощности гетеродина

Определить мощность гетеродина  $P_{lo1}$ , при которой обеспечивается наибольшее значение коэффициента преобразования

$$K = P_{IF} - P_{RF}, \text{ дБ.}$$

б) Задать  $P_{rf} = -5$  дБм. Настроить переменную  $Mdet = 0,9$  (задано по умолчанию) — для  $I_0 = 16$  мА.

Построить график зависимости уровня мощности на частоте IF от переменной мощности гетеродина. Определить мощность гетеродина  $P_{lo2}$ , при которой обеспечивается наибольшее значение коэффициента преобразования.

**Задание 3.** Исследовать характеристики смесителя в диапазоне изменения частоты RF.

Деактивировать блок «SWPVAR» для переменной  $var\_P\_LO$ . Активировать фиксированную переменную  $P_{lo}$  и деактивировать перестраиваемую переменную  $P_{lo}$ .

Активировать блок «SWPVAR» для переменной  $var\_fr\_RF$  — для установки диапазона перестройки радиочастоты  $f_{RF}$ . Настроить диапазон перестройки, полагая что относительная полоса перестройки должна составлять  $\xi = 15\%$  согласно выражения

$$\xi = \frac{2\Delta f_{rf}}{f_{rf}} = 0,15.$$

Тогда  $var\_fr\_RF$  задаётся в диапазоне от  $-\Delta f_{rf}$  до  $\Delta f_{rf}$  с шагом, например 0,05 ГГц.

а) Для случая тока накачки  $I_0 = 14$  мА (задать переменную  $Mdet = 0,44$ ) и фиксированной мощности гетеродина  $P_{lo1}$  построить график зависимости мощности выходного сигнала на частоте IF в зависимости от перестройки радиочастоты  $f_{RF}$ . Окно настройки измерений показано на рис. 4.8.

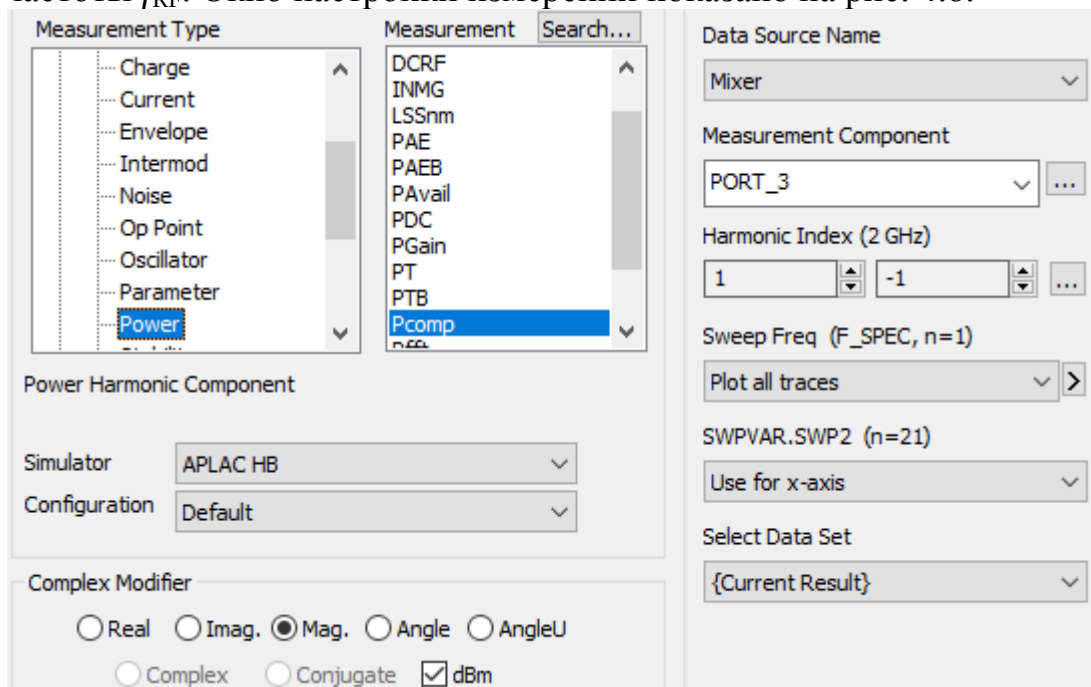


Рисунок 4.8 — Пример настройки окна измерений для построения графика зависимости мощности  $P_{IF}$  от  $f_{RF}$

б) Для случая тока накачки  $I_0=16$  мА (задать переменную  $M_{det}=0,9$ ) и фиксированной мощности гетеродина  $P_{lo2}$  построить график зависимости мощности выходного сигнала на частоте IF в зависимости от перестройки радиочастоты  $f_{RF}$ .

#### 4.4. Вопросы для подготовки к защите работы

- а) Опишите структурную схему радиофотонного смесителя.
- б) Опишите имитационную эквивалентную электрическую модель радиофотонного смесителя в САПР AWR DE.
- в) Проанализируйте состав спектра интермодуляционных составляющих на выходе фотодиода с точки зрения реализации преобразования частоты радиочастотной поднесущей.
- г) Проанализируйте зависимость уровня выходного сигнала на частоте IF от мощности гетеродина.
- д) Проанализировать зависимость мощности выходного сигнала на частоте IF от перестройки радиочастоты  $f_{RF}$  при токе накачки лазера  $I_0=14$  мА.
- е) Проанализировать зависимость мощности выходного сигнала на частоте IF от перестройки радиочастоты  $f_{RF}$  при токе накачки лазера  $I_0=16$  мА.
- ж) Сравнить частотные зависимости мощности выходного сигнала на частоте IF при токах накачки лазера  $I_0=14$  — 16 мА.

## **5. Лабораторная работа № 4. Моделирование радиофотонного умножителя частоты ММВ диапазона в САПР AWR DE**

### **5.1. Цель работы**

Целью работы является: исследовать физическую эквивалентную электрическую схему радиофотонного умножителя частоты ММВ диапазона средствами САПР AWE DE.

### **5.2. Описание модели радиофотонного умножителя частоты**

Радиофотонная технология может быть применена практически во всех видах перспективной радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) военного и гражданского назначений. Уровень ее современного развития подробно освещен в многостраничных обзорах в высокорейтинговых журналах и трудах крупных международных конференций. В частности, для телекоммуникации [16] (сотовые сети пятого и последующих поколений (5G, 6G) с распределением радиосигналов в миллиметровом диапазоне), радиолокации [17] (сверхширокополосные многодиапазонные РЛС с низкой вероятностью перехвата и с инверсным синтезом апертуры, радиопортретирование в реальном времени), радиоэлектронному противодействию [18] (сверхширокополосный формирователь помеховых радиосигналов, блокиратор радиоуправляемых взрывных устройств), измерительной технике [19] (параметры электромагнитного поля, фазовые шумы генераторов, направление прихода радиолуча). Ее скорейшее внедрение позволило бы не только решить ближайшие задачи отечественной радиоэлектронной промышленности и промышленности средств связи в области импортозамещения, но и существенно повысить обороноспособность страны, а также конкурентоспособность и экспортный потенциал российской техники в краткосрочной и долгосрочной перспективе за счет опережающих поставок радиоаппаратуры, еще не освоенной зарубежной промышленностью.

С целью наглядной демонстрации преимуществ радиофотонного подхода в работе предлагается рассмотреть сравнительное моделирование двух конкретных схем сверхвысокочастотного (СВЧ) умножителя частоты от нижней границы С-диапазона до верхней границы W- диапазона с использованием радиоэлектронного и радиофотонного подходов.

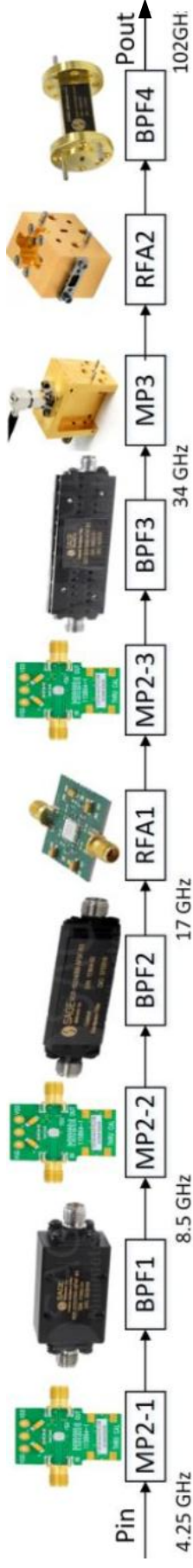
Примем к рассмотрению следующие исходные данные для моделирования:

- частота входного сигнала: 4,25, ГГц;
- частота выходного сигнала: 102 ГГц;
- кратность умножения: 24;
- входная мощность:  $\geq 5$  дБм
- коэффициент преобразования:  $\geq -5$  дБ.

#### **5.2.1. Модель радиоэлектронного умножителя 4,25 — 102 ГГц в САПР AWR DE**

Разработанная схема радиоэлектронного умножителя частоты и её реализация в AWR DE приведены на рис. 5.1.

a)



б)

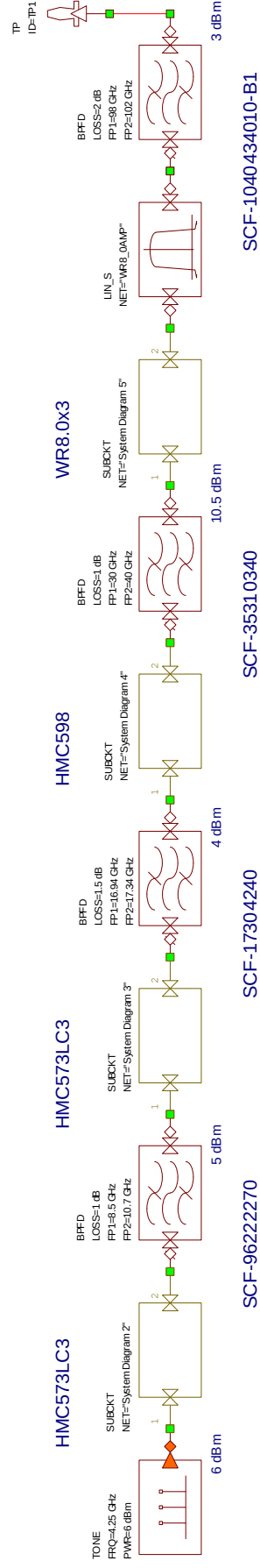


Рисунок 5.1 — Разработанная схема радиоэлектронного умножителя частоты (а) и её реализация в AWR DE (б)

Как следует из рис. 5.1,а, вследствие принципиальной невозможности создать в СВЧ диапазоне эффективный микроэлектронный умножитель высокой кратности заданное 24-кратное умножение достигается посредством разбиения схемы на 4 последовательных ступени. В первых трех реализуется умножение на 2, а в последней – умножение на 3. Каждая из ступеней содержит компенсирующий потери электронный усилитель, умножитель по второй гармонике и полосно-пропускающий фильтр (ППФ), устраняющий высшие гармоники и другие продукты нелинейного преобразования. А именно, первые две ступени МР2-1 и МР2-2 (4,25 — 8,5 ГГц и 8,5 — 17 ГГц) построены на базе микросхем HMC573LC3 фирмы Analog Devices, каждая из которых содержит входной и выходной усилители и умножитель, а ППФ ВРФ1 и ВРФ2 реализованы соответственно на базе микросхем SCF-96222270 и SCF-17304240 производства фирмы Eravant. Вследствие недостаточности усиления в первых двух ступенях для обеспечения оптимального режима работы последующих ступеней на выходе второй потребовалось ввести дополнительный усилитель RFA1 (Analog Devices, HMC1082LP4). Следующая за ним третья ступень МР2-3 (17 — 34 ГГц) выполнена на базе микросхемы HMC598 (Analog Devices) и следующий за ней ППФ ВРФ3 — микросхема SCF-35310340 (Eravant). Ввиду отсутствия микросхем миллиметрового диапазона четвертая ступень (34 — 102 ГГц) выполнена на базе волноводных устройств, включая умножитель частоты МР3 коаксиально-волноводной конструкции WR8.0x3 (Virginia Diodes) и волноводные усилитель RFA2 — микросхема SBL-6531243550 (Eravant) и следующий за ними ППФ ВРФ4 — микросхема SWF-10404340-10 (Eravant).

Характеристики выбранной компонентной базы для построения радиоэлектронного умножителя частоты 4,25 — 102 ГГц показаны в табл. 5.1.

Таблица 5.1 — Характеристики выбранной компонентной базы для построения радиоэлектронного умножителя частоты 4,25 — 102 ГГц

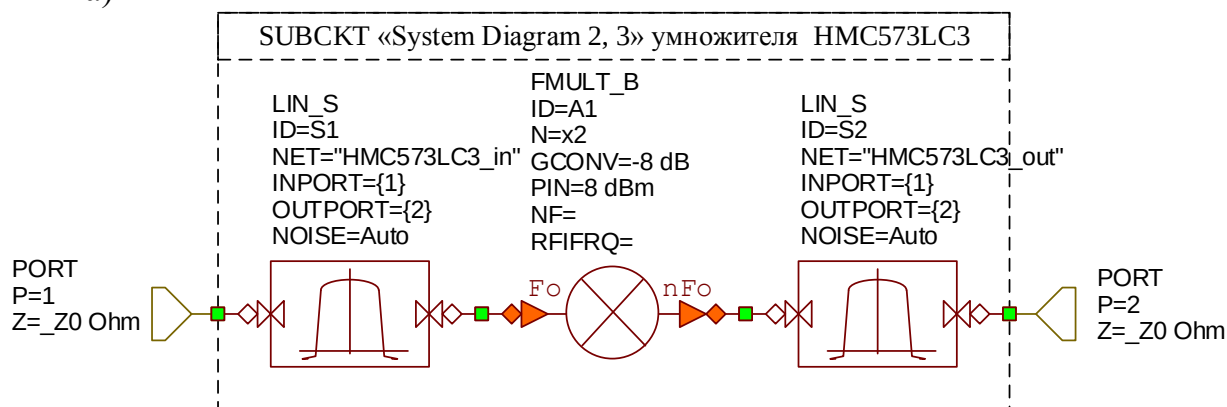
| Блок в схеме | Производитель                      | Компонент    | Параметр                              | Значение          |
|--------------|------------------------------------|--------------|---------------------------------------|-------------------|
| МР2-1, МР2-2 | Analog Devices                     | HMC573LC3    | Входной диапазон частот               | 4 — 11 ГГц        |
|              |                                    |              | Выходной диапазон частот              | 8 — 22 ГГц        |
|              |                                    |              | Типичная выходная мощность            | 12 дБм            |
|              |                                    |              | Типичная развязка по входному сигналу | 20 дБн            |
| ВРФ1         | Eravant (formerly SAGE Millimeter) | SCF-96222270 | Полоса пропускания                    | 8,5 — 10,7 ГГц    |
|              |                                    |              | Внутриполосное ослабление             | 1 дБ              |
|              |                                    |              | Внеполосное ослабление                | 70 дБ             |
| ВРФ2         | Eravant (formerly SAGE Millimeter) | SCF-17304240 | Полоса пропускания                    | 16,94 — 17,34 ГГц |

| Блок в схеме | Производитель                      | Компонент          | Параметр                              | Значение     |
|--------------|------------------------------------|--------------------|---------------------------------------|--------------|
|              |                                    |                    | Внутриполосное ослабление             | 1,5dB        |
|              |                                    |                    | Внеполосное ослабление                | 40 дБ        |
| RFA          | Analog Devices                     | HMC1082LP4         | Рабочая полоса частот                 | 5,5 — 18 ГГц |
|              |                                    |                    | Коэффициент усиления                  | 22 дБ        |
|              |                                    |                    | OIP3                                  | 35 дБ        |
| MP2-3        | Analog Devices                     | HMC598             | Входной диапазон частот               | 11 — 23 ГГц  |
|              |                                    |                    | Выходной диапазон частот              | 22 — 46 ГГц  |
|              |                                    |                    | Типичная выходная мощность            | 15 дБм       |
|              |                                    |                    | Типичная развязка по входному сигналу | 20 дБн       |
| BPF3         | Eravant (formerly SAGE Millimeter) | SCF-35310340       | Полоса пропускания                    | 30 — 40 ГГц  |
|              |                                    |                    | Внутриполосное ослабление             | 1 дБ         |
|              |                                    |                    | Внеполосное ослабление                | 40 дБ        |
| MP3          | Virginia Diodes                    | WR8.0x3            | Входной диапазон частот               | 30 — 46 ГГц  |
|              |                                    |                    | Выходной диапазон частот              | 90 — 140 ГГц |
|              |                                    |                    | Входная мощность                      | 20 — 240 мВт |
|              |                                    |                    | Типичная развязка по входному сигналу | –20 дБн      |
| BPF4         | Eravant (formerly SAGE Millimeter) | SWF-10404340-10-B1 | Полоса пропускания                    | 98 — 102 ГГц |
|              |                                    |                    | Внутриполосное ослабление             | 2 дБ         |
|              |                                    |                    | Внеполосное ослабление                | 40 дБ        |

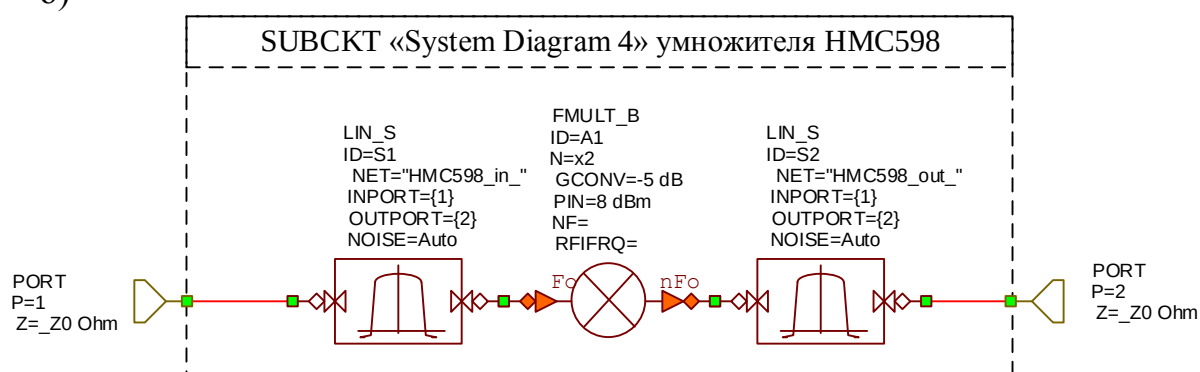
На рис. 5.1,б представлена выполненная в САПР AWR DE эквивалентная электрическая модель разработанной схемы радиоэлектронного умножителя частоты (рис. 5.1,а). В проекте САПРа использованы библиотечные модели генератора входного сигнала 4,25 ГГц (TONE), полосно-пропускающих фильтров (BPF4), а также узлов умножения частоты в виде подсхем SUBCKT. Данные для расчета выходных характеристик подсхем выбирались на сайтах соответствующих производителей. На рис. 5.2 представлены подсхемы в

программном проекте радиоэлектронного умножителя, показанном на рис. 5.1,б.

а)



б)



в)

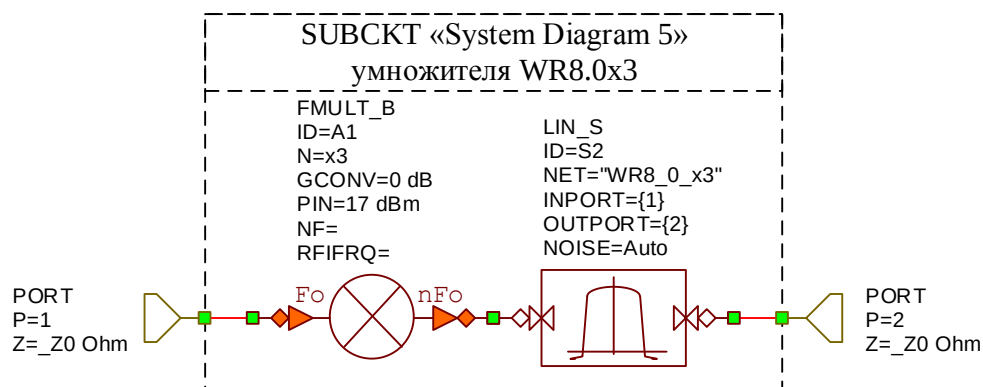


Рисунок 5.2 — Подсхемы в программном проекте радиоэлектронного умножителя частоты для модулей MP2-1 и MP2-2 (а), MP2-3 (б), MP3 (в)

Все использованные в проекте блоки «LIN\_S» — четырехполюсники с выборкой частотных характеристик модулей S11 или S22 соответствующих устройств для схем MP2 и модуля S21 для схемы MP3. В программных модулях умножителей FMULT\_B указана кратность умножения, коэффициент преобразования и номинальная входная мощность.

Для схемы на рис. 5.1,б выполнено системное моделирование спектр выходного сигнала радиоэлектронного умножителя. Спектр по мощности показан на рис. 5.3, где кроме основного выходного сигнала показаны уровни спектральных составляющих на частотах, отстоящих от главного тона на величину приблизительно равную частоте входного сигнала с частотой 4,25 ГГц.

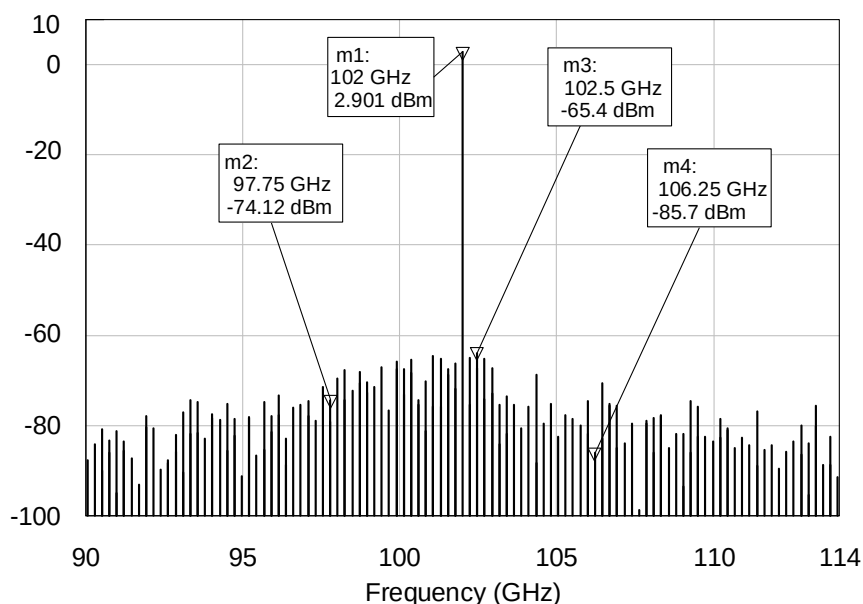


Рисунок 5.3 — Смоделированный спектр выходного сигнала радиоэлектронного умножителя

### 5.2.2. Модель радиопотонного умножителя 4,25 — 102 ГГц в САПР AWR DE

Структурная схема радиопотонного умножителя (РФУ) показана на рис. 5.4. В состав схемы РФУ входят элементы:

- лазерный диод с длиной волны в диапазоне 1535 — 1565 нм (SLS);
- фотодетекторы (PD1, PD2);
- электрооптические модуляторы (MZM\_1, MZM\_2);
- усилитель мощности диапазона 0,1 — 6 ГГц (EA1);
- усилители мощности диапазона 5,5 — 18 ГГц (EA2);
- усилитель мощности диапазона 65 — 120 ГГц (EA3);
- СВЧ полосо-пропускающий фильтр диапазона 16,94 — 17,34 ГГц (ППФ, RF BPF);
- СВЧ волноводный ППФ диапазона 98 — 102 ГГц (WG-BPF);
- оптический брэгговский фильтр диапазона 1525 — 1565 нм (OBGF);
- оптический волоконный эрбиевый усилитель (OA);
- коаксиальный патчкорд.

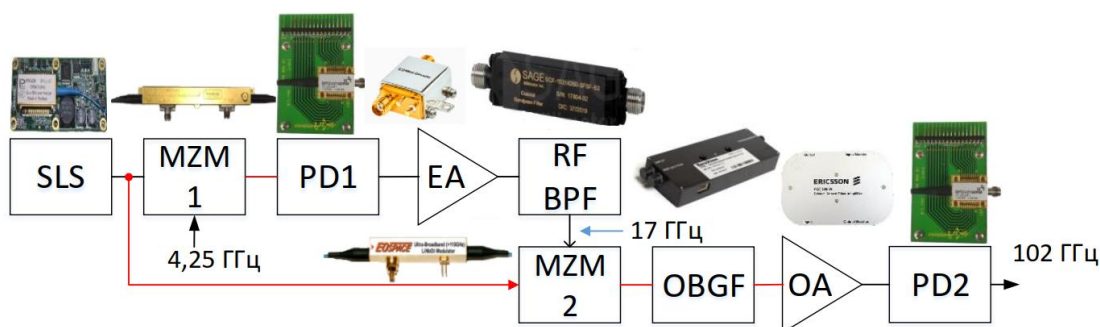


Рисунок 5.4 — Структурная схема радиопотонного умножителя (РФУ)

В САПР AWR DE реализована физическая эквивалентная электрическая модель радиопотонного умножителя (РФУ), представленная на рис. 5.5.



В модели использована библиотечная модель эквивалентного оптического разветвителя (SPLIT2). Остальные модели электронных и оптических узлов описаны в [2, 3, 20] и в п.1 пособия. В составе модели РФУ эквивалентные модели отдельных компонентов введены в подсхемах (SUBCKT). Данные для настройки их выходных характеристик выбирались на сайтах соответствующих производителей. Характеристики компонентной базы для реализации схемы умножителя частоты представлены в табл. 5.2.

Таблица 5.2 — Характеристики компонентной базы для реализации схемы умножителя частоты

| Блок в схеме | Производитель                      | Компонент           | Параметр                                                | Значение          |
|--------------|------------------------------------|---------------------|---------------------------------------------------------|-------------------|
| SLS          | Teraxion                           | NLL                 | Диапазон длин волн                                      | 1535 — 1565 нм    |
|              |                                    |                     | Выходная мощность                                       | $\geq 80$ мВт     |
|              |                                    |                     | Спектральная линия                                      | 10 кГц            |
| MZM1         | ThorLabs                           | LN05S-FG            | Диапазон длин волн                                      | 1525-1605nm       |
|              |                                    |                     | Вносимые потери                                         | 5 дБ              |
|              |                                    |                     | Коэффициент оптической контрастности                    | 20 дБ             |
|              |                                    |                     | Полоса модулирующих частот                              | 35 ГГц            |
|              |                                    |                     | Номинальная СВЧ-мощность                                | 24 дБм            |
| EA1          | Analog Devices                     | HMC637              | Диапазон частот                                         | 0,1 — 6 ГГц       |
|              |                                    |                     | Коэффициент усиления                                    | 13 дБ             |
|              |                                    |                     | Точка компрессии P1dB выходной мощности                 | 29 дБм            |
|              |                                    |                     | Коэффициент шума                                        | 5 дБ              |
| PD1          | II-VI (formerly Finisar)           | BPDV2150            | Диапазон длин волн                                      | 1525-1575nm       |
|              |                                    |                     | Полоса СВЧ выходного сигнала                            | 0 — 43 ГГц        |
|              |                                    |                     | Чувствительность                                        | 0,6 А/Вт          |
|              |                                    |                     | Номинальная входная оптическая мощность                 | 16 дБм            |
| EA2          | Analog Devices                     | HMC1082LP4          | Диапазон частот                                         | 5.5-18GHz         |
|              |                                    |                     | Коэффициент усиления                                    | 22dB              |
|              |                                    |                     | Точка пересечения с ИМС 3 порядка, OIP3                 | 35 дБм            |
| RF BPF       | Eravant (formerly SAGE Millimeter) | <u>SCF-17304240</u> | Полоса пропускания                                      | 16,94 — 17,34 ГГц |
|              |                                    |                     | Внутриполосное ослабление                               | 1,5 дБ            |
|              |                                    |                     | Внеполосное ослабление (нижние частоты/верхние частоты) | 40 / 40 дБ        |
| MZM2         | EOspace                            | Custom              | Диапазон длин волн                                      | 1525 — 1565 нм    |
|              |                                    |                     | Вносимые потери                                         | 7 дБ              |
|              |                                    |                     | Коэффициент                                             | 20 дБ             |

| Блок в схеме | Производитель                      | Компонент          | Параметр                                                | Значение       |
|--------------|------------------------------------|--------------------|---------------------------------------------------------|----------------|
|              |                                    |                    | оптической контрастности                                |                |
|              |                                    |                    | Полоса модулирующих частот                              | 110 ГГц        |
|              |                                    |                    | Номинальная СВЧ-мощность                                | 18 дБм         |
| OBGF         | Teraxion                           | TFN                | Диапазон длин волн                                      | 1525-1565nm    |
|              |                                    |                    | Полоса СВЧ-поднесущих                                   | 2 — 50 ГГц     |
|              |                                    |                    | Вносимые потери                                         | ≤ 3,5 дБ       |
|              |                                    |                    | Коэффициент подавления боковой моды (SMSR)              | > 20 дБ        |
|              |                                    |                    | Номинальная входная мощность                            | 500 мВт        |
| OA           | Ericsson                           | PGE 60830          | Диапазон длин волн                                      | 1540 — 1560 нм |
|              |                                    |                    | Коэффициент усиления                                    | 20 дБ          |
|              |                                    |                    | Номинальная выходная мощность                           | 13 дБм         |
|              |                                    |                    | Коэффициент шума                                        | 5 дБ           |
| PD2          | II-VI (formerly Finisar)           | XPDV4121R          | Диапазон длин волн                                      | 1525 — 1575 нм |
|              |                                    |                    | Полоса СВЧ выходного сигнала                            | 0 — 105 ГГц    |
|              |                                    |                    | Чувствительность                                        | 0,6 А/Вт       |
|              |                                    |                    | Номинальная входная оптическая мощность                 | 10 дБм         |
| EA3          | Eravant (formerly SAGE Millimeter) | SBL-6531243550     | Диапазон частот                                         | 65 — 120 ГГц   |
|              |                                    |                    | Коэффициент усиления                                    | 35 дБ          |
|              |                                    |                    | Коэффициент шума                                        | 5 дБ           |
| WG-BPF       | Eravant (formerly SAGE Millimeter) | SWF-10404340-10-B1 | Полоса пропускания                                      | 98 — 102 ГГц   |
|              |                                    |                    | Внутриполосное ослабление                               | 2 дБ           |
|              |                                    |                    | Внеполосное ослабление (нижние частоты/верхние частоты) | 40 / 40 дБ     |

Применение радиопотонного подхода может обеспечить умножение частоты радиосигналов с более высокой кратностью по сравнению с вариантом схемы умножителя, реализованной непосредственно в СВЧ диапазоне. Это принципиально позволяет упростить общую схему умножителя частоты, улучшив его выходные характеристики. Согласно модели РФУ, показанной на рис. 5.4, 5.5, заданное 24-кратное умножение СВЧ сигнала достигается посредством разбиения схемы на 2 последовательных ступени. В первой реализуется умножение на 4, а во второй – умножение на 6. В обеих ступенях процесс умножения частоты радиосигнала реализуется с помощью электрооптических модуляторов Маха-Цандера (ЭОМ МЦ). В первой ступени ЭОМ МЦ (MZM1, ThorLabs, LN05S-FG) работает в режиме смещения,

обеспечивающего максимальное пропускание. Во второй ступени ЭОМ МЦ (MZM2, EOspace, Custom) работает в режиме смещения, при котором обеспечивается минимальное пропускание. Оптическая накачка обоих модуляторов осуществляется от одного и того же лазерного излучателя (SLS, Pure Photonics, PPCL300). Для формирования модулирующего радиосигнала на входе MZM2, в первой ступени дополнительно осуществляется оптико-электрическое преобразование с помощью фотодетектора (PD1, Finisar BPDV2150) с последующим усилением (EA, Analog Devices HMC1082LP4) и фильтрацией (RF BPF, Eravant SCF- 17304240). Во второй ступени выходной оптический сигнал MZM2 фильтруется с помощью оптического полосно-запирающего фильтра (OBGF, Teraxion TNF), устраняющего остатки несущей и первые две гармоники, усиливается с помощью оптического усилителя (OA, Ericsson PGE 60830) и преобразуется в суб-терагерцевый диапазон с помощью еще одного фотодетектора (PD2, Finisar XPDV4121R).

Для лучшего понимания принципа работы РФУ рассмотрим результаты моделирования характеристик его физической эквивалентной электрической схемы, представленной на рис. 5.5 с описанием характеристик реальных компонентов в табл. 5.2. На схеме РФУ введена последовательность контрольно-измерительных точек в виде зондов «M\_PROBE» (зонды «VP1» — «VP7»).

Частота оптической несущей задана равной 193300 ГГц. В контрольной точке, соответствующей зонду VP2 (на выходе MZM1), с учетом нелинейности передаточной характеристики MZM1 получен оптический спектр по мощности, показанный на рис. 5.6, характеризующийся повышенным уровнем четных гармоник СВЧ-поднесущих в боковых полосах оптической несущей. Отмечена 4 гармоника в боковой полосе оптической несущей — на частоте 193317 ГГц.

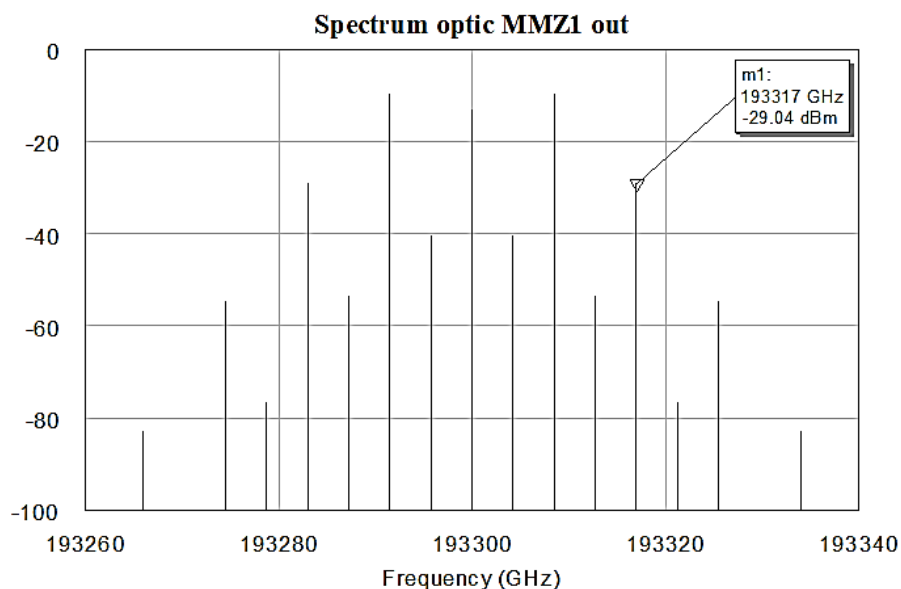


Рисунок 5.6 — Спектр по мощности в контрольной точке VP2

Спектр электрического сигнала на выходе первого фотодетектора PD1, измеренный в контрольной точке VP3, показан на рис. 5.7. Видно, что

сформирована СВЧ-несущая на частоте 17 ГГц, т.е. выполнено умножение частоты на 4 ( $f = 4 \times 4,25 = 17$ ).

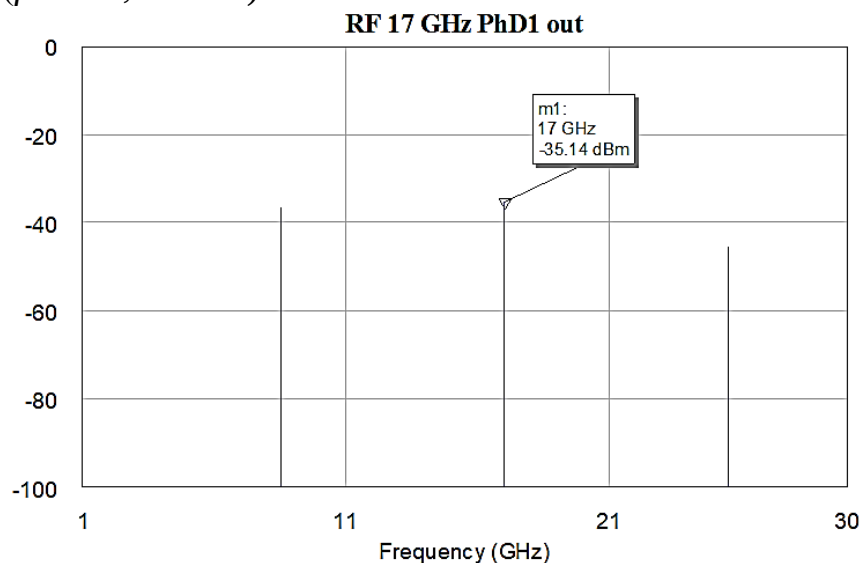


Рисунок 5.7 — Спектр электрического сигнала в контрольной точке VP3

После фильтрации и усиления в контрольной точке VP4 сформирован СВЧ сигнал мощностью 17 дБм, как показано на рис. 5.8.

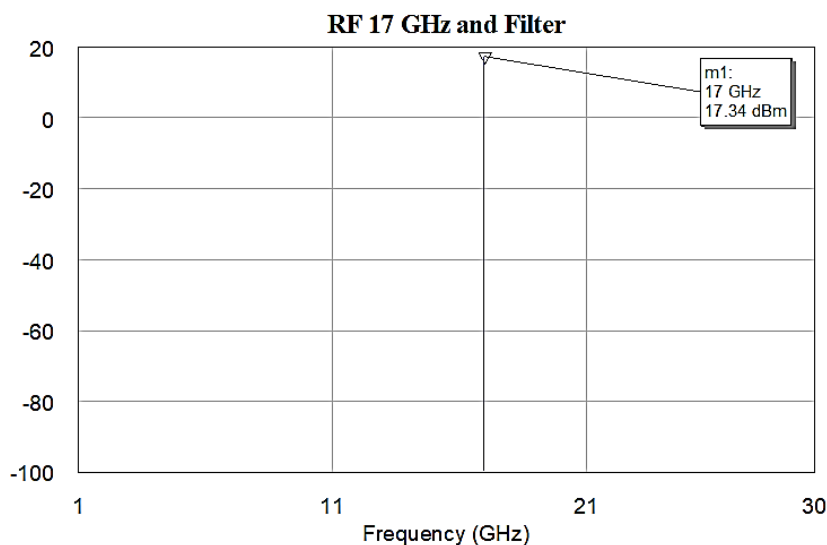


Рисунок 5.8 — Спектр электрического сигнала в контрольной точке VP4

Спектр оптического сигнала на выходе MZM2 — в режиме с подавленной оптической несущей, измеренный в точке VP5, показан на рис. 5.9. Брэгговский фильтр позволяет выделить верхнюю боковую полосу промоделированной оптической несущей в полосе поднесущей 51 ГГц.

После детектирования оптического сигнала на фотодиоде PD2, в спектре СВЧ сигнала выделяется вторая гармоника от поднесущей на частоте 51 ГГц. На рис. 5.10 показан спектр, полученный на выходе PD2, в контрольной точке VP7.

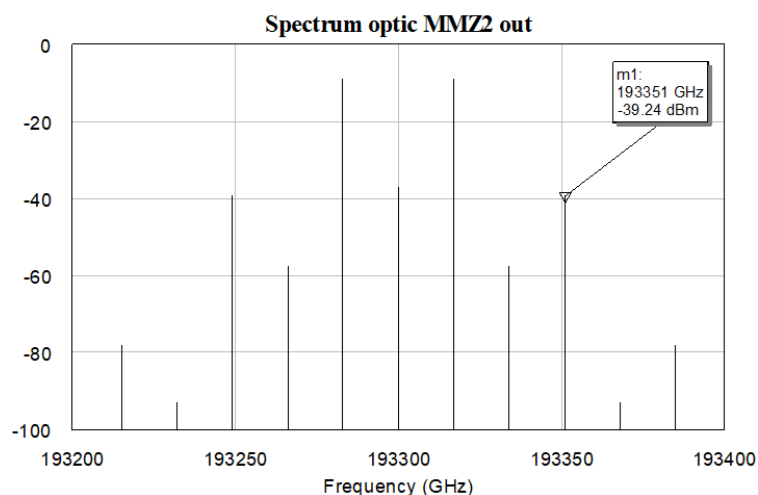


Рисунок 5.9 — Спектр электрического сигнала в контрольной точке VP5

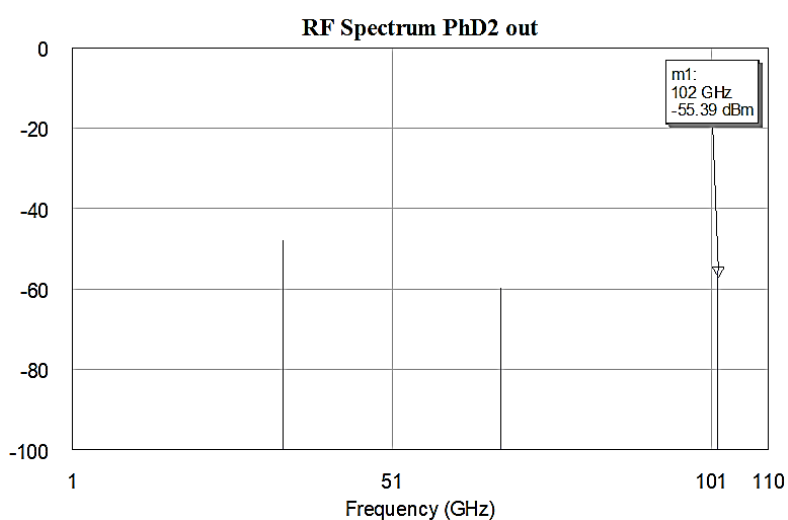


Рисунок 5.10 — Спектр электрического сигнала в контрольной точке VP7

На рис. 5.11 показан спектр на выходе схемы РФУ, полученный после усиления и фильтрации СВЧ-сигнала с выхода фотодиода.

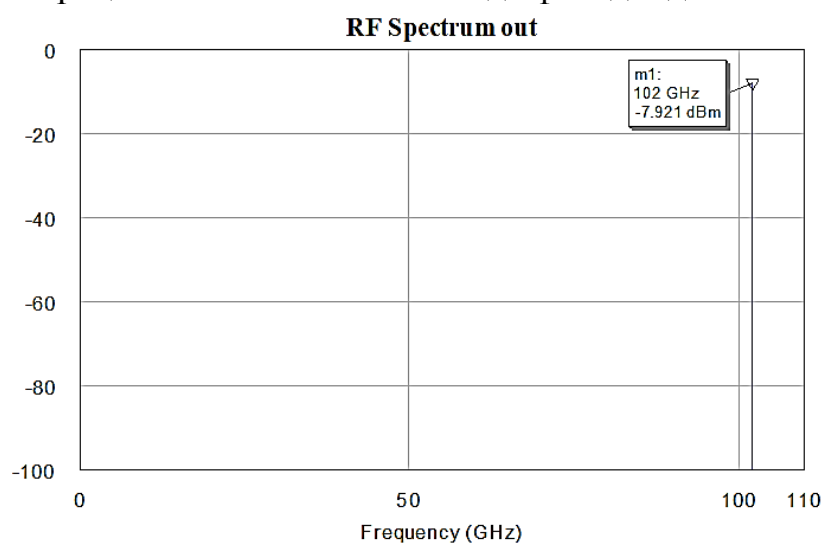


Рисунок 5.11 — Спектр на выходе РФУ

### 5.3. Порядок выполнения работы

Исходные данные для моделирования физической эквивалентной электрической схемы радиопотонного умножителя частоты (РФУ) приведены в табл. 5.3.

Таблица 5.3 — Исходные данные для моделирования физической эквивалентной электрической схемы радиопотонного умножителя частоты

| N                      | 0    | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    |
|------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $f_{IN}$ , ГГц         | 4    | 9    | 6,5  | 6    | 4,75 | 5    | 4,5  | 7,25 | 7,5  | 6,25 |
| $m_1$                  | 4    | 2    | 4    | 4    | 4    | 4    | 4    | 4    | 4    | 4    |
| $m_2$                  | 6    | 6    | 4    | 4    | 6    | 6    | 6    | 4    | 4    | 4    |
| $f_{OUT}$ , ГГц        | 96   | 108  | 104  | 96   | 114  | 120  | 108  | 116  | 120  | 100  |
| $\lambda_{optic}$ , нм | 1535 | 1537 | 1540 | 1545 | 1547 | 1550 | 1555 | 1557 | 1560 | 1565 |

Примечание: N — последний номер зачетной книжки обучающегося;  $f_{IN}$  — частота входного электрического гармонического сигнала,  $f_{OUT}$  — частота выходного электрического гармонического сигнала;  $m_1$  — коэффициент умножения частоты на первой ступени (MZM1);  $m_2$  — коэффициент умножения частоты на второй ступени (MZM2–PD2).

#### Задание 1. Собрать и отладить схему РФУ.

В САПР AWR DE в разделе дерева проекта в разделе «Circuit Schematics» создать проект с названием «**MWP\_RFM**» (расшифровывается как: «Радиопотонный умножитель радиочастоты»).

В дерево проекта импортировать подсхемы и данные:

— в раздел «Global Definitions» импортировать файл «Global Definitions.ieq»;

— в раздел «Data Files» импортировать файлы:

- «HMC637.s2p» (S-параметры EA1);
- «HMC1082LP4.s2p» (S-параметры EA2);
- «SBL\_6531243550.s2p» (S-параметры EA3).

— в раздел «Circuit Schematics» импортировать файлы:

- «Laser\_noise.sch» (модель RIN лазера);
- «BPDV2150.sch» (модель PD1);
- «Phase\_shifter.sch» (модель фазосдвигающей ячейки ЭОМ МЦ);
- «Ph\_Modulator.sch» (модель фазового модулятора ЭОМ МЦ);
- «Modulator A.sch» (базовая схема MZM1);
- «LN05S\_FG.sch» (модель внешней цепи MZM1);
- «Modulator A 2.sch» (базовая схема MZM2);
- «MMZ\_2.sch» (модель MZM2);
- «SCF\_17304240.sch» (модель RF BPF);
- «XPDV4121R.sch» (модель PD2);
- «TNF.sch» (модель «OBGF»);

- «SWF\_10404340\_10\_B1.sch» (модель WG-BPF).

Собрать модель РФУ, показанную на рис. 5.5.

Настроить полосы пропускания в подсхемах фильтров:

- «SCF\_17304240.sch» (модель RF BPF);
- «TNF.sch» (модель «OBGF»);
- «SWF\_10404340\_10\_B1.sch» (модель WG-BPF).

**Задание 2.** Проанализировать спектры сигналов в контрольных точках зондов VP1 — VP7 и на выходном порте P3.

Пример окна с настройками измерений спектра по мощности в контрольной точке на зонде VP2 показан на рис. 5.12.

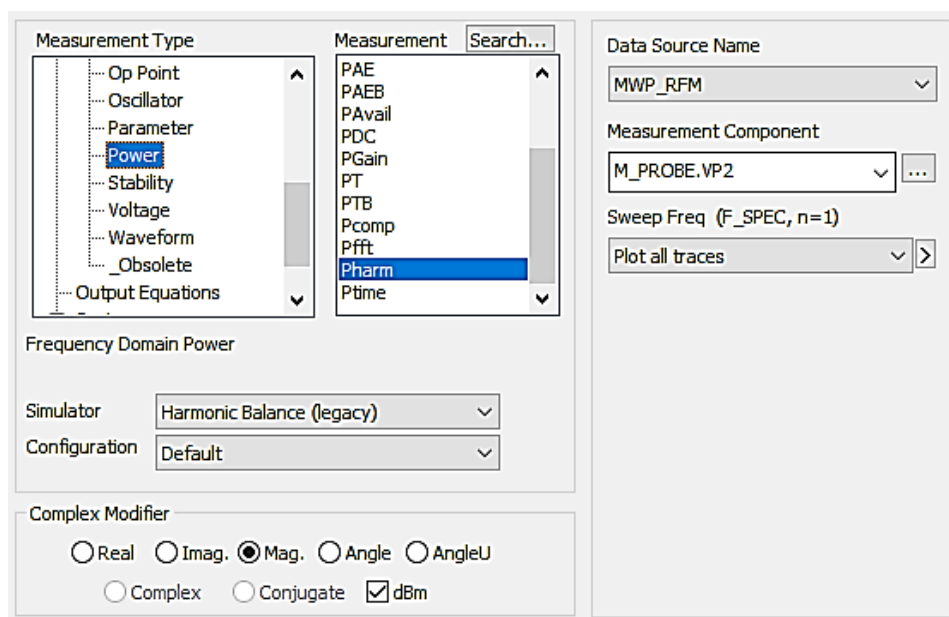


Рисунок 5.12 — Пример окна с настройками измерений спектра по мощности в контрольной точке на зонде VP2

Провести качественное сравнение полученных результатов с «примерными данными моделирования», представленными на рис. 5.6 — 5.11.

**Задание 3.** Оформить в отчете графики спектров сигналов, измеренных в контрольных точках.

Описать результаты сравнения с примерными данными моделирования.

Сделать выводы по работе.

#### 5.4. Вопросы для подготовки к защите работы

- Опишите структурную схему радиоэлектронного умножителя частоты.
- Проанализируйте характеристики компонентной базы радиоэлектронного умножителя частоты.
- Опишите системную модель радиоэлектронного умножителя, реализованную в САПР AWR DE.
- Опишите структурную схему радиопотонного умножителя частоты.

д) Опишите физическую эквивалентную электрическую модель радиофотонного умножителя частоты, реализованную в САПР AWR DE.

е) Проанализируйте характеристики компонентной базы для рассмотренной схемы радиофотонного умножителя частоты.

ж) По результатам моделирования проанализируйте спектры сигналов в контрольных точках схемы РФУ VP1 — VP3.

з) По результатам моделирования проанализируйте спектры сигналов в контрольных точках схемы РФУ VP4, VP5.

и) По результатам моделирования проанализируйте спектры сигналов в контрольных точках схемы РФУ VP6, VP7.

к) Проанализируйте спектр сигнала на выходе РФУ и сравните его со спектром выходного сигнала радиоэлектронного умножителя частоты, показанным на рис. 5.3.

## 6. Лабораторная работа № 5. Моделирование радиопотонной диаграммообразующей схемы 1×8 линейной фазированной антенной решетки в САПР AWR DE

### 6.1. Цель работы

Целью работы является: исследовать физическую эквивалентную электрическую схему радиопотонной диаграммообразующей схемы (РФДОС) фазированной антенной решетки (ФАР) средствами САПР AWE DE.

### 6.2. Описание модели радиопотонной диаграммообразующей схемы фазированной антенной решетки

#### 6.2.1. Описание структуры и компонентов РФДОС

Рассмотрим модель восьмиканальной РФДОС, реализованной на четырех анизопериодических решетках Брэгга (АБР) и восьми радиопотонных фазовращателях (РФФ). Функциональная схема РФДОС показана на рис. 6.1.

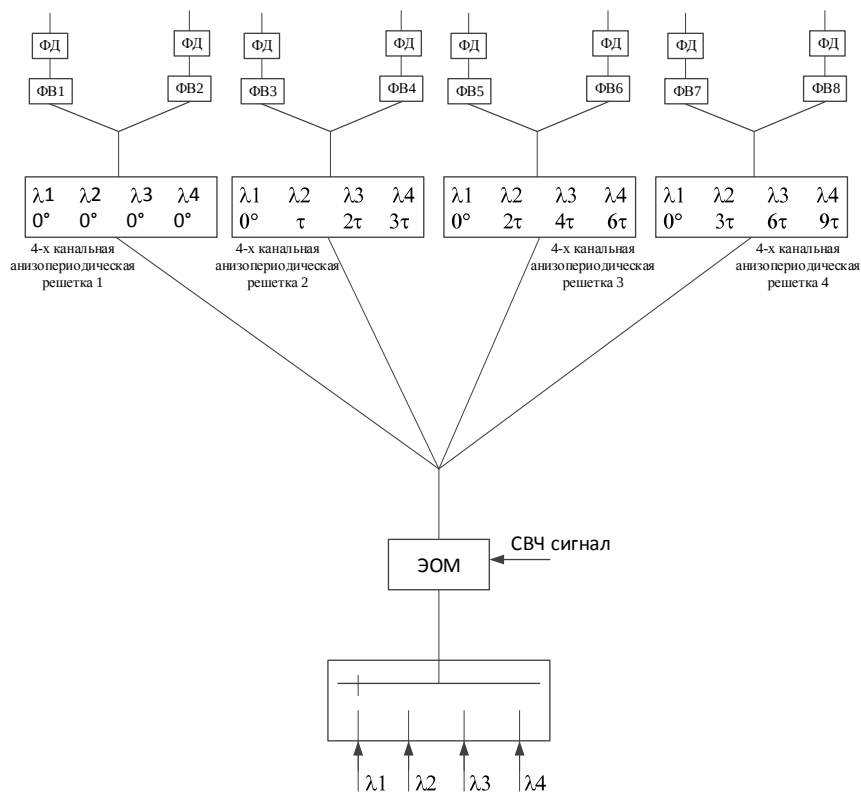


Рисунок 6.1 — Функциональная схема РФДОС с формированием сдвига фаз с помощью АБР (грубо) и РФФ (точно)

Эквивалентная электрическая схема анизопериодической брэгговской решетки показана на рис. 6.2. В схеме АБР входной оптический сигнала на длине волны  $\lambda_1$  отражается от входной Брэгговской решетки и попадает на выход АБР с нулевой временной задержкой. Оптический сигнал на длине волны  $\lambda_2$  отразится от второй Брэгговской решетки и будет задержан на время  $2 \cdot t_1$  нс. Оптический сигнал на длине волны  $\lambda_3$  будет задержан на время  $4 \cdot t_1$  нс, а на длине волны  $\lambda_4$  — на время  $6 \cdot t_1$  нс. Для различных АБР

величина  $t_1$  варьируется в диапазоне  $[0,5\tau, 1,5\tau]$ , где  $\tau$  — некоторое заданное дискретное времени задержки.

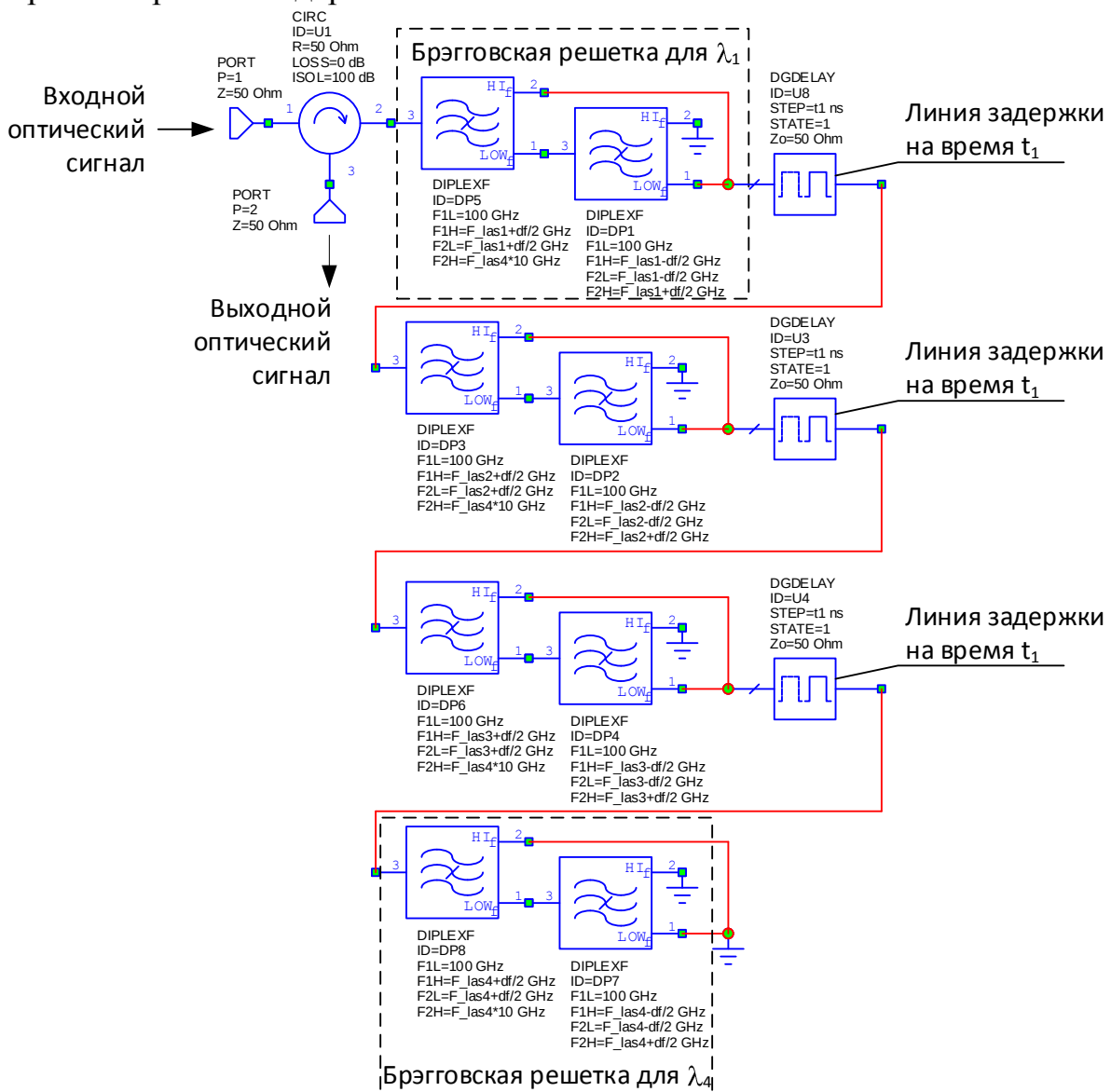


Рисунок 6.2 — Эквивалентная электрическая схема анизопериодической брэгговской решетки

В схеме РФДОС, показанной на рис. 6.1, используется четыре модуля АБР, которые величиной  $t_1$ . Для АБР-1  $t_1 = 0$ , для АБР-2  $t_1 = 0,5\tau$ , для АБР-3  $t_1 = \tau$ , для АБР-4  $t_1 = 1,5\tau$ .

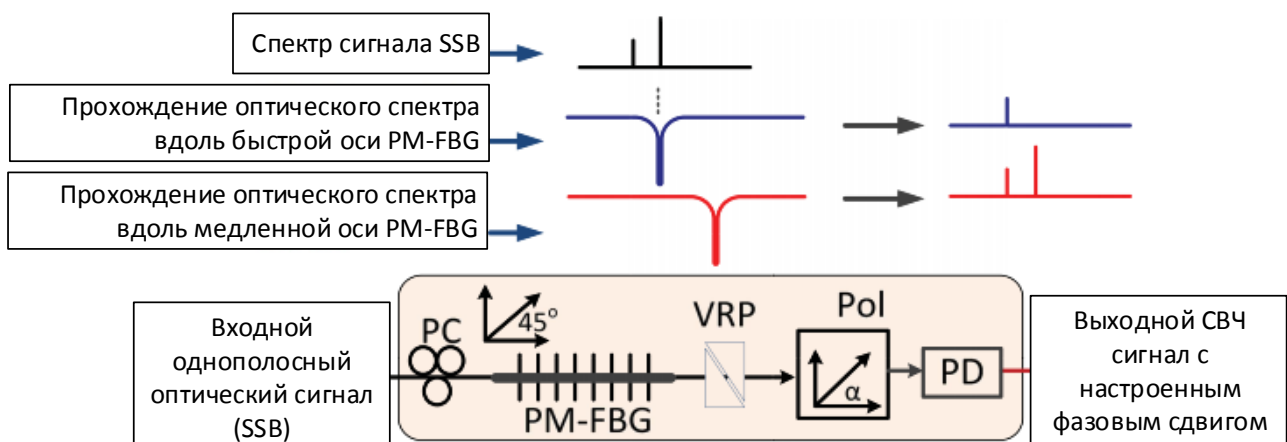
Модель РФФ реализована на основе схемы, предложенной в [6] (рис. 6.3). РФФ реализован для линейно поляризованного SSB-модулированного оптического сигнала с широкой полосой пропускания и полным сдвигом фазы СВЧ-сигнала на  $360^\circ$ . В предлагаемой системе линейно поляризованный SSB-модулированный сигнал подается на волоконную брэгговскую решетку, поддерживающую поляризацию (PM-FBG), через контроллер поляризации (PC) для управления положением плоскости поляризации падающей световой волны, чтобы она составляла угол  $45^\circ$  относительно «скоростной» оси PM-FBG. Вдоль «скоростной» оси оптический сигнал распространяется с максимальной

скоростью в световоде. Таким образом, достигается одинаковое деление мощности по скоростной и медленной осям. Вдоль «медленной» оси оптический сигнал распространяется с минимальной скоростью в световоде. Оптическая несущая SSB-сигнала вдоль быстрой оси удаляется с помощью режекции PM-FBG. Из-за двойного лучепреломления режекция PM-FBG вдоль медленной оси смещена по частоте относительно режекции на быстрой оси. Таким образом, PM-FBG не влияет на сигнал SSB вдоль медленной оси. Благодаря управлению пластиной переменного замедления (VRP), расположенной после PM-FBG, два сигнала по быстрой и медленной осям будут иметь настраиваемую разность фаз. Оптические сигналы с выхода VRP подаются на поляризатор, на выходе которого результирующий оптический сигнал представляет собой векторную сумму двух входных сигналов. Выходной сигнал поляризатора

$$E_{out} = E_x \cos \alpha + E_y \sin \alpha, \quad (6.1)$$

где  $E_{x,y}$  — два ортогональных по поляризации оптических сигнала, на которые разложен входной оптический сигнал на выходе PC;  $\alpha$  — угол между двумя главными осями поляризатора и двумя главными осями VRP.

Суммарный оптический сигнал регистрируется фотодетектором (PD), на выходе которого формируется СВЧ сигнал с настраиваемым сдвигом по фазе. Путем настройки разности фаз между двумя ортогональными оптическими сигналами на поляризаторе происходит сдвиг фазы выходного СВЧ-сигнала.



PC — контроллер поляризации; SSB — амплитудно-модулированный однопольный оптический сигнал; VRP — пластина с регулируемым замедлением оптического сигнала в заданной плоскости поляризации; Pol — поляризатор

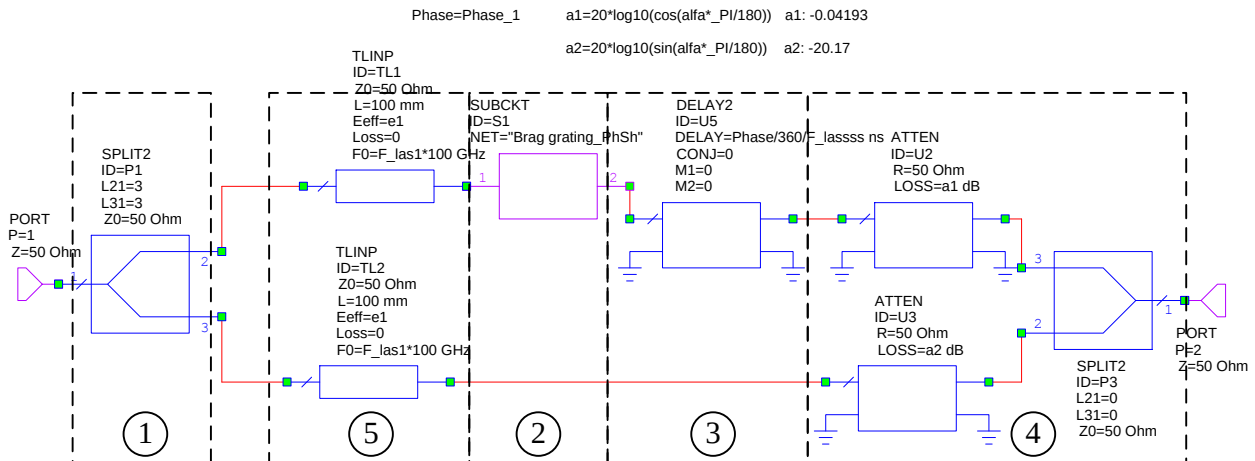
Рисунок 6.3 — Схема радиотонного фазовращателя

В САПР AWR DE разработана функциональная эквивалентная электрическая схема РФФ, показанная на рис. 6.4.

Входной амплитудно-модулированный SSB оптический сигнал делится на поляризационный контроллере (1) на две равные части. Верхнее плечо схемы — скоростная ось PM-FBG, нижнее плечо схемы — медленная ось PM-FBG. В плече скоростной оси VRP реализовано в виде линии задержки DELAY2 (3). Ослабление сигнала в скоростном и медленном плечах схемы реализовано на

аттенюаторах ATTEN. Величина соответствующих ослаблений сигналов при сложении на поляризаторе рассчитывается согласно (6.1) — коэффициенты  $a_1$  и  $a_2$ .

Эквивалентная схема волоконной брэгговской решетки (ВБР) в скоростном плече PM-FBG введена в SUBCKT «Brag grating\_PhSh» (2) и показана на рис. 6.5. На рис. 6.6 представлена частотная зависимость модуля  $S_{21}$  ВБР «Brag grating\_PhSh».



1 — поляризационный контроллер; 2 — поляризационно-ориентированная многочастотная волоконная Брэгговская решетка; 3 — переменная задерживающая плоскость (VRP); 4 — поляризатор; 5 — начальная задержка сигнала на элементах ФВ

Рисунок 6.4 — Функциональная эквивалентная электрическая схема РФФ в САПР AWR DE

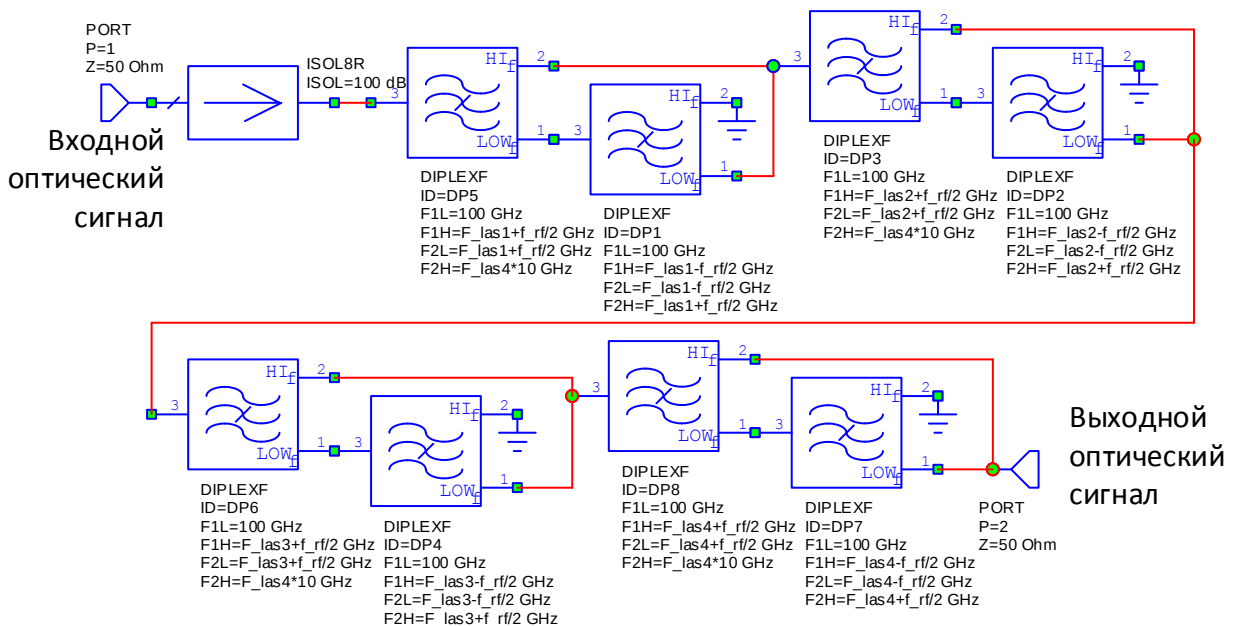


Рисунок 6.5 — Эквивалентная схема волоконной брэгговской решетки, предназначенной для размещения в модели скоростного плеча PM-FBG

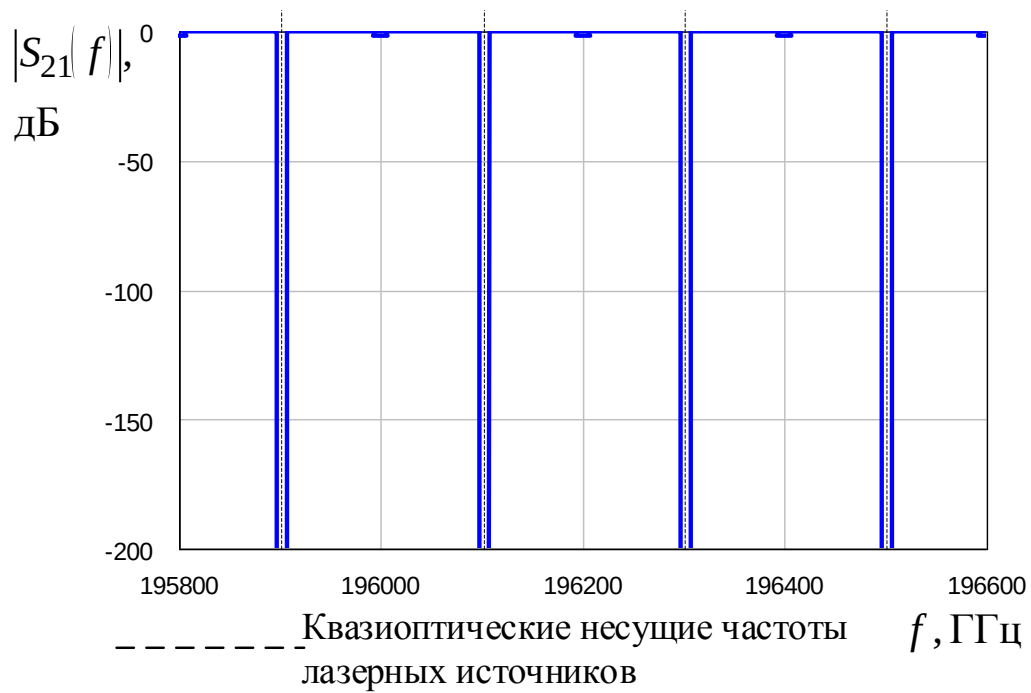


Рисунок 6.6 — Частотная зависимость модуля  $S_{21}$  схемы «Brag grating\_PhSh»

На рис. 6.7 показана зависимость аргумента коэффициента передачи РФФ по радиосигналу от вносимой фазы переменной задерживающей плоскости (VRP). На рис. 6.8 показана зависимость модуля коэффициента передачи РФФ по радиосигналу от вносимой фазы VRP.

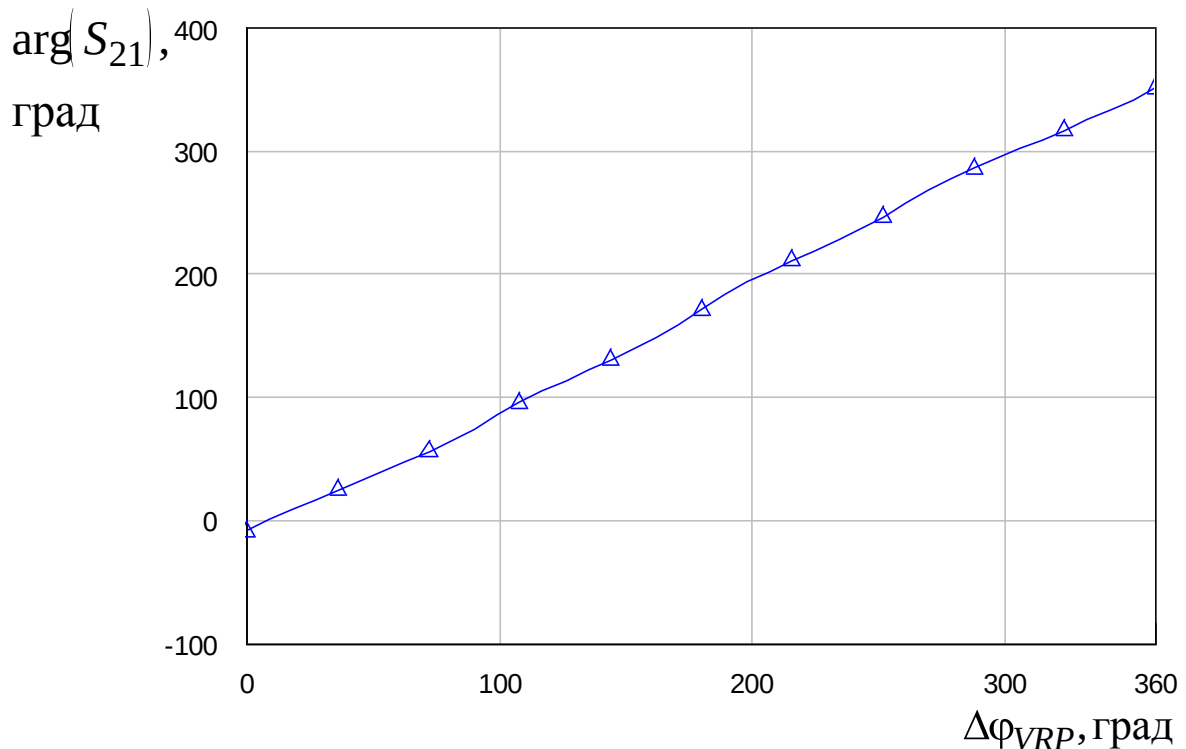


Рисунок 6.7 — Зависимость аргумента коэффициента передачи РФФ по радиосигналу от вносимой фазы переменной задерживающей плоскости (VRP)

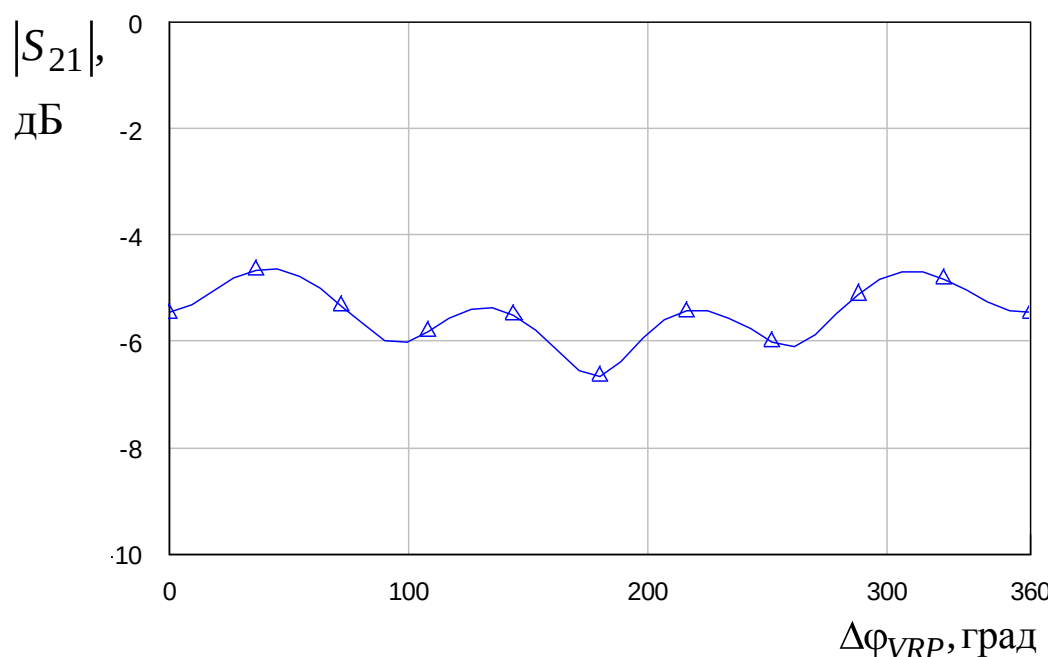


Рисунок 6.8 — Зависимость модуля коэффициента передачи РФФ по радиосигналу от вносимой фазы  $VRP$

Для формирования SSB-модулированного оптического сигнала использовалась классическая схема, показанная на рис. 6.9, реализованная на двух ЭОМ МЦ 1,2. Модулирующий СВЧ-сигнал подается равной мощности и в квадратуре на РЧ-входы двух одинаковых ЭОМ. На выходе ЭОМ МЦ 2 промоделированный оптический сигнал дополнительно смещается по фазе на  $90^\circ$ . Таким образом, на выходе схемы промоделированные оптические сигналы складываются по квадратуре относительно оптической несущей. Результатом интерференции этих сигналов является SSB-модулированный оптический сигнал.

Введем схему, показанную на рис. 6.9 в состав подсхемы SUBCKT «SB EOM». Если подать на оптический вход SB EOM квазиоптическую несущую с частотой 196100 ГГц, а на СВЧ-вход гармонический сигнал с частотой 10 ГГц, то в результате моделирования в AWR DE на выходе SB EOM будет получен спектр по мощности, показанный на рис. 6.10.

### 6.2.2. Описание принципов работы РФДОС

Исходные данные для моделирования РФДОС  $1 \times 8$  в САПР AWR DE следующие:

- частота входного радиосигнала 10 ГГц;
- мощность входного радиосигнала 0 дБм;
- частоты оптического излучения: 195900 ГГц, 196100 ГГц, 196300 ГГц, 196500 ГГц;
- ток накачки лазеров 10 мА;
- дискретное время задержки  $\tau=0,0084$  нс, что соответствует электрическому сдвигу фаз  $30^\circ$  на частоте радиосигнала 10 ГГц.

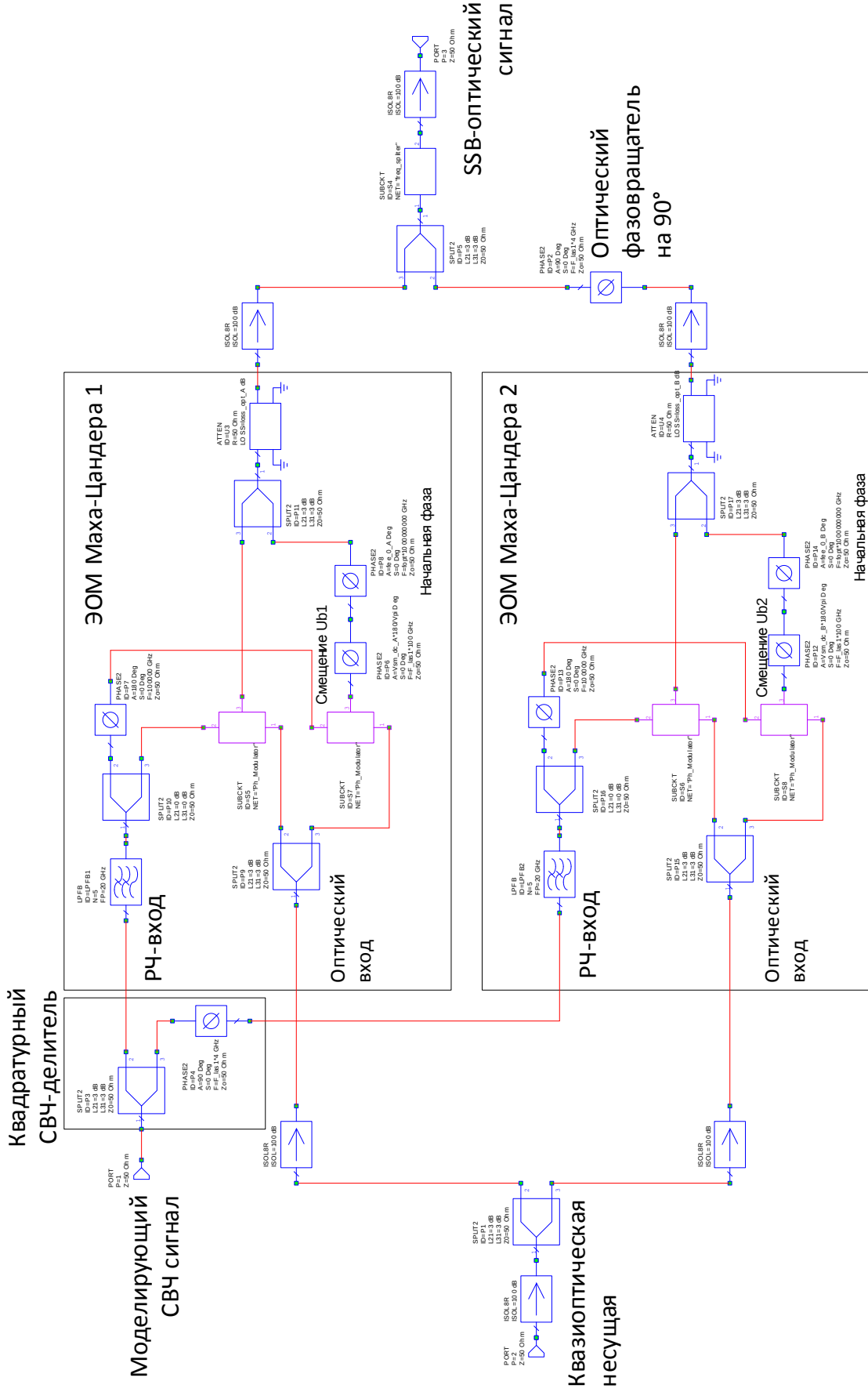


Рисунок 6.9 — Физическая эквивалентная электрическая схема внешнего ЭОМ для формирования SSB-модулированного оптического сигнала с применением двух одинаковых ЭОМ МЦ

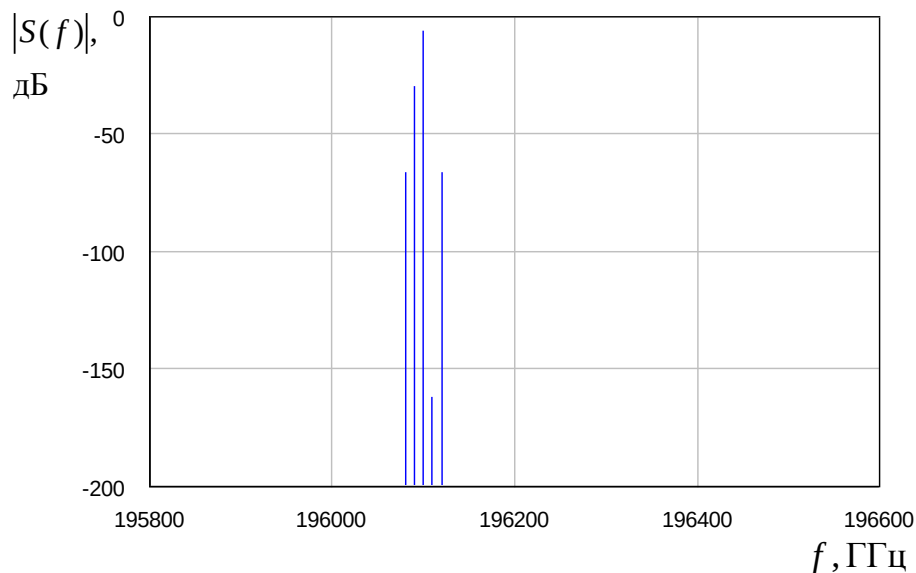


Рисунок 6.10 — Амплитудный спектр SSB-модулированного по интенсивности излучения лазера с частотой излучения 196100 ГГц, полученный на выходе эквивалентной схемы SB EOM в САПР AWR DE

Для формирования разных дискретов фазового сдвига между соседними выходами РФДОС, на оптический вход ДОС могут подаваться:

- излучение одного из четырех лазеров ( $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ ) — для формирования фазового сдвига, кратного  $\tau$ ;
- излучение двух лазеров из четырех ( $\lambda_1$  и  $\lambda_2, \lambda_2$  и  $\lambda_3, \lambda_3$  и  $\lambda_4$ ) — для формирования фазового сдвига, кратного  $\tau/2$ .

Сдвиги фаз РФФ:

- для ФВ2, ФВ4, ФВ6, ФВ8 —  $0^\circ$ ;
- для ФВ1, ФВ3, ФВ5, ФВ7 — сдвиг фаз, соответствующий временной задержке  $\tau/2$  на частоте 10 ГГц ( $15^\circ$ ) для случая применения одного входного лазера ( $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ ) и соответствующий временной задержке  $\tau/4$  на частоте 10 ГГц ( $7,5^\circ$ ) для случая применения двух входных лазеров ( $\lambda_1$  и  $\lambda_2, \lambda_2$  и  $\lambda_3, \lambda_3$  и  $\lambda_4$ ).

Пусть необходимо получить осевое излучения ФАР, т.е. все выходы РФДОС должны быть синфазными. Для этого на вход ДОУ подается оптический сигнал с длиной волны  $\lambda_1$ . Этот сигнал в анизопериодических решетках не получает никакого фазового сдвига. Фазовые сдвиги всех фазовращателей также устанавливаются на  $0^\circ$ . Тем самым получается, что на каждом выходе ДОУ сигналы будут синфазны.

Исходные дискреты фазовых сдвигов на выходах РФДОС формируются следующим образом.

В АРБ-1 время задержки по всем длинам волн равно нулю. Поэтому фазовый сдвиг второго выхода РФДОС формируется РФФ на величину  $\Delta\varphi_{\text{РФФ}}$ , равную  $\frac{1}{3}\Delta\varphi_{\text{АРБ-2}}$ . Величина  $\Delta\varphi_{\text{АРБ-2}}$  определяется для разных длин волн временем задержки  $t_1 = 0,5\tau$ . Например, для длины волны оптической несущей  $\lambda_2$  радиочастотный  $\Delta\varphi_{\text{АРБ-2}} = 30^\circ$ , для оптической длины волны  $\lambda_3$  —

$\Delta\varphi_{\text{АРБ-2}} = 60^\circ$ . При одновременной подаче на вход РФДОС двух оптических несущих, например  $\lambda_2$  и  $\lambda_3$ , радиочастотный  $\Delta\varphi_{\text{АРБ-2}} = 45^\circ$ .

Итоговые сдвиги фаз для выходов  $n = 1, 3, 5, 7$  формируются только в АБР, то есть РФФ для этих выходов настраивается на сдвиг фазы равный нулю. Для четных портов фазовый сдвиг  $\Delta\varphi_{\text{РФФ}} = \frac{1}{3}\Delta\varphi_{\text{АРБ-2}}$ .

На рис. 6.11 показаны результирующие фазовые сдвиги РЧ сигнала на различных выходах РФДОС ( $n = 1 — 8$ ) при активных сигналах различных лазеров на оптическом входе.

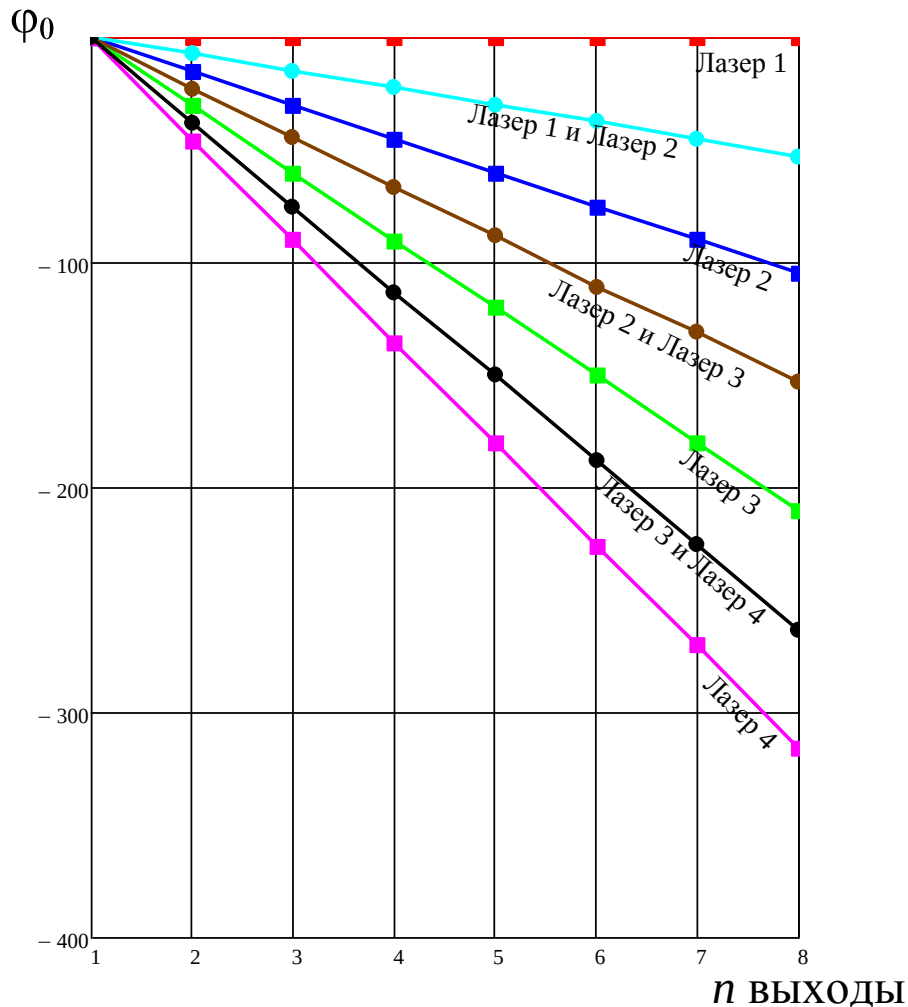


Рисунок 6.11 — результирующие фазовые сдвиги РЧ сигнала на различных выходах РФДОС при активных сигналах различных лазеров на оптическом входе

В САПР AWR DE разработана физическая эквивалентная электрическая схема РФДОС  $1 \times 8$ , представленная на рис. 6.12.

Для сокращения времени моделирования четыре тона с квазиоптическими частотами формировались на основании одного порта гармонического сигнала, гетеродина, умножителей частоты и линейных схем смесителей. Модель формирователя четырех тонов квазиоптических несущих в САПР AWR DE показана на рис. 6.13. В схеме РФДОС модуль формирования тонов введен в виде SUBCKT «Laser modul».

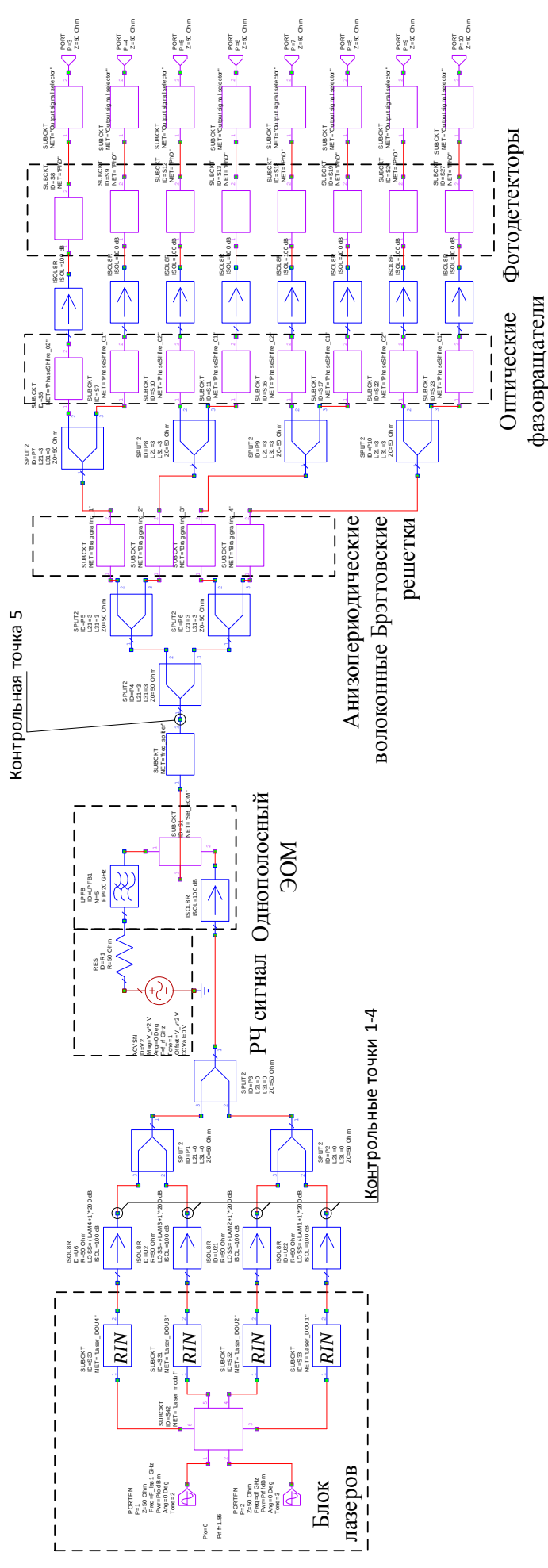


Рисунок 6.12 — Физическая эквивалентная электрическая схема передающего тракта РФ ДОС 1×8 в САПР AWR DE

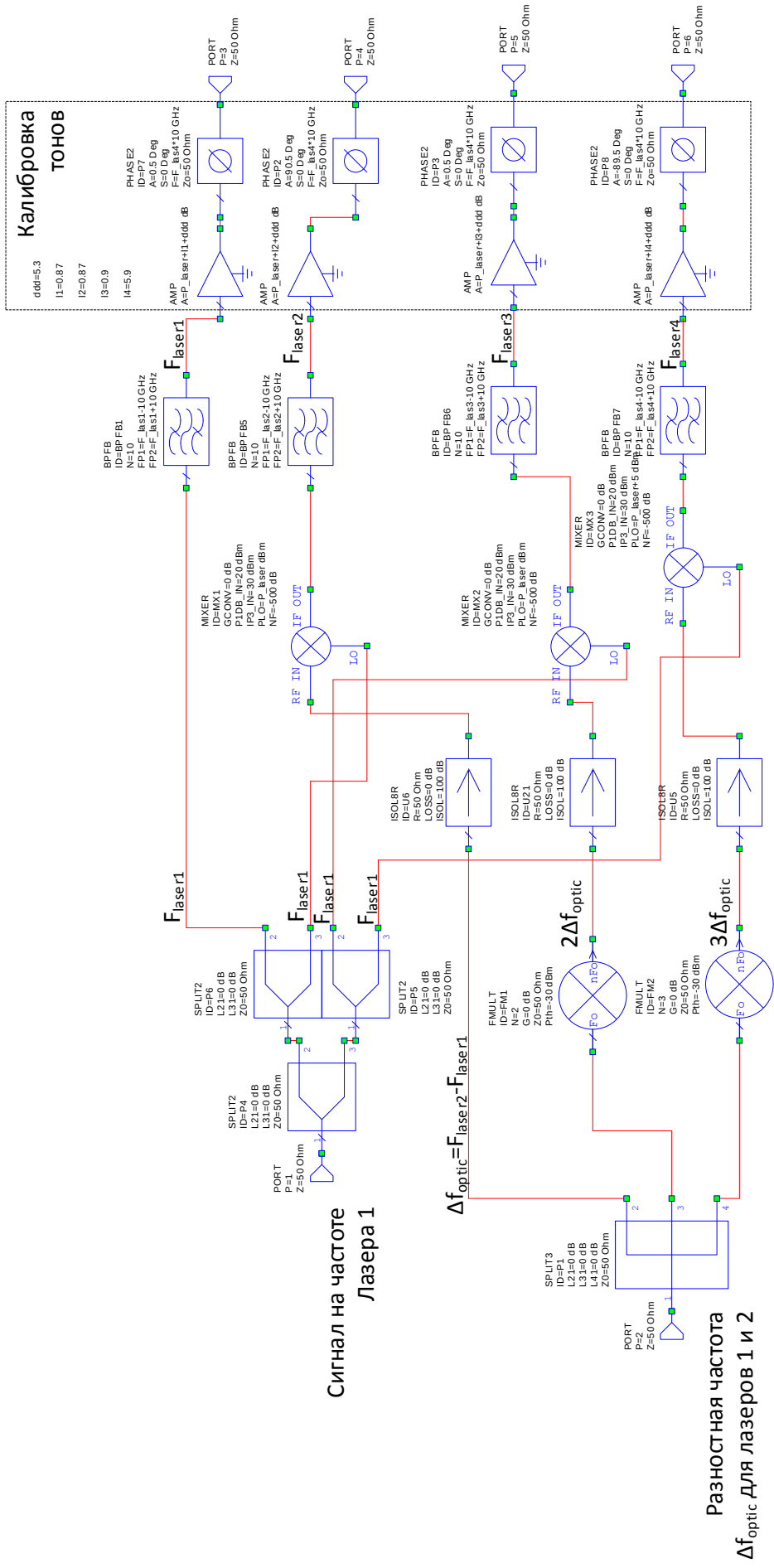


Рисунок 6.13 — Модель формирователя четырех тонов квазиоптических несущих в САПР AWR DE

Согласно схеме на РФДОС на рис. 6.12, модель модуля лазерных источников дополнена четырьмя подсхемами, моделирующими RIN лазеров на соответствующих квазиоптических несущих.

На выходах каждого из каналов РФДОС SSB-моделированный оптический сигнал детектируется на эквивалентной электрической схеме фотодетектора «PhD», на выходе которого установлена подсхема селекции радиосигнала «Output signal selector», которая представляет собой ФНЧ с частотой среза 100 ГГц.

В проекте РФДОС предусмотрена возможность построить диаграммы направленности множителя антенной решетки. Для этого в разделе дерева проекта «Output Equations» считываются значения амплитуд и фаз радиосигналов с выходных портов схемы РФДОС и записано выражение для диаграммы направленности множителя решетки изотропных излучателей, расположенных линейной с шагом, равным половине длины волны радиосигнала. Введена переменная «tet», определяющая направление на точку наблюдения при расчете ДН ФАР. Содержание раздела «Output Equations» в дереве проекта РФДОС ФАР показано на рис. 6.14.

```

fee_1 = DOU.$F_SPEC:Ang(Vcomp(PORT_3,1_0_0))    amp_1 = DOU.$F_SPEC:|Vcomp(PORT_3,1_0_0)|
fee_2 = DOU.$F_SPEC:Ang(Vcomp(PORT_4,1_0_0))    amp_2 = DOU.$F_SPEC:|Vcomp(PORT_4,1_0_0)|
fee_3 = DOU.$F_SPEC:Ang(Vcomp(PORT_5,1_0_0))    amp_3 = DOU.$F_SPEC:|Vcomp(PORT_5,1_0_0)|
fee_4 = DOU.$F_SPEC:Ang(Vcomp(PORT_6,1_0_0))    amp_4 = DOU.$F_SPEC:|Vcomp(PORT_6,1_0_0)|
fee_5 = DOU.$F_SPEC:Ang(Vcomp(PORT_7,1_0_0))    amp_5 = DOU.$F_SPEC:|Vcomp(PORT_7,1_0_0)|
fee_6 = DOU.$F_SPEC:Ang(Vcomp(PORT_8,1_0_0))    amp_6 = DOU.$F_SPEC:|Vcomp(PORT_8,1_0_0)|
fee_7 = DOU.$F_SPEC:Ang(Vcomp(PORT_9,1_0_0))    amp_7 = DOU.$F_SPEC:|Vcomp(PORT_9,1_0_0)|
fee_8 = DOU.$F_SPEC:Ang(Vcomp(PORT_10,1_0_0))   amp_8 = DOU.$F_SPEC:|Vcomp(PORT_10,1_0_0)|

fee_1_1=fee_1*180/_PI-fee_1*180/_PI              amp_sum=(amp_1+amp_2+amp_3+amp_4+amp_5+amp_6+amp_7+amp_8)
fee_2_1=fee_2*180/_PI-fee_1*180/_PI
fee_3_2=fee_3*180/_PI-fee_2*180/_PI              lam=3e8/(f_rf*1e9)
fee_4_3=fee_4*180/_PI-fee_3*180/_PI              d=d_array/lam    d: 0.2778
fee_5_4=fee_5*180/_PI-fee_4*180/_PI              fas_1=exp(j*(-fee_1+2*_PI*d*0*sin(tet)))
fee_6_5=fee_6*180/_PI-fee_5*180/_PI              fas_2=exp(j*(-fee_2+2*_PI*d*1*sin(tet)))
fee_7_6=fee_7*180/_PI-fee_6*180/_PI              fas_3=exp(j*(-fee_3+2*_PI*d*2*sin(tet)))
fee_8_7=fee_8*180/_PI-fee_7*180/_PI              fas_4=exp(j*(-fee_4+2*_PI*d*3*sin(tet)))
                                                  fas_5=exp(j*(-fee_5+2*_PI*d*4*sin(tet)))
                                                  fas_6=exp(j*(-fee_6+2*_PI*d*5*sin(tet)))
                                                  fas_7=exp(j*(-fee_7+2*_PI*d*6*sin(tet)))
                                                  fas_8=exp(j*(-fee_8+2*_PI*d*7*sin(tet)))

```

#### Идеальная ДН ФАР

$$DN\_base = 1/8 * \text{abs}(\sin(0.5 * 8 * (2 * \pi * d * \sin(tet) - fee\_2\_1 * \pi / 180))) / \sin(0.5 * (2 * \pi * d * \sin(tet) - fee\_2\_1 * \pi / 180))$$

#### ДН ФАР с учетом сигналов, сформированных в схеме РФДОС

$$DN = 1 / \text{amp\_sum} * \text{abs}(fas\_1 * \text{amp}_1 + fas\_2 * \text{amp}_2 + fas\_3 * \text{amp}_3 + fas\_4 * \text{amp}_4 + fas\_5 * \text{amp}_5 + fas\_6 * \text{amp}_6 + fas\_7 * \text{amp}_7 + fas\_8 * \text{amp}_8)$$

Рисунок 6.14 — Содержание раздела «Output Equations»  
в дереве проекта РФДОС ФАР

На рис. 6.15 представлен примеры расчета нормированных диаграмм направленности в САПР AWR DE для разработанной схемы РФДОС и заданных начальных условий проекта, полученные при одной из комбинаций используемых лазерных излучателей (Лазер 1 + Лазер 2).

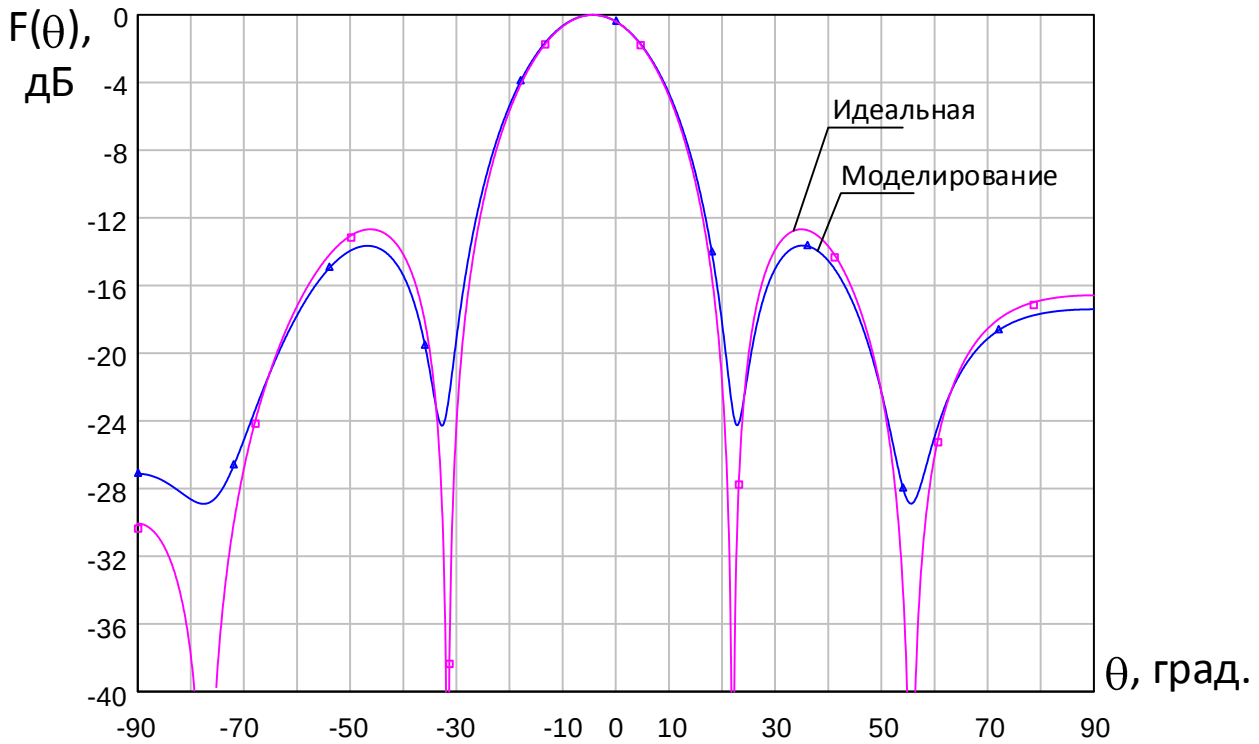


Рисунок 6.15 — Результаты расчета нормированных диаграмм направленности в САПР AWR DE для разработанной схемы РФДОС, полученные при одной из комбинаций используемых лазерных излучателей (Лазер 1 + Лазер 2)

### 6.3. Порядок выполнения работы

Исходные данные для моделирования физической эквивалентной электрической схемы радиопотонной диаграммообразующей схемы (РФДОС) фазированной антенной решеткой (ФАР) приведены в табл. 6.1.

Таблица 6.1 — Исходные данные для моделирования физической эквивалентной электрической схемы РФДОС

| N                               | 0      | 1      | 2      | 3      | 4      | 5   | 6    | 7   | 8   | 9    |
|---------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|-----|------|-----|-----|------|
| $F_{\text{laser1}}$ , ГГц       | 195100 | 195300 | 195500 | 195100 | 195300 |     |      |     |     |      |
| $\Delta f_{\text{optic}}$ , ГГц | 100    | 200    | 100    | 200    | 100    | 200 | 100  | 200 | 100 | 200  |
| $f_{\text{IN RF}}$ , ГГц        | 5      | 6      | 7      | 8      | 9      | 10  | 5    | 6   | 7   | 8    |
| $\tau$ , пс                     | 16,7   | 14     | 12     | 10,5   | 9,3    | 8,4 | 16,7 | 14  | 12  | 10,5 |

Примечание: N — последний номер зачетной книжки обучающегося;  $F_{\text{laser1}}$  — частота первого лазера (наименьшая из четырех);  $\Delta f_{\text{optic}}$  — шаг сетки частот лазерных излучателей в сторону увеличения частоты для больших номеров лазерных источников;  $f_{\text{IN RF}}$  — частота входного радиосигнала,  $\tau$  — дискрет времени задержки.

**Задание 1.** Собрать и отладить схему РФДОС.

В настройках «Project Options» задать одну рабочую частоту, равную  $f_{\text{IN RF}}$ .

В САПР AWR DE в разделе дерева проекта в разделе «Circuit Schematics» создать проект с названием «MWP\_BFN» (расшифровывается как: «Радиофотонная ДОС»).

В дерево проекта импортировать подсхемы и данные:

— в раздел «Global Definitions» импортировать файл «Global Definitions.ieq»;

— в раздел «Data Files» импортировать файлы:

– «Optical band.s2p» — селектор оптического диапазона;

– «freq\_splitter.s2p» — селектор радиодиапазона.

— в раздел «Circuit Schematics» импортировать файлы:

– «Phase\_shifter.sch» — модель фазосдвигающей ячейки ЭОМ МЦ;

– «Ph\_Modulator.sch» — модель фазового модулятора ЭОМ МЦ;

– «SB\_EOM.sch» — модель ЭОМ с выходным SSB-сигналом;

– «Laser\_modul.sch» — модуль формирователя четырёх гармонических квазиоптических несущих;

– «Laser\_DOU1.sch» — «Laser\_DOU4.sch» — модули RIN для четырёх квазиоптических тонов;

– «Brag\_grating\_1.sch» — «Brag\_grating\_4.sch» — модели АБР1 — АБР-4;

– «Brag\_grating\_PhSh.sch» — модель ВБР радиофотонного фазовращателя;

– «Phase\_shifter\_01.sch», «Phase\_shifter\_01.sch» — модели радиофотонного фазовращателя для формирования радиочастотного фазового сдвига «Phase\_1» и «Phase\_2», соответственно;

– «Output signal selector.sch» — селектор выходного радиочастотного сигнала.

В разделе «Global Definitions» предусмотрены настройки параметров:

— лазеров;

— выбор активных лазеров;

— ЭОМ МЦ;

— Брэгговских решеток;

— Эрбиевого волоконного усилителя;

— РФФ;

— параметры расчета ДН ФАР.

Выполнить калибровку модуля «Laser modul» (рис. 6.13).

Для этого в «Global Definitions» установить активными все лазеры Лазер 1

— Лазер 4.

Проанализировать сигналы в контрольных точках 1 — 4, показанных на рис. 6.12. Для этого в контрольные точки добавить контрольно-измерительные зонды «M-BROBE» VP1 — VP4. Создать один график «Laser modul analiz», на который добавить измерения амплитудного и фазового спектра сигнала по

напряжению на зондах VP1 — VP4 по примеру, показанному на рис. 6.16, где показана настройка измерения амплитудного спектра на зонде VP3. Для измерения фазового спектра следует снять галочку с «dB» и выбрать «Angle».

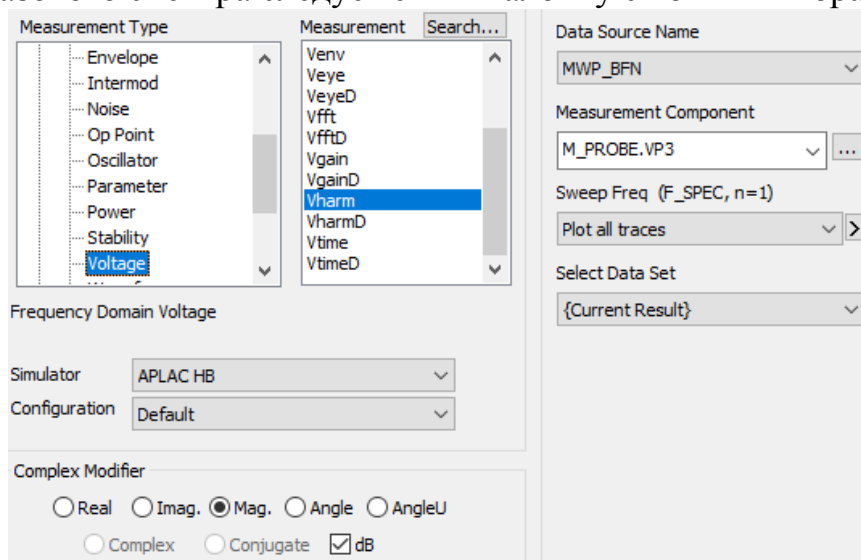


Рисунок 6.16 — Настройка измерения амплитудного спектра на зонде VP3

Пример результатов корректной настройки работы модуля «Laser modul» показан на рис. 6.17

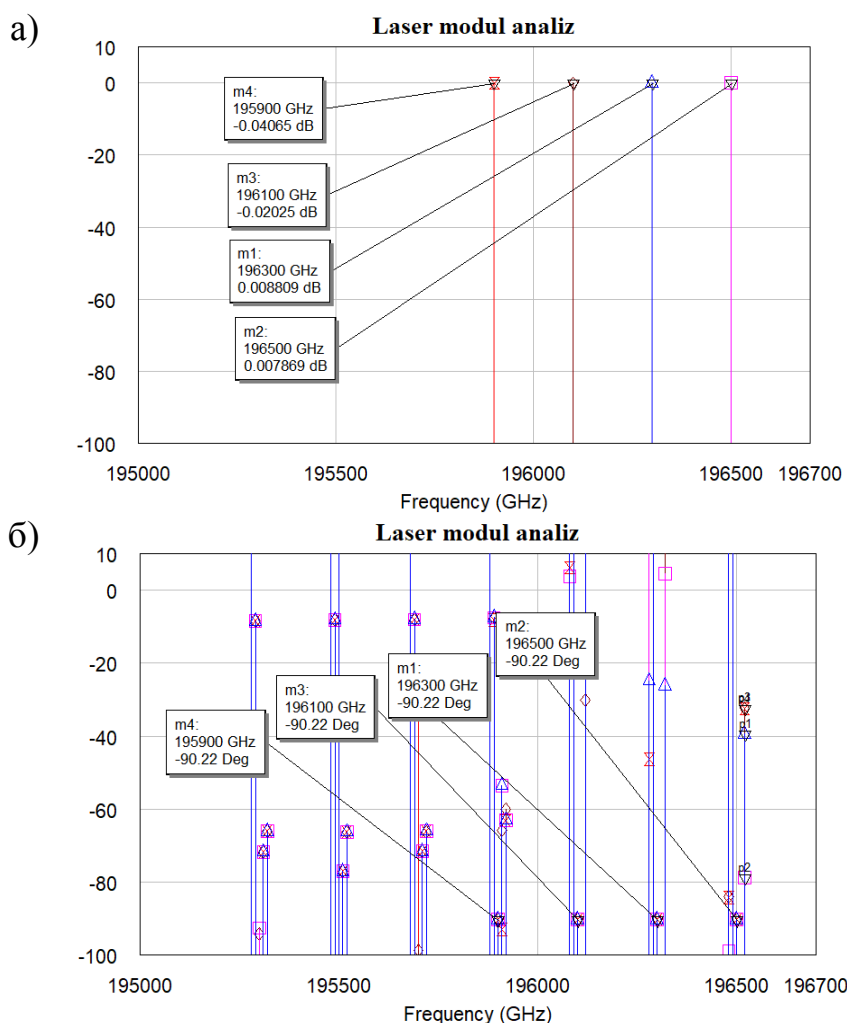


Рисунок 6.17 — Измерения спектров на зондах VP1 — VP4

Как видно из рис. 6.17 на графике следует настроить частоты в области квазиоптических несущих. В случае существенных отличий модулей или фаз формируемых тонов, следует внутри подсхемы «Laser modul» (рис. 6.13) настроить коэффициенты усиления и фазы компонентов в цепи калибровки выходных каналов схемы «Laser modul».

Проанализировать нормальную работу модуля «SB\_EOM». Для этого в «Global Definitions» установить активными только Лазер 1. В контрольной точке 5, показанной на рис. 6.12, установить зонд VP5. Построить график амплитудного спектра по мощности, настроив частотную область графика вблизи квазиоптической несущей. Убедится, что на выходе формируется спектр, похожий на тот, что представлен на рис. 6.10.

**Задание 2.** Проанализировать сигналы на выходных портах разработанной схемы РФДОС для случаев:

- активен Лазер 1;
- активен Лазер 2;
- активен Лазер 3;
- активен Лазер 4;
- активны Лазер 1 и Лазер 2;
- активны Лазер 2 и Лазер 3.

Настроить таблицу амплитуд выходных сигналов РФДОС. Для этого добавить новый график и выбрать тип графика «Tabular» (таблица). Назвать график «Amp of outs». В добавленном графике «Amp of outs» для каждого из выходных портов (Порт 3 — Порт 10) настроить тип измерений, как показано на рис. 6.16.

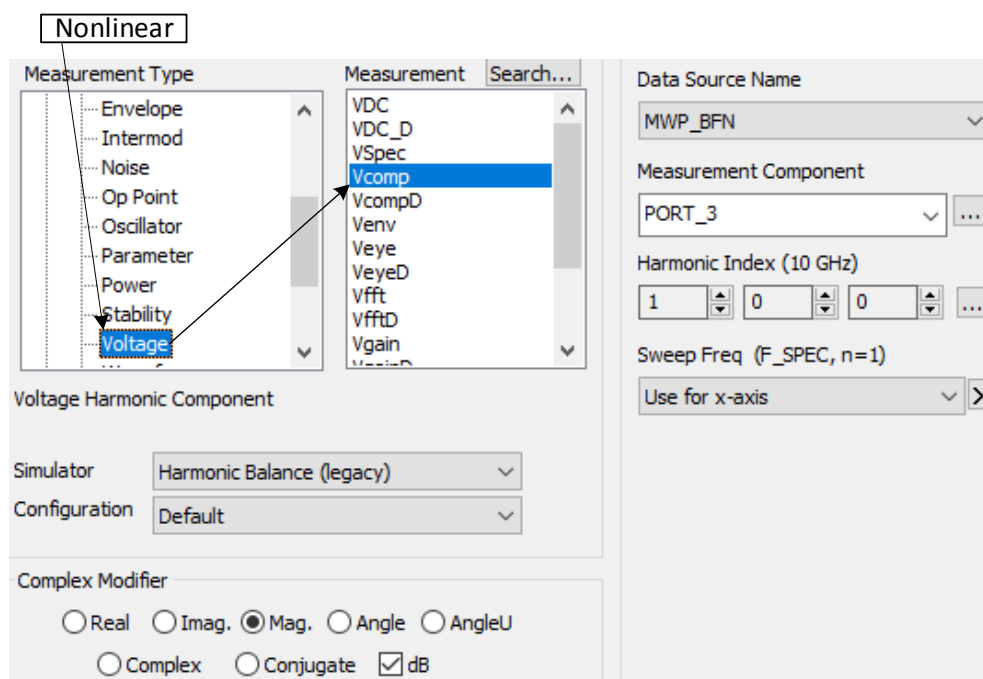


Рисунок 6.16 — Настройка измерений амплитуды сигнала по основному тону на выходном порте (Порт 3)

Настроить таблицу начальных фаз выходных сигналов РФДОС. Для этого добавить новый график и выбрать тип графика «Tabular». Назвать график «Phs

of outs». В добавленном графите «Phs of outs» для каждого из выходных портов (Порт 3 — Порт 10) настроить тип измерений, как показано на рис. 6.17.

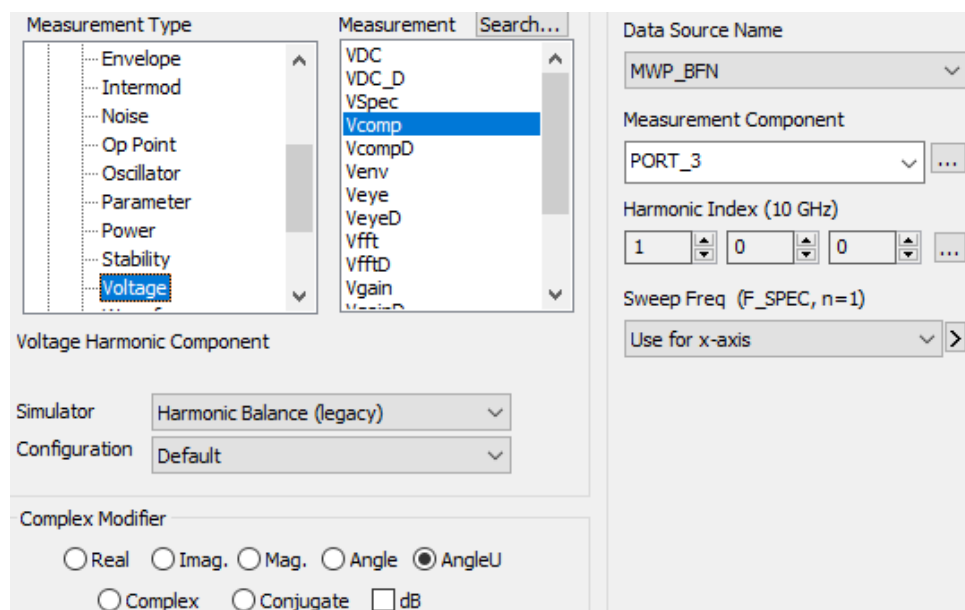


Рисунок 6.17 — Настройка измерений начальной фазы сигнала по основному тону на выходном порте (Порт 3)

Проанализировать полученные таблицы по критериям:

- неравномерность амплитуд сигналов основного СВЧ тона на выходных портах не должна превышать 1—2 дБ;
- фазы сигналов основного СВЧ тона на выходных портах должна нарастать линейно с незначительным отклонением от постоянной разности фаз для соседних выходных портов.

Задание 3. Построить диаграммы направленности ФАР для случаев:

- активен Лазер 1;
- активен Лазер 2;
- активны Лазер 1 и Лазер 2.
- активен Лазер 3;
- активны Лазер 2 и Лазер 3.
- активен Лазер 4;
- активны Лазер 3 и Лазер 4.

Для этого следует заполнить раздел «Output Equations» аналогично тому, как показано на рис. 6.14.

Для записи значений переменных fee\_1 — fee\_8 и amp\_1 — amp\_8 следует:

- создать новый раздел «Output Equations»;

— находясь внутри раздела «Output Equations», нажать на кнопку  (Output Equations) и использовать настройки измерений, показанные на рис. 6.18 для настройки измерений амплитуды и фазы выходного сигнала на Порте 3;

— аналогичным образом настроить все измерения fee\_1 — fee\_8 и amp\_1 — amp\_8.

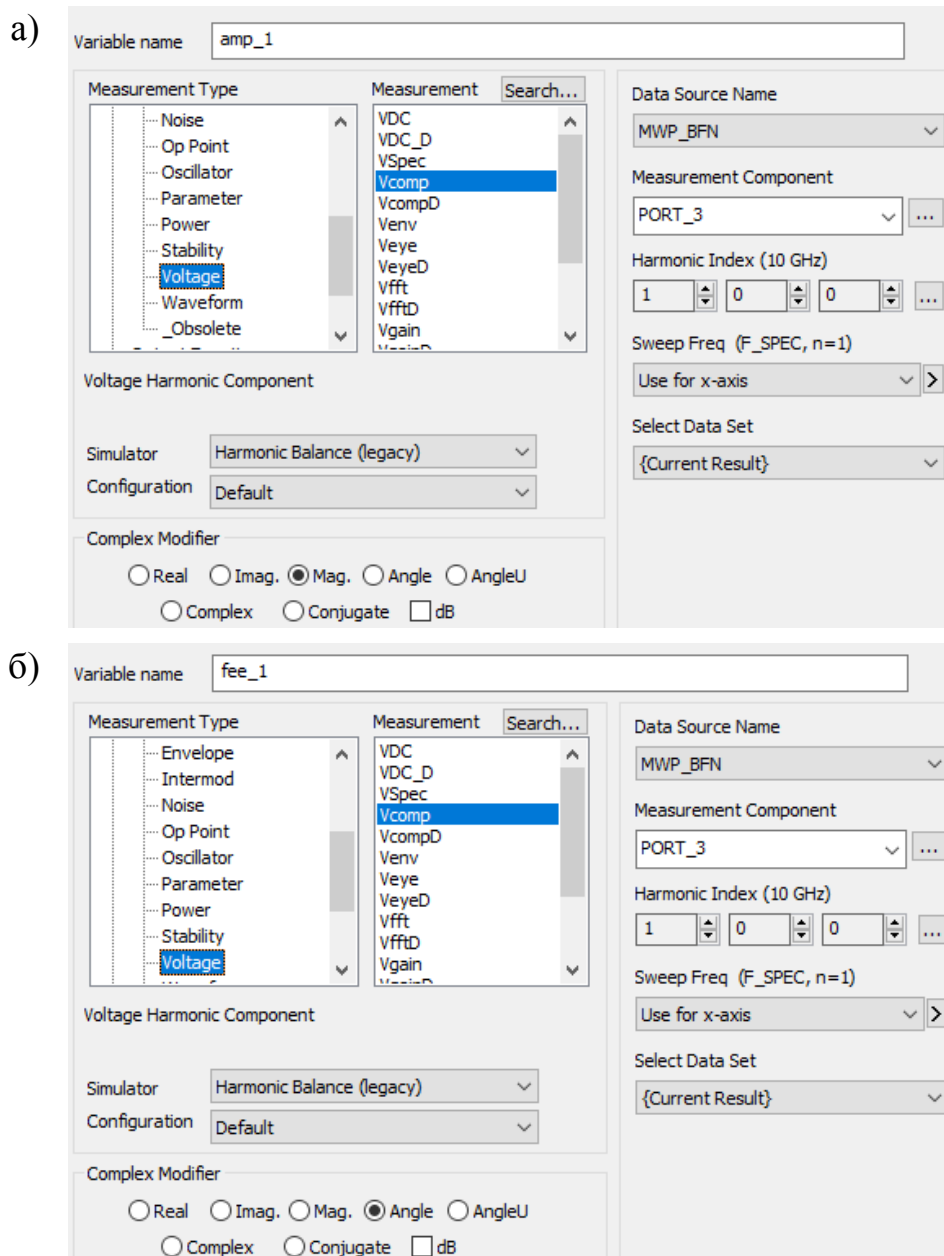


Рисунок 6.18 — Настройки измерений амплитуды (а) и фазы (б) выходного сигнала на Порте 3

После заполнения страницы раздела «Output Equations» перейти к построению графиков диаграмм направленности ФАР.

Для этого создать новый график с названием «DN».

В графике добавить расчетов по записанным математическим выражениям для реальной и идеальной диаграмм направленностей ФАР, как показано на рис. 6.19.

Результаты расчетов должны быть аналогичны показанным на рис. 6.15.

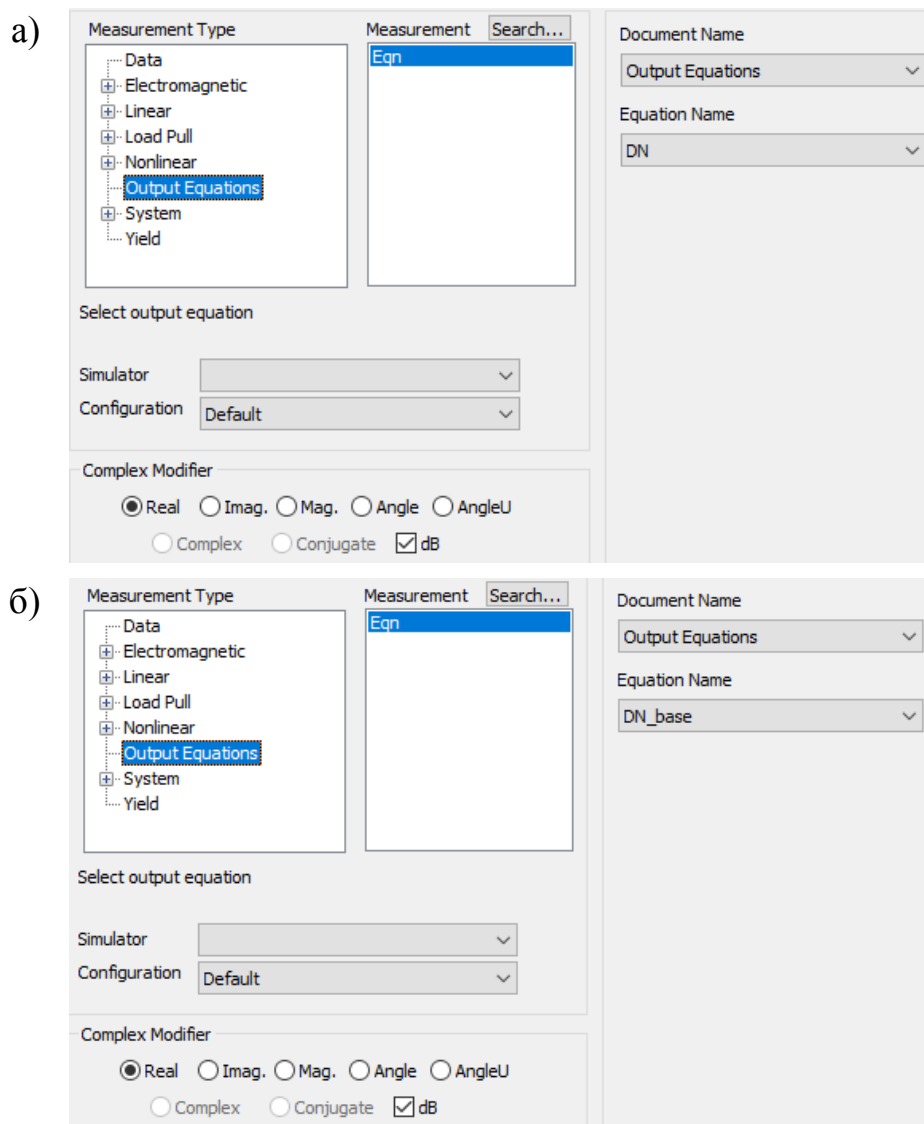


Рисунок 6.19 — Графики настройки расчетов по записанным математическим выражениям для реальной (а) и идеальной (б) диаграмм направленностей ФАР

**Задание 4.** Оформить результаты выполненных заданий 1 — 3 в виде отчета со схемами, графиками, их анализом и выводами по каждому заданию.

#### 6.4. Вопросы для подготовки к защите работы

а) Поясните принцип работы РФДОС по рассмотренной в работе функциональной схеме (рис. 6.1).

б) Поясните особенности реализации эквивалентной электрической схемы анизопериодической брэгговской решетки.

в) Поясните принцип действия рассмотренной в работе функциональной схемы радиопотонного фазовращателя (рис. 6.3).

г) Опишите функциональную эквивалентную электрическую схему РФФ, реализованную в САПР AWR DE.

д) Опишите эквивалентную схему волоконной брэгговской решетки, предназначенную для размещения в модели скоростного плеча РМ-FBG.

е) Проанализируйте полученные частотную зависимость модуля коэффициента передачи схемы «Brag grating\_PhSh».

ж) Опишите физическую эквивалентную электрическую схему внешнего ЭОМ для формирования SSB-модулированного оптического сигнала с применением двух одинаковых ЭОМ МЦ.

з) Проанализируйте спектр сигнала на выходе однополосного ЭОМ в контрольной точке 5 для случая одного активного Лазера 1, затем — Лазера 2.

и) Проанализируйте спектр сигнала на выходе однополосного ЭОМ в контрольной точке 5 для случая одного активного Лазера 3, затем — Лазера 4.

к) Проанализируйте спектр сигнала на выходе однополосного ЭОМ в контрольной точке 5 для случая двух активных Лазер 1 и Лазера 2.

л) Проанализируйте спектр сигнала на выходе однополосного ЭОМ в контрольной точке 5 для случая двух активных Лазер 2 и Лазера 3.

м) Поясните принцип формирования различных вариантов линейных распределений фаз сигналов на выходных портах рассматриваемой схемы РФДОС.

н) Опишите физическую эквивалентную электрическую схему передающего тракта РФДОС  $1 \times 8$ , реализованную в САПР AWR DE.

о) Опишите структуру и назначение подсхемы блока лазеров.

п) Для чего в «Блоке лазеров» на выходных портах включены дополнительные пассивные подсхемы-четырёхполюсники?

р) Проанализируйте качество выполненной калибровки «Блока лазеров» по сигналам в контрольных точках 1 — 4 на схеме РФДОС.

с) Поясните, каким образом в САПР AWR DE с помощью средств вкладки «Output Equations» можно смоделировать диаграммы направленности фазированной антенной решетки.

т) Проанализировать и сравнить таблицы «Amp of outs» для случая активных одного из Лазер 1 — Лазер 2.

у) Проанализировать и сравнить таблицы «Amp of outs» для случая двух вариантов активных Лазер 1 + Лазер 2 и Лазер 2 + Лазер 3.

ф) Проанализировать и сравнить таблицы «Phs of outs» для случая активных одного из Лазер 1 — Лазер 2.

х) Проанализировать и сравнить таблицы «Phs of outs» для случая двух вариантов активных Лазер 1 + Лазер 2 и Лазер 2 + Лазер 3.

ц) Проанализировать результаты расчета диаграмм направленностей ФАР для случая одного активного Лазер 1 — Лазер 3.

ч) Проанализировать результаты расчета диаграмм направленностей ФАР для случая одного активного Лазер 2 — Лазер 4.

ш) Проанализировать результаты расчета диаграмм направленностей ФАР для случая комбинаций активных лазеров: Лазер 1, Лазер 1 + Лазер 2, Лазер 2.

щ) Проанализировать результаты расчета диаграмм направленностей ФАР для случая комбинаций активных лазеров: Лазер 2, Лазер 2 + Лазер 3, Лазер 4.

ы) Проанализировать результаты расчета диаграмм направленностей ФАР для случая комбинаций активных лазеров: Лазер 2 + Лазер 3, Лазер 3, Лазер 3 + Лазер 4.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Урик В. Д., МакКинни Д. Д., Вилльямс К. Д. Основы микроволновой фотоники / Пер. с англ. под ред //СФ Боева, АС Сигова. М.: Техносфера. – 2016. – 377 с.
2. Belkin M. E. et al. Modeling and Simulation in Microwave-Photonics Applications //Modeling and Simulation in Engineering-Selected Problems. – IntechOpen, 2020 [Электронный ресурс] / IntechOpen. — Режим доступа: <https://www.intechopen.com/chapters/71601> (Дата обращения: 21.10.2024).
3. Belkin M. E. et al. Computer-aided design of microwave-photonics-based RF circuits and systems //RF Systems, Circuits and Components. – 2018 [Электронный ресурс] / IntechOpen. — Режим доступа: <https://www.intechopen.com/chapters/62220> (Дата обращения: 21.10.2024).
4. Учебно-методическое пособие по оформлению текстовых работ преподавателей и обучающихся всех форм обучения по всем направлениям и специальностям кафедры «Радиоэлектроника и телекоммуникации» [Электронный ресурс] / СевГУ; сост. В.Г. Слёзкин. — Севастополь : Изд-во СевГУ, 2020. — 26 с. — Режим доступа: Сервер методических указаний кафедры РТ.
5. Erwin H. W. Chan. Photonic RF Phase Shifter Based on Optical Carrier and RF Modulation Sidebands Amplitude and Phase Control/ Erwin H. W. Chan, WeiWei Zhang, Robert A. Minasian // Journal Of Lightwave Technology. — 2012. — Vol. 30. — № 21. — pp. 3672 — 3678.
6. Weilin Liu. An Ultra-Wideband Microwave Photonic Phase Shifter With a Full 360° Phase Tunable Range /Weilin Liu, Wangzhe Li, Jianping Yao // IEEE Photonics Technology Letters. — 2013. — Vol. 25. — № 12. — pp. 1107 — 1110.
7. Учебное пособие «Сигналы и процессы в радиотехнике, часть 2» для студентов направления 6.050901 — «Радиотехника» / СевНТУ; сост. Ю.Б. Гимпилевич — Севастополь: СевНТУ, 2013. — 149 с.
8. Yao X. S., Chang W. S. C. Opto-electronic oscillators. – Cambridge University Press, 2002. – С. 255-292.
9. Maleki L. Recent progress in opto-electronic oscillator // 2005 International Topical Meeting on Microwave Photonics. – IEEE, 2005. – С. 81-84.
10. Belkin M. E. et al. Performances of microwave-band analog signal transmission using wafer-fused long wavelength VCSELs //IEEE Photonics Technology Letters. – 2011. – Т. 23. – №. 20. – С. 1463-1465.
11. Constant S. B. et al. Low-cost all-optical up-conversion of digital radio signals using a directly modulated 1550-nm emitting VCSEL //IEEE Photonics Technology Letters. – 2008. – Т. 20. – №. 2. – С. 120-122.
12. Lindsay A. C., Knight G. A., Winnall S. T. Photonic mixers for wide bandwidth RF receiver applications //IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 1995. – Т. 43. – №. 9. – С. 2311-2317.
13. Yao J. Microwave photonics //Journal of lightwave technology. – 2009. – Т. 27. – №. 3. – С. 314-335.

14. Malyshev S. A., Chizh A. L. PIN photodiodes for frequency mixing in radio-over-fiber systems //Journal of Lightwave Technology. – 2007. – Т. 25. – №. 11. – С. 3236–3243.
15. Kapon E., Sirbu A. Power-efficient answer //Nature Photonics. – 2009. – Т. 3. – №. 1. – С. 27–29.
16. Waterhouse R., Novack D. Realizing 5G: Microwave photonics for 5G mobile wireless systems //IEEE Microwave Magazine. – 2015. – Т. 16. – №. 8. – С. 84-92.
17. Pan S., Zhang Y. Microwave photonic radars //Journal of Lightwave technology. – 2020. – Т. 38. – №. 19. – С. 5450–5484.
18. Ghelfi P. et al. Photonics for ultrawideband RF spectral analysis in electronic warfare applications //IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. – 2019. – Т. 25. – №. 4. – С. 1–9.
19. Pan S., Yao J. Photonics-based broadband microwave measurement //Journal of Lightwave Technology. – 2016. – Т. 35. – №. 16. – С. 3498-3513.
20. Белкин М. Е., Кудж С. А., Сигов А. С. Новые принципы построения радиоэлектронной аппаратуры СВЧ-диапазона с использованием радиофотонной технологии //Russian Technological Journal. – 2016. – Т. 4. – №. 1. – С. 4–20.

**ПРИЛОЖЕНИЕ А****ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ ТИТУЛЬНОГО ЛИСТА ОТЧЁТА  
ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ**

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»  
Институт радиоэлектроники и интеллектуальных технических систем  
Кафедра «Радиоэлектроника и телекоммуникации»

**ОТЧЁТ ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ № 1**  
**«Сверхширокополосный радиофотонный СВЧ-фазовращатель»**  
**по дисциплине «Радиофотоника в системах 5G»**

Выполнил студент \_\_\_\_\_  
фамилия и инициалы

Группа \_\_\_\_\_

Отчёт защищён с оценкой \_\_\_\_\_

Преподаватель \_\_\_\_\_

Севастополь  
202\_

Учебное издание

**РАДИОФОТОНИКА  
В СИСТЕМАХ 5G**

*Учебно-методическое пособие*

*Составители:* **Головин** Владислав Викторович,  
**Тыщук** Юрий Николаевич

В авторской редакции

Изд. № 166/2024. Объем 5,5 п.л. Усл. печ. л. 5,11. Уч.-изд. л. 5,39.  
Издательский центр ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»