

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники

В. Д. Дмитриев
Д. С. Брагин

Лабораторная работа №2
«СВЧ делители мощности»

Методические указания 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
2020

УДК 621.372
ББК 32.84
Д 534

Рецензент(ы):

Фамилия И. О., должность, ученая степень

Бахтин А.А., заведующий кафедрой телекоммуникационных систем
национального исследовательского университета МИЭТ, канд. техн. наук

Дмитриев, Владимир Дмитриевич

Д 534 Лабораторная работа №2 «СВЧ делители мощности»: Методические указания 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» / В. Д. Дмитриев, Д. С. Брагин. – Томск: Томск. Гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2020. – 20 с.

Представлены методические указания по выполнению лабораторной работы №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».

Одобрено на заседании каф. Телекоммуникаций и основ радиотехники,
протокол № 3 от 26.11.2020 г. _____

УДК 621.372
ББК 32.84

© Дмитриев В. Д., Брагин Д. С.,
2020

© Томск. Гос. Ун-т систем упр. и
радиоэлектроники, 2020

Оглавление

Введение.....	4
1 Классификация СВЧ делителей мощности	5
2 Расчёт некоторых видов делителей мощности	7
3 Пример математического и автоматизированного расчёта	11
4 Задание на лабораторную работу	20

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 AWR.

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 трехдецибельным 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 1.1), такой элементарный делитель функционально является шестиполосником. Простейший двухканальный делитель представляет собой разветвление (сочленение) линий передачи и не работает в качестве сумматора. Другой разновидностью двухканального делителя мощности является согласованный шестиполосный 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.

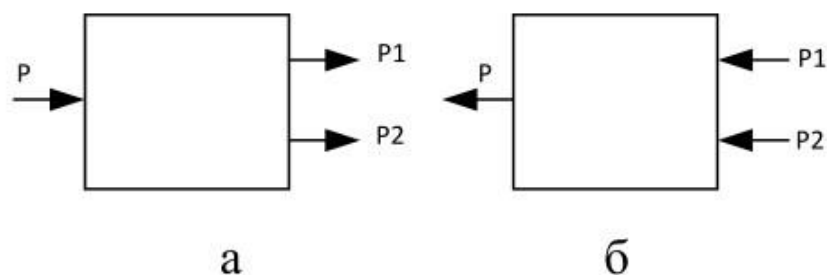


Рисунок 1.1 – Двухканальные делители мощности (а) и сумматор мощности(б)

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 2.1 и 2.2.

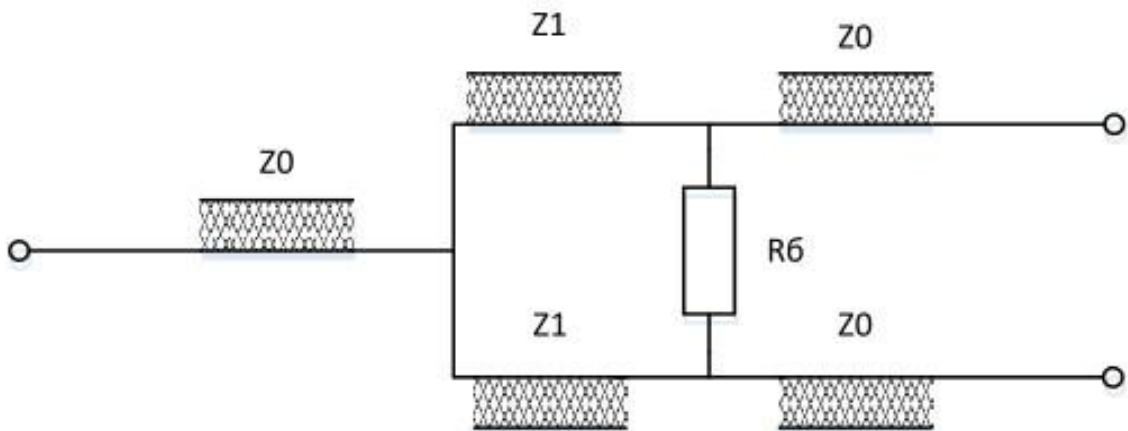


Рисунок 2.1 – Делитель мощности с равным делением на основе моста Уилкинсона

Волновые сопротивления микрополосковых линий рассчитываются следующим образом:

$$Z_0 = \rho \text{ [Ом]}; \quad (1.1)$$

$$Z_1 = \sqrt{2} \cdot \rho \text{ [Ом]}. \quad (1.2)$$

Балластное сопротивление:

$$R_B = 100 \text{ Ом}$$

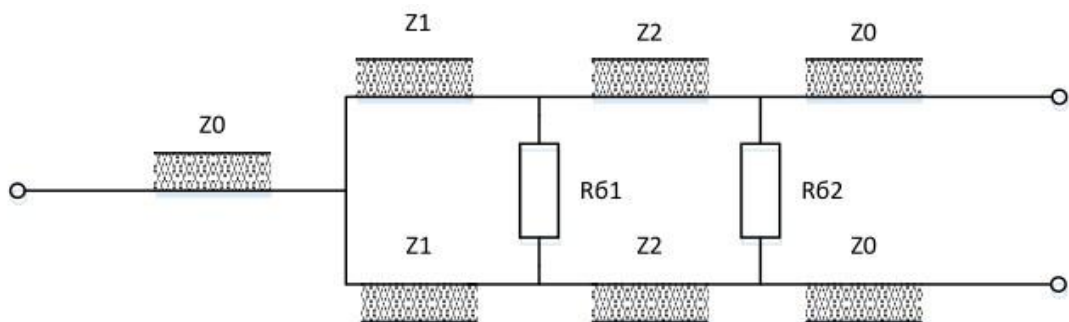


Рисунок 2.2 – Широкополосный делитель мощности с равным делением на основе моста Уилкинсона

Микрополосковый делитель мощности с неравным делением на основе моста Уилкинсона представлен на рисунке 2.3.

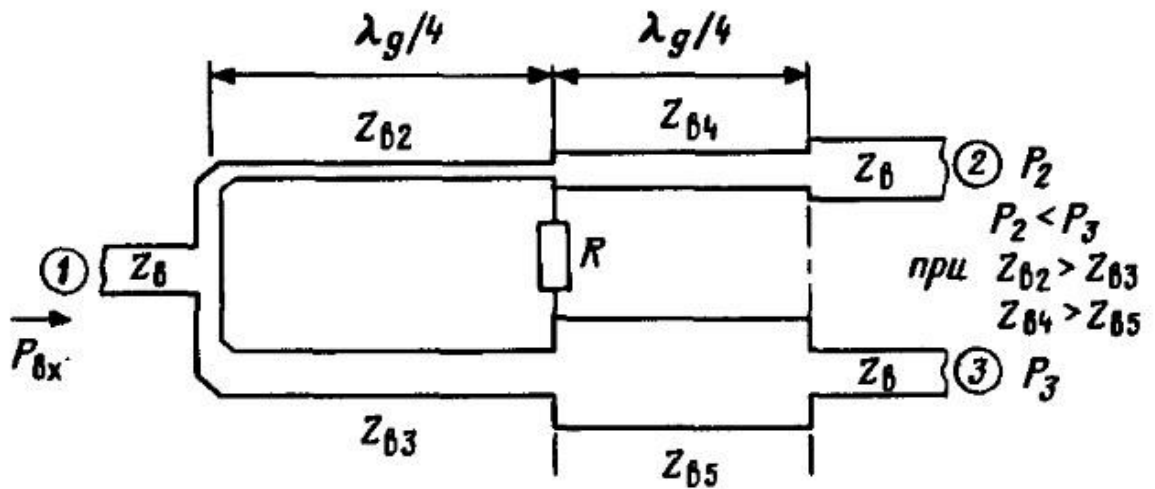


Рисунок 2.3. – Делитель мощности с неравным делением на основе моста Уилкинсона

Расчёты волнового сопротивления линий и балластного представлены ниже.

$$n^2 = \frac{P_3}{P_2}; \quad (1.3)$$

$$R_B = Z_0 \cdot \frac{1+n^2}{n} \text{ [Ом]}; \quad (1.4)$$

$$Z_{B2} = Z_0 \cdot \sqrt{(n \cdot (1+n^2))} \text{ [Ом]}; \quad (1.5)$$

$$Z_{B3} = Z_0 \cdot \sqrt{\frac{1+n^2}{n^3}} \text{ [Ом]}; \quad (1.6)$$

$$Z_{B4} = Z_0 \cdot \sqrt{n} \text{ [Ом]}; \quad (1.7)$$

$$Z_{B5} = \frac{Z_0}{\sqrt{n}} \text{ [Ом]}. \quad (1.9)$$

Делитель мощности на основе прямоугольной гибридной мостовой схемы (НО) представлен на рисунке 2.4.

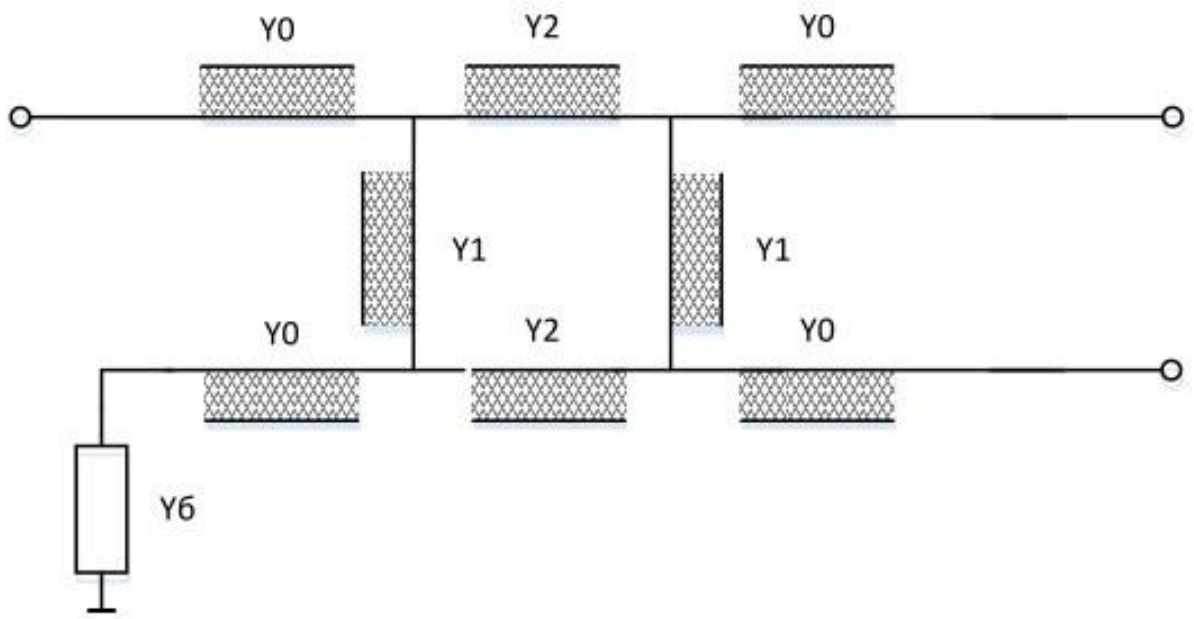


Рисунок 2.4 – Делитель мощности на основе прямоугольной гибридной мостовой схемы (НО)

$$m = \frac{P_2}{P_1}; \quad (1.10)$$

$$Y_1 = Y_0 / \sqrt{m} \text{ [См]}; \quad (1.11)$$

$$Y_2 = Y_0 \cdot \sqrt{\frac{m+1}{m}} \text{ [См]}; \quad (1.12)$$

$$Z_1 = \frac{1}{Y_1} \text{ [Ом]}; \quad (1.13)$$

$$Z_2 = \frac{1}{Y_2} \text{ [Ом]}; \quad (1.14)$$

Частотный случай $m=1$, $Y_1 = Y_0$;

$$Y_2 = Y_0 \cdot \sqrt{2} = 1.41 \cdot 0.02 = 0.028 \text{ См} \quad (1.15)$$

$$Y_0 = \frac{1}{Z_0} = \frac{1}{50} = 0.02 \quad (1.16)$$

На рисунке 2.5 изображен упрощенный модель подложки.

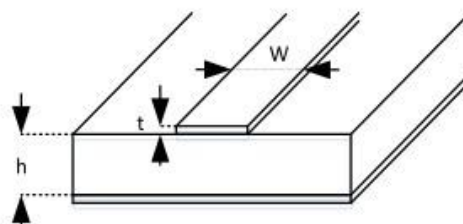


Рисунок 2.5 – Упрощенная модель подложки

Основным параметром участка микрополосковой линии является волновое сопротивление.

$$Z_B = \frac{377 \cdot h}{\sqrt{\varepsilon} \cdot W \left[1 + 1.735 \cdot \varepsilon^{-0.0724} \cdot (W/h)^{-0.836} \right]} \quad [Ом] \quad (1.17)$$

$$\Lambda = \frac{\lambda}{\sqrt{\varepsilon_r}}, \quad (1.18)$$

где W – ширина микрополосковой линии;

h – толщина подложки;

t – толщина проводника;

λ – длина волны;

ε_r – диэлектрическая проницаемость.

При известном значении волнового сопротивления появляется задача синтеза МПЛ, то есть определение ее геометрических размеров, в частности ширины W . Для синтеза МПЛ можно воспользоваться методом расчета.

При $A < 1,52$

$$W = \frac{8 \cdot h \cdot \exp(A)}{\exp(2 \cdot A) - 2} \quad [М] \quad (1.19)$$

При $A \geq 1,52$

$$W = \frac{2 \cdot h}{\pi} \cdot \left[B - 1 - \ln(2 \cdot B - 1) + \frac{\varepsilon_r - 1}{2 \cdot \varepsilon_r} \cdot \left(\ln(B - 1) + 0,39 - \frac{0,61}{\varepsilon_r} \right) \right] \quad [М] \quad (1.20)$$

Где:

$$A = \frac{Z_B}{60} \cdot \left(\frac{\varepsilon_r + 1}{2} \right)^{1/2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r - 1} \left(0,23 + \frac{0,11}{\varepsilon_r} \right) \quad (1.21)$$

$$B = \frac{377 \cdot \pi}{2 \cdot Z_B \cdot \sqrt{\varepsilon_r}} \quad (1.22)$$

Погрешность расчетов не превышает 1 %.

3 Пример математического и автоматизированного расчёта

В качестве примера рассчитаем делитель мощности с равным делением на основе моста Уилкинсона. Начальные параметры:

$$\epsilon_r = 9.8, f_0 = 2 \cdot 10^9 \text{ Гц}, h = 1 \text{ мм}, \rho = 50 \text{ Ом}, t = 30 \text{ мкм}.$$

По формулам (2.1) и (2.2) определим следующие параметры делителя:

$$Z_0 = \rho = 50 \text{ Ом}$$

$$Z_1 = \rho \cdot \sqrt{2} = 70 \text{ Ом}$$

$$R_B = 100 \text{ Ом}$$

Из формулы (2.17) – (2.20) для каждого волнового сопротивления рассчитаем ширину микрополосковой линии: $W(Z_0) = 0.96 \text{ мм}$, $W(Z_1) = 0.386 \text{ мм}$. Длина микрополосковых линий рассчитывается по формуле:

$$\lambda_1 = \frac{\Lambda}{4} = \frac{0.048}{4} = 11.979 \text{ мм}$$

Основной расчёт выполнен, переходим к автоматизированному, для начала пересчитаем линии с помощью утилиты TXLine (рисунок 3.1). Задаем толщину диэлектрика (H), диэлектрическую проницаемость (Dielectric Constant), коэффициент ослабления (Loss Tangent), толщину напыления слоя проводника (T) и частоту (Frequency). Задаем электрические параметры: волновое сопротивление (Z0, Impedance) и электрическую длину (Electrical Length) равной 90. Нажимаем на расчет параметров и получаем значения длины и ширины микрополосковой линии.

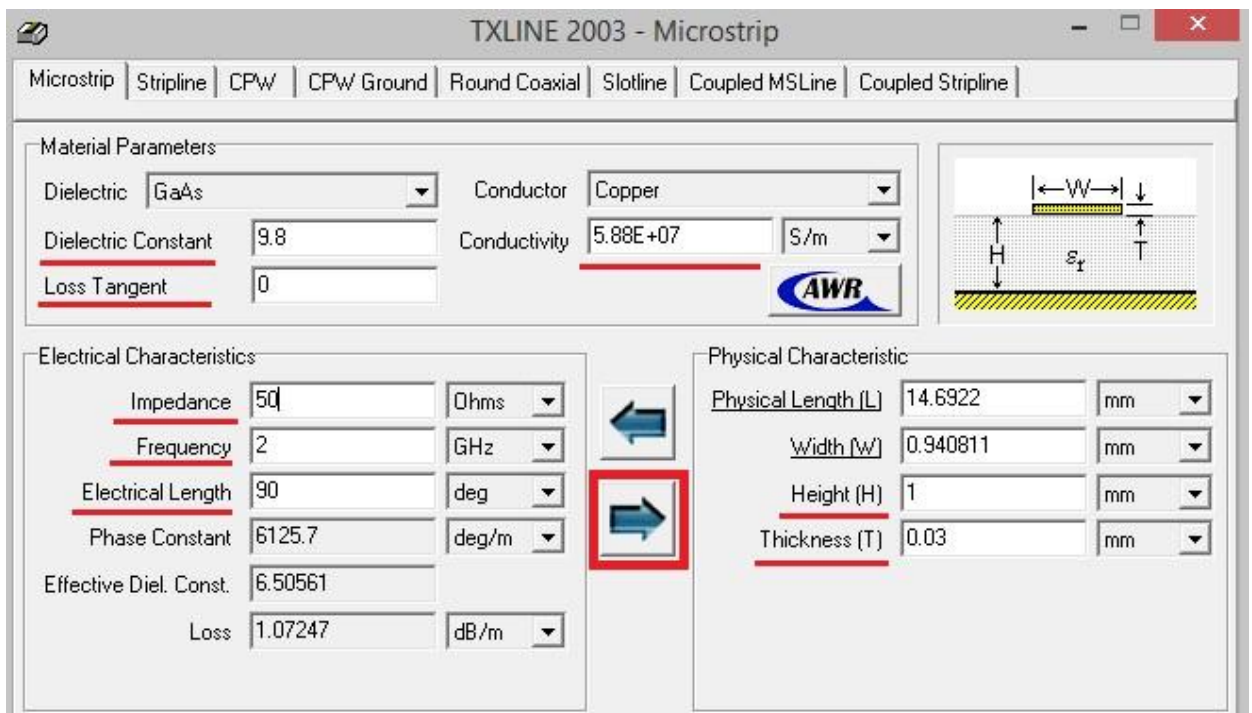


Рисунок 3.1 – Окно утилиты TXLine

Полученные значения ширины и длины микрополосковой линии с волновым сопротивлением 50 Ом не сильно отличаются от расчётных. По аналогии производим расчёт ширины МПЛ для волнового сопротивления 70 Ом: $W(75) = 0.407313$ мм.

После расчета размеров микрополосковых линий переходим к сборке схемы в AWR. Для этого создаём новую схему (рис. 3.2). Устанавливаем частоты, в нашем случае 0,1 – 4 ГГц, с шагом 0,01 ГГц.

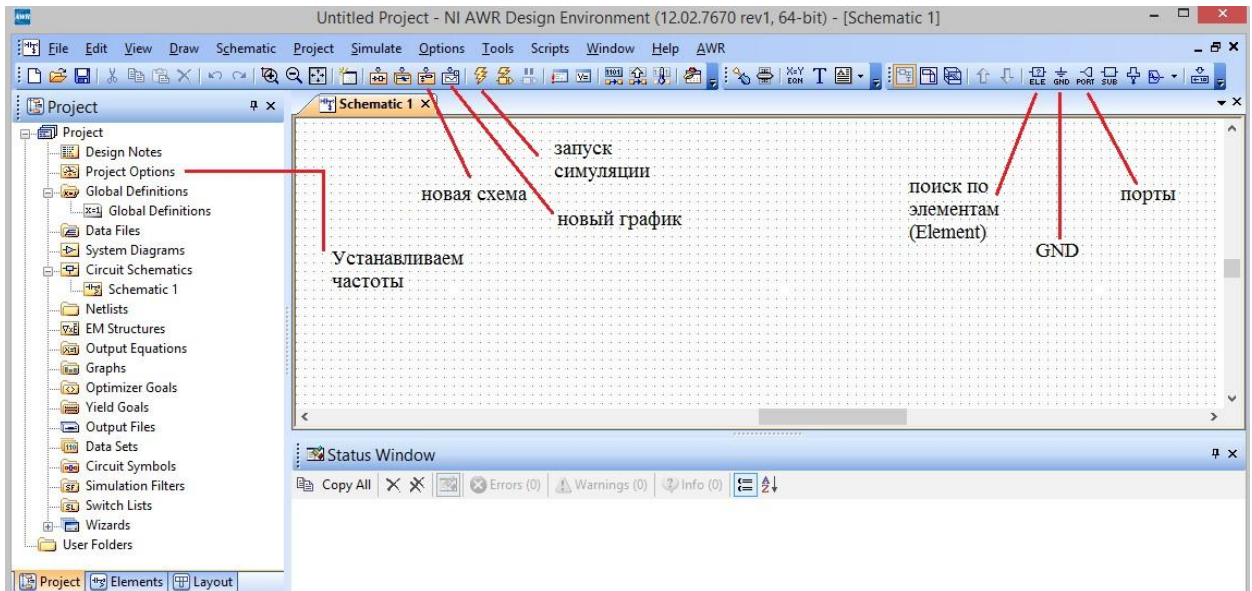


Рисунок 3.2 – Создание новой схемы

Используя поиск по элементам (Element) найдите модели подложки MSUB, резистора RES и микрополосковой линии MLIN. Соберем схему деления мощностей Уилкинсона.

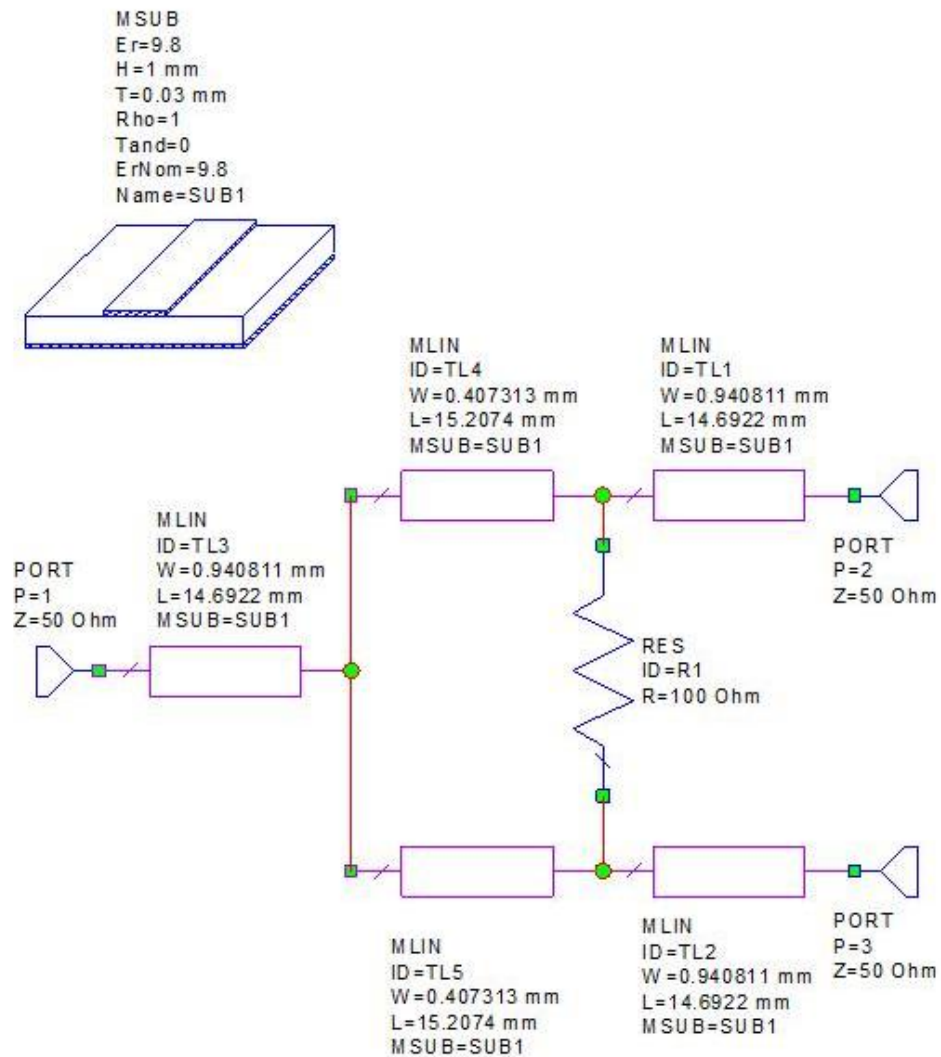


Рисунок 3.3 – Схема делитель мощности Уилкинсона 1/1

Для того чтобы провести анализ схемы необходимо добавить графики для коэффициентов передачи (S_{21} , S_{31} , S_{23}). Нажав правой кнопкой на графике и выбрав «Add New Measurement» откроется окно выбора измерений (рис. 3.4). В данном окне нужно настроить измерения для S-параметров.

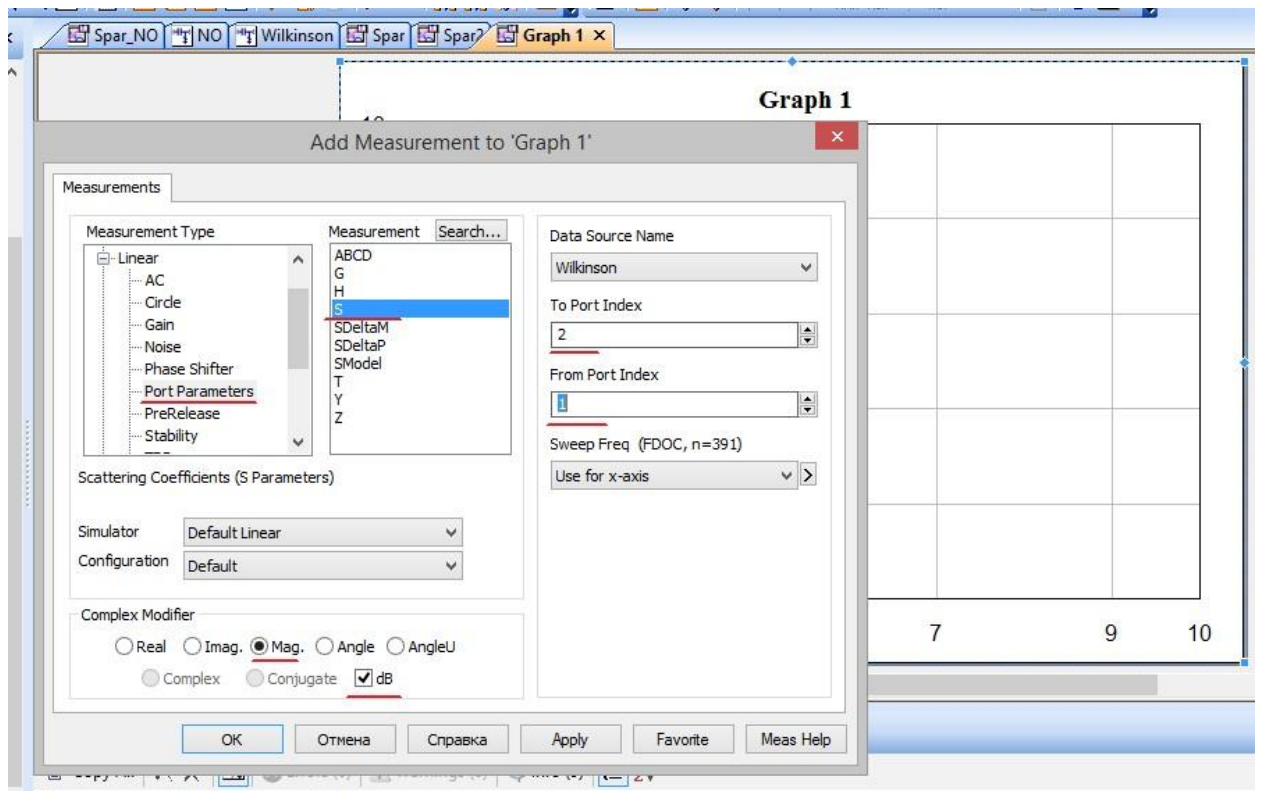


Рисунок 3.4 – Пример добавления измерения S_{21}

После этого получаем набор кривых S-параметров (рис.3.5).

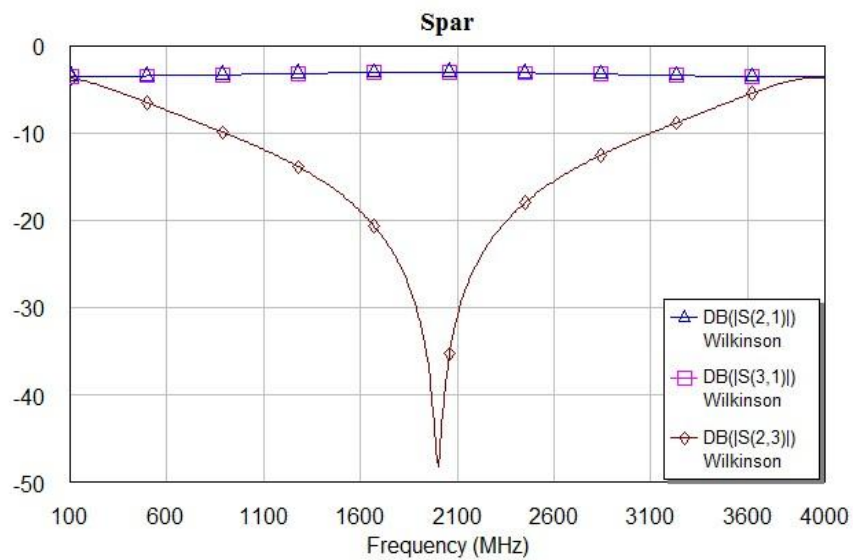


Рисунок 3.5 - S – параметры делителя мощности

Как можно заметить из полученных графиков S_{21} и S_{31} совпали, что говорит нам о равномерном делении мощности. Коэффициент передачи с 3 порта на 2 на центральной частоте (2 ГГц) имеет значения -45 дБ, это показывает то, что между вторым и третьим портом имеется хорошая развязка на центральной частоте.

По той же аналогии повторим делитель с неравным делением в отношении 1/3 на основе моста Уилкинсона. Начальные параметры:

$$\varepsilon_r = 3.66, f_0 = 2 \cdot 10^9 \text{ Гц}, h = 0,5 \text{ мм}, \rho = 50 \text{ Ом}, t = 30 \text{ мкм}.$$

$$n^2 = \frac{1}{3}$$

$$R_B = Z_0 \cdot \frac{1+n^2}{n} = 50 \cdot \frac{1+0.333}{0.577} = 115.47 \text{ Ом};$$

$$Z_{B2} = Z_0 \cdot \sqrt{(n \cdot (1+n^2))} = 50 \cdot \sqrt{0.577 \cdot (1+0.333)} = 43.869 \text{ Ом};$$

$$Z_{B3} = Z_0 \cdot \sqrt{\frac{1+n^2}{n^3}} = 50 \cdot \sqrt{\frac{1+0.577^2}{0.577^3}} = 131.607 \text{ Ом};$$

$$Z_{B4} = Z_0 \cdot \sqrt{n} = 50 \cdot \sqrt{0.577} = 37.992 \text{ Ом};$$

$$Z_{B5} = \frac{Z_0}{\sqrt{n}} = \frac{50}{\sqrt{0.577}} = 65.804 \text{ Ом}.$$

При помощи утилиты TXLine рассчитываем значения ширины и длины микрополосковой линии для полученных сопротивлений:

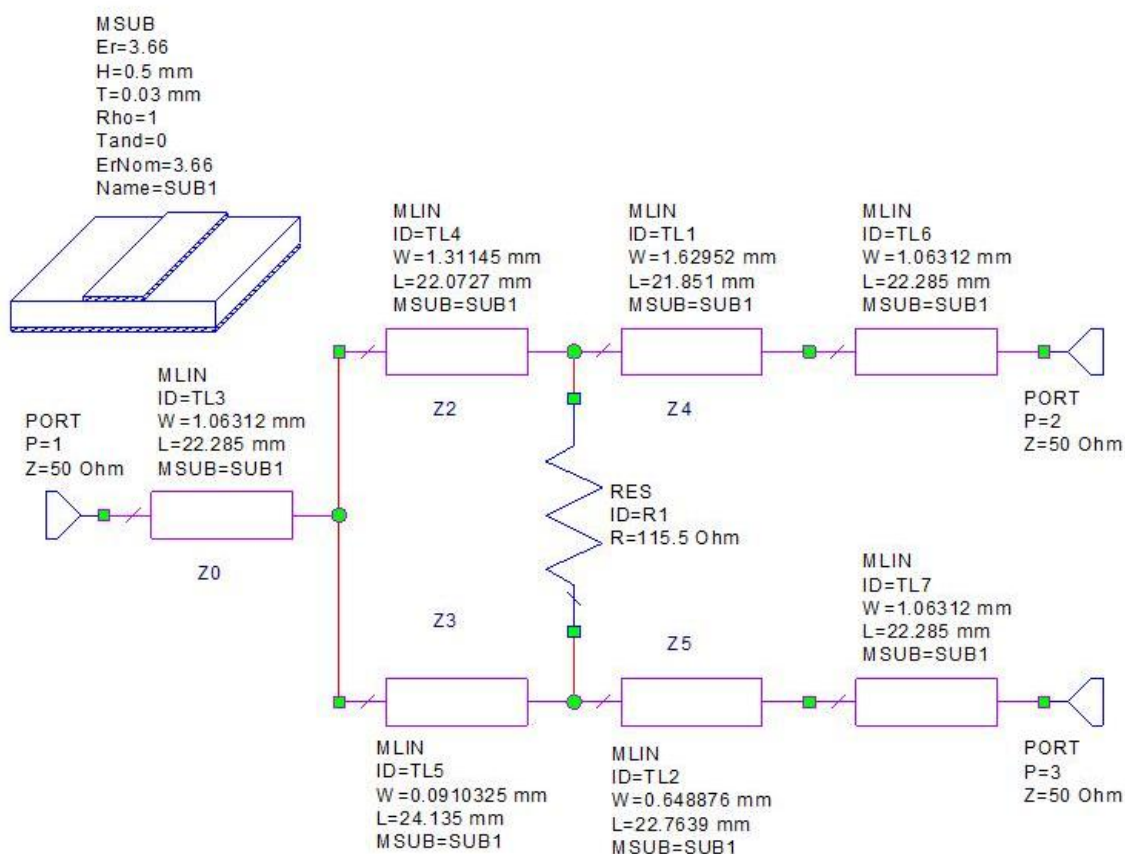


Рисунок 3.6 – Схема с неравным делением мощностей с рассчитанными параметрами МПЛ

Для анализа так же используются S-параметры. На рисунке 3.7 приведем коэффициенты передачи с первого порта на второй и третий, и коэффициент передачи, показывающий уровень развязки выходных плеч делителя.

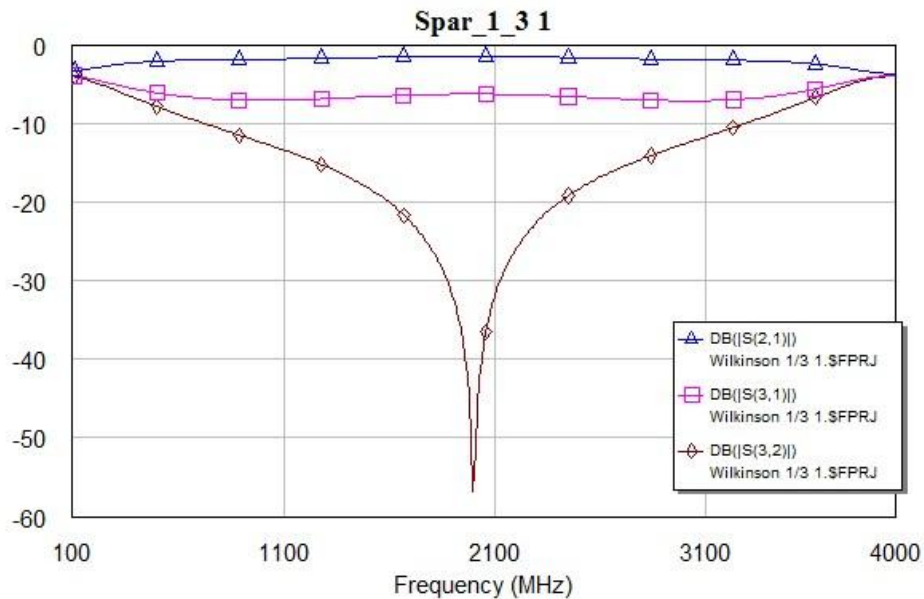


Рисунок 3.7 - S – параметры делителя мощности с неравным делением

Как видно из полученных зависимостей, данный делитель мощности обеспечивает неравномерное деление, которое мы и рассчитали. Уровень развязки максимален на центральной частоте 2 ГГц.

Далее разберём делитель мощности на основе направленного ответвителя (НО) с равномерным делением. Начальные параметры: $\epsilon_r = 9,8$, $f_0 = 2 \cdot 10^9$ Гц, $h = 0,5$ мм, $t = 30$ мкм. По формулам (2.13) – (2.16) рассчитаем значения проводимостей и импедансов для квадратурного моста (рисунок 2.4):

$$\begin{aligned}
 Z_0 &= 50 \text{ Ом}; \\
 Y_0 &= \frac{1}{Z_0} = \frac{1}{50} = 0,02 \text{ См}; \\
 Y_1 &= Y_0 = 0,02 \text{ См}; \\
 Y_2 &= Y_0 \cdot \sqrt{2} = 0,02 \cdot \sqrt{2} = 0,028 \text{ См}; \\
 Z_1 &= Z_0 = 50 \text{ Ом}; \\
 Z_2 &= \frac{1}{Y_2} = \frac{1}{0,028} = 35,355 \text{ Ом}.
 \end{aligned}$$

С помощью утилиты TXLine определяем параметры МПЛ линии и собираем схему, изображенную на рисунке 2.4. На рисунке 3.8 приведем схему делителя мощности на основе НО с коэффициентом деления 1/1, рассчитанный для нашего случая.

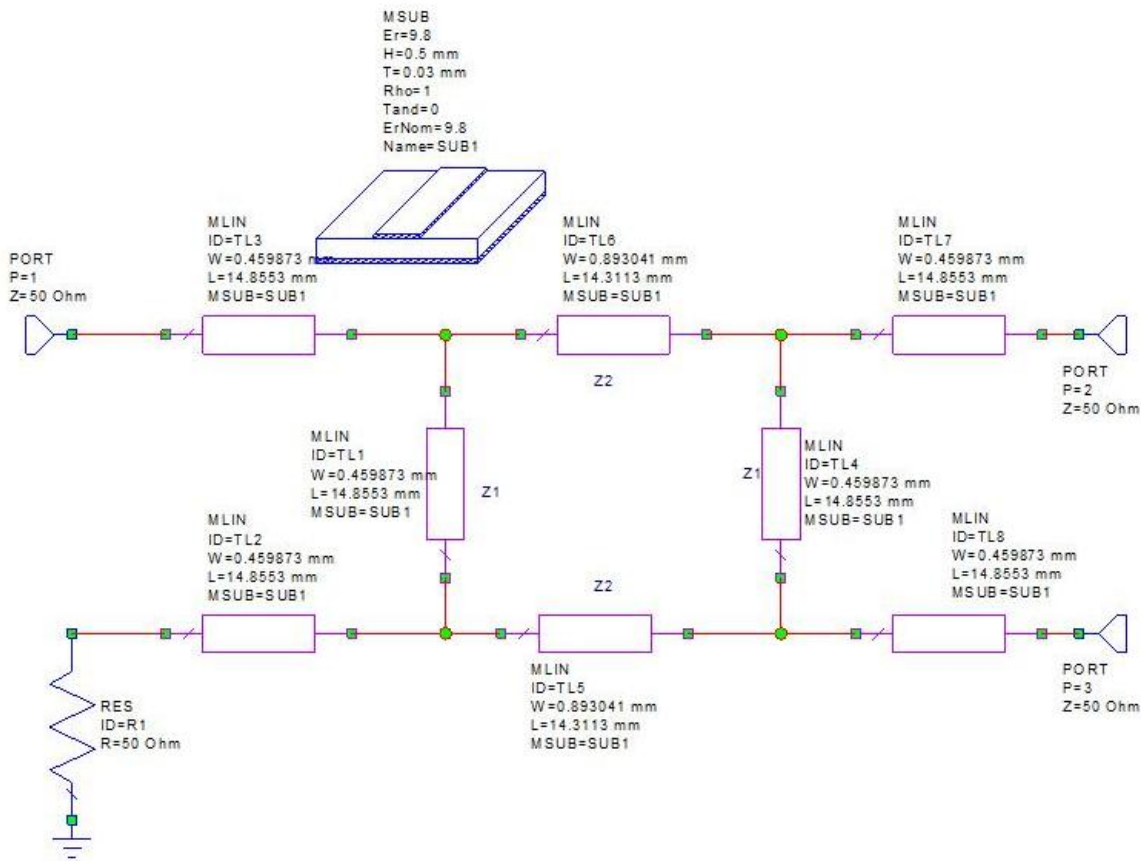


Рисунок 3.8 - Схема делителя мощности на основе НО с коэффициентом деления 1/1

Для анализа делителя мощности построим S-параметры (рис. 3.9).

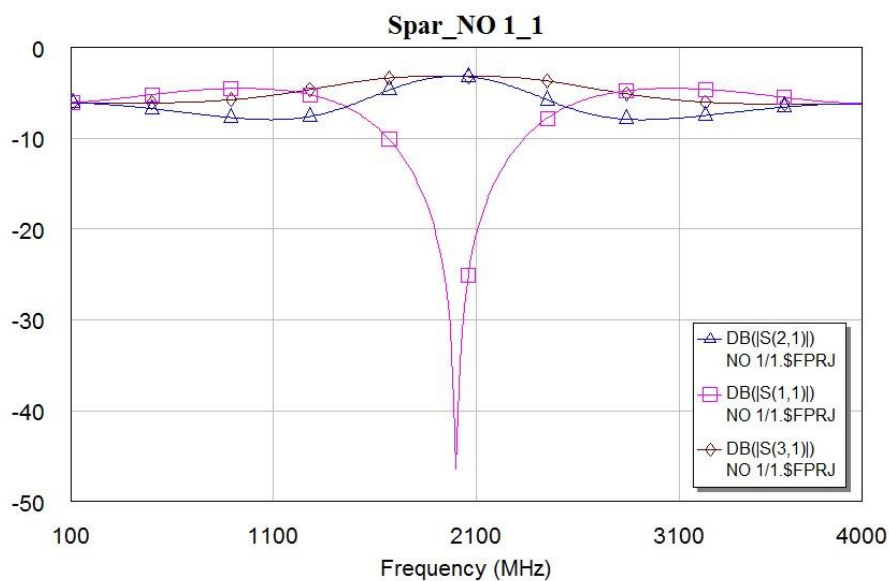


Рисунок 3.9 - S-параметры делителя мощности на основе НО с коэффициентом деления 1/1

Из графиков на рисунке 3.9 видно, что делитель мощности имеет равномерное деление, и максимальную развязку на частоте 2 ГГц.

В следующем примере рассчитаем квадратурный делитель мощности на основе направленного ответвителя (НО). Начальные параметры:

$$\varepsilon_r = 9,8, f_0 = 2 \cdot 10^9 \text{ Гц}, h = 0,5 \text{ мм}, \rho = 50 \text{ Ом}, t = 30 \text{ мкм}, m = \frac{1}{2}.$$

Коэффициент деления (m) из таблицы. По формулам (2.10) – (2.16) рассчитаем величины проводимостей для схемы, изображенной на рисунке 2.4.

$$m = \frac{1}{2};$$

$$Y_0 = \frac{1}{Z_0} = \frac{1}{50} = 0,02 \text{ См};$$

$$Y_1 = Y_0 / \sqrt{m} = \frac{0,02}{\sqrt{0,5}} = 0,028 \text{ См};$$

$$Y_2 = Y_0 \cdot \sqrt{\frac{m+1}{m}} = 0,02 \cdot \sqrt{\frac{0,5+1}{0,5}} = 0,035 \text{ См};$$

$$Z_1 = \frac{1}{Y_1} = \frac{1}{0,028} = 35,355 \text{ Ом};$$

$$Z_2 = \frac{1}{Y_2} = \frac{1}{0,035} = 28,868 \text{ Ом}.$$

С помощью утилиты TXLine определяем параметры МПЛ линии и собираем схему, изображенную на рисунке 2.4. На рисунке 3.10 приведем схему делителя мощности на основе НО с коэффициентом деления 1/2, рассчитанный для нашего случая.

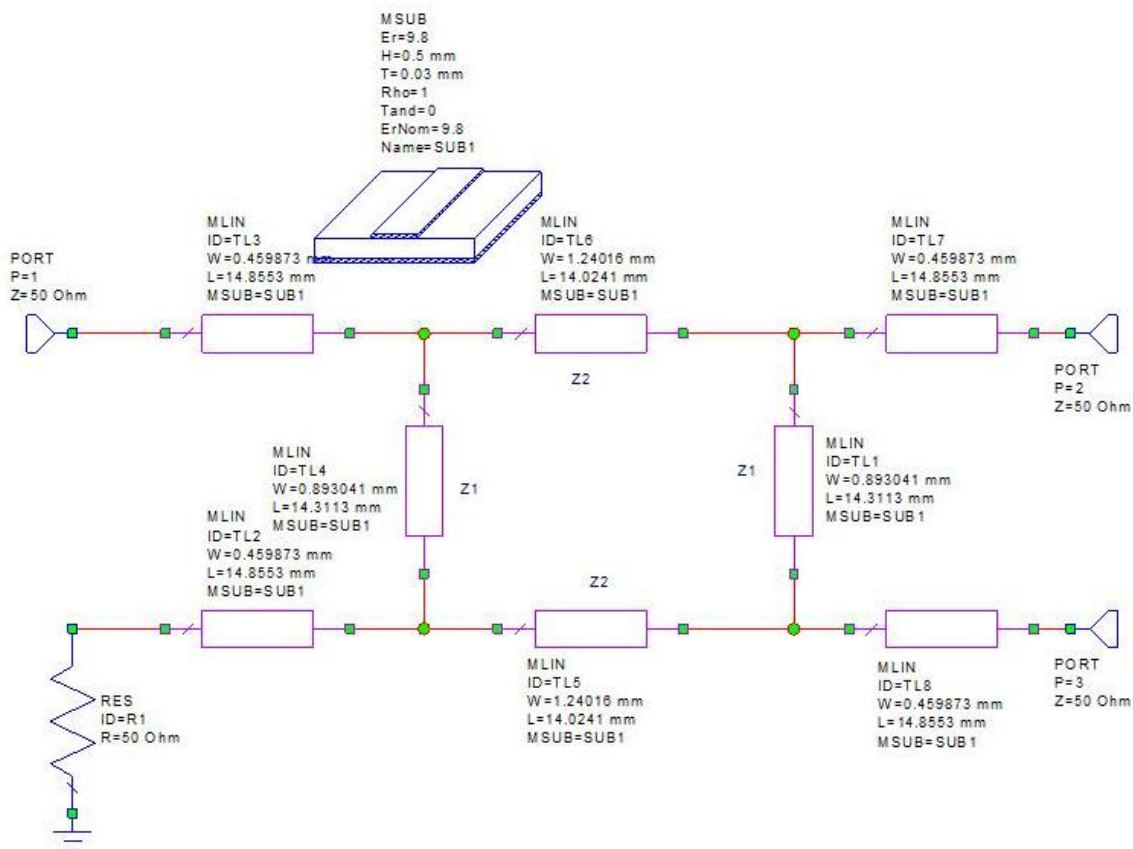


Рисунок 3.10 – Схема делителя мощности на основе НО с коэффициентом деления 1/2

Для анализа построим S-параметры делителя мощности (рис. 3.11).

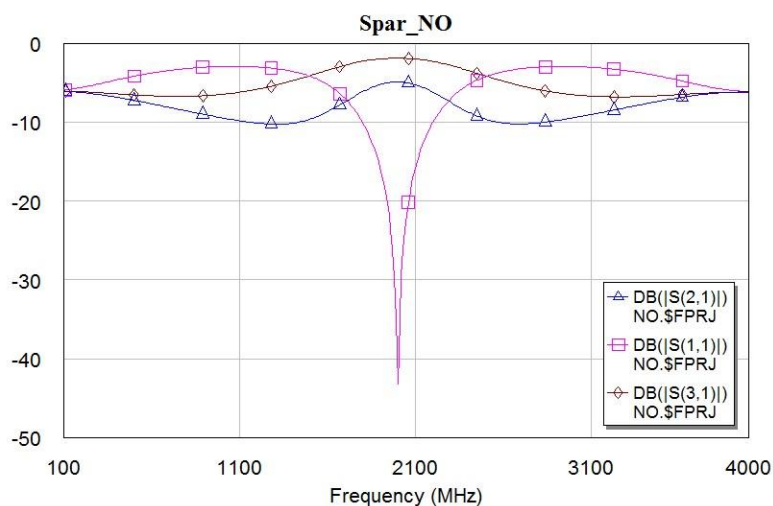


Рисунок 3.11 – S-параметры делителя мощности на основе НО с коэффициентом деления 1/2

В сравнении с делителем мощности Уилкинсона данный делитель имеет достаточно узкую полосу.

4 Задание на лабораторную работу

Для варианта (таблица 4.1), выданного преподавателем, рассчитать и промоделировать две схемы делителей мощностей:

- на основе моста Уилкинсона;
- на основе направленного ответвителя.

1. Рассчитать волновые сопротивления микрополосковых линий.
2. Произвести расчёт ширины и длины МПЛ при помощи утилиты TXLine.
3. Собрать схемы и промоделировать.
4. Проанализировать полученные характеристики делителей мощностей и провести сравнение.

Таблица 4.1 – Варианты заданий на лабораторную работу

Вариант	ϵ_r	$f_0, ГГц$	h, мм	t, мм	n^2, m
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	1/2
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	1/3
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	1/2
15	3.38	2.5	1	0.017	1/2