Филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования
«Национальный исследовательский университет «МЭИ»
в г. Смоленске

Методическое обеспечение дисциплины

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ УСТРОЙСТВ МИКРОВОЛНОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

(НАИМЕНОВАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ)

Смоленск – 2023 г.

Методические материалы составил:
Доцент кафедры
«Электроники и микропроцессорной техники»

Канд. техн. наук, доцент _____ Строев Николай Николаевич
подпись ФИО

«12» января 2023 г.

Заведующий кафедрой «Электроники и микропроцессорной техники**»:**

_____ Якименко Игорь Владимирович
подпись ФИО

«08» февраля 2023 г.

1. Методическое обеспечение лекций

Цель лекций – изучение понятийного аппарата, основных теоретических положений и методов изучаемой дисциплины, необходимых для освоения закрепленных компетенций.

1. Комплект лекций, в формате PDF, расположен на сайте кафедры по ссылке:

https://drive.google.com/drive/folders/1xprIRdT4PEGo-JAQpbpNRcVKMOYj1hhs

Пример лекций, в формате PDF:

Тема 3. Материалы и структуры устройств микроволновой электроники

Выбор материалов и структур для проектирования устройств микроволновой электроники. Типовые структуры планарных волноводных структур и их параметры. Средства и методики расчета параметров микрополосковых узлов для передачи волновых сигналов.

В первую очередь, познакомимся с материалами, которые используются при создании устройств микроволновой электронике и уточним требования по отбору материалов по их справочным характеристикам. Учитывая настоящее положение с необходимостью импортозамещения, акцент будет сделан на отечественные материалы, доступные к использованию.

Начнем с диэлектрических материалов, из которых делается основа печатной платы или подложки, разделительные слои. Условия эксплуатации диэлектриков определяются эксплуатационными требованиями предъявляемые к радиоэлектронной аппаратуре. Диэлектрические материалы в полосковых линиях используются в качестве среды для распространения СВЧ-энергии и как элемент конструкции, поддерживающей электрическую схему, расположенную на ее поверхности. СВЧ-диэлектрические материалы для основании полосковых плат изготавливаются из листов или плоских пластин с габаритными размерами до 500х550 мм и толщиной от 0.1 до 15,0 мм. При разработке и проектировании устройств на полосковых линиях передачи необходимо пользоваться соответствующей технической документацией.

При изготовлении микросхем СВЧ большое значение имеет чистота обработки поверхности диэлектрических материалов, т.к. с увеличением неоднородности поверхности увеличиваются потери передачи энергии. Для оснований полосковых плат СВЧ-диэлектрические материалы классифицируются по химической основе на органические и неорганические.

В качестве органической основы используются: неполярные полимеры (фторопласт, полиэтилен, полипропилен). полярные (полистирол, полифениленоксид и их сополимеры). Диэлектрические материалы на органической основе подвергаются армированию, наполнению и другим видам модифицирования для направленного изменения отдельных физико-технических параметров. Ненаполненные, наполненные, армированные органические материалы подразделяются на фольгированные и не фольгированные. Наполнение органических диэлектриков обычно производится тонкодисперсными или керамическими порошками, армирование производится стеклотканью. К диэлектрическим материалам на неорганической основе относятся ситаллы и различные виды керамики. В процессе изготовления полосковых плат не фольгированные органические и неорганические материалы подвергаются металлизации. Фольгирование органических материалов производится заводом-изготовителем в процессе изготовления материала. Традиционная классификация неорганических СВЧ-диэлектрических материалов приведена в табл. 1.1, органических — в табл. 1.2.

Для оснований полосковых плат выбор материалов производится по следующему перечню характеристик:

- способность сохранять форму и линейные размеры в различных климатических условиях и в процессе эксплуатации;
- чистота обработки поверхностей;
- допуск на размеры по толщине;
- состав (однородность);
- теплопроводность;
- электропроводность;
- диэлектрическая проницаемость;
- тангенс угла диэлектрических потерь.

Ниже приводится подробное описание приведенных характеристик. Так перечень СВЧ-диэлектрических материалов приведен в табл. 1.3, параметры и виды климатических испытаний — в табл. 1.4. Отбор материалов с необходимыми механическими характеристиками, диапазоном рабочих температур рекомендуется производить в соответствии с табл. 1.5.

Выбор величины относительной диэлектрической проницаемости производится из условия возможности реализовывать устройства СВЧ с необходимой степенью интеграции, миниатюризации. Далее производят оценку максимально возможного и допустимого отклонения величины относительной диэлектрической проницаемости, в пределах изменения которой выходные параметры устройства изменяются в допустимых пределах.

Выбранные материалы рассматривают по величине диэлектрических потерь и производят отбор материалов с соответствующим тангенсом угла диэлектрических потерь. Стабильность этого параметра создает предпосылки повторяемости выходных электрических характеристик полосковых устройств. Далее производят выбор материалов с требуемой толщиной. Толщина определяется величиной диэлектрической проницаемости, шириной проводников, передаваемой мощностью, рабочим диапазоном частот. Например, для устройств, работающих в диапазоне выше 10 ГГц и требующих высокой точности изготовления рисунка схемы, необходимо использовать диэлектрические материалы с величиной относительной диэлектрической проницаемости менее 7,25, что позволяет снизить требования по точности изготовления проводников схемы и уменьшить резистивные потери. Для уменьшения диссипативных потерь и потерь на отражение необходимо выбирать диэлектрический материал с поверхностью по такому классу обработки, при котором высота микронеровностей не должна превышать половины глубины проникновения поля в металл проводящих элементов.

Таблица 1.1 Диэлектрические материалы микрополосковых устройств

Наименование и марка	Диапазоны достигаемой шероховатости Rz, мкм	Относительная диэлектрическая проницаемость ε_r при частоте 10^{10} Гц	Тангенс угла диэлектрических потерь $tg\delta$	Характерные особенности
1	2	3	4	5
Керамика алюмооксидная с содержанием Al2O3 от 98 до 100 % марки ВК 100-1	от 0,100 до 0,025	до 9,8	до 1×10^{-4}	1. Предназначена для изготовления микросхем СВЧ повышенной точности, работающих в условиях повышенных температур. 2. Имеет высокую теплопроводность, высокую механическую прочность.
Керамика алюмооксидная с содержанием Al2O3 от 93 до 96 % марки ВК 94-1	до 0,063	до 10,3	до $1,5\times10^{-3}$	1. Предназначена для изготовления микросхем СВЧ повышенной точности, работающих в условиях повышенных температур. 2. Теплопроводность, механическая прочность ниже, чем у керамики марки ВК 100-1.
Керамика титанатная с содержанием TiO2 60-70 % марки БА-35	от 0,800 до 0,025	до 30±1,5	до 3×10^{-4}	1. Предназначена для изготовления деталей, применяемых в узлах и приборах радиоэлектронной аппаратуры и вычислительной техники, работающих в ВЧ- и СВЧ-диапазонах.
1	2	3	4	5
Керамика титанатная с содержанием TiO2 80-90 % марки МТ-60 и Т-90	от 0,800 до 0,025	до 90±1,5	до 4×10^{-4}	1. Предназначена для изготовления подложек интегральных схем РЭА, работающих в СВЧ-диапазонах.
Ситаллы				1. Предназначены для изготовления подложек микросхем и полосковых плат, работающих в СВЧ-диапазонах.
Марка СТ 32-1	от 0,040 до 0,020	10,0	$7,0\times10^{-4}$	
Марка СТ 38-1	от 0,100 до 0,050	7,2	$3,0\times10^{-4}$	
Марка СТ 50-1	до 0,040 от 0,020	8,5	$35,0\times10^{-4}$	

Таблица 1.2 Органические СВЧ-диэлектрические материалы микрополосковых устройств

Наименование	Марка	Состав: Связующее	Состав: Наполнитель	Способ металлизации поверхности	ε_r при частоте 5×10^{10} Гц	$tg\delta$ при частоте 5×10^{10} Гц	Характерные особенности
1	2	3	4	5	6	7	8
Неполненные							
Диэлен	Диэлен-2 Диэлен-4	Композиция полиэтилена низкого давления, облученная		Фольгирование прессованием в процессе изготовления медной гальваностойкой фольгой толщиной 0,050 мм	2,3±0,1	до 5×10^{-4}	1. Предназначена для изготовления СВЧ-плат больших габаритов, работающих в диапазоне температур от -60 до +80 °С 2. Допускает все виды механической обработки, стоек к действию агрессивных сред и органических растворителей. 3. Стабильность размеров при изготовлении плат удовлетворительна. 4. Температура пайки 140–170 °С.
Сополимер стирола с α-метилстиролом	САМ-ЭД	Сополимер стирола с α-метилстиролом		Фольгирование фольгой толщиной 0,035 или 0,050 мм и электрохимическая металлизация по ОСТ 4Г 0.054.008	2,5±0,10	до 5×10^{-4}	1. Предназначен для изготовления СВЧ плат повышенной точности. 2. Обладает стабильностью размеров при изготовлении плат, имеет склонность к растрескиванию при механических нагрузках, низкую теплостойкость, низкую стойкость к действию ароматических и хлорированных углеводородов. Допускает все виды механической обработки, но обладает хрупкостью. 3. Температура пайки до 140 °С.
1	2	3	4	5	6	7	8
Листы из фторопласта-4 фольгированные	ФФ-4	Фторопласт-4		Фольгирование прессованием в процессе изготовления фольгой толщиной 0,035 или 0,050 мм	2,0±0,10	до 3×10^{-4}	1. Предназначены для изготовления СВЧ-плат больших габаритов, не требующих высокой точности, работающих в условиях повышенных температур. 2. Допускают все виды механической обработки. Имеет высокую теплостойкость, инертен к действию ароматических и хлорированных углеводородов. 3. Отсутствует стабильность размеров при изготовлении плат. Процесс электрохимической металлизации требует специальной химической обработки поверхности. 5. Температура пайки до 260 °С.
Наполненные							
Диэлектрик фольгированный ФЛАН	ФЛАН-2,8 ФЛАН-3,8 ФЛАН-6,0 ФЛАН-7,2 ФЛАН-10,0 ФЛАН-16,0	Полифенилен оксид	Алуид Двуокись титана	Фольгирование прессованием в процессе изготовления фольгой толщиной 0,035 мм	от 2,8 до 16	до $1,5\times10^{-3}$	1. Предназначен для изготовления СВЧ-плат повышенной точности, работающих в условиях повышенных температур и механических нагрузок. 2. Имеет высокую механическую прочность, высокую теплостойкость, стойкость к ароматическим и хлорированным углеводородам. 3. Обладает высокой стабильностью размеров при изготовлении плат. 4. Требует применения твердосплавного инструмента при обработке. 5. Температура пайки до 260 °С.
1	2	3	4	5	6	7	8
Полистирол модифицированный двуокисью титана	ПТ-3 ПТ-5 ПТ-7 ПТ-10 ПТ-16	Полистирол	Двуокись титана	Фольгирование прессованием фольгой толщиной 0,035 мм и электрохимическая металлизация по ОСТ 4Г 0.054.008	от 3 до 16	от 1×10^{-2} до 3×10^{-2}	1. Предназначен для изготовления СВЧ-плат повышенной точности. Имеет низкую ударную прочность, низкую теплостойкость – до 80 °С, низкую стойкость к ароматическим и хлорированным углеводородам. 2. Обладает высокой стабильностью размеров при изготовлении плат. 3. Допускает все виды механической обработки. 4. Температура пайки до 150 °С.
Диэлектрик фольгированный ПКТ	ПКТ-3Ф ПКТ-5Ф ПКТ-10Ф	Поликарбонатная смола «Дифлон»	Двуокись титана	Фольгирование прессованием фольгой толщиной 0,035 мм	от 3 до 10	до 3×10^{-3}	1. Предназначен для изготовления СВЧ плат повышенной точности, работающих в условиях повышенных температур и механических нагрузок. 2. Имеет высокую механическую прочность, высокую теплостойкость - до 135 °С, низкую стойкость к ароматическим и хлорированным углеводородам. 3. Обладает стабильностью размеров при изготовлении плат. 4. Допускает все виды механической обработки. 5. Температура пайки до 260 °С.

2. **Методическое обеспечение лабораторных работ**

Цель лабораторных работ – закрепление лекционного материала, привитие навыков применения теоретических знаний для решения научно-исследовательских задач, необходимых для освоения закрепленных компетенций.

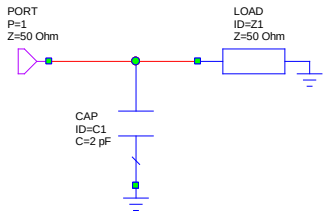
Задания на лабораторные работы расположены по ссылке:
https://drive.google.com/drive/folders/1xprIRdT4PEGo-JAQpbpNRcVKMOYj1hhs

Пример задания на лабораторную работу.

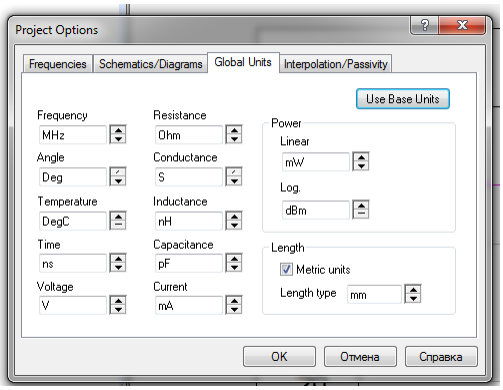
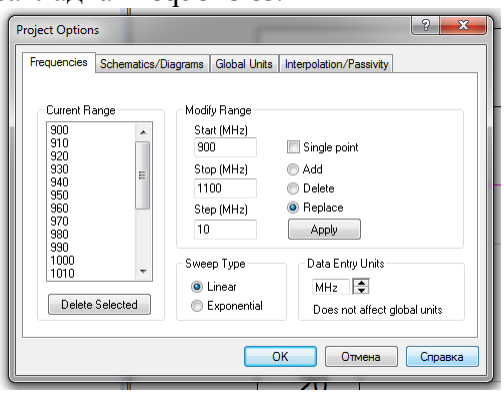
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 2 (4 ЧАСА)

Задание №2 (4 часа)
Тема занятия: Компенсация неоднородностей в микрополосковых СВЧ трактах передачи в узкой полосе частот

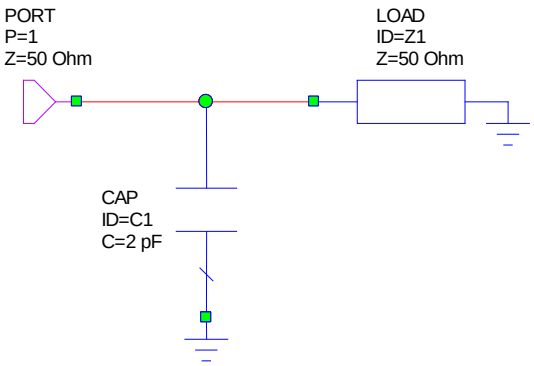
Задача №1. Компенсация концевой емкостной неоднородности в тракте с волновым сопротивлением 50 Ом в узкой полосе частот $f_ц = 1000$ МГц; $\Delta f = \pm 100$ МГц
Неоднородность задана в виде сосредоточенного конденсатора С1 емкостью 2 пФ, которая подключена параллельно оконечной нагрузке Z = 50 Ом.



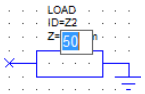
Необходимо:
Выполнить согласование неоднородной оконечной нагрузки с СВЧ трактом передачи, имеющим волновое сопротивление 50 Ом. Решение задачи можно осуществить в среде программы Microwave Office с применением элементов без потерь.
Решение.
1. Выполнить загрузку программы AWR. Используя команду New Project (меню File) создать файл emp проекта. Сохранить файл проекта с именем, например upr_1 в рабочей папке.
2. Выполним установку глобальных параметров проекта в меню Options\Project Options...

закладка Global Units:	закладка Frequencies:
	

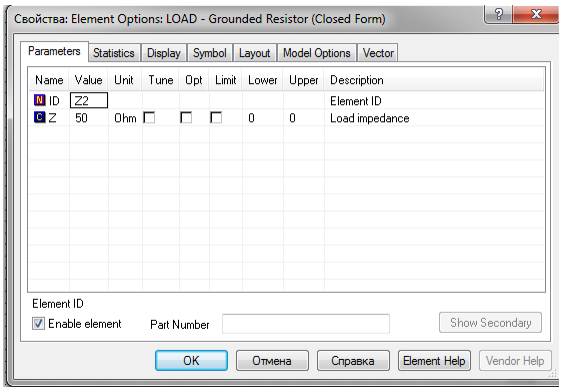
3. Используя команду меню Project\Add Schematic\New Schematic создаем схемный файл с именем, например upr_1_1.
4. На рабочем столе схемного редактора создаем принципиальную схему:

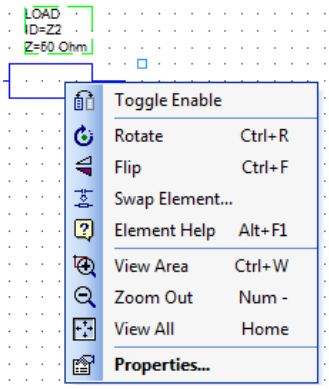


Доступ к библиотечным примитивам компонентов осуществляется в панели Elements выбором библиотечной группы Lumped Element (Пассивный элемент).
Символ резистора нагрузки Load выбираем курсором в библиотеке Resistor, нажатием левой клавиши мыши выделяем символ и не отпуская левую клавишу перетаскиваем изображение символа на рабочее поле схемного редактора.
Номинальное значение сопротивления резистора Z=50 Ом можно отредактировать двумя способами:
а) Подведя курсор к строке текстовых атрибутов символа двойным щелчком левой клавиши мыши в строке Z= открываем окно редактирования номинала резистора:



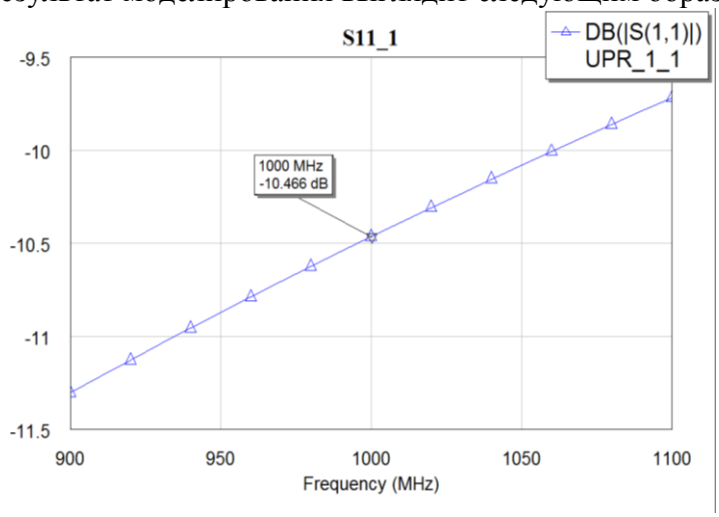
б) Подведя курсор к изображению символа двойным щелчком левой клавиши мыши по изображению символа компонента открываем всплывающее окно редактирования "Свойства компонента". В закладке Parameters в строке Z, столбце Value вводим значение сопротивления:





Примечание: Окно редактирования свойств компонента можно открыть иначе: Однократным нажатием левой клавиши мыши по изображению символа компонента выделяем компонент, после этого нажатием правой клавиши мыши открываем окно команд, доступных для редактирования.
Конденсатор CAP выбираем в библиотеке Capacitor. Редактирование номинала конденсатора (и других его атрибутов) выполняется аналогично ранее рассмотренным для резистора.
Нажатием клавиш GND и Port левой кнопкой мыши выбираем в строке Toolbar символы шины "Общий" и входного порта схемы и перетаскиваем их в нужное место в окне схемного редактора. Указанные действия можно выполнить командами меню DRAW: Add GND (Ctrl+G) и Add Port (Ctrl+P).
Символы элементов принципиальной схемы перетаскиваем в поле чертежа выделяя их курсором и нажимая левую клавишу мыши. Нажатием правой клавиши мыши выполняем вращение символа (Rotate) и поворот на 180 град относительно выбранной оси (Flip).
Чтобы соединить два элемента схемы проводником, нужно установить курсор возле точки вывода элемента, к которой нужно подключить начало проводника. Курсор должен изменить свое отображение в виде соленоида. В этой позиции курсора надо нажать левой кнопкой мышки, чтобы зафиксировать начало проводника, и, отпустив кнопку мышки, двигать мышкой курсор к месту, где нужно сделать изгиб проводника. Щелкнув снова левой кнопкой мышки зафиксируем изгиб. Чтобы закончить подключение проводника нужно щелкнуть по изображению вывода другого элемента, к которому нужно присоединить проводник или по другому проводнику.
5. Перед выполнением моделирования необходимо создать нужные графики и определить данные измерений и расчетов, которые следует разместить на этих графиках.
Чтобы создать график частотной зависимости коэффициента отражения S11, выраженного в дБ, щелкаем правой кнопкой мышки по группе Graphs (графики) в окне просмотра проектов и выбираем команду New Graph из всплывающего меню. Это же действие можно выполнить щелчком левой кнопки мышки по значку New Graph на панели инструментов. В открывшемся диалоговом окне задаем имя графика S11_1 и выбираем его тип: Rectangular (Прямоугольный). Нажимаем OK.
Щелкнув правой кнопкой мышки по имени нового графика в окне просмотра проектов выбираем команду Add Measurement. В открывшемся диалоговом окне выбираем:
Тип измеряемой величины (Measurement Type) - Linear, Port Parameters;
Измерение (Measurement) - S;
Имя источника данных (Data Source Name) - Upr_1_1
В поле To Port Index - 1
В поле From Port Index - 1
В поле Complex Modifier (представление комплексной величины) выбираем Mag (Модуль) и в строке тип результата - dB. Командой Apply измеряемая величина DB(|S11|) и имя источника (имя схемного файла) появятся в окне шаблона графика.
Нажав OK закроем диалоговое окно. редактирования измерений.
6. Выполним моделирование схемы. Выполним команду меню Simulate > Analyze. Та же операция выполняется щелчком левой кнопки мышки по значку Analyze на панели инструментов. Еще проще - нажатием клавиши F8.

Результат моделирования выглядит следующим образом:



Полученный результат указывает на плохое согласование схемы. В идеально согласованной схеме |S11|=0 (выраженное в дБ $|S11| \to -\infty\ dB$) Хорошо согласованная схема в узкой полосе частот должна иметь |S11|<-20...-30 дБ.

Построим график частотной зависимости КСВ входа (VSWR).

$$VSWR_{in} = \frac{1 + |S11|}{1 - |S11|}$$

Для построения графика КСВ в ранних версиях MWO требовалось выполнить пересчет измеренных значений S11 с использованием редактора Output Equations. В среде MWO 2009 расчет КСВ и построение его графика выполняется следующим образом:

Щелкнем левой кнопкой мышки по значку New Graph на панели инструментов. В открывшемся диалоговом окне задаем имя графика VSWR_in и выбираем его тип: Rectangular (Прямоугольный). Нажимаем OK.

Щелкнув правой кнопкой мышки по имени нового графика в окне просмотра проектов выбираем команду Add Measurement. В открывшемся диалоговом окне выбираем:

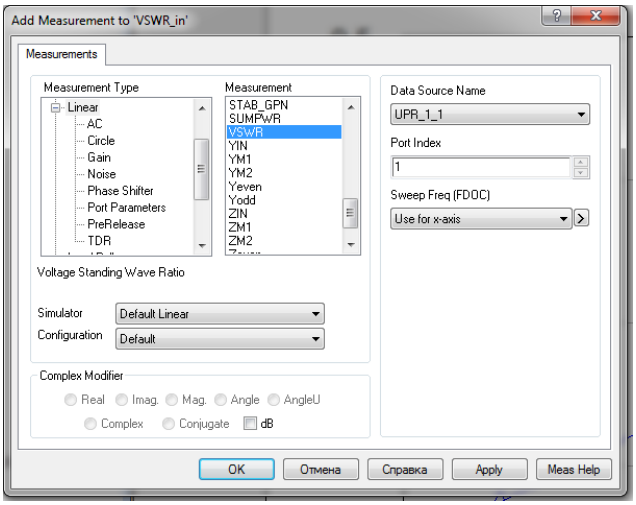
Тип измеряемой величины (Measurement Type) - Linear

Измерение (Measurement) - VSWR;

Имя источника данных (Data Source Name) - Upr_1_1

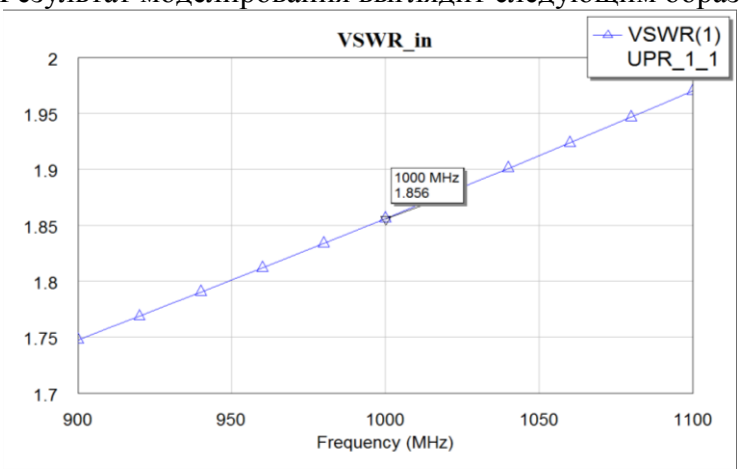
Port Index - 1

Поле Complex Modifier (представление комплексной величины) оставляем незаполненным, т.к. КСВ - действительная величина. Командой Apply измеряемая величина VSWR(1) и имя источника (имя схемного файла) появятся в окне шаблона графика. Нажав OK закроем диалоговое окно редактирования измерений.



Выполним моделирование схемы.

Результат моделирования выглядит следующим образом:



На частоте 1000 МГц получено значение VSWR=1,856. В идеально согласованной схеме VSWR→1.

Хорошо согласованная схема в узкой полосе частот должна иметь VSWR<1,2.

Вывод: необходимо использовать дополнительные элементы (L и C), включение которых в схему позволит добиться поставленной задачи.

Формально, режим согласования исследуемой схемы с 50-омным СВЧ трактом считается выполненным, если $Jm(Z_{\text{вх}}) = 0$, $Re(Z_{\text{вх}}) = 50$ Ом.

Следует построить графики зависимости $Jm(Z_{\text{вх}})$ и $Re(Z_{\text{вх}})$.

Щелкнем левой кнопкой мышки по значку New Graph на панели инструментов. В открывшемся диалоговом окне задаем имя графика Re_Jm_1 и выбираем его тип: Rectangular (Прямоугольный). Нажимаем OK.

Щелкнув правой кнопкой мышки по имени нового графика в окне просмотра проектов выбираем команду Add Measurement. В открывшемся диалоговом окне выбираем:

Тип измеряемой величины (Measurement Type) - Linear

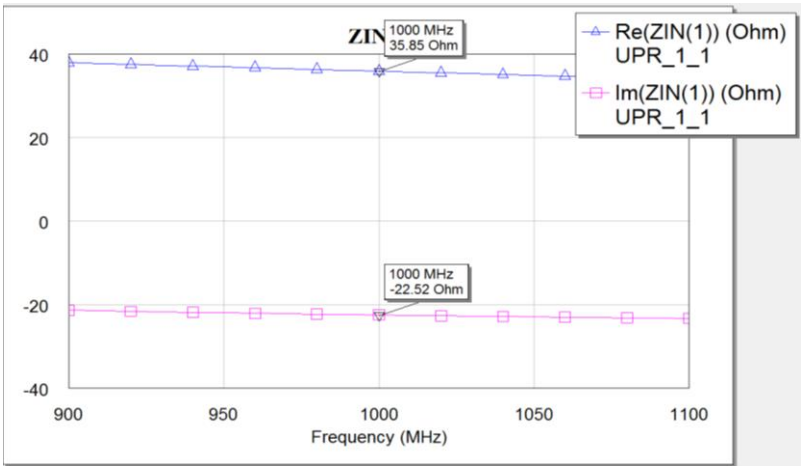
Измерение (Measurement) - ZIN;

Имя источника данных (Data Source Name) - Upr_1_1

Port Index - 1

В поле Complex Modifier (представление комплексной величины) устанавливаем Real для $Re(Z_{\text{вх}})$. Командой Apply измеряемая величина и имя источника (имя схемного файла) появятся в окне шаблона графика. В поле Complex Modifier (представление комплексной величины) устанавливаем Imag для $Jm(Z_{\text{вх}})$.Нажав OK закроем диалоговое окно редактирования измерений.

Выполним моделирование схемы.



Для более полного понимания комплексного характера входного сопротивления схемы удобно использовать представление частотных зависимостей комплексных величин в виде диаграмм Смита: Щелкнем левой кнопкой мышки по значку New Graph на панели инструментов. В открывшемся диалоговом окне задаем имя графика Smith_1 и выбираем его тип: Smith Chart (Диаграмма Смита). Нажимаем OK.

Щелкнув правой кнопкой мышки по имени нового графика в окне просмотра проектов выбираем команду Add Measurement. В открывшемся диалоговом окне выбираем:

Тип измеряемой величины (Measurement Type) - Linear, Port Parameters

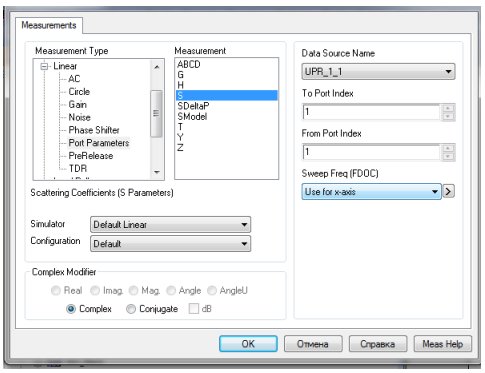
Измерение (Measurement) - S;

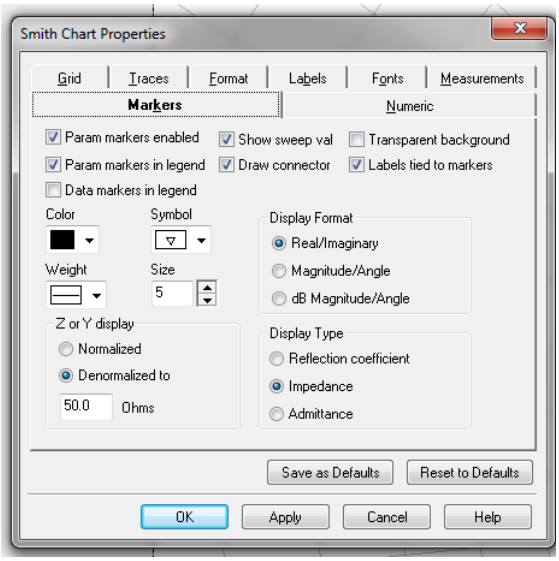
Имя источника данных (Data Source Name) - Upr_1_1

В поле To Port Index - 1

В поле From Port Index - 1

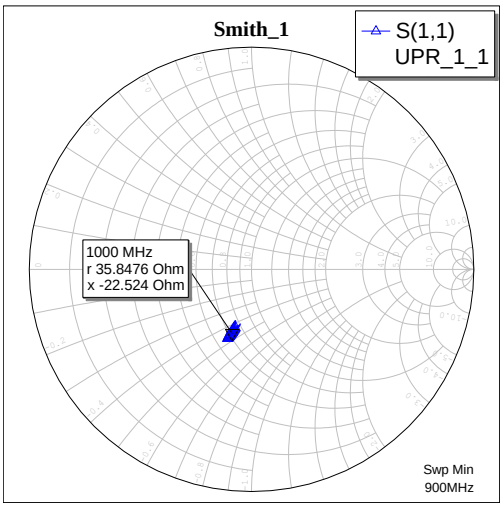
Поле Complex Modifier (представление комплексной величины) оставляем незаполненным. В строке представления данных устанавливаем Complex. Нажав OK закроем диалоговое окно редактирования измерений. Щелчком правой кнопки мышки по шаблону диаграммы Смита выбираем команду Properties. Открыв закладку Markers включаем радиокнопку Denormalized to и устанавливаем 50 Ом.



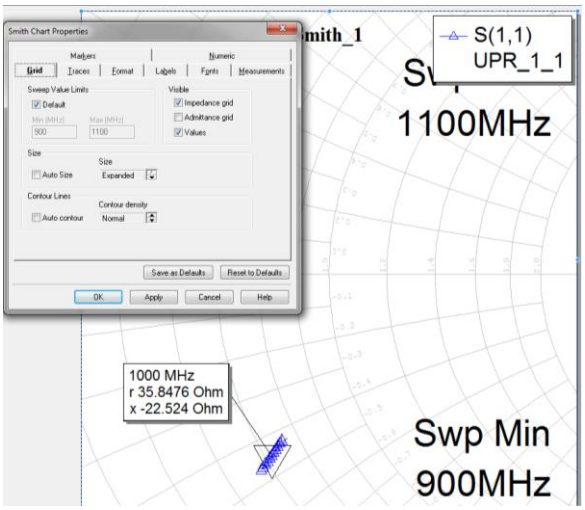


Выполним моделирование схемы.

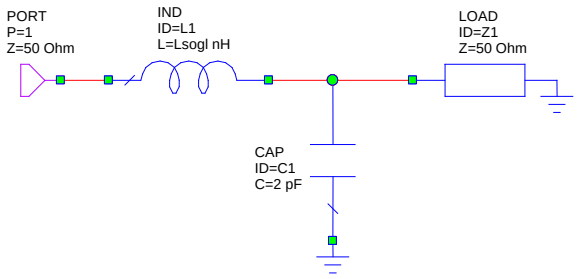
Результат моделирования выглядит следующим образом:



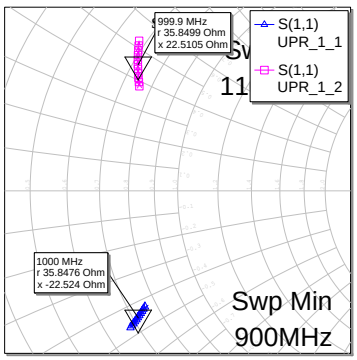
Щелчком правой кнопкой мыши диаграмме Смита выбираем команду Properties. Открыв закладку Greed В строке Size выбираем Expanded.



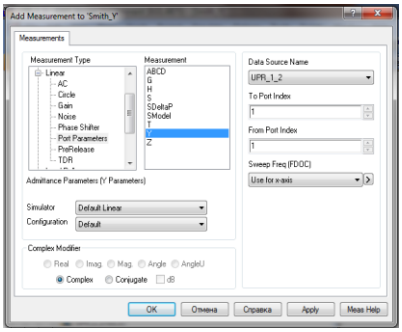
Выполним компенсацию мнимой части входного сопротивления схемы.
Используя команду меню Project\Add Schematic\New Schematic создаем схемный файл с именем, например upr_1_2.
Откроем окно с принципиальной схемой upr_1_1, выделим все элементы схемы и скопируем их выполнив команду Ctrl+C. Вновь откроем схемный файл upr_1_2 и вставим в рабочее окно редактора скопированные элементы (команда Ctrl+V). Выделим и удалим проводник между входным портом и реактивной нагрузкой.
Активируем панель Elements в нижней части левого окна. В категории Circuit Elements развернем группу сосредоточенных элементов (Lumped Element). Щелкнув левой кнопкой мышки по подгруппе Inductor, откроем окно с доступными символами индуктивностей. Нажав левой кнопкой мышки на модель Ind, перетаскиваем символ в область черетежа схемы в разрыв между входным портом и реактивной нагрузкой. Соединим выводы индуктивного элемента проводниками с входным портом и реактивной нагрузкой:

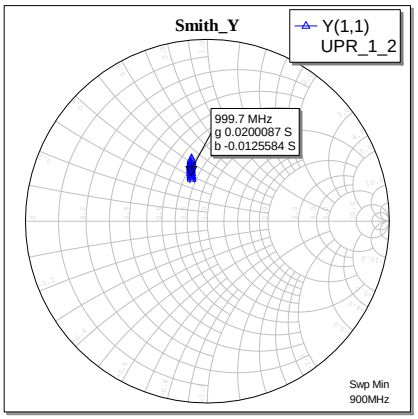


Двойным щелчком левой кнопки мышки открываем окно редактирования атрибутов символа. В закладке Parameters в ячейку L / Value записываем имя параметра Lsogl.
Далее рассчитаем значение индуктивности Lsogl:
Определяем входное сопротивление схемы Upr_1_1 в точке f=1000 МГц.
Zвх=35,85-j22,52
1. Видно, что входное сопротивление надо увеличивать, именно этой целью индуктивный элемент Lsogl включен в схему последовательно с нагрузкой.
2. Величину индуктивности необходимо выбрать такой чтобы действительная часть входного сопротивления стала равной 50 Ом (либо действительная часть входной проводимости $Re(Y_{\text{вх}}) = 0{,}02\ Sm$. Мнимая часть входного сопротивления должна иметь индуктивный характер.
Рассчитаем величину индуктивности, чтобы получить $Z^*_{\text{вх}} = 35{,}85 + j22{,}52$
Следовательно, $Lsogl = 2\frac{22{,}52}{2\cdot\pi\cdot f_{\text{согл}}} = 2\frac{22{,}52}{2\cdot\pi\cdot 10^9}$=7,168 нГн
В панели Project выбираем команду Global Definitions и щелчком левой кнопки мыши открываем окно редактирования глобальных переменных. Нажатием кнопки Equation выполняем запись:
Lsogl=7.168
Результаты моделирования во второй схеме можно отобразить на любом из ранее созданных графиках. Возьмем диаграмму Смита Smith_1. Щелчком правой кнопки мыши по имени графика в дереве проекта вызовем команду Add Measurement. В открывшемся окне необходимо в закладке Data Source Name указать имя схемы Upr_1_2 и нажать кнопку Apply. Командой OK закроем окно и выполним моделирование двух схем.
Результат моделирования будет выглядеть следующим образом:



Видно, что в результате входное сопротивление изменилось и теперь оно носит индуктивный характер. Для выполнения следующих процедур расчета построим диаграмму Смита в формате полных проводимостей:



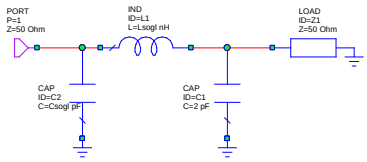


Для компенсации индуктивной реакции входа параллельно входу можно подключить согласующий конденсатор емкость которого определяем из ранее построенной диаграммы Смита для проводимостей:

$$2 \cdot \pi \cdot f_{\text{согл}} \cdot Csogl = b(f_{\text{согл}}) = 0{,}01256$$

Откуда Csogl=2.

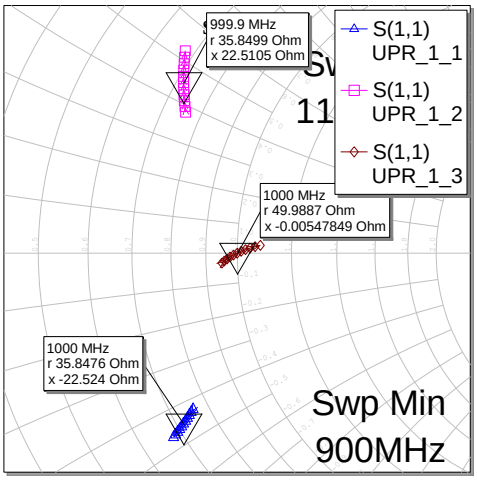
Для проверки результатов расчета создаем новую схему с именем Upr_1_3:



В редакторе Global Definitions записываем уравнение: Csogl=2

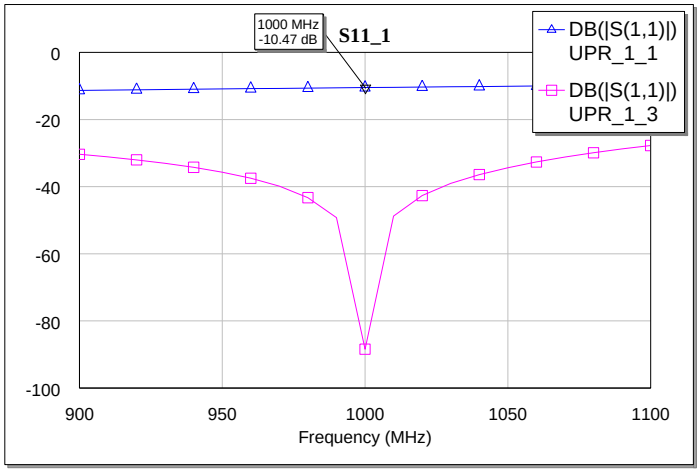
Результаты моделирования во третьей схеме можно отобразить на любом из ранее созданных графиках. Возьмем диаграмму Смита Smith_1. Щелчком правой кнопки мыши по имени графика в дереве проекта вызовем команду Add Measurement. В открывшемся окне необходимо в закладке Data Source Name указать имя схемы Upr_1_3 и нажать кнопку Apply. Командой OK закроем окно и выполним моделирование трех схем.

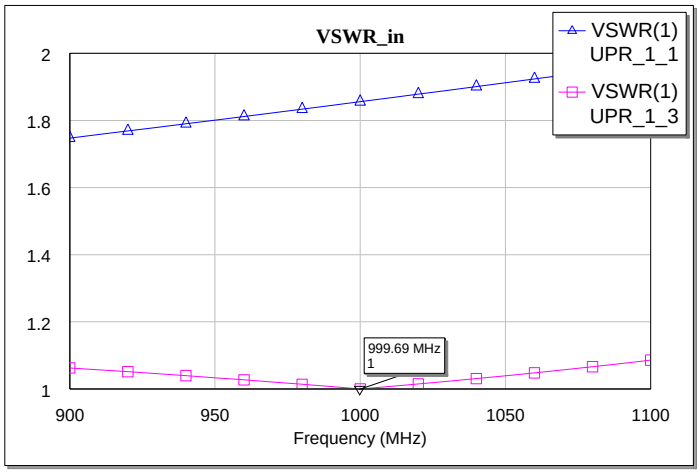
Результат моделирования будет выглядеть следующим образом:



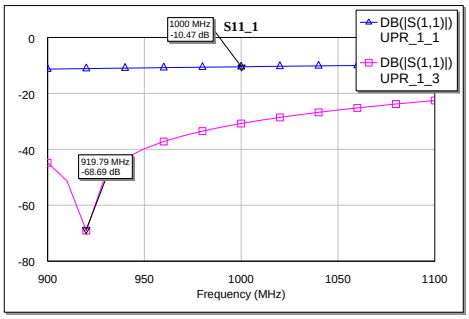
Видно, что мы добились решения поставленной задачи.

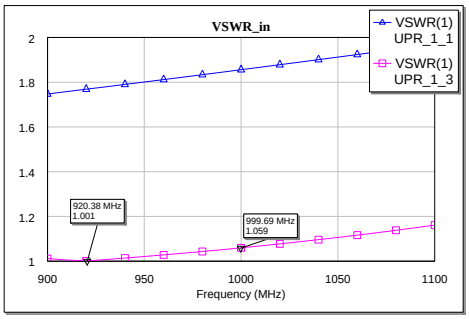
Осталось оформить результат в виде графиков частотных зависимостей S11 и КСВ. Построим эти графики, используя аналогичные для схемы Upr_1_1:





Рассчитанные значения Lsogl и Csogl обеспечивают необходимый уровень S11 и КСВ.
Однако, реализовать требуемое значение индуктивности согласующего элемента невозможно (маловероятно). Выбираем номинальное значение индуктивности $Lsogl = 7{,}5$ нГн.
Запишем это значение в качестве глобального параметра и выполним расчет характеристик. Получаем:





Произошло закономерное смещение точки согласования в область более низких частот, однако в заданной полосе частот 900 МГц ... 1100 МГц картина согласования осталась в целом удовлетворительной.

3. **Методическое обеспечение расчетно-графической работы**

Выполнение расчетно-графической работы– закрепление лекционного материала, привитие навыков применения теоретических знаний для самостоятельного решения инженерных задач, необходимых для освоения закрепленных компетенций.

Задания расчетно-графической работы расположены по ссылке:
https://drive.google.com/drive/folders/1xprIRdT4PEGo-JAQpbpNRcVKMOYj1hhs

4. **Методическое обеспечение проведения экзамена:**

Экзамена является заключительным этапом изучения дисциплины и имеет цель оценить уровень теоретические знания обучаемых, их навыки и умения применять полученные знания при решении практических задач, а также оценить уровень освоения компетенций закрепленных за дисциплиной.

Вопросы для подготовки к экзамену расположены по ссылке:
https://drive.google.com/drive/folders/1xprIRdT4PEGo-JAQpbpNRcVKMOYj1hhs