

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

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ
(ТУСУР)

Кафедра радиоэлектроники и систем связи
(РСС)

С. А. Подлиннов, Д. С. Фадеева, А. В. Фатеев

Исследование диэлектрических и магнитных свойств материалов
методом коаксиальной линии

Методические указания для выполнения лабораторных работ для
студентов технических направлений подготовки и специальностей

Томск
2024

УДК 621.372.22
ББК 32.843
П 44

Рецензент:

Убайчин А. В., доцент кафедры радиоэлектроники
и систем связи ТУСУР, канд.техн. наук

Подлиннов С. А., Фадеева Д.С, Фатеев А. В.

П 44 Исследование диэлектрических и магнитных свойств материалов методом коаксиальной линии: метод. указания по выполнению студентами лабораторных работ/ С. А. Подлиннов, Д. С. Фадеева, А. В. Фатеев. – Томск : Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2024. – 24 с.

Настоящее учебно-методическое пособие для выполнения лабораторных работ для студентов составлено с учетом требований федерального государственного образовательного стандарта высшего образования.

Учебно-методическое пособие содержит краткое теоретическое описание по расчету диэлектрической и магнитной проницаемостей методом Николсона-Росса-Вейера, предназначено для выполнения лабораторных работ студентами технических направлений подготовки и специальностей.

Одобрено протоколом на заседании кафедры протокол № 8 от 16.05.2024 г.

УДК 621.372.22

ББК 32.843

© Подлиннов С. А., 2024
© Фадеева Д. С., 2024
© Фатеев А. В., 2024
© Томск : гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, каф. РСС, 2024

Содержание

Введение	4
1 Краткие теоретические сведения	5
1.1 Векторные анализаторы цепей	5
1.2 Понятие комплексной диэлектрической и магнитной проницаемостей	6
1.3 Исследование свойств материалов методом коаксиальной линии	8
2 Экспериментальная часть	12
2.1 Описание экспериментальной установки	12
2.2 Порядок выполнения работы	14
3 Требования к отчету	16
4 Контрольные вопросы	17
5 Список рекомендуемой литературы	18
Приложение А	19

Введение

Цель работы: исследование диэлектрических и магнитных свойств материалов путем математической обработки параметров матрицы рассеяния коаксиальной линии передач.

Задачи:

- 1) Изучение лабораторного макета по измерению комплексных диэлектрических и магнитных проницаемостей в коаксиальном тракте.
- 2) Изучение принципов измерений на СВЧ.
- 3) Конфигурирование измерительной установки.
- 4) Проведение экспериментальных измерений материалов в коаксиальной линии передач на лабораторном макете векторного анализатора цепей.
- 5) Изучение и построение в среде *MathCad* математической модели для обработки параметров матрицы рассеяния коаксиальной линии передач и последующего вычисления диэлектрической и магнитной проницаемостей материала в коаксиальном тракте.
- 6) Проведение анализа результатов проведённой работы.

1 Краткие теоретические сведения

1.1 Векторные анализаторы цепей

Для измерения пассивных радиоустройств (усилителей, аттенуаторов и др.), а также свойств различных материалов (отражение и поглощение радиоволн, диэлектрическая постоянная и др.) широко используются векторные анализаторы цепей.

Векторный анализатор электрических цепей – это прибор, который позволяет изучать тестируемые устройства, путем измерения проходящего через них опорного сигнала. В случае с устройствами с двумя портами, характеристика отражения от порта 1 называется S_{11} , характеристика передачи в направлении с первого до второго порта называется S_{21} , характеристика передачи в обратном направлении называется S_{12} , и характеристика отражения от порта 2 называется S_{22} .

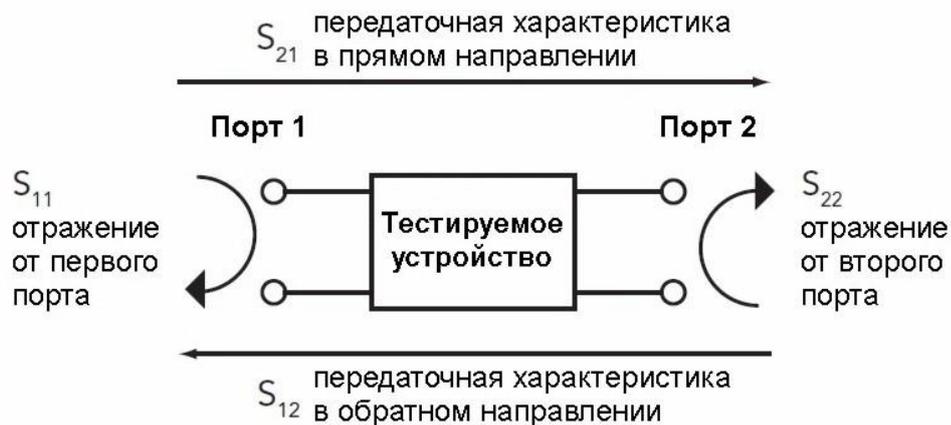


Рисунок 1.1 – Графическая иллюстрация S -параметров двухпортового устройства

Измерение происходит за счет подачи анализатором синусоидального сигнала, а затем измерения сигнала отраженного, и прошедшего через устройство. Оба сигнала этих сигнала будут иметь отличия в фазе и амплитуде, по сравнению с изначальным сигналом. В то время как скалярный анализатор цепи может измерить лишь амплитуду, векторный способен замерять и амплитуду, и фазу. Подавляющее количество используемых анализаторов на сегодняшний день являются векторными, ввиду наиболее подробного измерения характеристики исследуемого устройства.

На рисунке 1.1 можно увидеть упрощенную схему работы векторного анализатора цепей в процессе измерения передаточной характеристики в прямом (S_{21}) и обратном (S_{12}) направлении. Опорный сигнал в виде синусоиды, с заранее известной фазой и амплитудой подается на исследуемое устройство. По прохождению через устройство, амплитуда и фаза

претерпевают изменения, который и улавливает векторный анализатор цепи. Благодаря этому анализатор определяет характеристику устройства на заданной частоте. В процессе изменения диапазона частоты, на котором проводятся измерения, векторный анализатор цепи постоянно так же меняет и частоту синусоиды, являющуюся опорным сигналом.

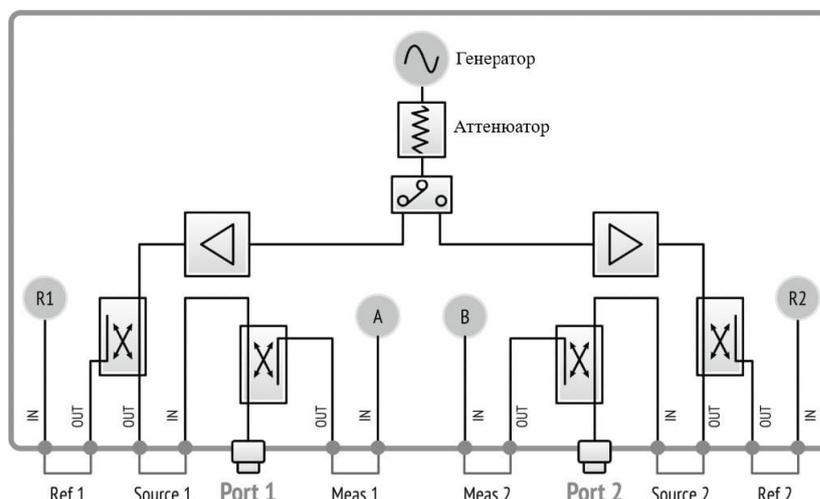


Рисунок 1.2 – Упрощенная структурная схема векторного анализатора электрических цепей

На рисунке 1.2 представлена упрощенная структурная схема векторного анализатора цепей, где R_1 и R_2 – это приемники падающей волны, A и B – приемники отраженной волны.

1.2 Понятие комплексной диэлектрической и магнитной проницаемостей

Комплексная относительная диэлектрическая проницаемость ϵ_r – это безразмерная физическая величина, характеризующая диэлектрические свойства исследуемой среды. Связана с эффектом поляризации диэлектриков под действием электрического поля и показывает, во сколько раз сила взаимодействия двух электрических зарядов в среде меньше, чем в вакууме.

Комплексную диэлектрическую проницаемость можно записать как:

$$\epsilon_r = \epsilon' - j \cdot \epsilon'', \quad (1.1)$$

где ϵ' – реальная часть диэлектрической проницаемости, которая показывает способность вещества хранить в себе энергию электрического поля;

ϵ'' – мнимая часть диэлектрической проницаемости – диэлектрические потери, отображающие рассеивающие свойства исследуемого вещества, поглощающего энергию и частично преобразующего ее в тепловую энергию;

j – мнимая единица.

Комплексная относительная магнитная проницаемость μ_r – это безразмерная физическая величина, характеризующая магнитные свойства исследуемой среды.

Комплексную магнитную проницаемость можно записать как:

$$\mu_r = \mu' - j \cdot \mu'', \quad (1.2)$$

где μ' – действительная часть магнитной проницаемости, которая характеризует способность материала намагничиваться во внешнем магнитном поле;

μ'' – мнимая часть магнитной проницаемости, которая характеризует потери энергии в материале при намагничивании;

j – мнимая единица.

Комплексная магнитная проницаемость является комплексным числом, которое зависит от температуры материала и частоты магнитного поля.

Рисунок 1.3 отображает типичное поведение диэлектрической проницаемости (ϵ' и ϵ'') как функции от частоты.

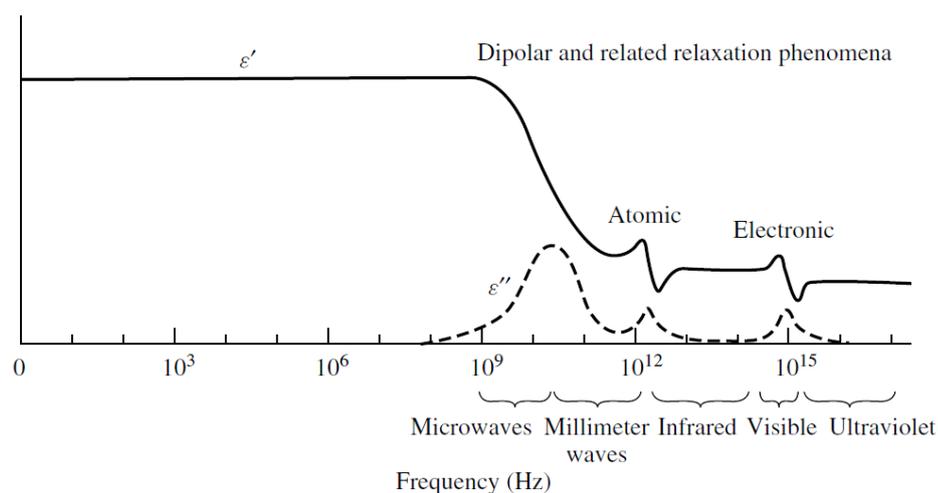


Рисунок 1.3 – Зависимость диэлектрической проницаемости от частоты в гипотетическом материале [4]

Диэлектрическая проницаемость связана с множеством физических явлений. Дипольная релаксация, ионная проводимость, атомная и электронная поляризации являются первичными механизмами, влияющими на диэлектрическую проницаемость вещества. Влияние ионной проводимости подавляет ϵ'' на низких частотах. Колебания значений диэлектрической проницаемости на микроволновом диапазоне происходят в основном за счет дипольной релаксации, а поглощение в инфракрасном диапазоне – за счет атомной и электронной поляризации.

1.3 Исследование свойств материалов методом коаксиальной линии

Один из распространенных методов вычисления комплексной диэлектрической проницаемости материалов на радио- и микроволновых частотах основан на использовании коаксиальной линии передач, строение которой изображено на рисунке ниже. В данном методе свойства материала, такие как диэлектрическая и магнитная проницаемость, рассчитываются на основе отражения электромагнитных волн от образца и прохождении через него.

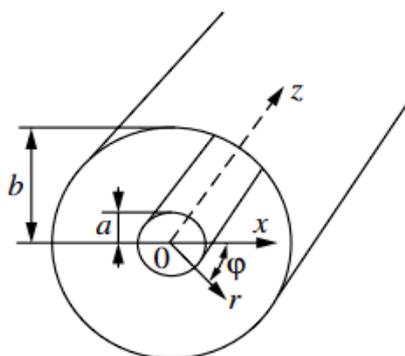


Рисунок 1.4 – Строение коаксиальной линии [4]

Как показано на рисунке 1.4, коаксиальная линия в основном состоит из центрального проводника радиусом a и внешнего проводника с внутренним радиусом b .

В коаксиальных кабелях, используемых в микроволновых цепях, пространство между центральным проводником и внешним проводником заполнено диэлектрическим материалом, таким как тефлон. Если диэлектрическим материалом между центральным проводником и внешним проводником является воздух, то коаксиальную линию обычно называют воздушной коаксиальной линией. При определении свойств материалов часто используются воздушные коаксиальные линии, а испытуемые тороидальные образцы вставляются в пространство между центральным проводником и внешним проводником.

Вычислить комплексные диэлектрическую и магнитную проницаемости, имея снятые параметры матрицы рассеяния, возможно с помощью алгоритма Николсона-Росса-Вейера. Ниже приведены основные соотношения, используемые в математической модели Николсона-Росса-Вейера, для материала толщиной d , установленного в воздушный коаксиал с подводящими линиями длиной l_1 и l_2 (Рисунок 1.5).

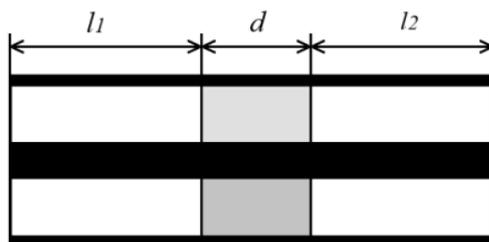


Рисунок 1.5 – Воздушная коаксиальная линия с размещенным образцом

Для тестового СВЧ сигнала электрическая длина исследуемого образца материала z определяется согласно соотношению [11]:

$$z = \exp \left[-\frac{j\omega d}{c} \sqrt{\mu_r \varepsilon_r} \right], \quad (1.3)$$

где ω – круговая частота;

c – скорость света в вакууме;

d – толщина материала;

μ_r – относительная магнитная проницаемость;

ε_r – относительная диэлектрическая проницаемость.

Коэффициент отражения Γ от исследуемого материала (при $d \rightarrow \infty$) для СВЧ сигнала, распространяющегося от источника, определяется согласно соотношению:

$$\Gamma = \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0} = \frac{\sqrt{\mu_r / \varepsilon_r} - 1}{\sqrt{\mu_r / \varepsilon_r} + 1}, \quad (1.4)$$

где Z – волновое сопротивление коаксиальной линии, заполненной исследуемым материалом;

Z_0 – волновое сопротивление коаксиальной линии с воздушным заполнением.

Частотно-зависимые комплексные коэффициенты передачи (S_{21}) и отражения (S_{11}) определяются следующими соотношениями:

$$S_{21}(\omega) = \frac{(1 - \Gamma^2)z}{1 - \Gamma^2 z^2}, \quad (1.5)$$

$$S_{11}(\omega) = \frac{(1 - z^2)\Gamma}{1 - \Gamma^2 z^2}, \quad (1.6)$$

где Γ – коэффициент отражения от исследуемого материала.

Представим сумму и разность коэффициентов матрицы рассеяния следующим образом:

$$V_1 = S_{21} + S_{11}, \quad (1.7)$$

$$V_2 = S_{21} - S_{11}, \quad (1.8)$$

Где S_{11} – комплексные коэффициент отражения на входе;

S_{21} – комплексный коэффициент передачи.

Введем коэффициент K .

$$K = \frac{1-V_1V_2}{V_1-V_2}. \quad (1.9)$$

Коэффициент отражения Γ и электрическая длина исследуемого образца материала z определяются как:

$$\Gamma = K \pm \sqrt{K^2 - 1}, \quad (1.10)$$

$$z = \frac{V_1 - \Gamma}{1 - V_1 \Gamma}. \quad (1.11)$$

Соответствующий знак выбирается из условия $|\Gamma| \leq 1$.

Выполнив математические преобразования соотношений (1.3) – (1.11) получаем следующие:

$$\frac{\mu_r}{\varepsilon_r} = \left(\frac{1+\Gamma}{1-\Gamma} \right)^2 = c_1, \quad (1.12)$$

$$\mu_r \varepsilon_r = - \left\{ \frac{c}{\omega d} \ln \left(\frac{1}{z} \right) \right\}^2 = c_2, \quad (1.13)$$

$$\mu_r = \sqrt{c_1 c_2}, \quad (1.14)$$

$$\varepsilon_r = \sqrt{\frac{c_2}{c_1}}. \quad (1.15)$$

Так, воспользовавшись выражениями (1.12) – (1.15), можем определить комплексные значения относительной диэлектрической ε_r и магнитной μ_r проницаемостей.

Однако, для корректной работы математического алгоритма, необходимо учитывать отражения и помехи в подводящих линиях. Реализуется это в математической модели с помощью перехода от матрицы рассеяния S -параметров $[S]$ к матрице передачи $[T]$. Матрица передачи $[T]$ устанавливает зависимость волн на входе устройства от волн на его выходе. Способ перехода от матрицы рассеяния к матрице передачи представлен ниже.

$$[T] = \begin{bmatrix} \frac{1}{S_{21}} & -\frac{S_{22}}{S_{21}} \\ \frac{S_{11}}{S_{21}} & S_{12} - \frac{S_{11}S_{21}}{S_{21}} \end{bmatrix}, \quad (1.16)$$

$$[S] = \begin{bmatrix} \frac{T_{21}}{T_{11}} & T_{22} - \frac{T_{12}T_{21}}{T_{11}} \\ \frac{1}{T_{11}} & -\frac{T_{12}}{T_{11}} \end{bmatrix}. \quad (1.17)$$

Важной особенностью этой матрицы является то, что T -матрица соединения ряда элементов СВЧ равна произведению матриц передачи данных элементов. Таким образом, T -матрицу всей коаксиальной линии можно представить как произведение трёх T -матриц, подводящей линии l_1 до образца, самого образца d , и подводящей линии l_2 после образца, а

затем, получив матрицу передачи образца, вернуть ее к виду матрицы рассеяния. Для этого найдем S -матрицу подводящей линии при помощи следующих выражений:

$$[S_{\text{воздуха}}] = \begin{bmatrix} 0 & e^{-\gamma l} \\ e^{-\gamma l} & 0 \end{bmatrix}, \quad (1.18)$$

$$\gamma = \alpha + j\beta, \quad (1.19)$$

$$\alpha \approx 0, \quad (1.20)$$

$$\beta = \frac{2\pi f}{c}, \quad (1.21)$$

где γ – постоянная распространения волны в линии;

α – коэффициент затухания (для воздушной линии пренебрежимо мал);

β – фазовая константа;

f – частота;

j – мнимая единица;

l – длина подводящей линии;

c – скорость света.

Искомую T -матрицу образца получаем путем перемножения матриц:

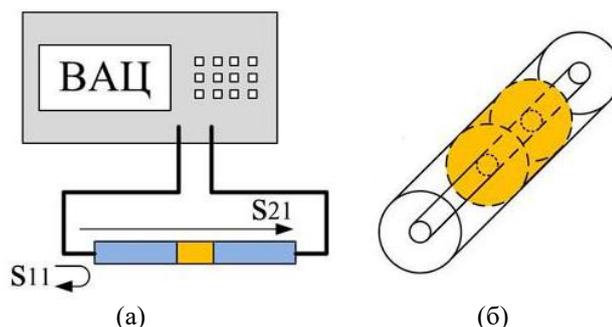
$$T_d = T_{l1}^{-1} \cdot T_{\text{общ}} \cdot T_{l2}^{-1}. \quad (1.22)$$

Далее, используя выражение (1.17), мы можем получить S -матрицу образца и использовать S -параметры в последующих расчетах диэлектрической и магнитной проницаемостей.

2 Экспериментальная часть

2.1 Описание экспериментальной установки

Для снятия параметров матрицы рассеяния исследуемого образца используется система измерений, представленная на рисунке 2.1. Данная система измерений представляет из себя векторный анализатор цепей, к двум портам которого подключена воздушная коаксиальная линия.



Для проведения корректных измерений выполняется двухпортовая *SOLT* калибровка. Она осуществляется с помощью специальных калибровочных модулей (Рисунок 2.2), которые необходимо последовательно подключать к портам, выполняя этапы калибровки, в соответствии с указаниями, которые дает векторный анализатор цепей.



Основными эталонными нагрузками являются согласованная (СН или *Load*), короткозамкнутая (КЗ или *Short*) и нагрузка холостого хода (ХХ или *Open*). На калибровочные модули с каждой стороны нанесены обозначения, соответствующие типу нагрузки.

Каждый тип нагрузки необходимо последовательно подключить к первому, а затем ко второму порту, после чего соединить оба порта при помощи перемычки (*Through*) для проведения последнего этапа калибровки.

После проведения калибровки образец измеряемого материала устанавливается в коаксиальную линию ровно по центру при помощи специальной оснастки с насечкой, определяющей на какую глубину будет помещен образец. Затем при помощи определенных переходов и кабелей коаксиальная линия подсоединяется к портам векторного анализатора цепей.

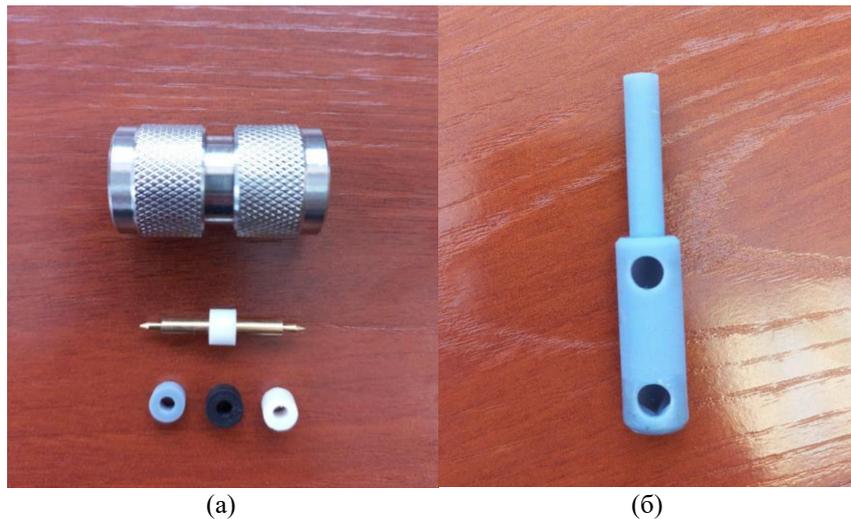


Рисунок 2.3 – Используемые в измерениях устройства: (а) – воздушная коаксиальная линия и примеры образцов; (б) – оснастка для центрирования образца в тракте

2.2 Порядок выполнения работы

Ниже представлен порядок выполнения лабораторной работы в виде последовательности действий:

1. Включить векторный анализатор цепей, дать ему прогреться в течение 30 минут.
2. Провести конфигурирование устройства:
 - Настроить тип сохраняемых данных на векторном анализаторе цепей: при двухпортовых измерениях данные необходимо сохранять в формате *s2p*;
 - Выставить частотный диапазон, на котором будут проводиться измерения, и количество точек на графиках: используемый коаксиальный тракт корректно работает на диапазоне от 6 до 18 ГГц, количество точек - 1000.
 - Настроить путь сохранения параметров: создать временную папку на время работы с устройством. При измерении создается файл в Вашей папке, название которого должно соответствовать исследуемому материалу.
3. Осуществить процедуру двухпортовой *SOLT* калибровки при помощи специальных калибровочных модулей.
4. Установить образец исследуемого материала в тракт ровно по центру. Чтобы это сделать, нужно измерить полную длину коаксиальной линии L и толщину образца d , а затем определить длины подводящих линий $l_1 = l_2$. На оснастке для центрирования образца делается соответствующая отметка и образец помещается внутрь тракта на глубину, соответствующую данной отметке.
5. При помощи переходов и кабелей подключить коаксиальную линию к двум портам векторного анализатора цепей, как показано на рисунке 2.1.
6. Провести измерения параметров матрицы рассеяния коаксиальной линии с исследуемым образцом, сохранить результаты измерений. Формат сохранённых данных с лабораторного макета выглядит следующим образом: первый столбец – частоты, последующие столбцы – попарно уровень сигнала в дБ и фаза в градусах параметров матрицы рассеяния. Данные параметры представлены в следующем порядке: коэффициент отражения по входу S_{11} , коэффициент прямой передачи S_{21} , коэффициент обратной передачи S_{12} и коэффициент отражения по выходу (S_{22}). Пример сохраненных результатов измерения представлен на рисунке 2.4.

```

!S2P File: Measurements:S11,S21,S12,S22:
# Hz S DB R 50
30000 -30.9126278957393 146.385113867095 -0.03226007384:
90029850 -28.0480080968782 70.4690748036017 0.0442:
180029700 -24.218112959305 57.1971572837058 -0.371:
270029550 -22.3423958208765 61.0734412136137 -0.217:
360029400 -19.5613776627165 56.3226848259202 0.0349:
450029250 -17.5152563049899 48.0148309128311 -0.836:
540029100 -17.0549846180158 41.4533805303909 -0.214:
630028950 -16.4858000165316 38.4426590214748 -0.185:
720028800 -14.6533509190468 39.6082519186014 -1.269:
810028650 -13.4019223574472 26.5804610546027 0.0433:
900028500 -13.8282808088947 19.3871263418739 -0.700:
990028350 -13.2096620702902 25.6629034845895 -1.342:
1080028200 -11.4154482580756 16.1445943423882 0.1584:
1170028050 -11.6592561762272 5.05620859802547 -1.348:
1260027900 -12.1190980789899 9.37827123895272 -1.216:
1350027750 -10.6641870952986 5.75837244757381 -0.024:
1440027600 -9.95845196295413 -4.18020772125361 -2.131:
1530027450 -10.4981669968597 -8.8277635872888 -0.817:
1620027300 -10.139166326096 -11.9680730801064 -0.725:
1710027150 -9.25351098108878 -14.5564921023953 -2.373:
1800027000 -9.05265600494113 -22.1284443626681 -0.597:

```

Рисунок 2.4 – Пример сохраненных результатов измерения параметров матрицы рассеяния

7. Если необходимо, повторить шаги 4–6 для других материалов.

8. Провести математическую обработку результатов измерений методом Николсона-Росса-Вейера в среде *MathCad*: осуществить процедуру исключения подводящих линий и рассчитать диэлектрическую и магнитную проницаемости исследуемого материала из его *S*-параметров. Рекомендации по проведению математической обработки методом Николсона-Росса-Вейера представлены в приложении А.

9. Построить графики полученных в ходе обработки диэлектрической и магнитной проницаемостей с разделением на действительную и мнимую составляющие, как показано на рисунках А.18 и А.19.

10. Написать выводы о проделанной работе. В выводах должны быть отражены следующие результаты: необходимо описать поведение диэлектрической и магнитной проницаемостей исследуемого материала на установленном диапазоне частот.

3 Требования к отчету

Отчет должен быть выполнен в соответствие с образовательным стандартом ВУЗа для технических специальностей (ОС ТУСУР 01-2021) и должен содержать следующие пункты:

- титульный лист;
- введение;
- результаты измерений и математической постобработки;
- построенные в соответствии с заданием графики;
- заключение.

4 Контрольные вопросы

1. Дайте определение комплексной относительной диэлектрической проницаемости.
2. Дайте определение диэлектрическим потерям.
3. Дайте определение комплексной относительной магнитной проницаемости.
4. От чего зависит комплексная магнитная проницаемость?
5. Строение коаксиальной линии.
6. Дайте определение понятию электрической длины исследуемого образца материала.
7. По какой формуле рассчитывается коэффициент отражения от исследуемого материала?
8. Определение матрицы передачи $[T]$.
9. Способы перехода от матрицы рассеяния $[S]$ к матрице передачи $[T]$.
10. Как найти матрицу рассеяния подводящей линии?

5 Список рекомендуемой литературы

1. М. А. Силаев, С. Ф. Брянцев «Приложение матриц и графов к анализу СВЧ устройств»
2. Брандт А. А. «Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах», М. Физматгиз, 1963 г., 404 с.;
3. Д. Г. Фомин, Н.В. Дударев, С.Н. даровских «анализ методов измерения диэлектрических свойств материалов в свч диапазоне длин волн»
4. «Microwave Electronics: Measurements and material characterization» // L. F. Chen, C. K. Ong, C. P. Neo, V. V. Varadan, V. K. Varadan;
5. В.И. Шестопапов «Методы измерения диэлектрической проницаемости вещества на сверхвысоких частотах», 1961 г., Т. LXXIV, В.И. Шестопапов и К. И. Ящук;
6. М. П. Пархоменко, Д. С. Калёнов, И. С. Ерёмин, Н. А. Федосеев, В. М. Колесникова, Ю. Л. Баринов «волноводный метод измерений электромагнитных параметров материалов в свч диапазоне и оценка погрешности измерений»
7. А. Хиппель «Диэлектрики и волны», Госэнергоиздат, 1959 г.;
8. О. А. Дьяконова, Ю. Н. Казанцев, Д. С. Каленов Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова. «измерительный комплекс для определения электромагнитных характеристик материалов резонаторным методом с помощью скалярных анализаторов цепей»
9. Презентация Keysight Technologies «Характеризация параметров материалов от постоянного тока до терагерцового диапазона частот», 2015 г.;
10. «Основы измерения диэлектрических свойств материалов. Заметки по применению», Agilent Technologies, 2010 г.
11. Фомин Д.Г., Дударев Н.В., Даровских С.Н. Анализ методов измерения диэлектрических свойств материалов в СВЧ диапазоне длин волн. // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. – 2021. – №6.

Приложение А

(справочное)

Рекомендации по проведению математической обработки методом Николсона-Росса-Вейера в среде *MathCad*

Для реализации процедуры математической обработки результатов измерений методом Никольсона-Росса-Вейера необходимо написать программу в среде *MathCad* по представленным в п.1 выражениям, согласно синтаксису:

Для удобства работы можно создать области, которые могут сворачиваться, обеспечивая структурирование вводимых формул:

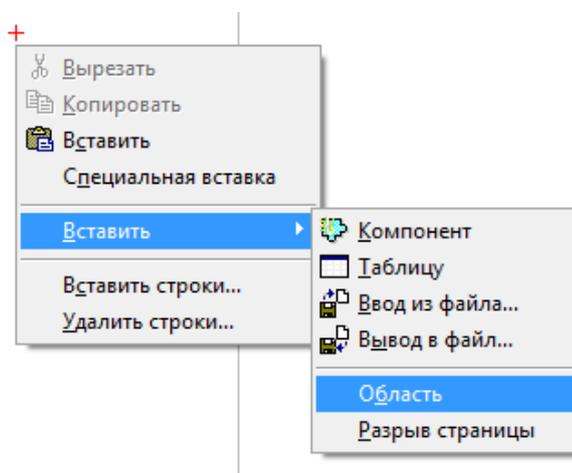


Рисунок А.1 – Создание областей в среде *MathCad*

Перед началом работы зададим нумерацию строк и столбцов с единицы, записав выражение, как показано на рисунке А.2:

ORIGIN := 1

Рисунок А.2 – Отчет первой строки или столбца в среде *MathCad*

Затем проведем считывание измеренных данных. Для загрузки данных необходимо нажать правой кнопкой мыши на рабочей области, как показано на рисунке А.3:

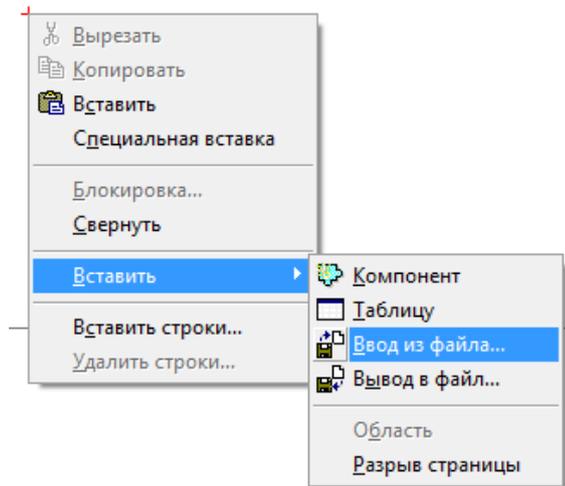


Рисунок А.3 – Процедура загрузки измеренных данных

Необходимо выбрать путь и написать с какой строчки начинаются данные (Рисунок А.4):

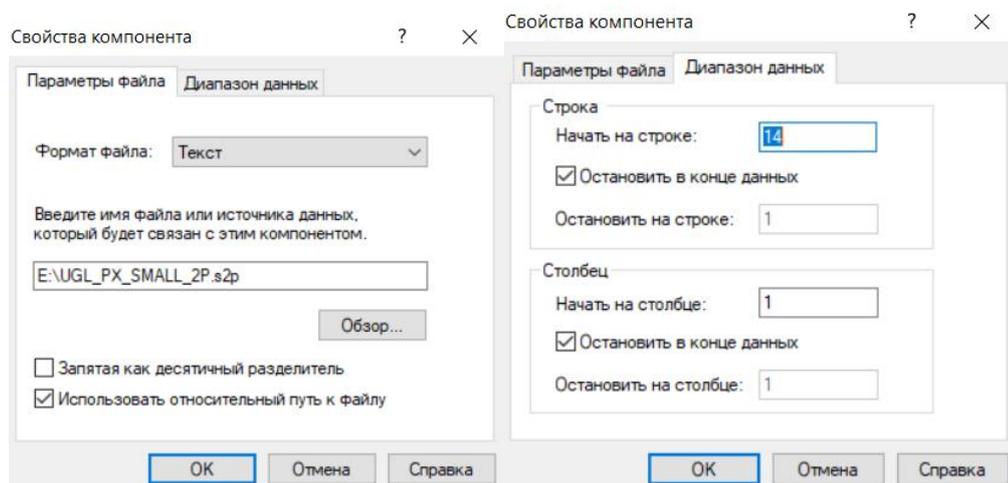


Рисунок А.4 – Процедура загрузки измеренных данных, выбор пути

После загрузки измеренных данных присваиваем значения переменной и проверяем корректность загрузки данных (Рисунок А.5 – А.6).

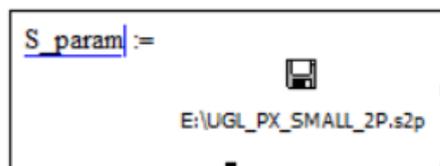


Рисунок А.5 – Присвоение загруженных данных переменной *S_param*

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	$3 \cdot 10^4$	-30.913	146.385	-0.032	-0.212	-0.017	-0.011	-30.43	-36.263
2	$9.003 \cdot 10^7$	-28.048	70.469	0.044	-4.334	0.035	-4.29	-28.105	-110.275
3	$1.8 \cdot 10^8$	-24.218	57.197	-0.371	-7.656	-0.362	-7.66	-24.094	-123.172
4	$2.7 \cdot 10^8$	-22.342	61.073	-0.217	-14.766	-0.249	-14.644	-22.254	-120.93
5	$3.6 \cdot 10^8$	-19.561	56.323	0.035	-15.033	0.028	-15.163	-19.542	-124.019
6	$4.5 \cdot 10^8$	-17.515	48.015	-0.836	-19.465	-0.84	-19.139	-17.559	-131.328
7	$5.4 \cdot 10^8$	-17.055	41.453	-0.214	-27.954	-0.292	-27.838	-16.918	...

Рисунок А.6 – Проверка считанных данных

Проведем индексацию считанных данных, где k -порядковый номер частоты, как показано ниже:

$$k := 1..rows(S_param) - 1$$

Рисунок А.7 – Индексация данных в среде MathCad

Зададим массив частот в герцах, которые потребуются далее при расчетах и построении графиков, см. рисунок А.8:

$$f := S_param \langle 1 \rangle$$

Рисунок А.8 – Задание частотных точек, на основе измеренных данных

Затем опишем используемые при расчете функции:

- Функция перевода параметров матрицы рассеяния $[S]$ из дБ в разы для последующих расчетов:

$$\begin{aligned}
 RI_S11(x, k) &:= 10^{\frac{x_{k, ORIGIN+1}}{20} \cdot e^{(i \cdot x_{k, ORIGIN+2}) \cdot \frac{\pi}{180}}} & RI_S12(x, k) &:= 10^{\frac{x_{k, ORIGIN+5}}{20} \cdot e^{(i \cdot x_{k, ORIGIN+6}) \cdot \frac{\pi}{180}}} \\
 RI_S21(x, k) &:= 10^{\frac{x_{k, ORIGIN+3}}{20} \cdot e^{(i \cdot x_{k, ORIGIN+4}) \cdot \frac{\pi}{180}}} & RI_S22(x, k) &:= 10^{\frac{x_{k, ORIGIN+7}}{20} \cdot e^{(i \cdot x_{k, ORIGIN+8}) \cdot \frac{\pi}{180}}}
 \end{aligned}$$

Рисунок А.9 – Перевод S -параметров из дБ в разы в среде MathCad

- Функции перехода от матрицы рассеяния $[S]$ к матрице передачи $[T]$ и наоборот:

$$T_gup(S, k) := \frac{1}{(S_k)_{2,1}} \cdot \begin{bmatrix} -[(S_k)_{1,1} \cdot (S_k)_{2,2} - (S_k)_{2,1} \cdot (S_k)_{1,2}] & (S_k)_{1,1} \\ (S_k)_{2,1} & -(S_k)_{2,2} & 1 \end{bmatrix}$$

Рисунок А.10 – Переход от S -матрицы к T -матрице в среде MathCad

$$S_{\text{gup}}(T,k) := \frac{1}{(T_k)_{2,2}} \begin{bmatrix} (T_k)_{1,2} & (T_k)_{1,1} \cdot (T_k)_{2,2} - (T_k)_{1,2} \cdot (T_k)_{2,1} \\ 1 & -(T_k)_{2,1} \end{bmatrix}$$

Рисунок А.11 – Переход от T -матрицы к S -матрице в среде *MathCad*

Чтобы приступить к последующим расчетам, подгруженные данные S_{param} необходимо перевести из дБ в разы, что можно сделать при помощи функции на рисунке А.12.

$$\begin{aligned} S11m_k &:= \text{RI_S11}(S_{\text{param}},k) & S21m_k &:= \text{RI_S21}(S_{\text{param}},k) \\ S12m_k &:= \text{RI_S12}(S_{\text{param}},k) & S22m_k &:= \text{RI_S22}(S_{\text{param}},k) \end{aligned}$$

Рисунок А.12 – Перевод измеренных параметров S -матрицы в разы

Для учета помех и переотражений в подводящих линиях необходимо перейти от измеренных S -параметров всего коаксиального тракта к S -параметрам непосредственно образца, что можно сделать с помощью метода преобразования матриц рассеяния СВЧ элементов в линии в матрицы передачи. В первую очередь запишем S -параметры каждого элемента в виде матриц.

$$\begin{aligned} \beta_k &:= \frac{2\pi \cdot f_k}{c} & \gamma_k &:= i\beta_k \\ S_{\text{param_v1}_k} &:= \begin{bmatrix} 0 & e^{-(\gamma_k l1)} \\ e^{-(\gamma_k l1)} & 0 \end{bmatrix} \\ S_{\text{param_v2}_k} &:= \begin{bmatrix} 0 & e^{-(\gamma_k l2)} \\ e^{-\gamma_k l2} & 0 \end{bmatrix} \\ S_{m_MUT_k} &:= \begin{pmatrix} S11m_k & S12m_k \\ S21m_k & S22m_k \end{pmatrix} \end{aligned}$$

Рисунок А.13 – S -матрицы каждого СВЧ элемента в линии в среде *MathCad*

Далее осуществляется переход от S -матриц к T -матрицам следующим образом:

$$T_{L1_k} := T_gup(S_param_v1,k)$$

$$T_{L2_k} := T_gup(S_param_v2,k)$$

$$Tm_MUT_k := T_gup(Sm_MUT,k)$$

Рисунок А.14 – Переход к T -параметрам каждого СВЧ элемента в линии в среде *MathCad*

При помощи выражения (1.22) можно получить T -параметры самого образца, которые затем необходимо перевести в S -параметры для последующей математической обработки.

$$T_MUT_k := (T_{L1_k})^{-1} \cdot Tm_MUT_k \cdot (T_{L2_k})^{-1}$$

$$S_MUT_k := S_gup(T_MUT,k)$$

Рисунок А.15 – Расчет T -параметров образца и последующий переход к S -параметрам в среде *MathCad*

Произведем проверку полученных результатов, построим график фазы коэффициента отражения S_{11} , выведя на один график фазу до исключения помех в подводящей линии и после.

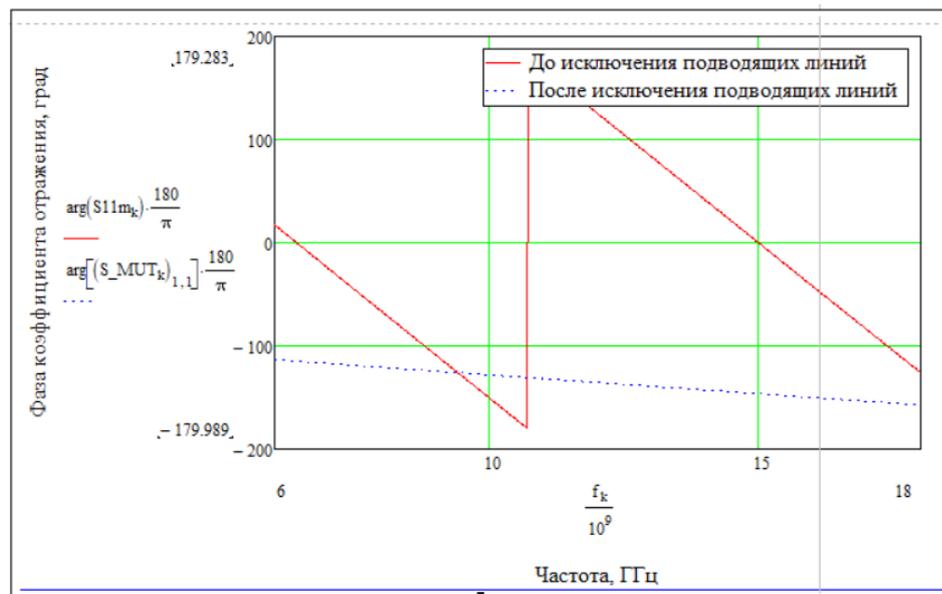


Рисунок А.16 – Проверка корректности исключения помех в подводящей линии

Данную процедуру проверки также необходимо провести для фазы коэффициента передачи S_{12} .

Получив искомые S -параметры исследуемого образца материала, необходимо рассчитать комплексные диэлектрическую и магнитную проницаемости материала с помощью математического алгоритма Николсона-Росса-Вейера, описанного в

выражениях(1.7) – (1.15). Выбор знака в выражении (1.10) осуществляется следующим образом:

$$\Gamma_k \approx \begin{cases} K_k + \sqrt{(K_k)^2 - 1} & \text{if } \text{abs}[K_k + \sqrt{(K_k)^2 - 1}] \leq 1 \\ K_k - \sqrt{(K_k)^2 - 1} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Рисунок А.17 – Выбор знака при расчете коэффициента отражения от материала

Полученные в результате вычислений комплексные значения диэлектрической и магнитной проницаемостей выносятся на графики с разделением на действительную и мнимую части с помощью встроенных в среду *MathCad* функций *Re* и *Im*. Примеры графиков представлены на рисунках ниже.

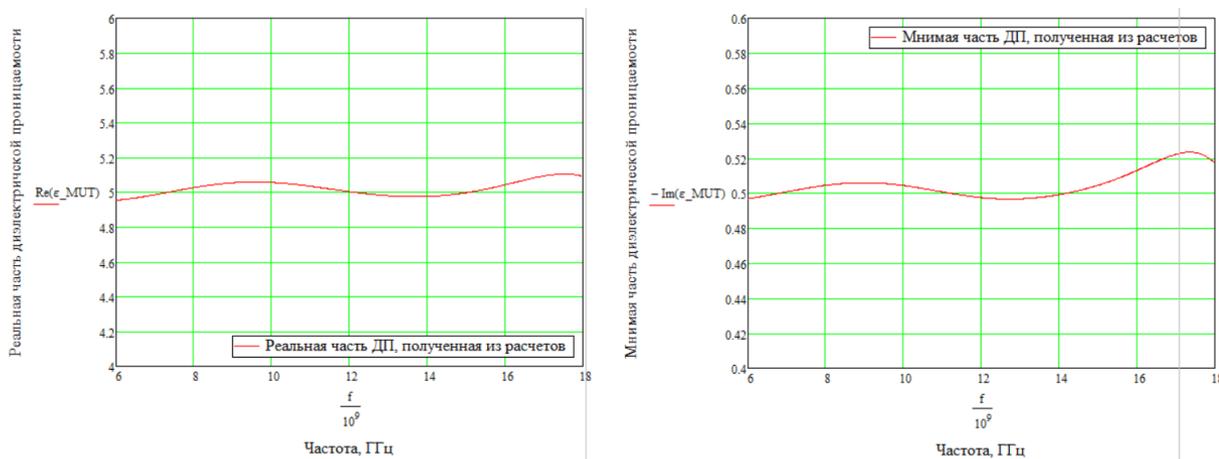


Рисунок А.18 – Полученная в ходе математической обработки комплексная диэлектрическая проницаемость материала

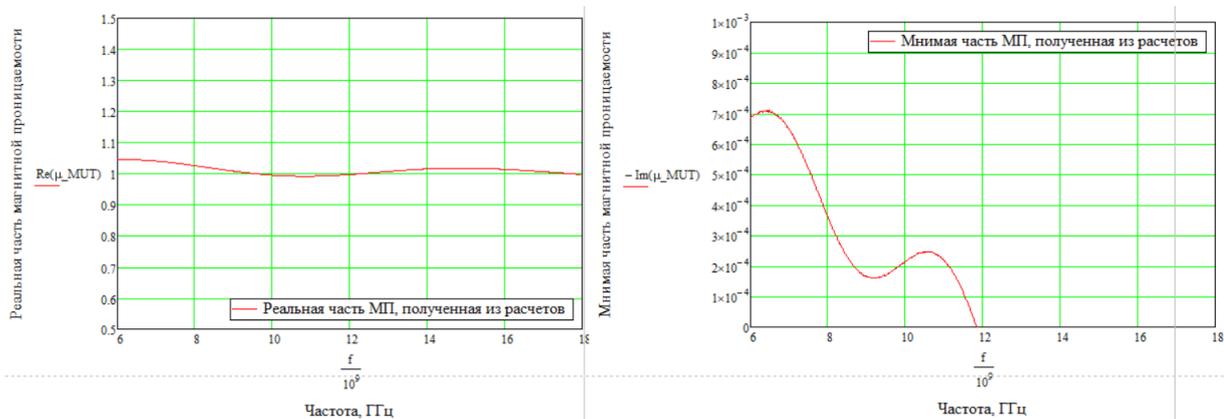


Рисунок А.19 – Полученная в ходе математической обработки комплексная магнитная проницаемость материала