

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

Томский Государственный Университет Систем Управления и  
Радиоэлектроники (ТУСУР)

Кафедра Телекоммуникаций и основ радиотехники (ТОР)

**В.Д. Дмитриев**

**Лабораторная работа №2**

**«СВЧ делители мощности»**

по дисциплине «Автоматизированное проектирование СВЧ устройств»  
для студентов, обучающихся по направлению подготовки магистратура

11.04.01-«Радиотехника»

11.04.02-«Инфокоммуникационные технологии и системы связи»

Томск

2019

**Оглавление**

Введение.....	3
1. Классификация СВЧ делителей мощности.....	3
2. Расчет некоторых видов делителей мощности.....	6
3. Пример математического и автоматизированного расчета.....	10
4. Варианты задания.....	17

## Введение

В схемах СВЧ часто требуется обеспечить деление мощности для разветвления тракта или сложение мощностей от нескольких источников. Как правило, для этих целей применяют пассивные взаимные устройства, имеющие довольно простую конструкцию, которые в силу принципа взаимности могут использоваться как в качестве делителей, так и сумматоров мощности СВЧ. Делители-сумматоры необходимы для построения балансных смесителей и усилителей, разделителей частотных каналов (мультиплексоров и демультиплексоров), мощных передатчиков, схем возбуждения многоэлементных антенн, измерительных трактов. Они также широко используются в усилителях мощности, в антенных модемах, смесителях и системах на основе интегральных схем. Соединения на его основе часто используются в беспроводных устройствах для разделения мощности и в калибровочных лабораториях. Широкое использование делителя мощности обусловлено простотой его конструкции и реализации.

Цель лабораторной работы научиться проектировать делители мощности в системе автоматизированного проектирования ADS.

### 1. Классификация СВЧ делителей мощности

Идеальным называется делитель мощности, реализуемый во взаимном симметричном шестиполоснике без потерь, согласованном по всем входам. Это означает, что мощность сигнала, поданного в одно из плеч при условии, что все плечи нагружены на согласованные нагрузки, распределяется между двумя выходными плечами. В силу принципа взаимности делитель мощности также может выполнять функцию сложения мощностей от нескольких источников. Важнейшей характеристикой делителей-сумматоров является коэффициент деления  $m$  – безразмерная величина, определяемая отношением мощностей в выходных плечах делителя, при условии, что все плечи

нагружены на согласованные нагрузки. Коэффициент деления обычно представляется в виде отношения целых чисел и применительно к двухканальному делителю записывается следующим образом:  $m = 1:1, 2:1, 3:1$  и т. д. Делитель с коэффициентом деления  $m = 1:1$  обеспечивает равное деление мощности между выходами. Если в устройстве отсутствуют потери, то мощность в каждом выходном плече равна половине входной мощности, что соответствует вносимому затуханию 3 дБ. Такой делитель называется трехдецибелльным делителем, или гибридным соединением. Мостовым устройством (мостом) называется гибридное соединение, у которого волны напряжений в выходных плечах равны по величине и имеют постоянный фазовый сдвиг в рабочей полосе частот. Двухканальные делители мощности – наиболее широко применяемый класс делителей мощности. В простейшем случае, когда мощность входного сигнала делится между двумя каналами (рисунок 1), такой элементарный делитель функционально является шестиполюсником. Простейший двухканальный делитель представляет собой разветвление (сочленение) линий передачи и не работает в качестве сумматора. Другой разновидностью двухканального делителя мощности является согласованный шестиполюсный делитель-сумматор мощности конструкции Уилкинсона. Использование двухканальных делителей с различным коэффициентом деления теоретически позволяет реализовать любой закон распределения мощности в выходных плечах системы с произвольным числом плеч.

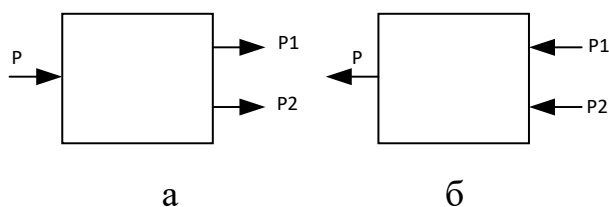


Рисунок 1. – Двухканальные делители мощности (а) и сумматор мощности(б)

Направленный ответвитель также выполняет функции двухканального делителя-сумматора мощности. Вследствие взаимности направленного ответвителя сигналы, поступившие на два входа, складываются без отражений и без потерь и поступают в одно из оставшихся плеч, так что мощность выходного сигнала равна сумме мощностей входных сигналов. При этом выполняются определенные амплитудные и фазовые соотношения для суммируемых сигналов, которые определяются конструкцией направленного ответвителя. Многоканальные делители мощности известны как самостоятельные конструкции, но также могут быть выполнены в виде соединения нескольких двухканальных делителей мощности.

## 2. Расчёт некоторых видов делителей мощности.

Микрополосковые делители мощности с равным делением на основе моста Уилкинсона представлены на рисунках 2 и 3.

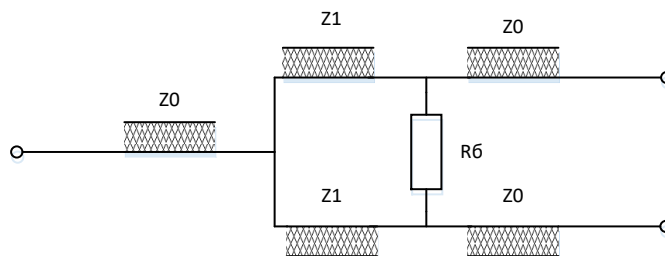


Рисунок 2. – Делитель мощности с равным делением на основе моста Уилкинсона

Волновые сопротивления микрополосковых линий рассчитываются следующим образом:

$$Z_0 = \rho \text{ Ом}; \quad (1)$$

$$Z_1 = \sqrt{2} \cdot \rho \text{ Ом}; \quad (2)$$

Балластное сопротивление:

$$R_B = 100 \text{ Ом}$$

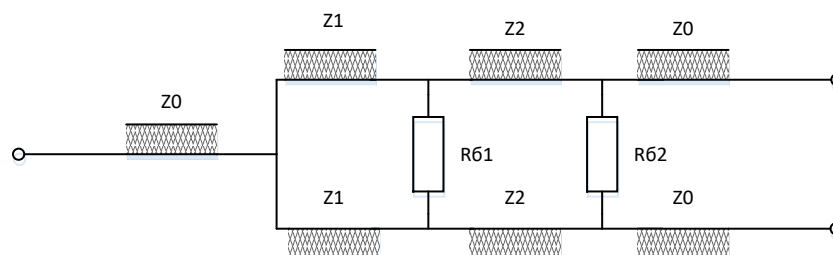


Рисунок 3. – Широкополосный делитель мощности с равным делением на основе моста Уилкинсона

Микрополосковый делитель мощности с неравным делением на основе моста Уилкинсона представлен на рисунках 4.

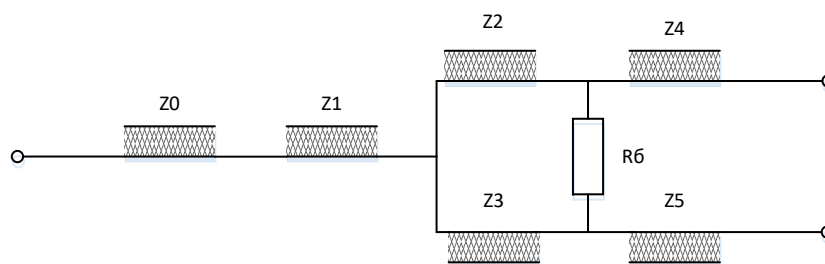


Рисунок 4. – Делитель мощности с неравным делением на основе моста

Уилкинсона

Расчёты волнового сопротивления линий и балластного представлены ниже.

$$n^2 = \frac{P_2}{P_1}; \quad (3)$$

$$R_B = Z_0 \frac{1+n^2}{2} \text{ Ом}; \quad (4)$$

$$Z_1 = \sqrt[4]{\frac{n}{1+n^2}} \text{ Ом}; \quad (5)$$

$$Z_2 = \sqrt[4]{n^3(1+n^2)} \text{ Ом}; \quad (6)$$

$$Z_3 = \sqrt[4]{\frac{1+n^2}{n^5}} \text{ Ом}; \quad (7)$$

$$Z_4 = Z_0 \cdot \sqrt{n} \text{ Ом}; \quad (8)$$

$$Z_5 = \frac{Z_0}{\sqrt{n}} \text{ Ом}; \quad (9)$$

Делитель мощности на основе прямоугольной гибридной мостовой схемы (НО) представлен на рисунке 5.

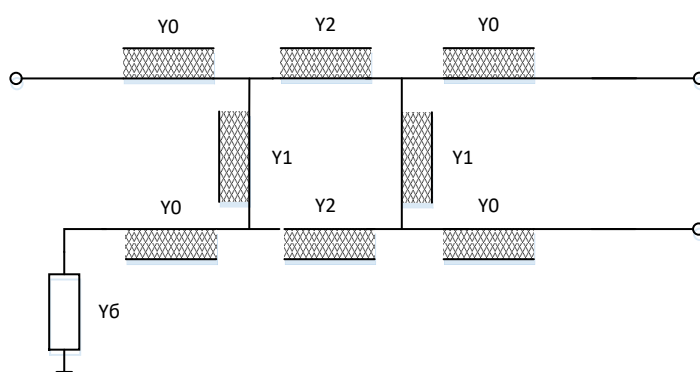


Рисунок 5. – Делитель мощности на основе прямоугольной гибридной мостовой схемы (НО)

Расчёты проводимости линий представлены ниже.

$$m = \frac{P_2}{P_1}; \quad (10)$$

$$Y_1 = Y_0 / \sqrt{m}; \quad (11)$$

$$Y_2 = Y_0 \cdot \sqrt{\frac{m+1}{m}}; \quad (12)$$

Частный случай  $m=1$ ,  $Y_1 = Y_0$ :

$$Y_2 = Y_0 \sqrt{2} = 1,41 \cdot 0,02 = 35 \text{ Ом}$$

$$Y_0 = \frac{1}{50} = 0,02$$

На рисунке 6 изображен упрощенный модель подложки.

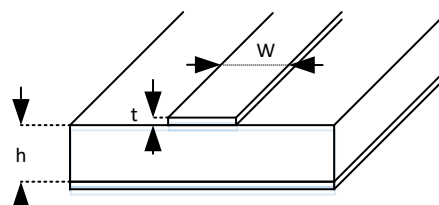


Рисунок 6. – Упрощенная модель подложки



Из уравнения волнового сопротивления выражается ширина отрезка микрополосковой линии.

$$Z_B = \frac{75}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \left( 6 * \frac{h}{0.75 * W + t} + 0.075 * \frac{W}{h} \right); \quad (13)$$

$$L = \frac{2\pi Z_B l}{\omega \lambda}, \text{ отрезок МПЛ } (1 < \frac{\lambda}{8}); \quad (14)$$

Выражение для волнового сопротивления короткозамкнутой линии:

$$Z_{\text{ВХКЗ}} = jZ_B \operatorname{tg}\left(\frac{2\pi l}{\lambda}\right), (1 < \frac{\lambda}{4}); \quad (15)$$

$$Z_{\text{ВХКЗ}} \approx jZ_B \left(\frac{2\pi l}{\lambda}\right), (1 < \frac{\lambda}{4}); \quad (16)$$

Выражение для волнового сопротивления холостой линии:

$$Z_{\text{ВХХХ}} = -\frac{jZ_B}{\operatorname{tg}\left(\frac{2\pi l}{\lambda}\right)}, (1 < \frac{\lambda}{4}); \quad (17)$$

$$Z_{\text{ВХХХ}} \approx -\frac{jZ_B}{\left(\frac{2\pi l}{\lambda}\right)}, (1 < \frac{\lambda}{4}); \quad (18)$$

### 3. Пример математического и автоматизированного расчёта.

В качестве примера рассчитаем делитель мощности с равным делением на основе моста Уилкинсона. Начальные параметры:  $\epsilon_r = 9,8$ ,  $f_p = 2 * 10^9$ ,  $h = 1$  мм,  $p = 50$  Ом,  $t = 30$  мкм.

$$Z_0 = p = 50 \text{ Ом}$$

$$Z_1 = p\sqrt{2} = 70 \text{ Ом}$$

$$R_6 = 100$$

Из формулы (13) выразим  $W$  для  $Z_0 = 50$  Ом:

$$W = 0.95 \text{ мм}$$

Из (14):

$$l = 15 \text{ мм}$$

для  $Z_1 = 70$  Ом:  $W = 0.4$  мм,  $l = 15$  мм

Основной расчёт выполнен, переходим к автоматизированному, для начала пересчитаем линии с помощью утилиты LineCalc (рисунок 7).

Задаем толщину диэлектрика  $H$ , диэлектрическую проницаемость  $\epsilon_r$ , толщину напыления слоя проводника  $T$  и частоту  $f_{req}$ . Задаем электрические параметры: волновое сопротивление  $Z_0$  и по умолчанию  $E_{Eff} = 90$  и нажимаем синтезировать.

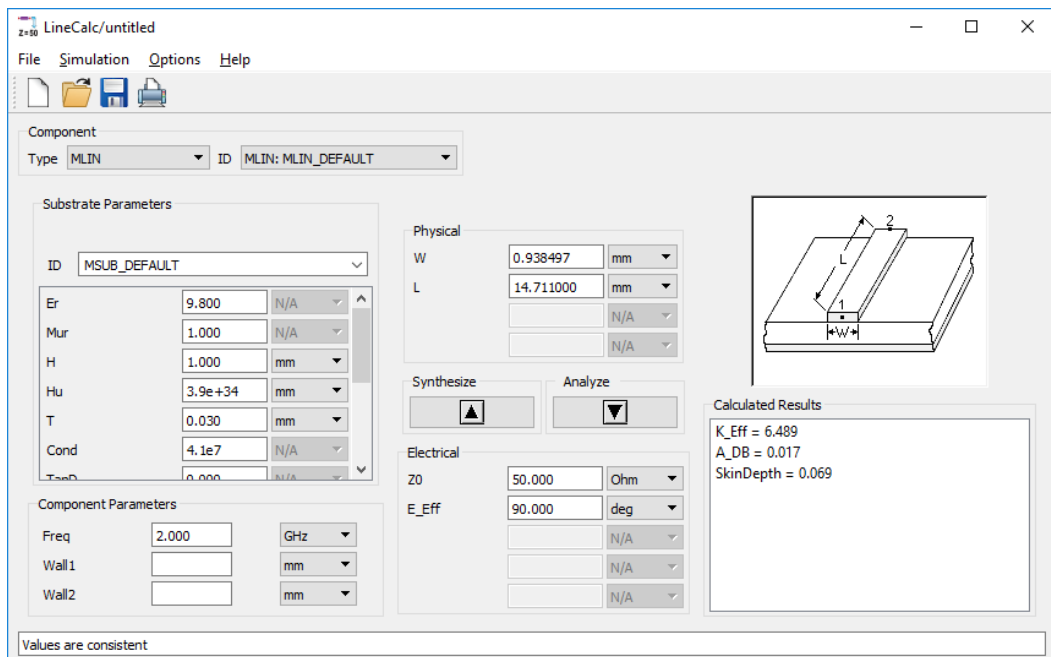


Рисунок 7. – Окно утилиты LineCalc

Необходимо чтобы размерности соответствовали габаритам полученного полоска.

Полученные размеры незначительно расходятся с расчётами.

Следующий шаг – сборка делителя на микрополосках. Для начала в библиотеке найдём Tlines-microstrip и добавим MSUB, определив параметры подложки. Добавляем в рабочую область микрополосковые линии Mline и задаем полученные размеры. Резистор добавляем из Lumped-components. Для добавления основных инструментов симуляции следуем инструкции: Simulation-S\_param – SP и TermG; Simulation-HB – HB; Sources\_Freq\_Domain – P\_1Tone. Вытащим VAR для определения переменной Pw, при помощи NAME обозначим выходы схемы. Повторить сборку так, как показано на рисунке 8.

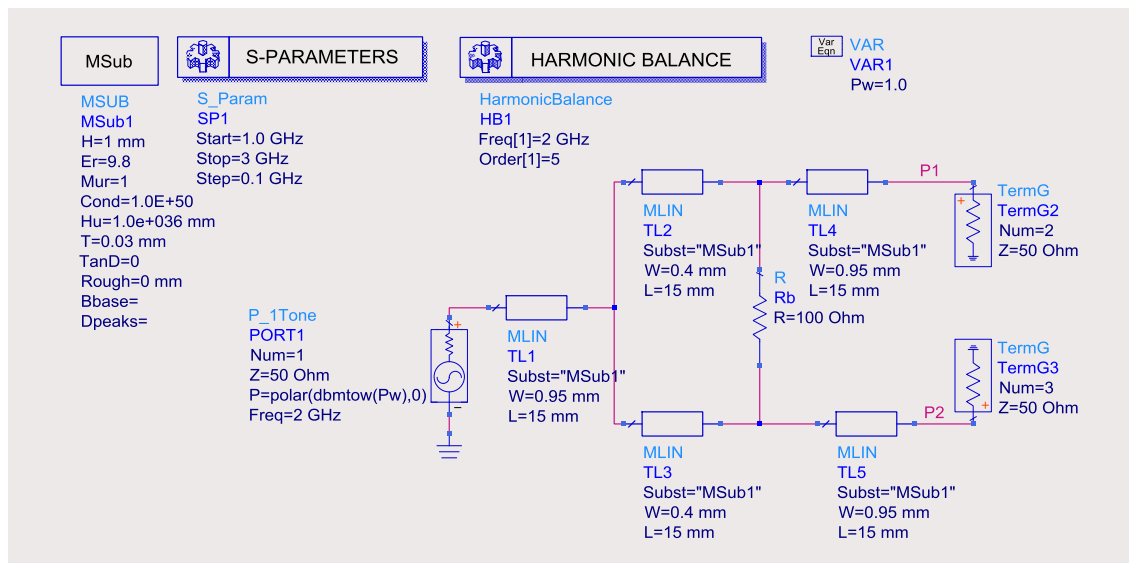


Рисунок 8. – Делитель мощности в ADS

В инструменте HARMONIC BALANCE обозначим параметр для свипа по мощности Pw, В инструменте S-PARAMETERS определим частоты моделирования (рисунок 9).

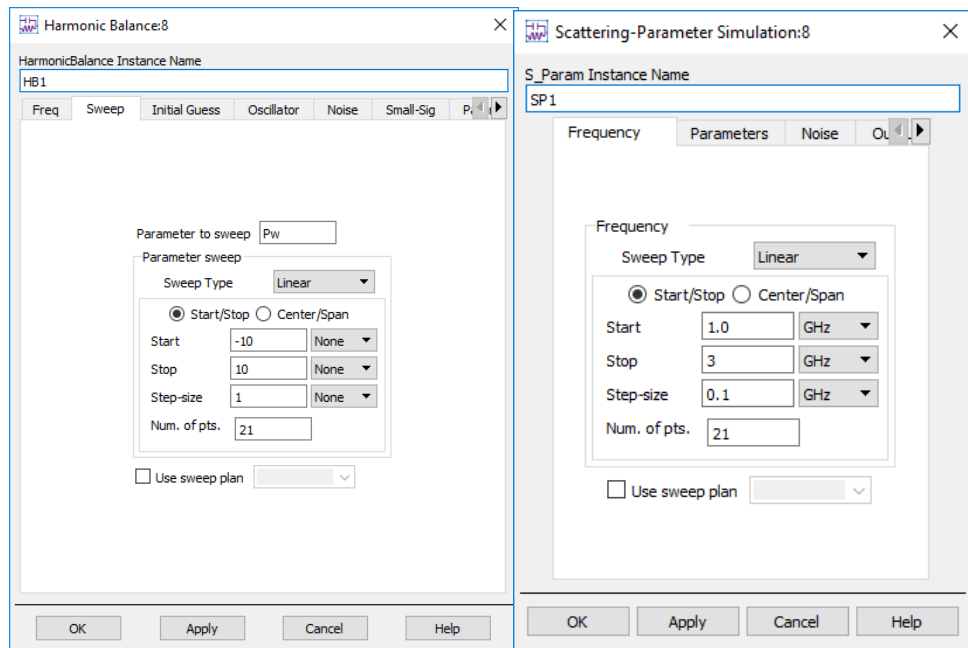


Рисунок 9 – Окна настройки инструментов моделирования

Промоделировать полученную схему, после появится окно для построения графиков (рисунок 10). Для построения графиков выбрать то, что показано на рисунке 10.

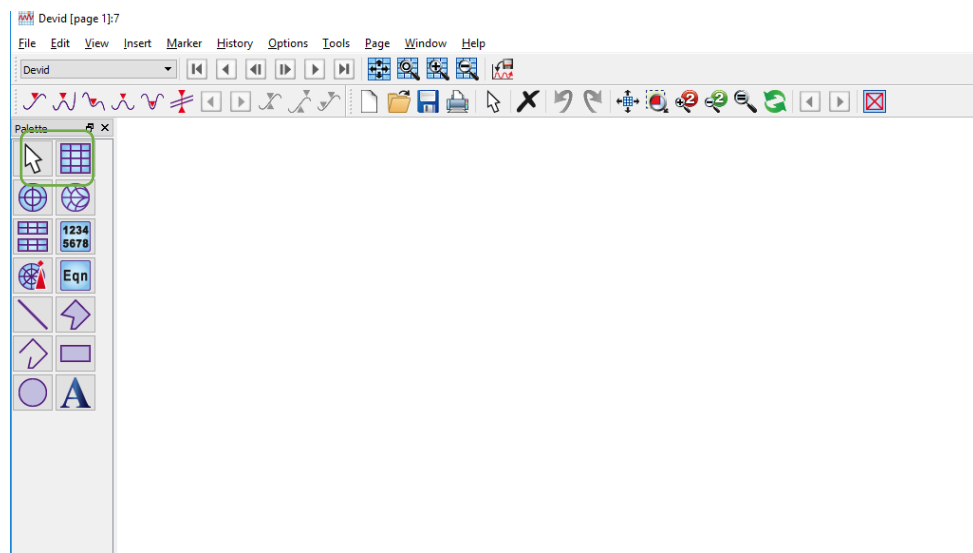


Рисунок 10. – Окна построения графиков

В появившемся окне добавить необходимые функции для построения графиков.

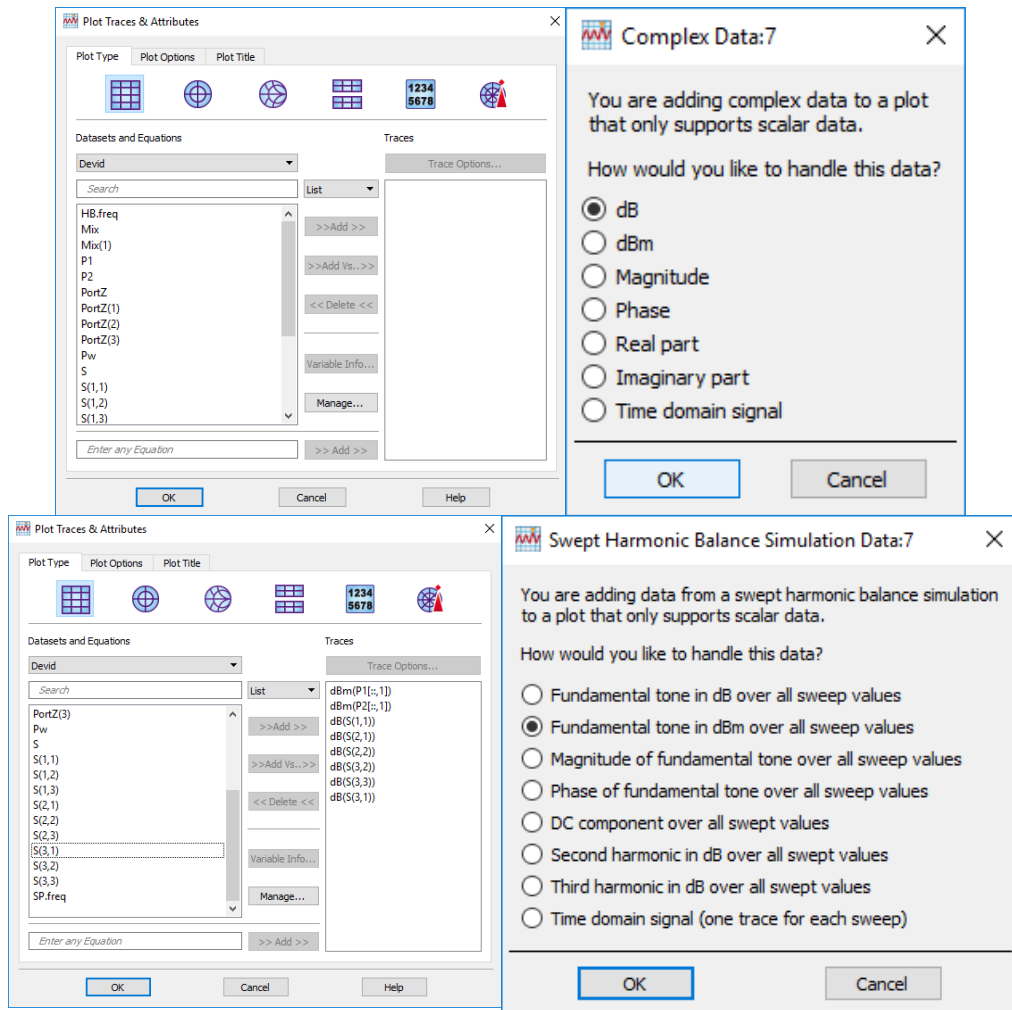


Рисунок 11. – Необходимые подстройки для построения графиков

При построении S-параметров ( $|S_{11}|$ ,  $|S_{21}|$ ,  $|S_{22}|$ ) выбираем размерность дБ, для построения зависимости выходной мощности от входной выбираем дБм.

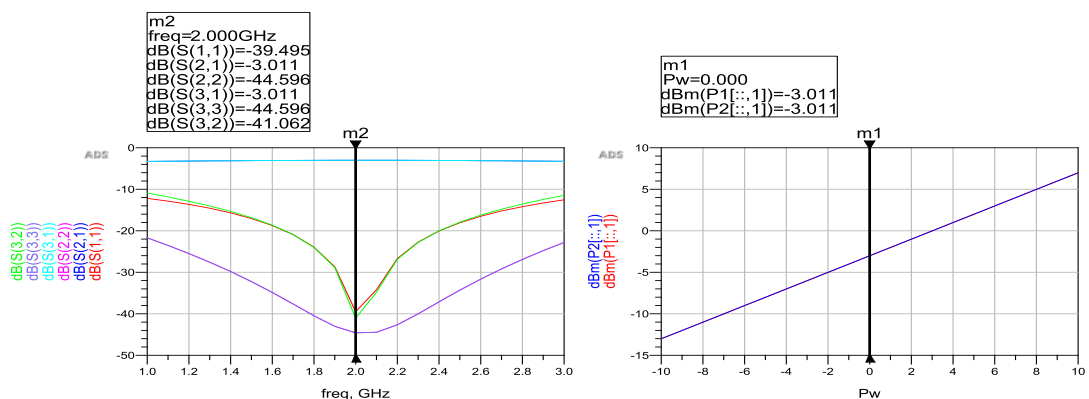


Рисунок 12. – Результаты моделирования

Как можно было заметить из полученных графиков (рисунок 12), центральная частота полностью соответствует расчётам, мощность на выходе с каждого порта составляет половину от входной мощности, на входе 0 дБм - на выходе -3 дБм или 2 раза, равное деление.

По той же аналогии повторим делитель с неравным делением в отношении 1/3 на основе моста Уилкинсона. Начальные параметры:  $\epsilon_r = 3,66$ ,  $f_p = 1 * 10^9$ ,  $h = 0,5$  мм,  $p = 50$  Ом,  $t = 30$  мкм.

$$n^2 = \frac{P_2}{P_1} = 3;$$

$$R_B = Z_0 \frac{1+n^2}{2} = 115,5 \text{ Ом};$$

$$Z_1 = \sqrt[4]{\frac{n}{1+n^2}} = 81 \text{ Ом};$$

$$Z_2 = \sqrt[4]{n^3(1+n^2)} = 106,8 \text{ Ом};$$

$$Z_3 = \sqrt[4]{\frac{1+n^2}{n^5}} = 35,6 \text{ Ом};$$

$$Z_4 = Z_0 \cdot \sqrt{n} = 65,8 \text{ Ом};$$

$$Z_5 = \frac{Z_0}{\sqrt{n}} = 38 \text{ Ом};$$

Из формулы (13) выразим  $W$  для всех значений волновых сопротивлений:

$$W_0 = 1.1 \text{ мм}; W_1 = 0.47 \text{ мм}; W_2 = 0.225 \text{ мм}; W_3 = 1.77 \text{ мм}; W_4 = 0.72 \text{ мм};$$

$$W_5 = 1.65 \text{ мм}$$

Из (14):

$l = 40$  мм (при автоматизированном расчёте  $l = 44$  мм) для все микрополосковых отрезков длиной ( $l < \frac{\lambda}{4}$ ),  $l = \frac{\lambda}{4\sqrt{\epsilon_r}}$ .

Далее рассчитаем линии при помощи LineCalc. Геометрические размеры незначительно расходятся.

На рисунке 13 представлена схема делителя мощности с неравным делением, на рисунке 14 результаты моделирования.

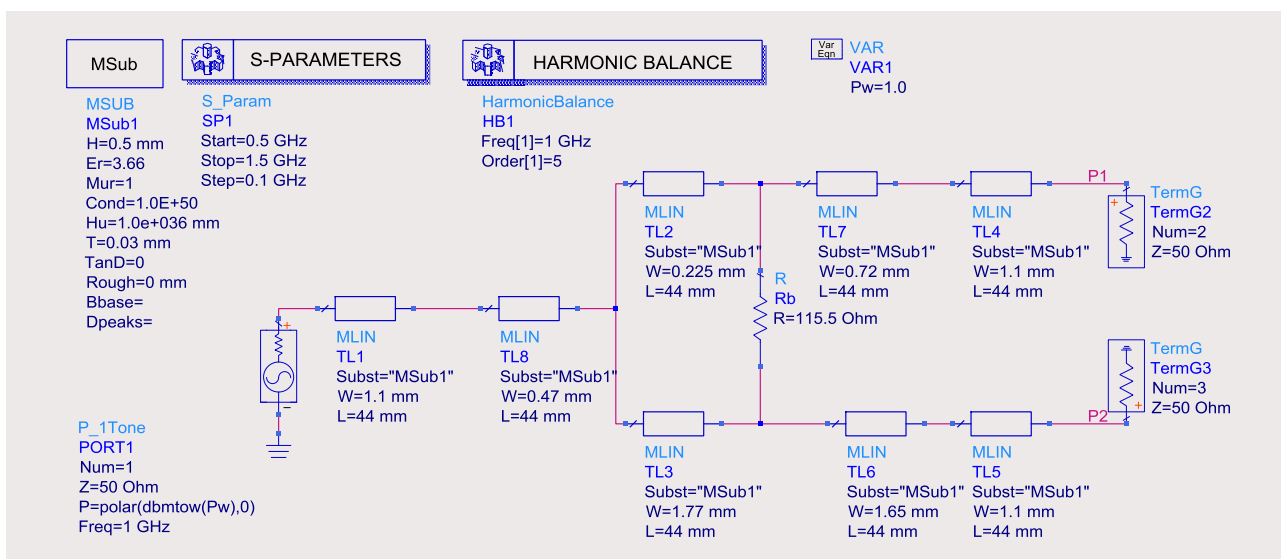


Рисунок 13. – Схема делителя мощности на основе моста Уилкинсона

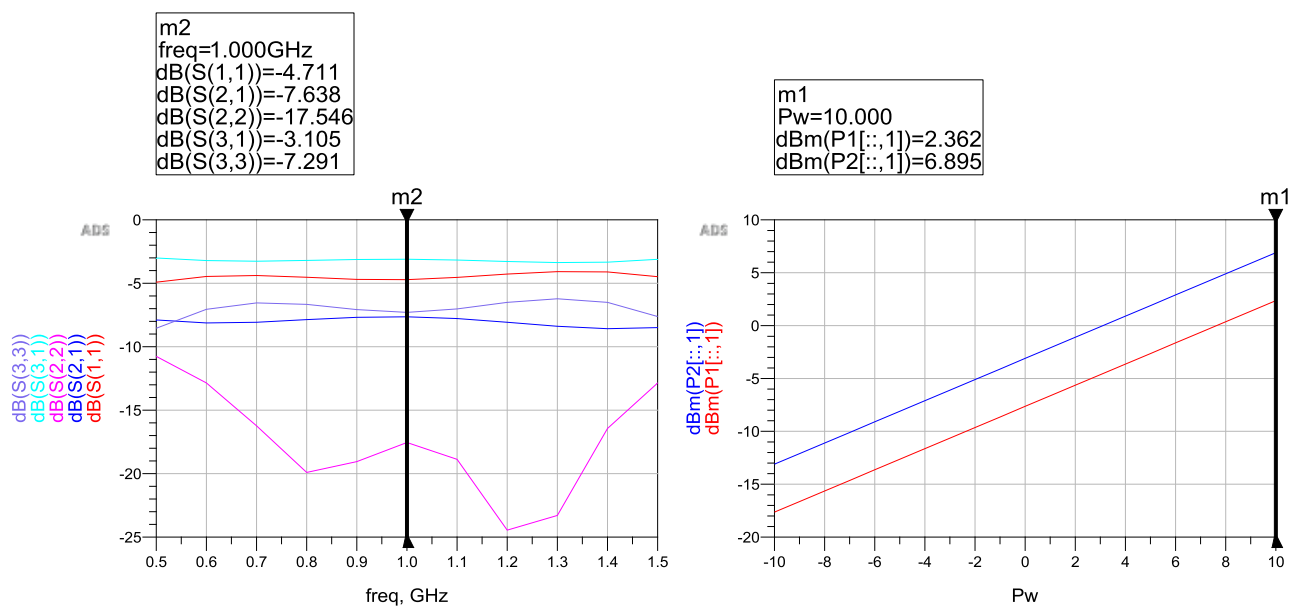


Рисунок 14. – Результаты моделирования

Как можно заметить из графиков отношение выходных мощностей как 1/3. Центральная частота полностью соответствует расчётной.

На рисунках 15 и 16 представлена модель НО в схематике и результаты моделирования. Начальные параметры:  $\epsilon_r = 9,8$ ,  $f_p = 2 * 10^9$ ,  $h = 0,5$  мм,  $p = 50$  Ом,  $t = 30$  мкм.

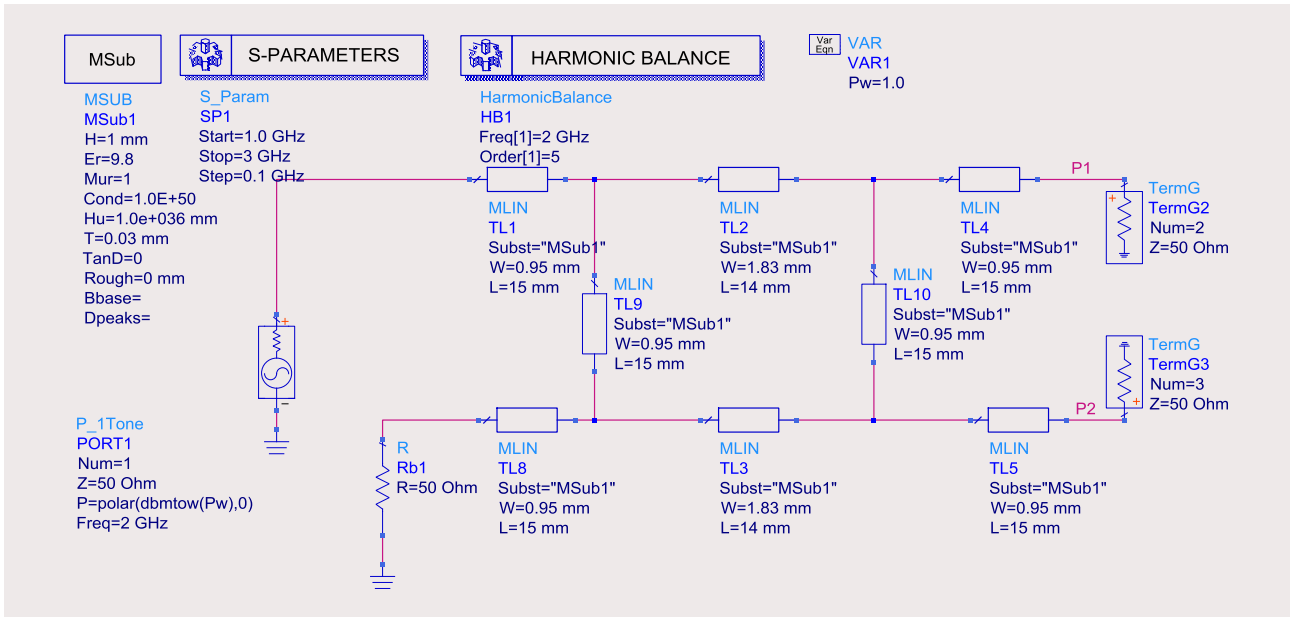


Рисунок 15. – Схема делителя мощности на основе НО

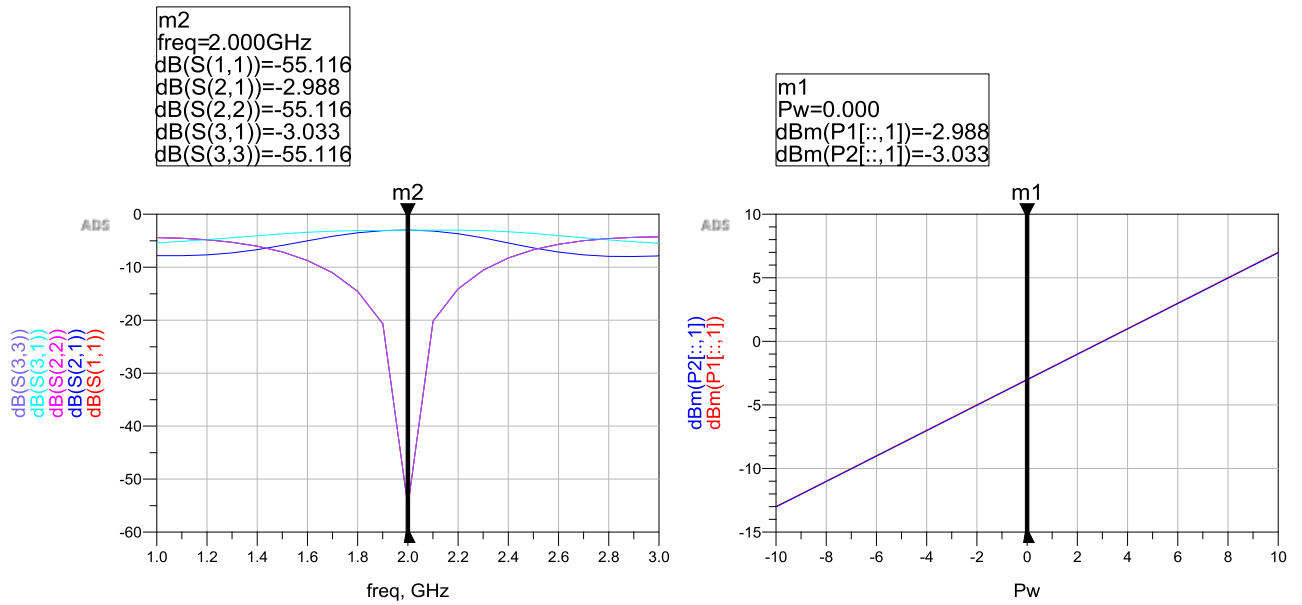


Рисунок 16. – Результаты моделирования



**Варианты задания:**

Для каждого из вариантов, выданных преподавателем, промоделировать и построить результирующие характеристики делителя мощности (таблица 1).

Таблица 1 – Варианты заданий на лабораторную работу

Вариант	$\epsilon_r$	$f_p$ , ГГц	h, мм	t, мм	$n^2$
1	3,66	0,5	0,5	0,035	1/2
2	9,8	1	1	0,035	1/1
3	4,5	1,5	1,5	0,035	1/1
4	4	3	2	0,035	1/1
5	3,66	1	0,7	0,035	1/2
6	2	0,5	0,5	0,017	1/3
7	3,88	0,8	1,5	0,017	1/4
8	2,5	0,2	1,4	0,017	1/2
9	4,5	4	2	0,017	1/1
10	2,2	3	1	0,017	1/4
11	3	2,1	0,4	0,035	1/1
12	2	0,6	0,5	0,035	1/3
13	5,6	1,2	0,5	0,035	1/1
14	2,5	3,2	1	0,017	1/3
15	3,38	2,5	1	0,017	1/4
16	4,2	2,4	0,8	0,035	1/2