

Лабораторная работа №1

Проектирование и моделирование двухзвенного делителя мощности

Цель работы: произвести расчет двухзвенного делителя мощности, на основании которого спроектировать топологию устройства в микрополосковом исполнении в САПР Microwave Office.

1. Общие сведения о делителях/сумматорах мощности

Для деления и суммирования мощности СВЧ, как правило, применяются пассивные обратимые устройства, имеющие достаточно простую конструкцию, высокую надежность, низкую стоимость, малые габариты и удобные в эксплуатации. Такие устройства в силу принципа взаимности могут быть использованы в качестве как делителей, так и сумматоров мощности СВЧ. В зависимости от схемы делитель СВЧ обеспечивает равное и неравное деление мощности на два и более каналов. Делители и сумматоры находят широкое применение в фазированных антенных решетках, мощных передатчиках для сложения мощностей генераторов, в усилителях, в многоканальных системах и т. д.

К делителям и сумматорам мощности могут предъявляться самые разнообразные требования, которые определяются их применением. Делители мощности фазированных антенных решеток должны обеспечивать в выходных плечах заданное амплитудно-фазовое распределение, которое формирует требуемую диаграмму направленности решетки. При построении широкополосных транзисторных усилителей мощности применяются квадратурные делители и сумматоры, выполняющие наряду с функциями деления (суммирования) функции согласования отдельных каскадов усилителя с генератором и друг с другом. Сумматоры мощности нескольких генераторов должны иметь возможность синхронизировать генераторы таким образом, чтобы обеспечить синфазное сложение их мощностей в нагрузке. Делители и сумматоры мощности должны иметь приемлемое согласование в полосе частот и необходимую развязку между каналами. Существенными

являются также массогабаритные параметры этих устройств, показатели надежности, стоимости и др.

Делители могут быть выполнены на основе последовательных или параллельных схем. Выбор того или иного схемного решения производится исходя из технических требований к устройству, с учетом технологических возможностей их реализации.

Делитель мощности последовательного типа является одним из наиболее простых делителей на гладких переходах (рис. 1.1)

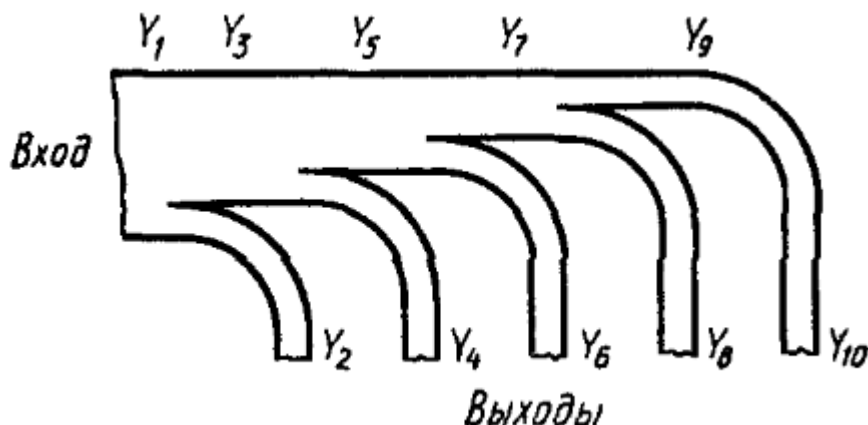


Рисунок 1.1 – Топология делителя мощности на основе гладких переходов

Условие согласования такого делителя $Y_i = Y_{i+1} + Y_{i+2}$, где Y_i – волновые проводимости соответствующих линий. Распределение мощности зависит от соотношения волновых проводимостей выходных линий передачи. В частности, равномерному распределению мощности соответствует $Y_2 = Y_4 = Y_6 = Y_8 = Y_{10}$ ($Y_9 = Y_{10}$). Для согласования на входе и выходах этого делителя могут быть включены трансформирующие четвертьволновые секции. Недостатком делителя на основе гладких переходов является низкое переходное затухание между каналами (развязка).

Простейшей схемой параллельного типа является сумматор мощности, выполненный в виде многолучевой звезды. На рис. 1.2 показана схема сумматора, входные и выходные плечи которого имеют равные волновые сопротивления Z_0 . Согласование осуществляется с помощью четвертьволнового отрезка линии передачи, волновое сопротивление которой

$Z_1 = Z_0 / \sqrt{N}$, где N – число входных плеч. Развязка (дБ) определяется числом входных плеч:

$$C = 10 \cdot \lg \left[\frac{(1 - N^{-2})}{(2 \cdot N - 1)} \right] \quad (1)$$

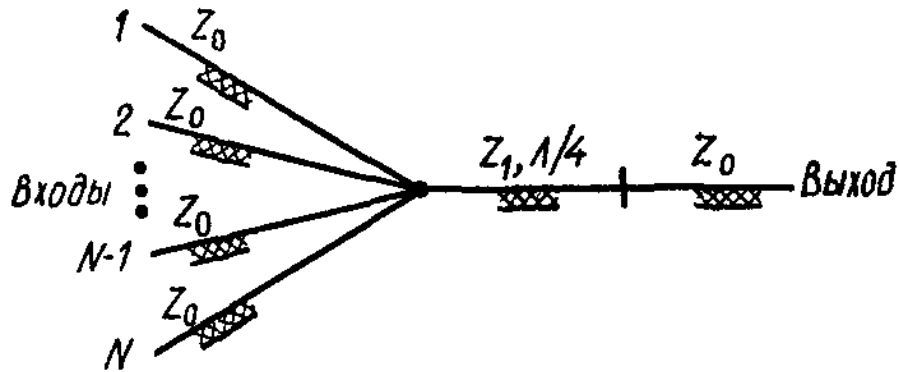


Рисунок 1.2 – Электрическая схема сумматора мощности в виде многолучевой звезды

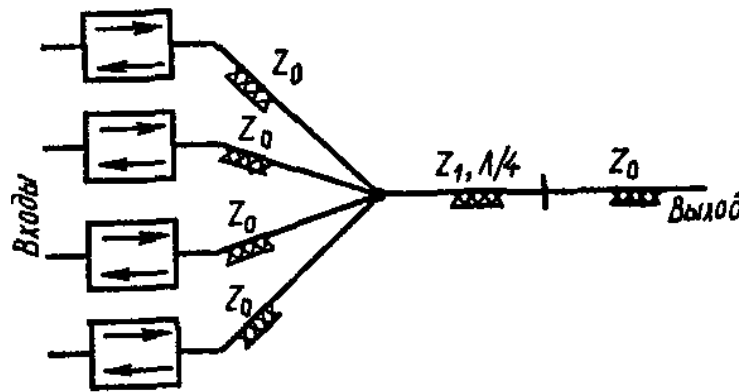


Рисунок 1.3 – Схема сумматора с вентилями

Во многих случаях развязка (1) оказывается недостаточной, поэтому к выходным плечам сумматора подключаются вентили (рис. 1.3). Это приводит к возрастанию габаритов и массы устройства, но в то же время вентили защищают каналы от воздействия отраженных волн при возможных изменениях нагрузки на выходе.

Кольцевые делители мощности (рис. 1.4). Согласование входа и выходов в этих устройствах достигается подбором волновых сопротивлений четвертьволновых отрезком микрополосковых линий (МПЛ), которые в случае равного деления мощности имеют значение $Z_1 = \sqrt{2} \cdot Z_0$.

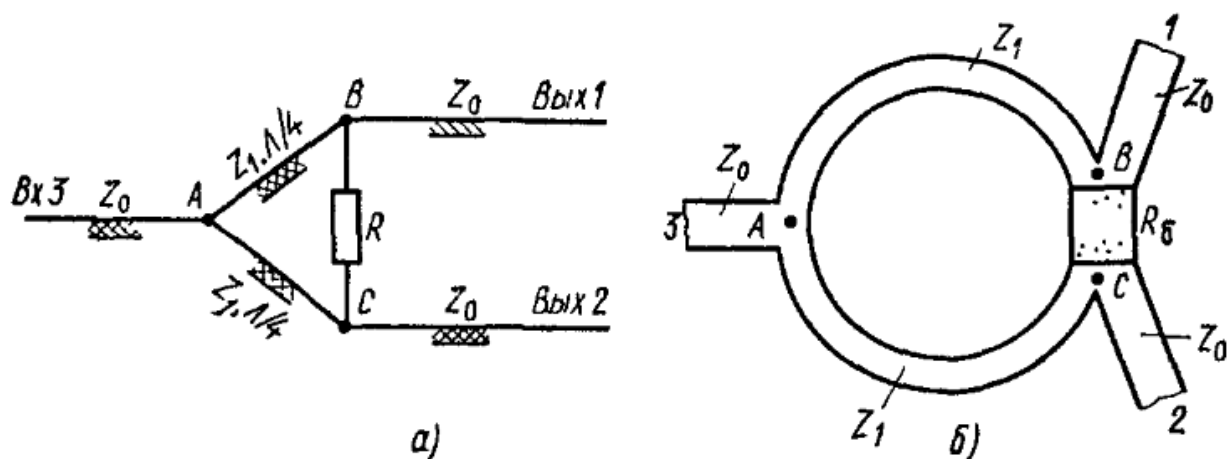


Рисунок 1.4 – Электрическая схема (а) и топология (б) однозвенного кольцевого делителя мощности

При возбуждении делителя со входа 3 вследствие его электрической симметрии точки В и С оказываются эквипотенциальными. Ток через балластный резистор R_b не протекает, и мощность в нем не выделяется. Вся мощность генератора делится пополам и передается в нагрузки, подключенные к выходным плечам 1 и 2. При возбуждении делителя со стороны одного из выходных плеч, например с выхода 1, сигнал в точку С приходит по двум путям: через четвертьволновые отрезки (путь В-А-С) и через резистор R_b (путь В-С). Разность фаз сигналов, прошедших пути В-А-С и В-С, равна 180° . Сопротивление балластного резистора $R_b = 2Z_0$ обеспечивает равенство амплитуд указанных противофазных сигналов. Таким образом, напряжение в точке С равно нулю, а мощность сигнала, поступающего на выход 1, частично гасится в балластном резисторе, частично поступает во входное плечо 3. На средней частоте рабочего диапазона кольцевой делитель мощности имеет идеальное согласование и бесконечную развязку выходных плеч. Если плечи 1 и 2 возбуждаются одновременно противофазными сигналами равной амплитуды, то в точке А эти сигналы складываются в противофазе и во входное плечо мощность не передается. Вся мощность гасится в балластном сопротивлении. При возбуждении выходных плеч синфазными сигналами мощность передается

на вход. Кольцевой делитель мощности является своеобразным фильтром противофазных сигналов.

Развязка выходных плеч кольцевого делителя с равным делением мощности составляет 20 дБ в полосе частот с коэффициентом перекрытия диапазона 1,44 при КстУ не более 1,2. Вносимое затухание при этом изменяется от 3,01 до 3,08 дБ. В реальных устройствах (из-за влияния технологических отклонений, неоднородностей и рассогласования) развязка выходных плеч обычно не превышает 30 дБ.

В ряде случаев широкополосность кольцевых делителей оказывается недостаточной. Более широкий диапазон рабочих частот по сравнению с однозвенными имеют многозвенные делители (рис. 1.5). Характеристики одно- и двухзвенного делителей приведены для сравнения на рис. 6 как функции от аргумента l/λ (l – длина линии, λ – длина волны в линии). В практических устройствах число звеньев обычно не превышает четырех. Расчет таких делителей проводится по справочным данным.

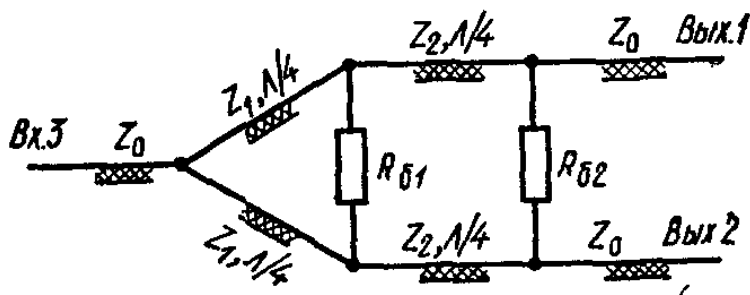


Рисунок 1.5 – Электрическая схемы двухзвенного делителя мощности

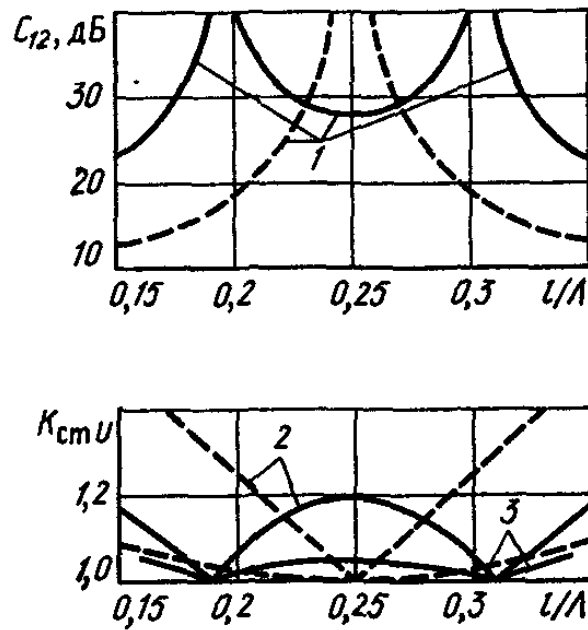


Рисунок 1.6 – Характеристики однозвенного (штриховые линии) и двухзвенного (сплошные линии) делителей мощности: 1 – развязка (S_{12}), 2 – K_{ctU} на входе, 3 – K_{ctU} на выходе.

Кольцевые делителя могут осуществлять неравное деление мощности (рис. 1.7). На входе и выходах делителя включены четвертьволновые трансформирующие секции с волновыми сопротивлениями $Z_1, Z_2, \dots, Z_5$. Если P_1 – мощность на выходе 1, P_2 – мощность на выходе 2, то по заданному отношению выходных мощностей $n_2 = P_2/P_1$ можно определить волновые сопротивления и балластный резистор делителя мощности:

$$Z_1 = Z_0 \sqrt[4]{n/(1+n^2)}, Z_2 = Z_0 \sqrt[4]{n^3/(1+n^2)},$$

$$Z_3 = Z_0 \sqrt[4]{(1+n^2)/n^5},$$

$$Z_4 = Z_0 \sqrt{n}, Z_5 = Z_0 \sqrt{n},$$

$$R_6 = Z_0(1+n^2)/n$$

На рис. 1.7 показана простейшая схема параллельного N -канального сумматора мощности. Волновые сопротивления четвертьволновых согласующих секций определяются исходя из заданных значений суммируемых мощностей. Схема обеспечивает согласование и развязку генераторов на средней частоте рабочего диапазона. Частотные свойства сумматора по мере увеличения числа каналов ухудшаются. Существенным

недостатком подобных сумматоров является трудность их реализации методами интегральной технологии, что обусловлено непланарностью схемы. Преодолеть эту трудность можно, например, используя конструктивное решение, при котором многолучевая звезда из линий передачи и звезда сопротивлений располагаются в двух разных плоскостях.

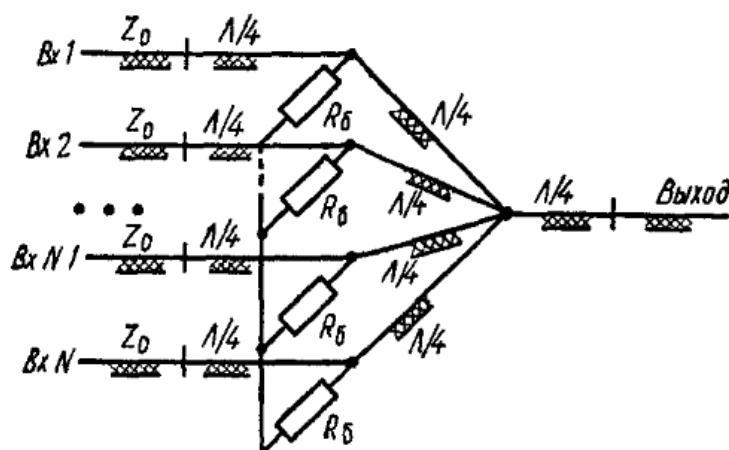


Рисунок 1.7 – Электрическая схема параллельного N-канального сумматора мощности

Наиболее полно требованиям интегральной технологии удовлетворяют планарные многоканальные сумматоры, содержащие незамкнутые цепочки балластных резисторов (рис. 1.8). Применение многозвенных структур такого типа позволяет получать хорошее согласование и необходимую развязку. Трехканальный двухзвенный сумматор с незамкнутой цепочкой балластных резисторов имеет октавную полосу рабочих частот.

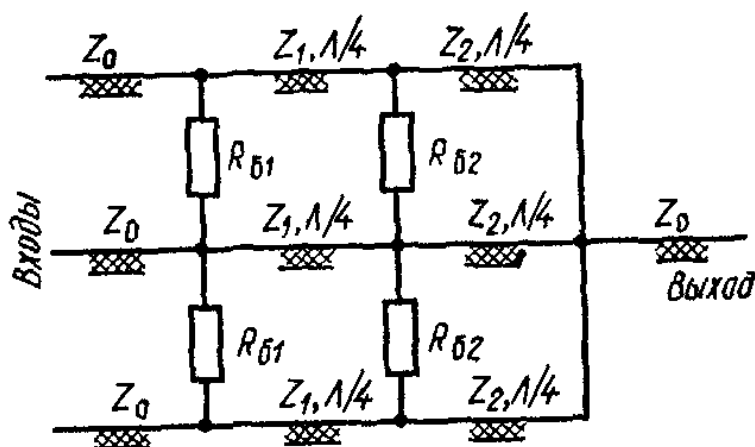


Рисунок 1.8 – Схема трехканального сумматора, содержащего незамкнутые цепочки балластных резисторов

2. Расчет двухзвенного делителя мощности

Основные параметры рассчитываемого делителя:

S_{11} , S_{22} , S_{33} – коэффициенты отражения на соответствующих портах устройства;

S_{12} – коэффициент развязки между двумя плечами 2 и 1;

S_{21} – коэффициент развязки между двумя плечами 1 и 2;

S_{31} – коэффициент передачи мощности из плеча 1 в плечо 3;

S_{32} – коэффициент передачи мощности из плеча 2 в плечо 3.

Порядок выполнения работ

1. Создание нового проекта

1.1. Выберите в меню **File > New Project**.

1.2. Сохраните файл в меню **File > Save Project As > Save As**.

1.3. Выберите в меню **Options > Project Options**.

1.4. В окне **Frequencies** задайте начальное и конечное значение частоты (start = 0 ГГц; stop=2 ГГц), а также шаг (step =0.01 ГГц). В окне **Global Units** в поле **Frequency** введите **GHz**, в поле **Length type** введите **mm**, и нажмите **OK**.

2. Делитель мощности в электрическом базисе.

2.1. Создание подложки

В окне просмотра проекта дважды щелкните по **Global Definitions**, чтобы открыть окно глобальных переменных (рис. 2.1). В данном окне можно создать подложку, которая будет распространяться на все последующие схемы. Для этого в панели навигации откройте вкладку **view > Element Browser**. В открывшемся меню элементов выберите вкладку **Circuit Elements > Substrates > подложка MSUB**, установите подложку и задайте значения так, как показано на рисунке 2.

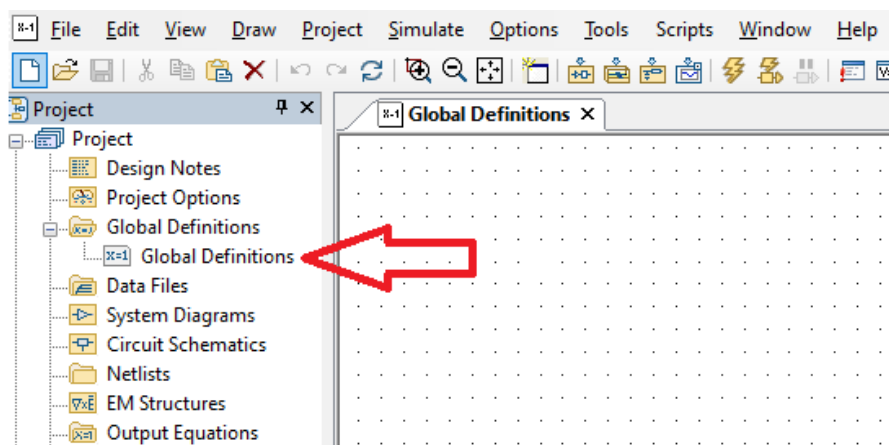


Рисунок 2.1. окно **Global Definitions**.

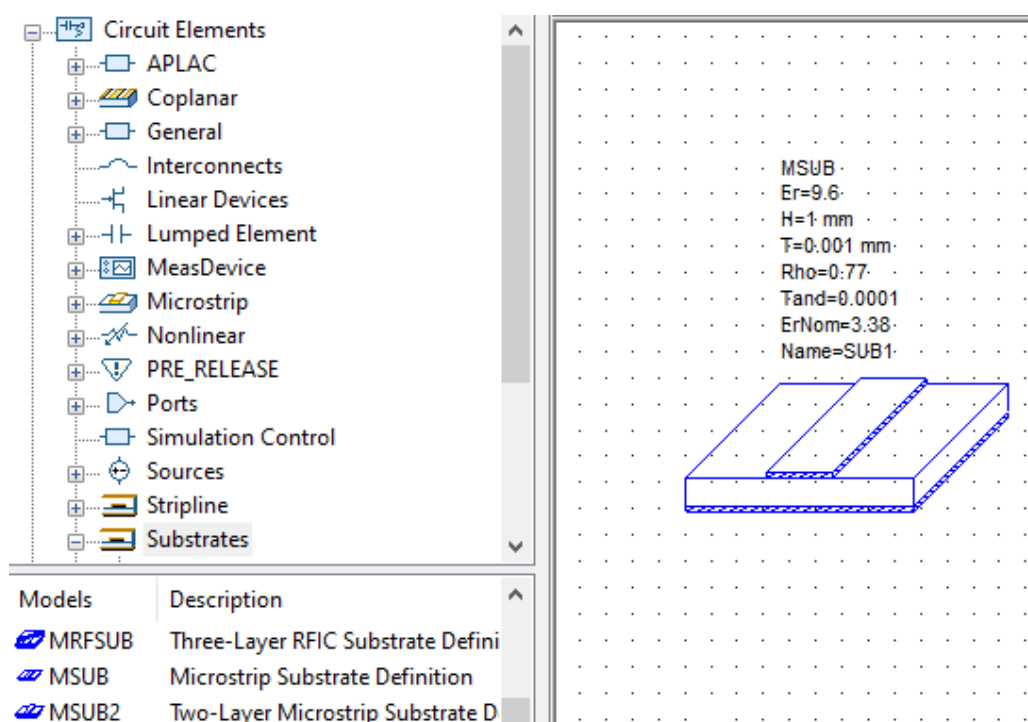


Рисунок 2.2. Размещение подложки **MSUB**.

2.2. Схема в электрическом базисе

Далее необходимо собрать схему в электрическом базисе, представленную на Рисунок 2.3. Откройте в меню **Project > Add Schematic > New Schematic**. Установите элементы на схему **View> Elements Browser > Circuit Elements > Transmission Lines > Phase** и выберите элемент **TLIN** (TLIN – идеальная линия без потерь). Аналогично выберите элемент **View> Elements > Circuit Elements > Lumped Element > Resistor > Res**. Быстрый поиск элементов можно осуществить при помощи окна **Element** на рабочей

панели, а справа располагается окно для установки портов – **Port** (Рисунок 2.4).

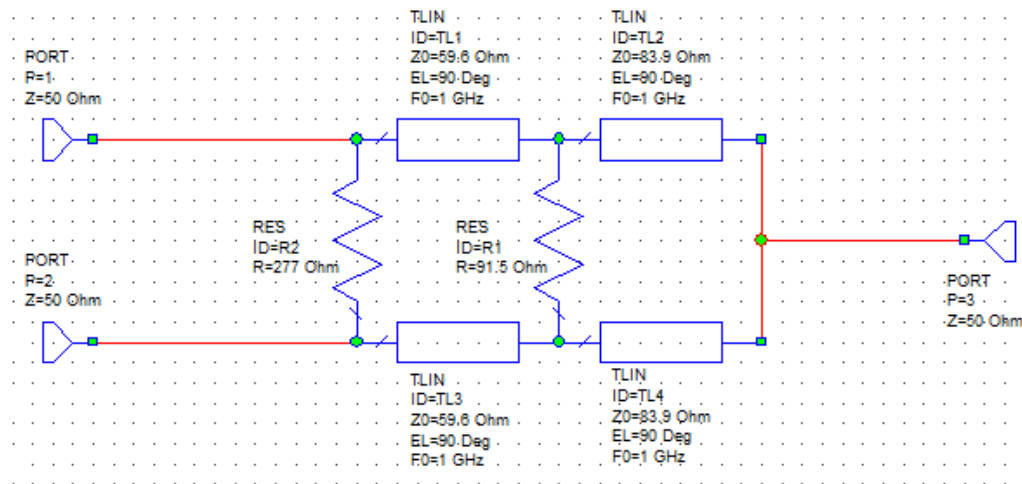


Рисунок 2.3. Схема в электрическом базисе.

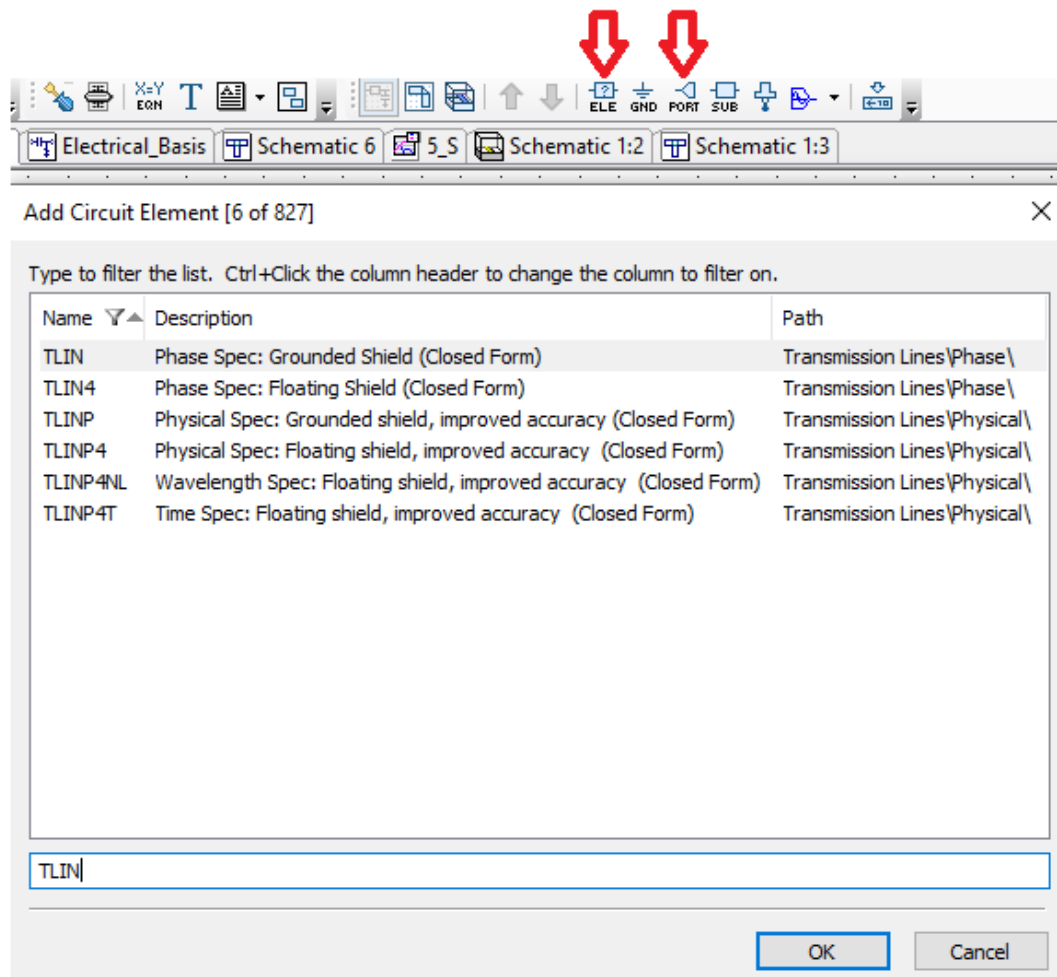


Рисунок 2.4. Быстрый поиск элементов.

Задайте значения параметров элементов согласно Рисунок 2.3.

Чтобы изменить значение элемента, щёлкните двойным нажатием ЛКМ по изменяемому значению и введите значения см. Рисунок 2.3.

2.3 Графики и их анализ

Для создания графиков зайдите во вкладку **Project > Add Graph >** выберите тип **Rectangular** и нажмите **Create**. Чтобы построить график S – параметров (

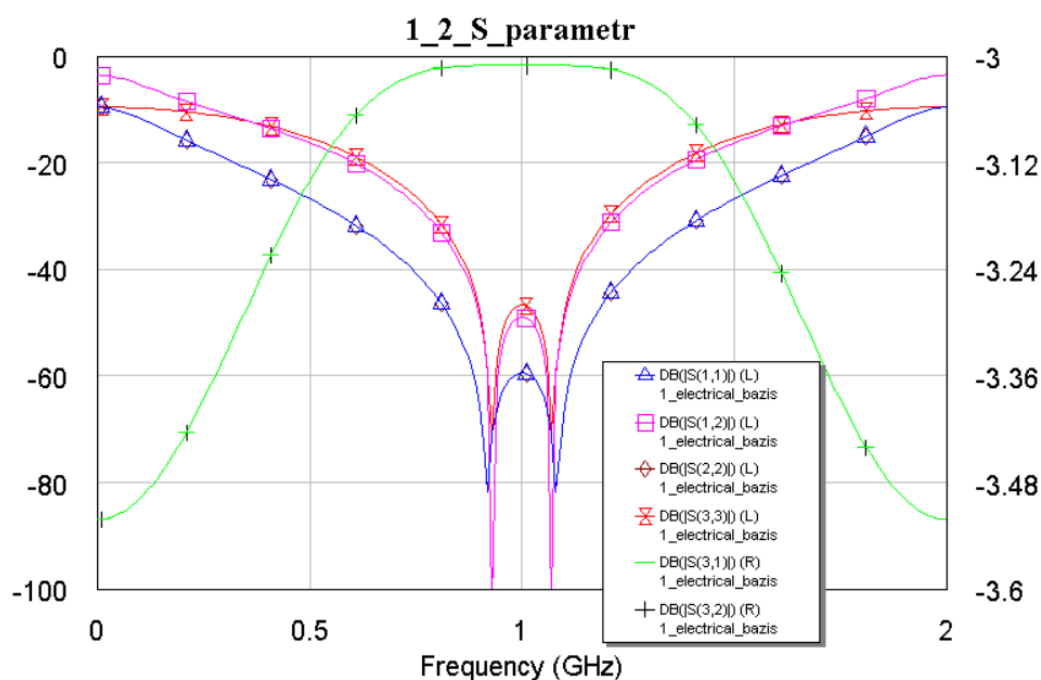


Рисунок 2.6) **Project > Add Measurement > Linear > Port parameters** в окне **Measurement > S**.

В окне **Data Source Name** выберите схему электрического базиса, после задайте входной и выходной порты **To Port Index (1), From Port Index (1) > Add**, поставьте галочку в окне **dB**. Повторите вышеуказанные действия для пар портов: (2,1), (2,2), (3,1), (3,3). После нажмите на значок **Analyze (F8)**. Для изменения масштаба по осям координат, нужно щёлкнуть ПКМ по графику **options** и в панели **Axes** выбрать ось **x**. Далее, необходимо убрать галочку **Limits > Auto limits** и задать необходимые значения Рисунок 2.5, в панели **Measurements** выберите графики **S(3.1) → Right 1**, повторите действие для графика **S(3.2)**.

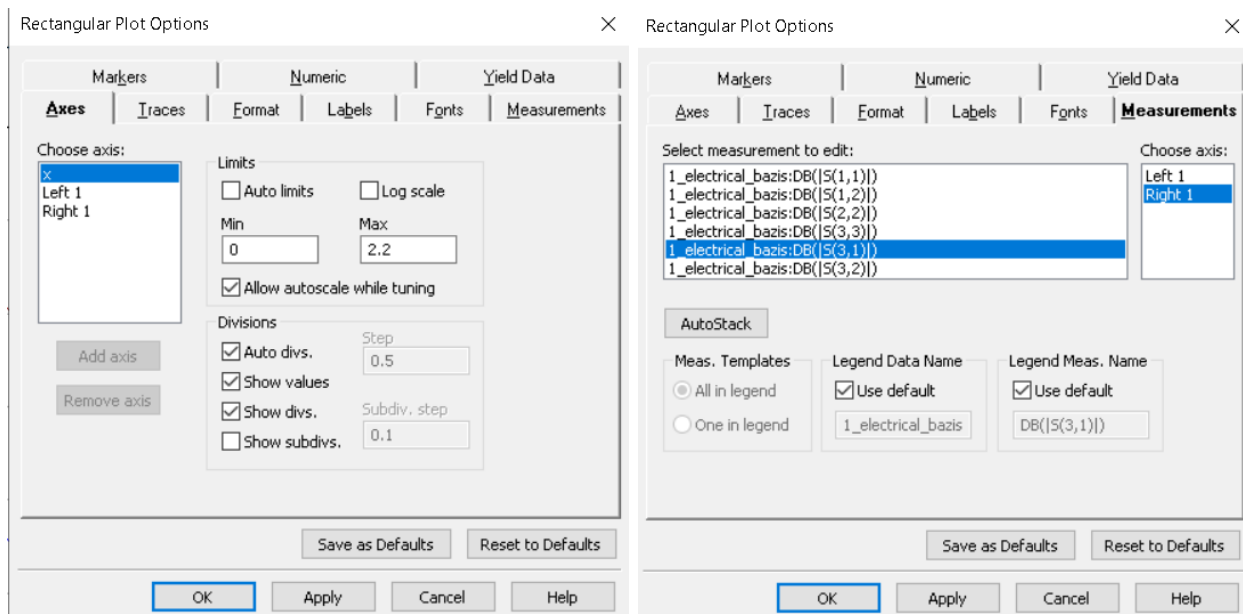


Рисунок 2.5. Масштабирование и добавление новой оси

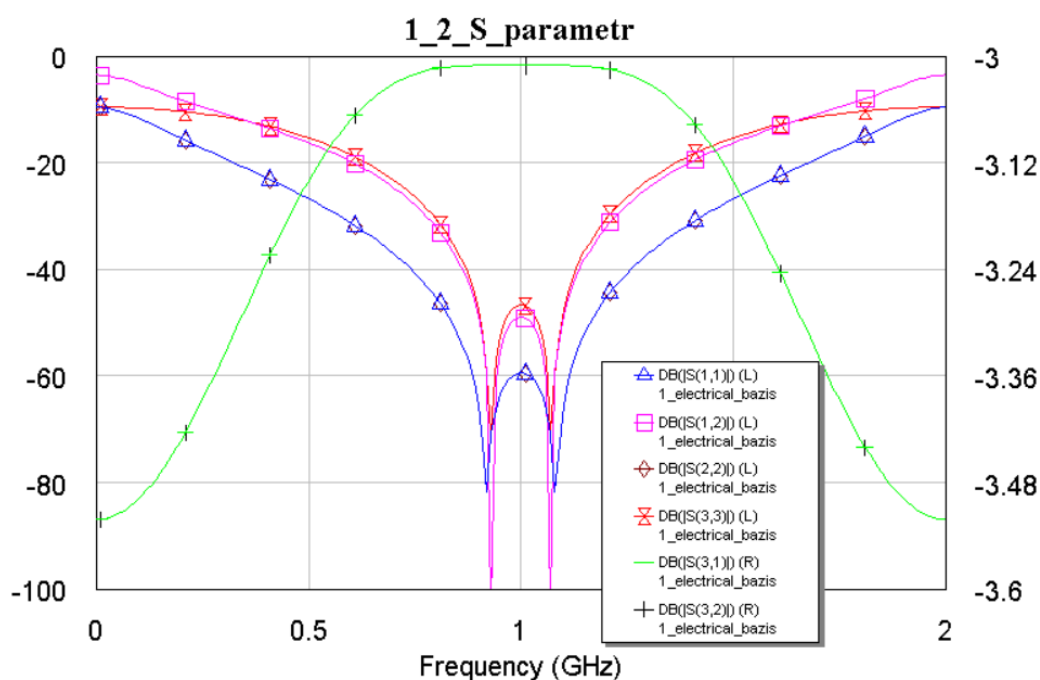


Рисунок 2.6. График S – параметров (dB).

Чтобы построить график KCB (Рисунок 2.7), аналогично создайте новый график, затем: **Project > Add Measurement** на панели **Measurement Type** выберите **Linear**, на панели **Measurement** выберите **VSWR**.

На панели **Data Source Name** выберите схему электрического базиса, после задайте входной и выходной порты **Port Index (1) > Add**. Повторите

вышеуказанные действия для портов (2), (3). После нажмите на значок **Analyze (F8)**.

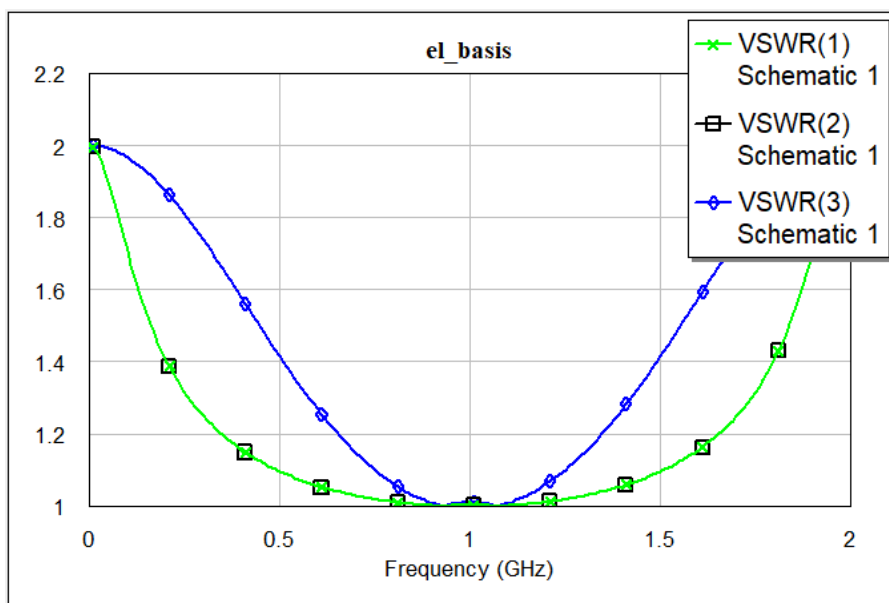


Рисунок 2.7. КСВН

3. Переход из электрического базиса в геометрический

В геометрическом базисе элементу RES соответствует элемент TFR2. TFR2 – это модель напылённого на подложку тонкоплёночного резистора. Более подробно об элементе TFR2 (как и обо всех других элементах схемы) можно узнать, щелкнув по элементу ПКМ → **Help**. Для перевода элементов RES из электрического базиса в геометрический (TFR2), постройте схему, представленную на Рисунок 2.8.

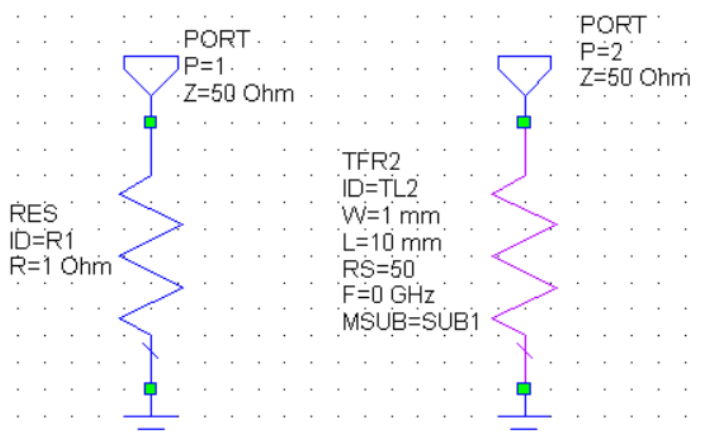


Рисунок 2.8. Схема для перевода резистора из электрического базиса в геометрический

Далее постройте характеристики входных сопротивлений резисторов, отдельно фиксируя значения длины, ширины и плотности напыления, изменяя ширину с помощью инструмента **Tune Tool** (Рисунок 2.9. Инструмент Tune Tool).

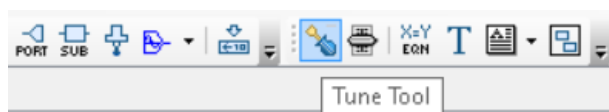


Рисунок 2.9. Инструмент Tune Tool

Для этого необходимо ввести значение сопротивления первого резистора из электрического базиса (**RES**). Чтобы определить значения (**TFR2**) используйте инструмент **Tune Tool**. Нажмите ЛКМ по **Tune Tool** и ЛКМ по варьируемым значениям длины (L), ширины (W) и плотности напыления (RS). Указанные элементы после воздействия функции **Tune Tool** будут подсвечены, синим цветом.

Для входных сопротивлений создайте новый график. **Project > Add Measurement** на панели **Measurement Type** выберите **Linear**, на панели **Measurement** выберите **ZIN**. На панели **Data Source Name** выберите схему резисторов, после задайте порты (1 и 2) **Port Index > Add** и постройте график (F8). В панели инструментов выберите **Tune** (Рисунок 2.10).

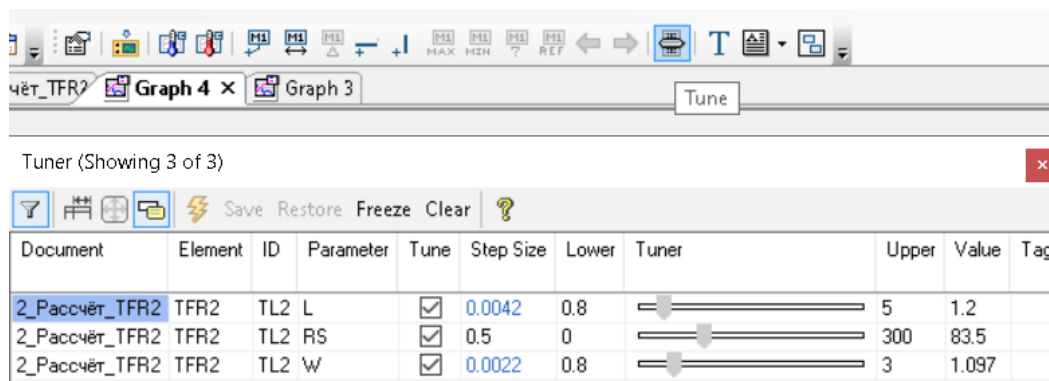


Рисунок 2.10. Инструмент **Tune**.

Варьируя значениями длины (L), ширины (W) и плотности напыления (RS), добейтесь максимального совпадения графиков (рис .2.11).

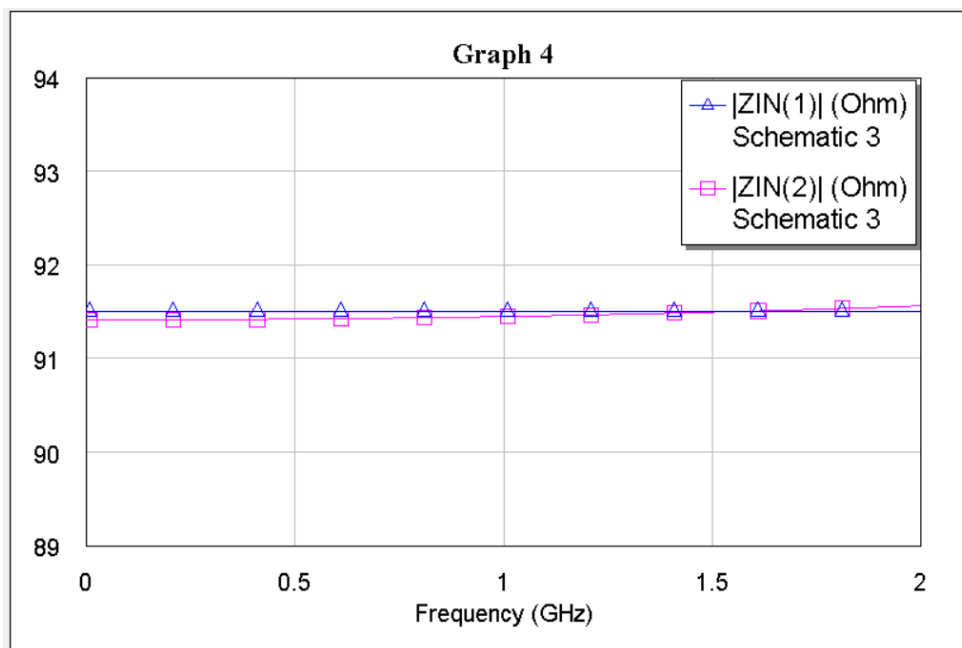


Рисунок 2.11. Входные сопротивления резисторов **RES** и **TFR2**.

Для перевода элементов **TLIN** из электрического базиса в геометрический, перейдите во вкладку **tools** на панели инструментов и откройте программу **TXLine**.

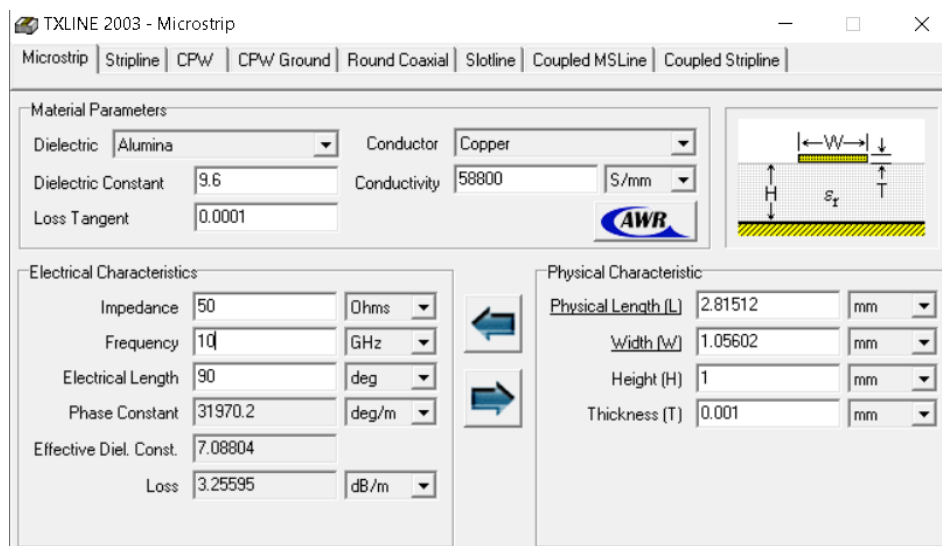


Рисунок 2.12. TXLine.

На панели Electrical Characteristics введите значение частоты, соответствующее вашему варианту, и значения импеданса элементов TLIN из вашей схемы в электрическом базисе. Остальные параметры оставьте по умолчанию, как показано на Рисунок 2.12. При нажатии на → на панели Physical Characteristic появятся геометрические размеры микрополосковой линии передачи. Переведите в геометрический базис все элементы TLIN вашей схемы.

Соберите схему в геометрическом базисе, аналогичную схеме на Рисунок 2.15.

Элемент **MTEE** представляет собой тройник, позволяющий присоединять элементы с разной шириной (W_1 , W_2 , W_3).

Элемент **MLIN** (микрополосковая линия) соответствует элементу **TLIN** в геометрическом базисе. Параметрами элемента **MLIN** является ширина (W) и длина (L).

Для удобства записи значений в элементы используется инструмент **Equation** (Рисунок 2.13). Он позволяет записать значения параметров в виде переменных.

Полученные значения в пункте 3.1. запишите в виде переменных, как показано на Рисунок 2.14. Пример значений для геометрического базиса. .

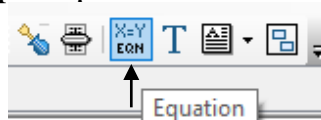


Рисунок 2.13 Equation.

		Wr1=0.8	Wr2=1.097
L1=29.8902	L2=30.6165	Lr1=0.8	Lr2=1.2
W1=0.672429	W2=0.260856	RS1=278.5	RS2=83.5

Рисунок 2.14. Пример значений для геометрического базиса.

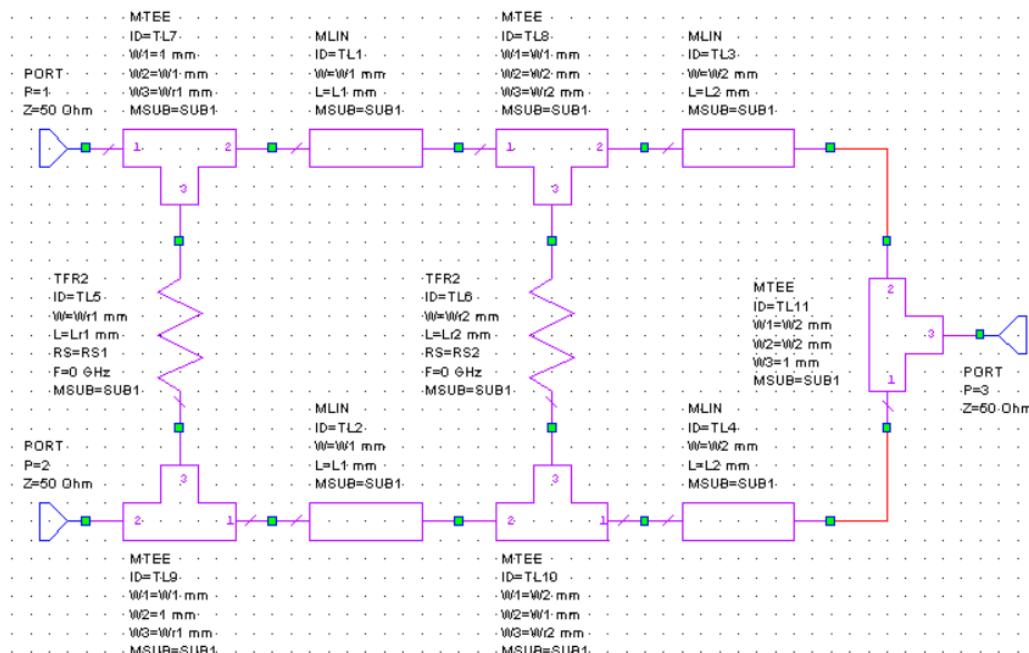


Рисунок 2.15. Схема в геометрическом базисе.

Расстояние между микрополосковыми линиями TL1, TL2 и TL3, TL4 слишком мало (рис. 2.16), что приводит к взаимному влиянию линий друг на друга и искажению характеристик устройства.

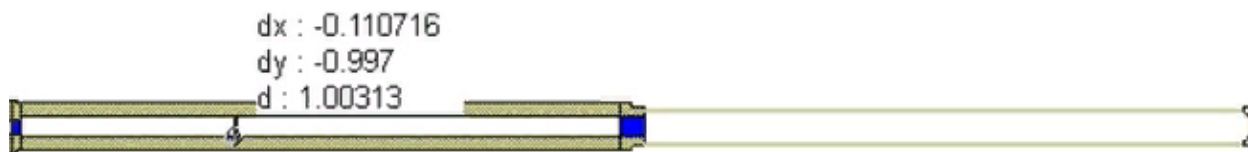


Рисунок 2.16. Топология схемы в геометрическом базисе.

Чтобы увеличить это расстояние, нужно разбить и изогнуть все элементы типа MLIN, как показано на рис 2.17. Сумма длин элементов схемы после разбиения равна длине элемента MLIN в схеме до разбиения.

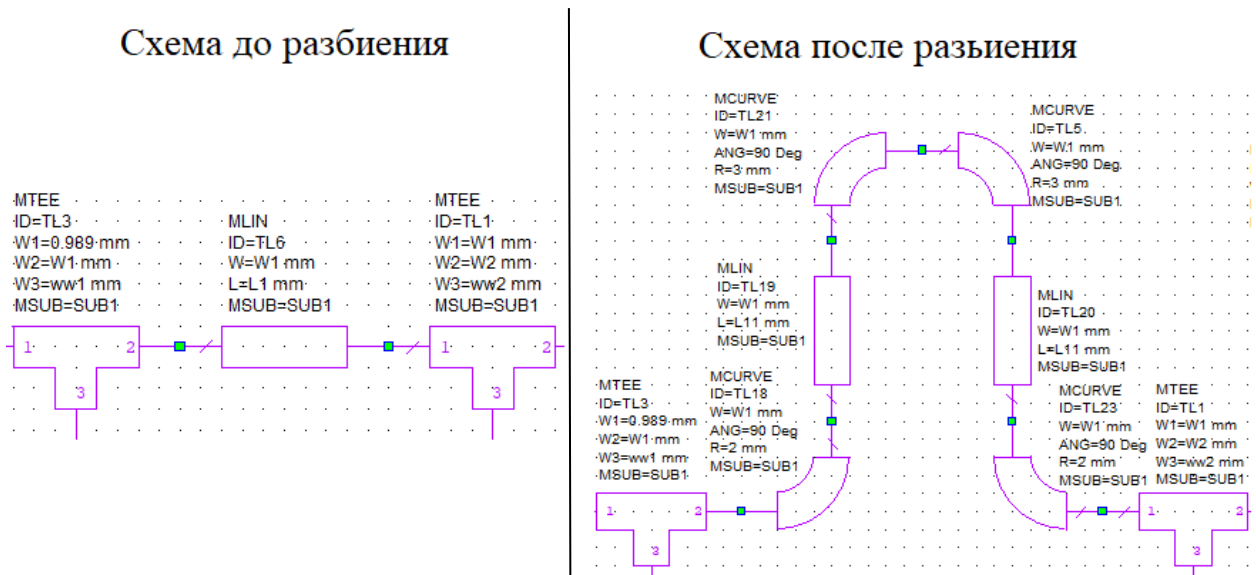


Рисунок 2.17. Элемент MLIN до и после разбиения.

Задайте значение радиуса элемента **MCURVE** $R=2.5$ мм. Данное значение идентично для всех элементов **MCURVE** в схеме, за исключением выходных изгибов (см. Рисунок 2.18). Чтобы посчитать длину элементов **MLIN**, находящихся в изгибах, необходимо из длины исходного **MLIN** вычесть длину изгибов **MCURVE**.

$$L' = \frac{L - 2\pi R}{2};$$

Сформируйте подводящие к устройству линии. На вход и выход полученной схемы добавьте элементы **MLIN** с размерами соответствующими волновому сопротивлению 50 Ом и длиной, необходимой для вывода портов на край подложки. Для данного случая $L = 5$ мм, $W = 0.989$ мм. Данные элементы необходимы для подключения разъемов к схеме. В этой же схеме добавьте элементы **MCURVE** для перехода между **MLIN** и **MTEE**, как показано на рис 2.18.

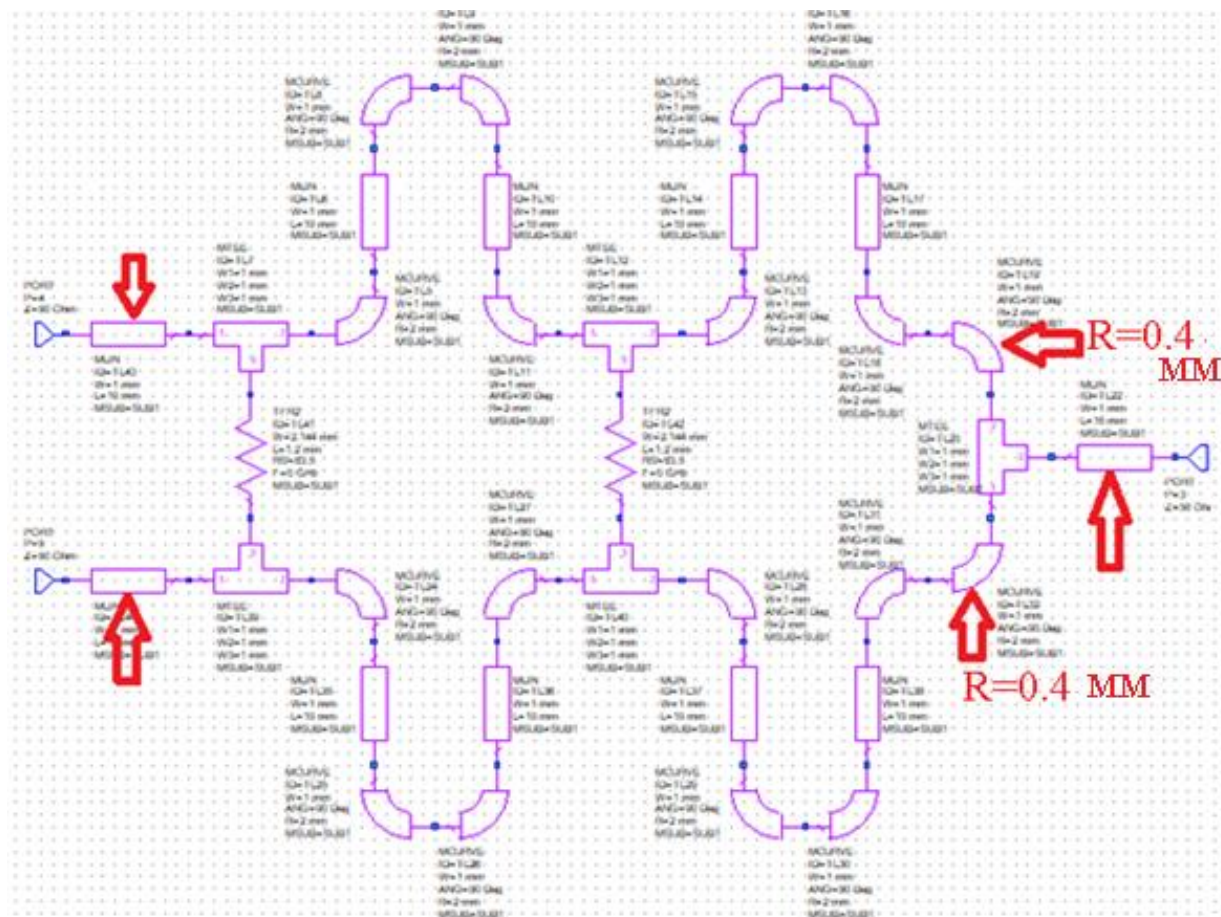


Рисунок 2.18. Схема в геометрическом базисе с подводящими к устройству линиями

Далее требуется разбить входные элементы **MLIN**, как показано на рисунке 2.19. Это необходимо, чтобы получить достаточное **расстояние** L_m между элементами для подключения разъемов. Радиус элементов **MCURVE** останется прежним ($R=2.5$ мм), а угол нужно взять равным $ANG=45$ Deg. Длина полученных элементов **MLIN** равна $L_{123} = 5$ мм, $L_{45} = 10$ мм $W = 0.989$ мм.

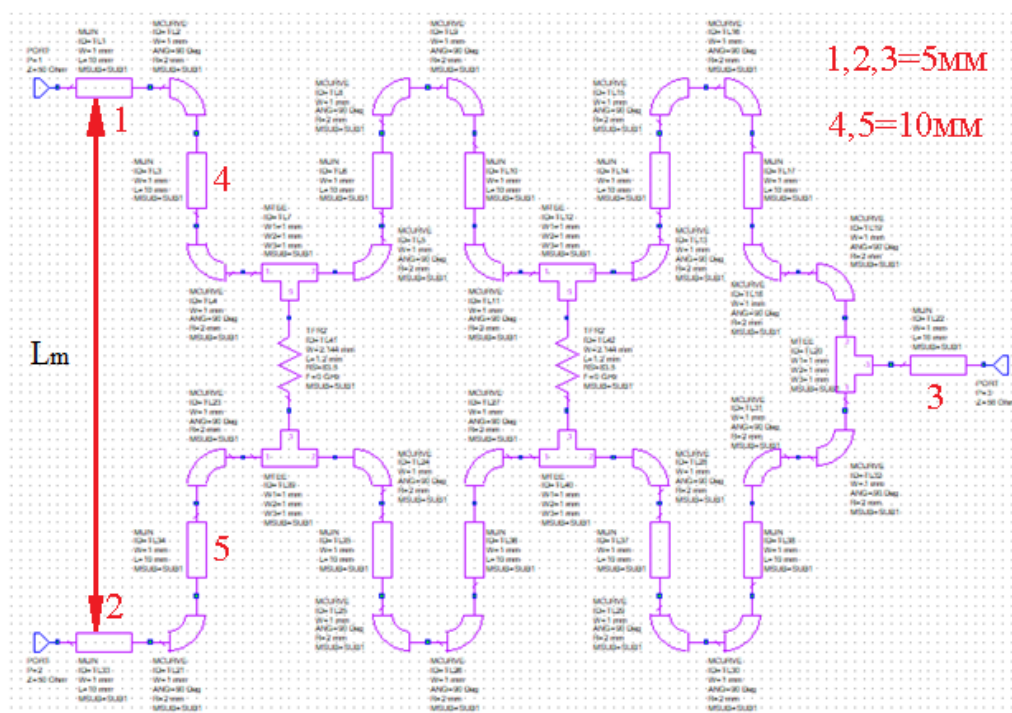


Рисунок 2.19. Схема в геометрическом базисе с разбиением входных линий

4. Топология устройства

4.1. Режим макета

Для перехода в режим макета на панели инструментов перейдите во вкладку **View > View Layout**. В режиме макета схема будет беспорядочно разбита на элементы. Связи между элементами отображаются красной линией. Для соединения элементов схемы выделите элементы (Ctrl+A) и нажмите на значок  , получим см. Рисунок 2.21.

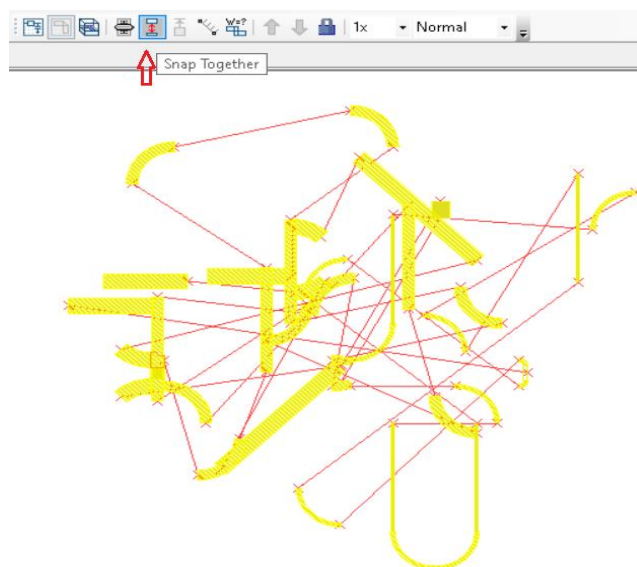


Рисунок 2.20. Snap Together

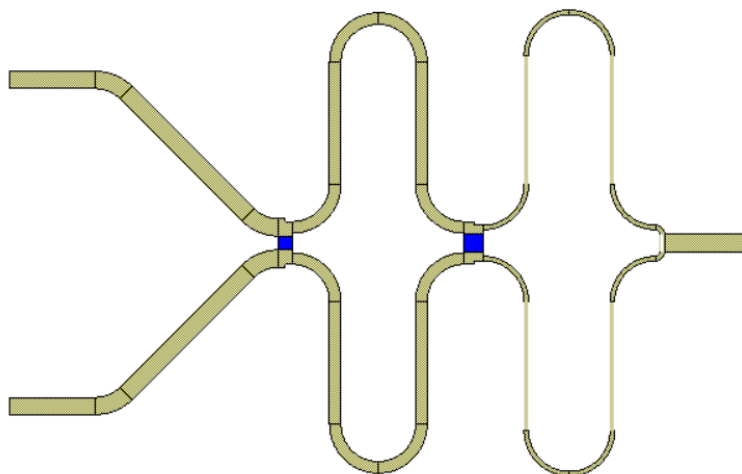


Рисунок 2.21. Собранная схема в режиме макета

4.2. Установка схемы на подложку.

Для создания контура подложки в нижнем меню выберите **Rectangle**, в области элементов зажмите **ЛКМ** + **ТАВ** отредактируйте подложку под

размеры схемы так, чтобы расстояние от края подложки до схемы (по ширине) было равно пяти толщин подложки, для удобства используйте линейку (**CTRL+D**), в открывшемся окне введите размеры соответствующие вашей подложке. Для выбора платы нажмите **ПКМ** по подложке **Shape Properties** в появившемся окне **Layout > Layer Settings > Draw Layers** выберите слой Board (Рисунок 2.22).



Рисунок 2.22. Установка слой

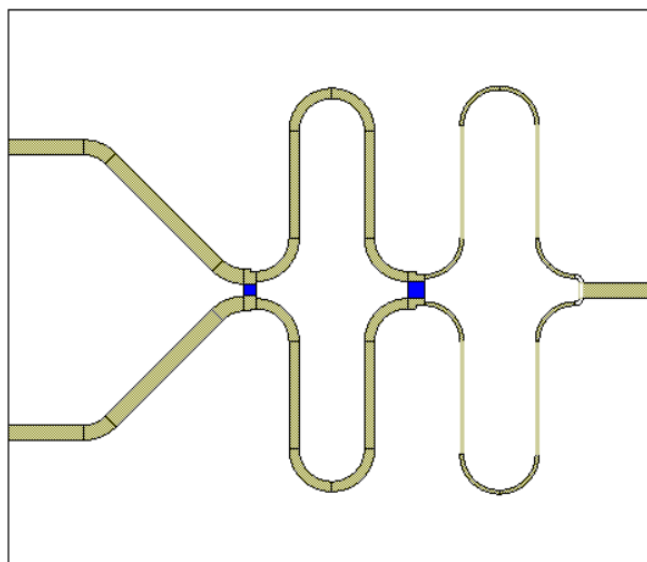


Рисунок 2.23. Двухзвенный делитель мощности, установленный на подложку