

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

Кафедра радиоэлектроники и систем связи

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

**Исследование диэлектрических свойств материалов методом открытого конца
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:

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

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

П 44 Исследование диэлектрических свойств материалов методом открытого конца 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 комплексной относительной диэлектрической проницаемости материалов методом открытого конца коаксиальной линии передач, 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 Измерения на векторных анализатора цепей	5
1.2 Понятие комплексной относительной диэлектрической проницаемости.....	6
1.3 Исследование свойств материалов методом открытого конца коаксиальной линии ...	8
2 Экспериментальная часть	13
2.1 Описание экспериментальной установки.....	13
2.2 Порядок выполнения работы.....	16
3 Требования к отчету	18
4 Контрольные вопросы.....	19
5 Список рекомендуемой литературы	20
Приложение А	21

Введение

Цель работы: исследование диэлектрических свойств материалов путем математической обработки параметров матрицы рассеяния коаксиальной линии передач с открытым концом.

Задачи:

- 1) Изучение лабораторного макета по измерению комплексных диэлектрической проницаемости материалов с помощью открытого конца коаксиальной линии.
- 2) Изучение принципов измерений на СВЧ.
- 3) Конфигурирование измерительной установки.
- 4) Проведение экспериментальных измерений материалов с помощью открытого конца коаксиальной линии на лабораторном макете векторного анализатора цепей.
- 5) Изучение и построение в среде *MathCad* математической модели для обработки параметров матрицы рассеяния, полученных путем измерения с помощью открытого конца коаксиальной линии, и последующего вычисления диэлектрической проницаемости исследуемого материала.
- 6) Проведение анализа результатов проведённой работы.

1 Краткие теоретические сведения

1.1 Измерения на векторных анализатора цепей

Для оценки различных характеристик активных и пассивных цепей и схем широко используются анализаторы цепей. В качестве исследуемых характеристик часто выступают полное сопротивление (импеданс), а также параметры матрицы рассеяния устройств. Некоторые из анализаторов цепей могут предоставлять возможность переводить данные, полученные в ходе измерений, из частотной области во временную и наоборот.

Анализатор электрических цепей – это прибор, позволяющий исследовать различные устройства путем измерения проходящего через них опорного сигнала.

На комплексной плоскости опорный синусоидальный сигнал с произвольной фазой представляет из себя вектор. Соответственно, векторными анализаторами цепей можно назвать те анализаторы, которые работают с комплексными величинами, а также обеспечивают построение не только амплитудно-частотных, но и фазочастотных характеристик. В текущее время при измерениях преимущественно используются векторные анализаторы цепей, что обусловлено наиболее подробным описанием характеристик тестируемых устройств.

На рисунке 1.1 представлена упрощенная функциональная схема векторного анализатора цепей с двумя портами.



Рисунок 1.1 – Функциональная схема двухпортового векторного анализатора цепей

Данная схема содержит в себе настраиваемый по частоте источник сигнала и 4 приемника, пара которых является опорными, а другая пара – измерительными. Источники и приемники подключены к широкополосным портам 1 и 2, между которых подключается исследуемое устройство в случае двухпортовых измерений.

При оценке параметров матрицы рассеяния тестируемого устройства измерения происходят за счет подачи опорного синусоидального сигнала, который отражается и проходит через данное устройство. Прошедший и отраженный сигналы будут иметь отличия по фазе и амплитуде от изначального опорного сигнала. На рисунке 1.2 изображен процесс измерения всех главных параметров матрицы рассеяния двухпортового устройства.

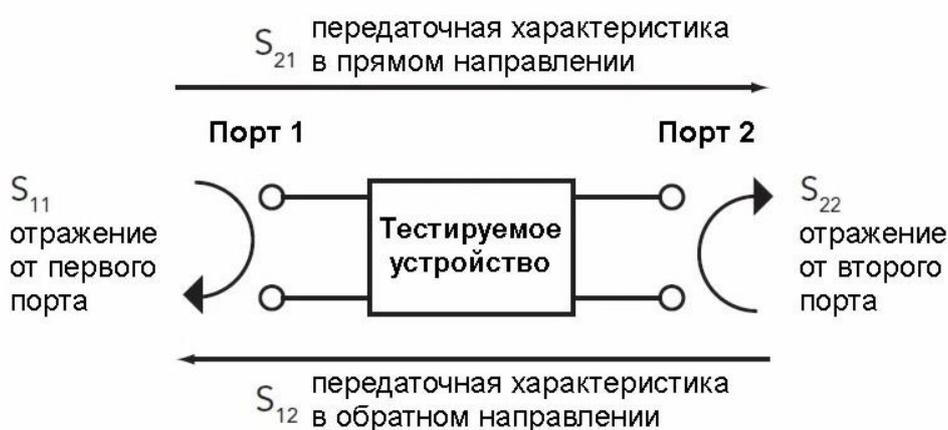


Рисунок 1.2 – Главные S-параметры матрицы рассеяния исследуемого устройства

В данном случае S_{11} является характеристикой отражения от первого порта (коэффициент отражения по входу), S_{21} называется характеристикой передачи в направлении с первого до второго порта (коэффициент прямой передачи), S_{12} – характеристика передачи в направлении со второго порта на первый (коэффициент обратной передачи), а S_{22} – это характеристика отражения от второго порта (коэффициент отражения по выходу).

1.2 Понятие комплексной относительной диэлектрической проницаемости

Из всего многообразия свойств материалов основным является их комплексная относительная диэлектрическая проницаемость ϵ_r , которая характеризует диэлектрические свойства исследуемой среды. Она 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 относительную диэлектрическую проницаемость можно записать как:

$$\varepsilon_r = \varepsilon' - j \cdot \varepsilon'', \quad (1.1)$$

$$\varepsilon'' = \varepsilon' \operatorname{tg} \delta = \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0}, \quad (1.2)$$

где ε' – действительная 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;

σ – проводимость исследуемого вещества;

$\varepsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – диэлектрическая постоянная;

$\operatorname{tg} \delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь, который определяет отношение потерь энергии к энергии, запасенной в исследуемом материале.

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} = \frac{\text{Потери энергии}}{\text{Запасенная энергия}}. \quad (1.3)$$

Физические величины, представленные в выражениях, (1.1) – (1.3), а именно – ε' , ε'' и σ , являются функциями от частоты. На рисунке 1.3 изображено типичное поведение комплексной относительной диэлектрической проницаемости как функции от частоты.

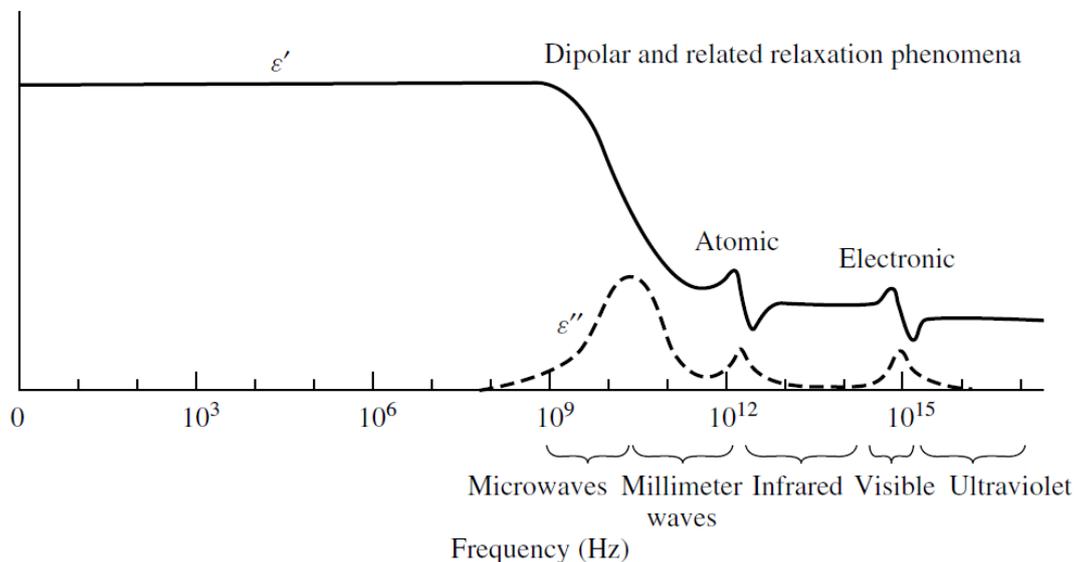


Рисунок 1.3 – Зависимость диэлектрической проницаемости гипотетического материала от частоты

Диэлектрическая проницаемость связана с множеством различных явлений. В первую очередь на нее влияют такие явления, как дипольная релаксация, ионная проводимость, атомная и ионная поляризации. На частотах ниже микроволнового диапазона наблюдается

подавление ε'' , что обусловлено влиянием ионной проводимости. На микроволновом диапазоне колебания диэлектрической проницаемости в основном обусловлены дипольной релаксацией, поглощение на инфракрасном диапазоне – атомной и электронной поляризацией.

1.3 Исследование свойств материалов методом открытого конца коаксиальной линии

Метод открытого конца коаксиальной линии уже много лет используется в качестве неразрушающего метода исследования диэлектрических свойств материалов. Рассматриваемый метод из-за своей относительной простоты и точности широко используется для определения диэлектрической проницаемости исследуемых материалов на радио- и микроволновых частотах, а также предполагает распространение исключительно волн *TEM* и *TE*-типа.

Метод открытого конца коаксиальной линии основан на измерении только одного параметра матрицы рассеяния, а именно – комплексного коэффициента отражения S_{11} , путем подключения открытой коаксиальной линии к одному порту векторного анализатора цепей.

В рассматриваемом методе обычно используется коаксиальная линия, отличная от воздушной. Это значит, что пространство между центральным и внешним проводниками должно быть заполнено материалом отличным от воздуха. Например, в качестве заполнителя может выступать фторопласт-4 (тефлон). Строение коаксиальной линии, используемой в измерениях, изображено на рисунке 1.4.

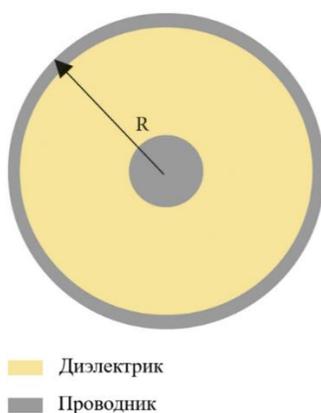


Рисунок 1.4 – Строение коаксиальной линии передач, используемой в измерениях

В данном методе измерения проводятся путем контакта открытого конца коаксиальной линии с различными материалами. В случае с жидкими или сыпучими образцами открытый

конец линии необходимо погрузить в них, а в случае с твердыми или пластичными – конец линии плотно прижимают к образцу во избежание возникновения воздушных зазоров. Поскольку контакт конца коаксиальной линии с исследуемым материалом вызывает искажение структуры полей, мы можем измерить отраженный сигнал S_{11} и затем совершить процедуру математической обработки для получения комплексной относительной диэлектрической проницаемости ϵ_r .

Описанную систему измерений с открытым концом линии и исследуемым материалом можно представить в виде эквивалентной схемы, состоящей из двух параллельно соединенных конденсаторов. Данная схема изображена на рисунке 1.5.

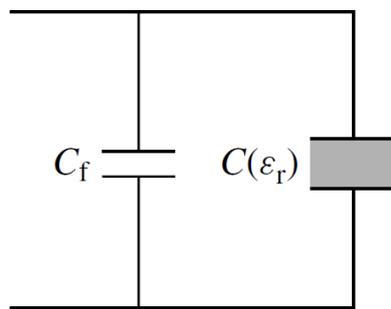


Рисунок 1.5 – Эквивалентная схема системы измерений

Емкость C_f не зависит от параметров исследуемого материала и представляет собой концентрацию электрического поля, находящегося внутри диэлектрического заполнения в коаксиальной линии. Ее значение постоянно и зависит от различных параметров коаксиальной линии, как геометрических, так и диэлектрических.

Емкость $C(\epsilon_r)$ в свою очередь связана с параметрами исследуемого материала и представляет собой концентрацию краевого электрического поля в диэлектрике. Ее можно описать следующим выражением:

$$C(\epsilon_r) = \epsilon_r C_0, \quad (1.4)$$

где ϵ_r – комплексная диэлектрическая проницаемость исследуемого материала;

C_0 – емкость, заполненная воздухом.

Адмиттанс (комплексную проводимость) данной системы измерений можно описать следующим образом:

$$Y = j\omega C_f + j\omega C(\epsilon_r) = j\omega C_f + j\omega \epsilon_r C_0, \quad (1.5)$$

где j – мнимая единица;

ω – угловая частота;

$C(\epsilon_r)$ – емкость, зависящая от параметров исследуемого материала;
 C_f – емкость, не зависящая от параметров исследуемого материала.

Адмиттанс, как и диэлектрическая проницаемость исследуемого материала, является комплексной величиной, следовательно, его можно записать как:

$$Y = j\omega C_f + j\omega(\epsilon' - j\epsilon'')C_0, \quad (1.6)$$

$$Y = \omega\epsilon''C_0 + j\omega(C_f + \epsilon'C_0) = G + jB, \quad (1.7)$$

где G – действительная часть комплексной проводимости, характеризующая способность материала проводить электрический ток

B – мнимая часть комплексной проводимости, характеризующая сопротивление материала.

Действительная часть комплексной проводимости напрямую связана с мнимой частью комплексной диэлектрической проницаемости, т.е. с потерями энергии.

Адмиттанс данной системы измерений обратно пропорционален ее импедансу, поэтому, следовательно, комплексный коэффициент отражения, полученный в ходе измерений, можно записать следующим образом:

$$\Gamma = \frac{Y_0 - Y}{Y_0 + Y}, \quad (1.8)$$

где $Y_0 = \frac{1}{Z_0}$ – характеристический адмиттанс линии передач.

Однако, важно учитывать, что комплексный коэффициент отражения необходимо измерять в плоскости, где происходит соприкосновение коаксиальной линии с образцом. На рисунке 1.6 эта плоскость обозначена как $A - A'$.

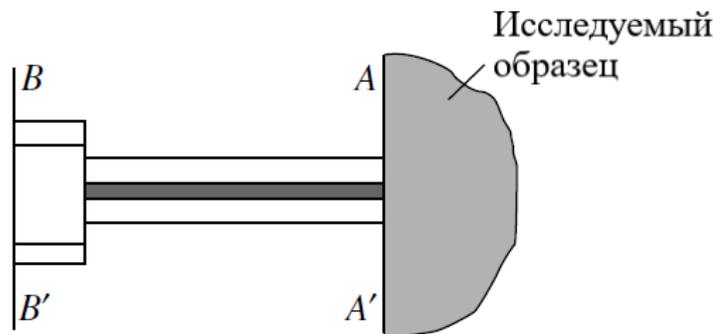


Рисунок 1.6 – Плоскости измерений при оценке диэлектрической проницаемости

Поскольку при проведении реального эксперимента плоскость измерений будет находиться в сечении $B - B'$, перед тем, как приступить к математической обработке измерений, необходимо провести процедуру переноса плоскости и учета длины коаксиальной линии при помощи следующего выражения:

$$\Gamma_{A-A'} = \Gamma_{B-B'} \cdot e^{2j \cdot \frac{2\pi l f}{c} \cdot \sqrt{\epsilon_d}}, \quad (1.9)$$

где ϵ_d – относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика в коаксиальной линии;
 l – длина линии передач.

Из выражений (1.6) – (1.7) становится очевидно, адмиттанс нагрузки является функцией от ее диэлектрической проницаемости, а из выражений (1.8) и (1.9) видно, что коэффициент отражения является функцией от адмиттанса нагрузки. Таким образом, должна существовать функция диэлектрической проницаемости от коэффициента отражения, полученного в ходе измерений.

Согласно представленной выше эквивалентной схеме, для вывода данной зависимости необходимо определить значения трех неизвестных параметров коаксиальной линии передач, а именно параллельно соединенных емкостей C_0 и C_f , а также длины линии l . Эти неизвестные можно получить путем измерения коэффициентов отражения трех материалов/нагрузок с известными свойствами.

При помощи калибровки на три нагрузки можно определить зависимость $\epsilon_r = f(\Gamma)$, которая записывается как:

$$\epsilon_r = \frac{A_1 \Gamma - A_2}{A_3 - \Gamma}, \quad (1.10)$$

где Γ – комплексный коэффициент отражения исследуемого материала, полученный в ходе измерений;

A_1, A_2, A_3 – неизвестные переменные, полученные путем калибровки.

Все неизвестные параметры из данного выражения, а именно – A_1, A_2 и A_3 , так же можно получить в процессе калибровки. Основные эталонные нагрузки – это *open*, *short* и *load*. Под состоянием *open* подразумевается холостой ход, т.е. измерение коэффициента отражения воздуха. *Short* – это короткое замыкание, т.е. измерение коэффициента отражения от любого металлического материала. *Load* – это согласованная нагрузка, т.е. измерение коэффициента отражения любого материала с известными диэлектрическими свойствами. Например, деионизированной воды, метилового спирта и т.д. При помощи полученных коэффициентов отражения неизвестные переменные A_1, A_2, A_3 можно выразить следующим образом:

$$A_1 = \frac{\varepsilon_L(\Gamma_S - \Gamma_L) - (\Gamma_S - \Gamma_O)}{\Gamma_L - \Gamma_O}, \quad (1.11)$$

$$A_2 = \frac{\varepsilon_L \Gamma_O (\Gamma_S - \Gamma_L) - \Gamma_L (\Gamma_S - \Gamma_O)}{\Gamma_L - \Gamma_O}, \quad (1.12)$$

$$A_3 = \Gamma_S, \quad (1.13)$$

где ε_L – комплексная диэлектрическая проницаемость известного материала при согласованной нагрузке;

Γ_L – комплексный коэффициент отражения при согласованной нагрузке;

Γ_O – комплексный коэффициент отражения при холостом ходе;

Γ_S – комплексный коэффициент отражения при коротком замыкании.

Каждая переменная, представленная в выражениях (1.11) – (1.13), так же может быть функцией от частоты, поэтому процесс калибровки математической модели должен проводиться по всему диапазону частот. Вычисления неизвестных переменных A_1 , A_2 , A_3 необходимо совершать в каждой частотной точке, что позволит получить значение комплексной относительной диэлектрической проницаемости исследуемого материала на всем диапазоне частот.

2 Экспериментальная часть

2.1 Описание экспериментальной установки

Для проведения эксперимента по исследованию диэлектрических свойств различных материалов методом открытого конца коаксиальной линии необходимо собрать лабораторный макет. Как показано на рисунке 2.1, такой макет должен состоять из векторного анализатора цепей и коаксиальной линии, подключенной к одному из его портов с помощью определенных кабелей и переходов. В зависимости от ситуации используются коаксиальные переходы с разъемами *SMA*- или *N*-типа.

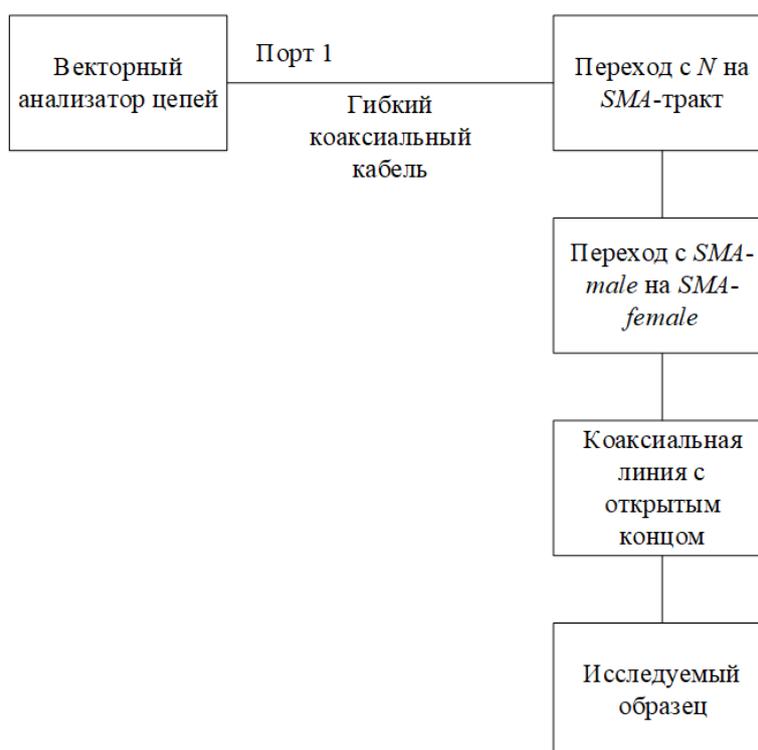


Рисунок 2.1 – Функциональная схема измерительной установки

Чтобы при измерениях получить корректные значения комплексного коэффициента отражения, перед сборкой макета необходимо провести процедуру калибровки векторного анализатора цепей. Калибровка осуществляется для исключения влияния переменных внешних факторов, например, таких, как, изменение температуры внешней среды, которое, как правило, воздействует на свойства и параметры используемых в измерениях устройств и материалов.

В случае однопортовых измерений необходимо провести однопортовую *SOL* (*short-open-load*) калибровку, что можно сделать при помощи автоматического калибратора, либо отдельных калибровочных модулей, последовательно подключаемых к векторному

анализатору цепей в соответствии с его указаниями. Эталонными нагрузками данного вида калибровки являются согласованная (*Load*), короткозамкнутая (*Short*) и нагрузка холостого хода (*Open*).

В измерениях используются такие устройства, как векторный анализатор цепей «*FieldFox Handheld Microwave Analyzer N9918A*» и автоматический калибратор «*Electronic Calibration Module N4691-60004*». Данные устройства изображены на рисунке 2.2.



(a)

(б)

Рисунок 2.2 – Устройства, используемые для измерений: (а) – векторный анализатор цепей «*FieldFox Handheld Microwave Analyzer N9918A*»; (б) – автоматический калибратор «*Electronic Calibration Module N4691-60004*»

Для исследования диэлектрических свойств материалов также используется коаксиальная линия «*SR_86_CU_TP_M17*» длиной $l = 94$ мм. На одном из концов линии расположен разъем типа *SMA-male*, как показано на рисунке 2.3. Для подключения векторного анализатора цепей к коаксиальной линии используется гибкий коаксиальный кабель с разъемами *N*-типа и 2 перехода – с *SMA-male* на *SMA-female*, а также с *SMA*-тракта на *N*-тракт. Используемые переходы представлены на рисунке 2.4.



(a)

(б)

Рисунок 2.3 – Коаксиальная линия с открытым концом, используемая в измерениях: (а) – вид сбоку; (б) – разъем типа SMA-male



(a)

(б)

Рисунок 2.4 – Используемые в измерениях переходы: (а) – переход с SMA-male на SMA-female; (б) – переход с SMA-тракта на N-тракт

После проведения калибровки и подключения коаксиальной линии к одному из портов векторного анализатора цепей, необходимо настроить тип сохраняемых данных (при однопортовых измерениях данные должны сохраняться в формате *.slp*), частотный диапазон и количество частотных точек на графиках. Важно отметить, что корректной работы математического алгоритма необходимо, чтобы у всех измеренных комплексных коэффициентов отражений совпадали количество точек и частотный диапазон.

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 настройку векторного анализатора цепей:
 - Настроить тип сохраняемых данных: при однопортовых измерениях данные необходимо сохранять в формате *s1p*;
 - Выставить частотный диапазон, на котором будут проводиться измерения, и количество точек на графиках: диапазон должен быть от 0.01 до 10 ГГц, количество точек – 1000.
 - Настроить путь сохранения данных: создать временную папку на время работы с устройством. При измерениях создается файл в Вашей папке, название которого должно соответствовать исследуемому материалу.
3. Осуществить процедуру однопортовой *SOL* калибровки векторного анализатора цепей с помощью автоматического калибратора, либо специальных калибровочных модулей.
4. Подключить коаксиальную линию с открытым концом к первому порту векторного анализатора цепей с помощью определенных кабелей и переходов.
5. Провести измерения комплексных коэффициентов отражения трех нагрузок для калибровки математической модели: холостого хода (воздух), согласованной нагрузки (деионизированной воды) и короткого замыкания (любой металл). Также необходимо провести измерения комплексных коэффициентов отражения исследуемых материалов. Формат сохраненных данных с лабораторного макета выглядит следующим образом:
 - Если измерения проводились в дБ, то первым столбцом будут частотные точки, вторым и третьим – амплитуда и фаза комплексного коэффициента отражения
 - Если измерения проводились в размах, то первым столбцом так же будут частотные точки, а вторым и третьим – действительная и мнимая составляющие комплексного коэффициента отражения.

```

!S1P File: Measurement: S11:
# Hz S DB R 50
30000 -0.0535466358702126 -0.134590820119766
10039979.97998 0.0443154293886634 -46.5501138719934
20049959.95996 0.19530186175652 -92.5540922019388
30059939.9399399 0.270331041649468 -137.868345404129
40069919.9199199 0.191053424254926 177.315883417211
50079899.8998999 -0.0177379231838172 132.394609920275
60089879.8798799 -0.27458477872456 87.0236170948487
70099859.8598599 -0.373432460989118 40.9005610801909
80109839.8398398 -0.288302914621444 -5.4943167247525
90119819.8198198 -0.0642293722164193 -51.4154467590715

```

Рисунок 2.5 – Пример сохраненных результатов измерения параметров матрицы рассеяния

6. Осуществить математическую обработку результатов измерений в среде *MathCad* для расчета комплексной относительной диэлектрической проницаемости исследуемого материала. В приложении А представлены рекомендации по проведению математической обработки. Построить графики результатов математической обработки с разделением на действительную и мнимую части.

7. Написать выводы о проделанной работе. В выводах необходимо описать поведение полученной комплексной относительной диэлектрической проницаемости исследуемого материала.

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. Что такое анализатор электрических цепей?
2. В чем разница между скалярным и векторным анализаторами цепей?
3. Что такое комплексная относительная диэлектрическая проницаемость?
4. Понятие тангенса угла диэлектрических потерь.
5. На чем основан метод открытого конца коаксиальной линии?
6. Строение коаксиальной линии.
7. Эквивалентная схема метода открытого конца коаксиальной линии.
8. Описать процедуру переноса плоскости комплексного коэффициента отражения.
9. Основные эталонные нагрузки и их применение.
10. Параметр, характеризующий потери в диэлектрике.

5 Список рекомендуемой литературы

1. Microwave Electronics: Measurements and material characterization / L.F. Chen, C.K. Ong, C.P. Neo, V.V. Varadan, V.K. Varadan. John Wiley & Sons, Ltd, 2004. 537 с.
2. Мандель А.Е., Боков Л.А. Электродинамика и распространение радиоволн. Томск: ТУСУР. 2013. 145 с.
3. Брандт А.А. Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах, М. Физматгиз, 1963, 404 с.
4. Хиппель А. Диэлектрики и волны, Госэнергоиздат, 1959 г.
5. Дьяконов В. Современные цифровые векторные анализаторы цепей // Компоненты и технологии. 2014. №2. С. 158–166.
6. dB or not dB? Everything you ever wanted to know about decibels but were afraid to ask. Application notes, Rohde & Shwartz GmbH & Co. KG, 2019.
7. Гупта К., Гардж Р., Чадха Р. Машинное проектирование СВЧ устройств. Пер. с англ. Москва: Радио и связь. 1987, 432 с.
8. Шестопалов В.И. Методы измерения диэлектрической проницаемости вещества на сверхвысоких частотах, 1961 г., Т. LXXIV, В.И. Шестопалов и К.И. Яшук.
9. Measurement of Dielectric Material Properties. Application note, Rohde & Shwartz GmbH & Co. KG, 2012.
10. Jingchen Wang, Eng Gee Lim, Mark Paul Leach, Zhao Wang, Ka Lok Man. Open-Ended Coaxial Cable Selection for Measurement of Liquid Dielectric Properties via the Reflection Method // Mathematical Problems in Engineering. 2020, 8 с.
11. Šarolić, A.; Matković, A. Dielectric permittivity measurement using open-ended coaxial probe—modeling and simulation based on the simple capacitive-load model. Sensors. 2022, 22, 6024. 28 с.
12. Презентация Keysight Technologies «Характеризация параметров материалов от постоянного тока до терагерцового диапазона частот», 2015 г.
13. «Основы измерения диэлектрических свойств материалов. Заметки по применению», Agilent Technologies, 2010 г.

Приложение А

(справочное)

Рекомендации по расчету диэлектрической проницаемости материалов в среде *MathCad*

После проведения всех необходимых измерений необходимо осуществить расчет комплексной относительной диэлектрической проницаемости исследуемых материалов в среде *MathCad*. Это можно сделать, используя выражения, представленные в п.1.3.

В первую очередь необходимо провести считывание измеренных данных. Для этого необходимо нажать правой кнопкой мыши на рабочей области, чтобы вывести меню, изображенное на рисунке А.1.

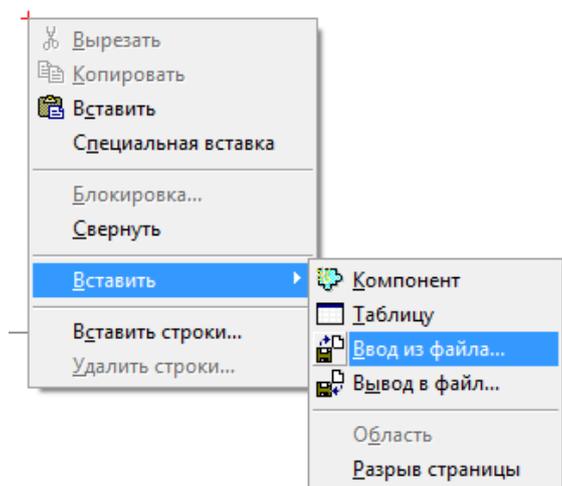


Рисунок А.1 – Загрузка данных, полученных путем измерений

Далее нужно выбрать путь к данным и указать, с какой строки будет осуществляться считывание данных, как показано на рисунке А.2.

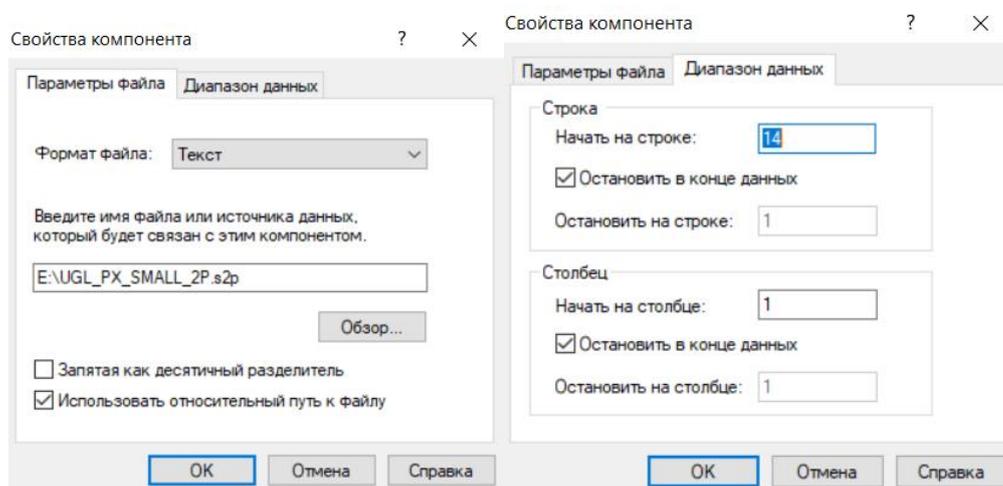


Рисунок А.2 – Загрузка данных, выбор пути и строки, с которой будут считывать данные

Для расчетов нужно подгрузить коэффициенты отражений трех калибровочных нагрузок, а также исследуемого образца. Затем загруженным данным необходимо присвоить названия и проверить корректность загрузки данных, как показано на рисунках А.3 и А.4.

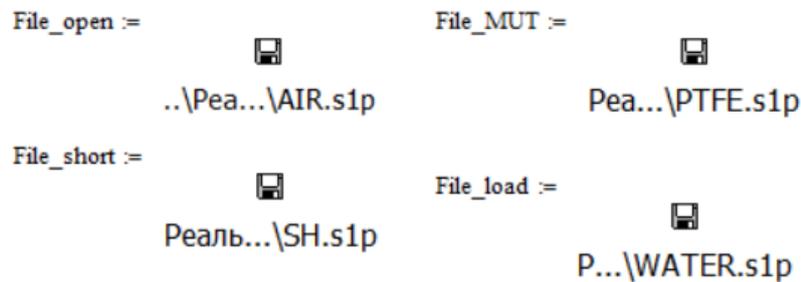


Рисунок А.3 – Присвоение названий загруженным данным (*File_open* – холостой ход, *File_short* – короткое замыкание, *File_load* – согласованная нагрузка, *File_MUT* – исследуемый материал)

	0	1	2	
<code>File_open =</code>	0	$1.004 \cdot 10^7$	0.044	-46.55
	1	$2.005 \cdot 10^7$	0.195	-92.554
	2	$3.006 \cdot 10^7$	0.27	-137.868
	3	$4.007 \cdot 10^7$	0.191	...

Рисунок А.4 – Проверка загруженных данных

После подгрузки данных проиндексируем их, где k – порядковый номер частоты, как показано ниже.

$$k := 0..rows(\text{File_open}) - 1$$

Рисунок А.5 – Процедура индексации измеренных данных

Затем, как показано на рисунке А.6, необходимо задать массив частотных точек в Гц, которые потребуются далее при построении графиков и расчетов.

$$f := \text{File_open}^{(0)}$$

Рисунок А.6 – Создание массива частотных точек

Для последующих расчетов опишем необходимые функции:

- Функция перевода комплексного коэффициента отражения из дБ в разы, если измерения проводились в дБ:

$$RI(x) := \left(\frac{x^{(1)}}{10} \cdot e^{i \cdot x^{(2)} \cdot \frac{\pi}{180}} \right)$$

- Рисунок А.7 – Функция перевода комплексного коэффициента отражения из дБ в разы
- Функция считывания данных в размах, если измерения проводились в размах:

$$RI(x) := x^{(1)} + i \cdot x^{(2)}$$

Рисунок А.8 – Функция вывода данных в размах

- Функция перевода комплексного коэффициента отражения из разов в дБ для построения графиков:

$$db(x) := 20 \cdot \log(abs(x))$$

Рисунок А.9 – Функция перевода из разов в дБ

- Функция расчета фазы комплексного коэффициента отражения:

$$phase(x) := \arg(x) \cdot \frac{180}{\pi}$$

Рисунок А.10 – Расчет фазы комплексного коэффициента отражения

Для того, чтобы приступить к последующим расчетам, все подгруженные комплексные коэффициенты отражения необходимо вывести в размах (формат *RI*), что можно сделать следующим образом:

$$\begin{aligned} S11_O &:= RI(File_open) & S11_MUT &:= RI(File_MUT) \\ S11_L &:= RI(File_load) & S11_S &:= RI(File_short) \end{aligned}$$

Рисунок А.11 – Вывод измеренных данных в размах (*S11_O* – коэффициент отражения холостого хода, *S11_L* – коэффициент отражения согласованной нагрузки, *S11_S* – коэффициент отражения короткого замыкания, *S11_MUT* – коэффициент отражения исследуемого материала)

Затем, чтобы провести корректные расчеты диэлектрической проницаемости исследуемого образца, проведем процедуру переноса плоскости. Это можно сделать с помощью выражения (1.9), представленного на рисунке А.12. В данном выражении *L* – это длина коаксиальной линии, используемой в измерениях, а значение под корнем – диэлектрическая проницаемость диэлектрика в линии. (Для фторопласта-4 или

тефлона $\varepsilon=2.1$) Важно отметить, что данную процедуру необходимо провести для всех подгруженных комплексных коэффициентов отражений.

$$S_{11_O_PH_k} = S_{11_O_k} \cdot e^{2 \cdot i \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot L \cdot f_k}{c} \cdot \sqrt{\varepsilon_{diel}}}$$

Рисунок А.12 – Перенос плоскости комплексного коэффициента отражений холостого хода

Осуществим проверку корректности процедуры переноса плоскости. Для этого необходимо вынести на один график комплексный коэффициент отражения до и после переноса плоскости, как показано на рисунке А.13.

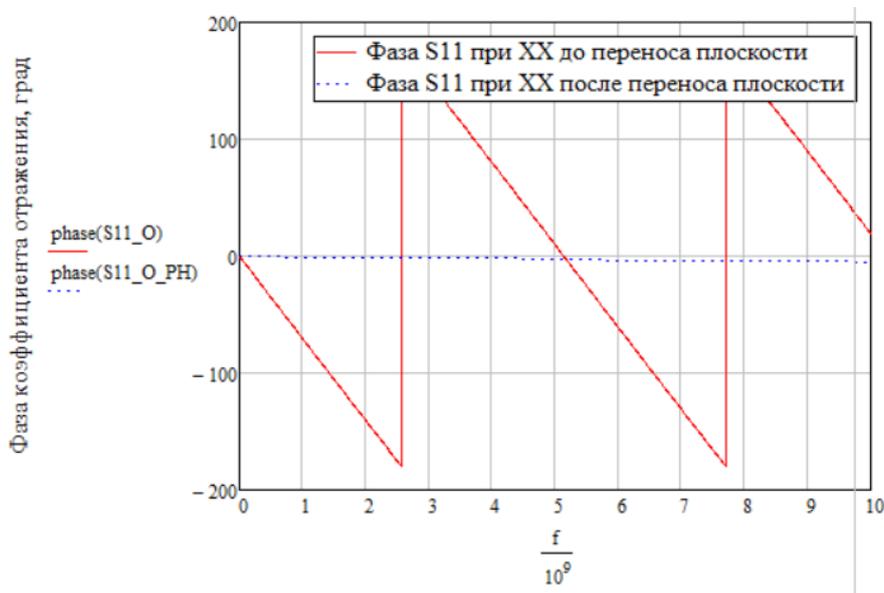


Рисунок А.13 – Проверка корректности переноса плоскости коэффициента отражения

Данную проверку необходимо провести для всех коэффициентов отражений, полученных путем измерений. Если на графиках отсутствует набег фазы, то можно сделать вывод о корректности проведенной процедуры.

Завершив процедуру переноса фазы всех комплексных коэффициентов отражений, можно приступить к калибровке математической модели и последующему расчету диэлектрической проницаемости исследуемого образца. Для калибровки в первую очередь необходимо описать поведение диэлектрической проницаемости согласованной нагрузки для частотного диапазона, на котором ведется работа. Если в качестве согласованной нагрузки была использована деионизированная вода, то ее комплексную относительную диэлектрическую проницаемость можно описать с помощью уравнения Дебая так, как показано на рисунке А.14.

$$\omega_k := 2 \cdot \pi \cdot f_k$$

$$\epsilon s_{\text{water}} := 78.4$$

$$\epsilon i_{\text{water}} := 3.1$$

$$\tau_{\text{water}} := 8.27 \cdot 10^{-12}$$

$$\epsilon_{\text{water}_k} := \epsilon i_{\text{water}} + \frac{\epsilon s_{\text{water}} - \epsilon i_{\text{water}}}{1 + i \cdot \omega_k \cdot \tau_{\text{water}}} \quad \text{- Формула Дебая для описания д. воды}$$

Рисунок А.14 – Описание комплексной относительной диэлектрической проницаемости деионизированной воды с помощью уравнения Дебая

Последним этапом в калибровке математической модели будет расчет калибровочных переменных с помощью выражений (1.11) – (1.13), после чего можно приступить к расчету комплексной относительной диэлектрической проницаемости исследуемого материала с помощью выражения (1.10).

Комплексную относительную диэлектрическую проницаемость исследуемого материала, полученную из расчетов, затем необходимо вынести на графики с разделением на действительную и мнимую составляющие, как показано на рисунке А.15. Это можно сделать с помощью встроенных в *MathCad* функций *Re* и *Im*, где *Re* – это вывод действительной части комплексного числа, а *Im* – мнимой.

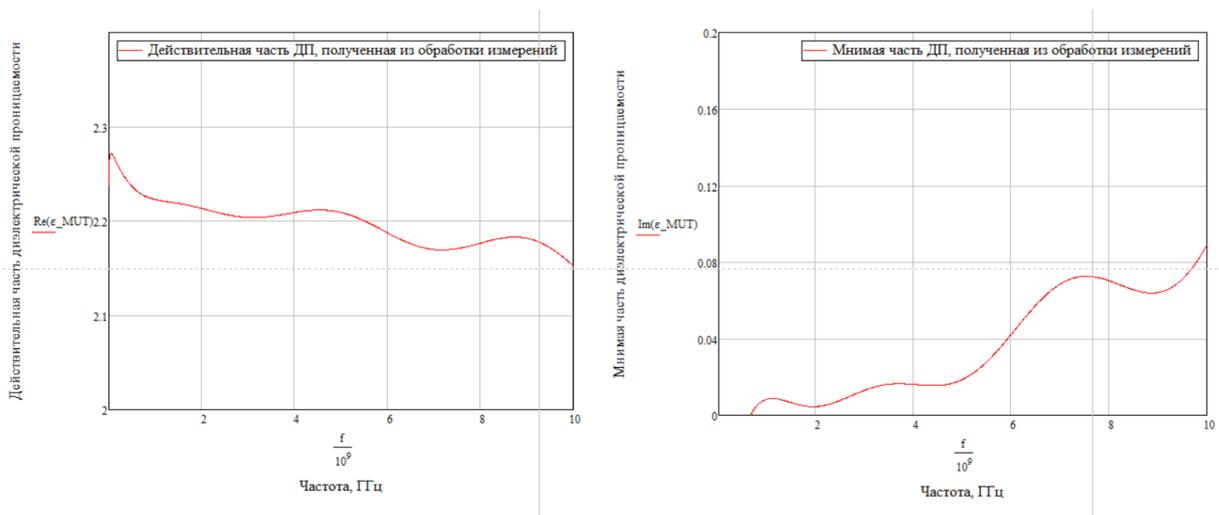


Рисунок А.15 – Комплексная относительная диэлектрическая проницаемость исследуемого материала, полученная в ходе математической обработки измерений

Если на графиках наблюдается значительный шум, то от него можно избавиться путем сглаживания данных с помощью встроенной в *MathCad* функцию *medsmooth*, как показано на рисунке А.16. Коэффициент сглаживания *n* необходимо выбрать вручную.

```
n := 501 - Коэффициент сглаживания  
Re_ε_ksm := medsmooth(Re(ε_MUT), n)  
Im_ε_ksm := medsmooth(Im(ε_MUT), n)
```

Рисунок А.16 – Процедура сглаживания данных

Затем сглаженные данные необходимо вывести на графики с разделением на действительную и мнимую составляющие.

На основе полученных графиков необходимо сделать выводы о поведении комплексной относительной диэлектрической проницаемости исследуемого материала на установленном диапазоне частот.