

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ИНСТИТУТ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ И ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Кафедра «Радиоэлектроника и телекоммуникации»

АНТЕННЫЕ СИСТЕМЫ

Часть 1

Учебно-методическое пособие

по выполнению лабораторного практикума по дисциплине
для студентов очной и заочной форм обучения направлений

11.03.01 - Радиотехника,

11.03.02 - Информационные технологии и системы связи
и специальности

11.05.01 - Радиоэлектронные системы и комплексы

Севастополь
СевГУ
2021

УДК 621.396.67(076.5)

ББК 32.845я73

A720

Р е ц е н з е н т:

А.А. Щекатури – канд. техн. наук, доцент

Ответственный за выпуск:

И. Л. Афонин – д-р техн. наук, профессор,
заведующий кафедрой «Радиоэлектроника и телекоммуникации»

Составители: В. В. Головин, Ю. Н. Тыщук, В. В. Громоздин

A720 Антенные системы : учебно-методическое пособие по выполнению лабораторного практикума по дисциплине для студентов очной и заочной форм обучения направлений 11.03.01 - Радиотехника, 11.03.02 - Информационные технологии и системы связи и специальности 11.05.01 - Радиоэлектронные системы и комплексы. В 3 частях. Часть 1 / Севастопольский государственный университет, Институт радиоэлектроники и информационной безопасности, кафедра «Радиоэлектроника и телекоммуникации» ; составители: В. В. Головин, Ю. Н. Тыщук, В. В. Громоздин. – Севастополь : Изд-во СевГУ, 2021. – 58 с. – Текст : электронный.

Цель учебно-методического пособия - оказание помощи студентам дневной и заочной форм обучения в подготовке и выполнении лабораторного практикума по дисциплине «Антенные системы», а также в получении ими теоретических знаний и приобретении практических навыков исследования линий передачи СВЧ и устройств на их основе.

УДК 621.396.67(076.5)

ББК 32.845я73

Учебно-методическое пособие утверждено на заседании кафедры «Радиоэлектроника и телекоммуникации», протокол № 6 от 24 февраля 2021 г.

Учебно-методическое пособие рассмотрено и рекомендовано к изданию на заседании Учёного совета Института радиоэлектроники и информационной безопасности, протокол № 8 от 24 февраля 2021 г.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
1. Лабораторная работа № 1. Исследование режимов работы линии передачи.....	6
2. Лабораторная работа № 2. Исследование частотных свойств комплексных нагрузок.....	19
3. Лабораторная работа № 3. Анализ частотных характеристик различных методов согласования линии передачи с нагрузкой.....	30
Библиографический список.....	52
Приложение А. Образец оформления титульного листа отчета по лабораторной работе.....	53
Приложение Б. Описание измерительной волноводной линии P1-4.....	54
Приложение В. Пример расчёта распределений амплитуды напряжения и тока в линии передачи, нагруженной на сопротивление нагрузки.....	56
Приложение Г. Пример расчёта параметров согласующих устройств в САПР <i>MATHCAD</i>	58

ВВЕДЕНИЕ

Лабораторные работы выполняются бригадами из 2 — 3 студентов.

Перед выполнением лабораторной работы **студенты обязаны:**

- изучить описание предстоящей лабораторной работы;
- изучить методику предстоящих измерений и расчетов;
- выполнить предварительные расчеты, оформить их в соответствии с требованиями кафедры;
- ознакомиться с правилами работы с измерительными приборами, входящими в измерительную установку;
- подготовиться к ответам на контрольные вопросы, относящиеся к данной лабораторной работе.

Бригада, допущенная к работе, готовит лабораторную установку в соответствии с методическими указаниями и до выполнения измерений предъявляет установку для проверки преподавателю.

При выполнении очередного опыта рекомендуется сначала произвести измерения без записей, чтобы убедиться в работоспособности лабораторной установки и выявить общий характер исследуемой зависимости. При этом следует отметить линейные и нелинейные участки зависимости, что позволит правильно выбрать интервал между отсчётами независимой переменной величины (частоты, напряжения и т.п.), пределы ее изменения, а также число отсчётов, достаточных для выявления особенностей исследуемой зависимости. Затем данный опыт нужно повторить с фиксацией результатов эксперимента.

После завершения работы преподаватель просматривает и подписывает протокол выполнения работы, на основании которого студенты оформляют отчёты.

Защита отчёта по выполненной лабораторной работе производится каждым студентом индивидуально на очередном лабораторном занятии. В процессе защиты проверяются: правильность оформления отчёта, знание студентами методики проведения экспериментов и умение анализировать характер полученных зависимостей и обосновывать выводы к работе.

Отчёт оформляется в соответствии с требованиями кафедры к оформлению текстовых документов [1].

Отчёт должен содержать:

- титульный лист;
- постановку задач исследования;
- структурную схему лабораторной установки;
- исходные данные;
- результаты теоретических исследований;
- результаты экспериментов и расчётов;
- выводы.

Образец оформления титульного листа приведён в Приложении А.

При постановке задач исследования необходимо сформулировать цель лабораторной работы и краткое содержание теоретических и экспериментальных исследований, которые необходимо выполнить в ходе лабораторной работы.

Исходные данные выбираются каждым студентом в соответствии с предпоследней (M) и последней (N) цифрами номера зачетной книжки.

Теоретические исследования выполняются студентом при подготовке к лабораторной работе. Для получения допуска к работе студент должен предъявить отчет, содержащий подготовленный бланк протокола измерений, и ответить на один-два вопроса (по выбору преподавателя) из числа контрольных вопросов для подготовки к выполнению работы.

Выводы должны носить конкретный характер по каждой из поставленных задач. Не следует подменять выводы перечислением выполненных измерений и наблюдений. Необходимо пояснить особенности исследованных зависимостей, оценить соответствие расчетных и экспериментальных данных, а в случае их расхождения — высказать предположения о возможных причинах, вызвавших такое расхождение.

1. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ

1.1. Цель работы

Изучить режимы работы линии передачи при различных сопротивлениях нагрузки, освоить методику измерения распределения напряжения в линии передачи и определения коэффициента стоячей волны.

1.2. Описание измерительной установки

Измерительная установка 1 состоит из СВЧ генератора 3 и измерительной линии 4. Исследуемая нагрузка 2 содержит диафрагму 5 (**исследуемая нагрузка**) и согласованную нагрузку 6 (рис. 1.1).

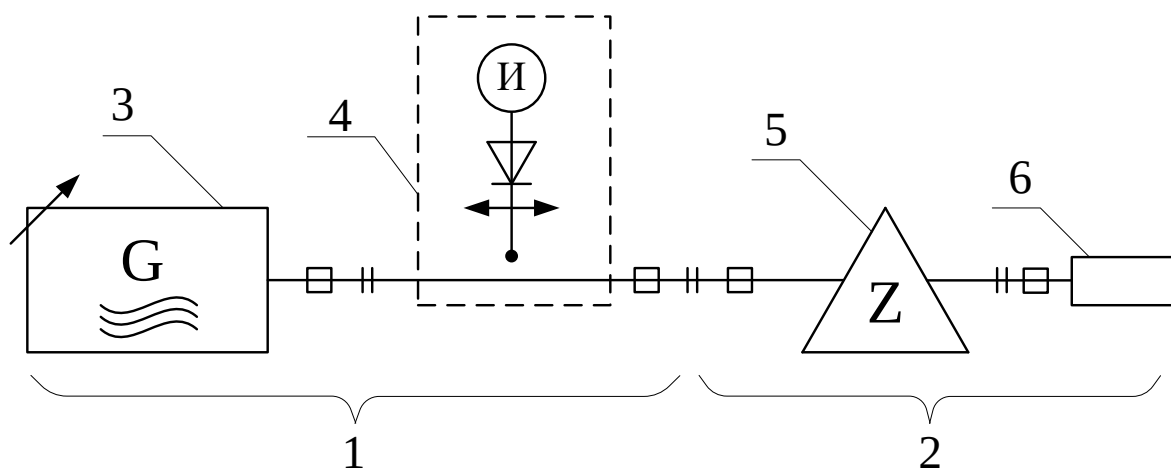


Рисунок 1.1 — Функциональная схема измерительной установки

Распределение напряженности электрического поля линии передачи измеряется при помощи волноводной измерительной линии.

Предусмотрены следующие варианты комплектации измерительной установки:

- вариант I: измерительная линия P1-4 на волноводе типа R84: размер поперечного сечения волновода 28,50×12,62 мм; длина 23 см;
- вариант II: измерительная линия P1-4 на волноводе типа R100: размер поперечного сечения волновода 22,66×10,16 мм; длина 29,5 см,
- вариант III: измерительная линия P1-4 на волноводе типа R140: размер поперечного сечения волновода 15,80×7,90 мм; длина 25 см.

Описание измерительной линии приведено в Приложении Б.

1.3. Исходные данные

Исходными данными для теоретических исследований являются: волновое сопротивление линии передачи ρ ; электрическая длина линии передачи

l/λ ; сопротивление нагрузки $Z_H = R_H + jX_H$; мощность, подводимая от генератора к линии передачи, P_{BX} (табл. 1.1).

Таблица 1.1 — Исходные данные для теоретических исследований

M	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
ρ , Ом	150	75	200	90	250	50	300	120	360	180
$\frac{R_H}{\rho}$	0,1	1,5	0,2	2,5	0,3	3	0,4	3,5	0,5	4
N	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\frac{X_H}{\rho}$	-1	0,5	-2	1,5	-3	2	-4	2,5	-3,5	4
$\frac{l}{\lambda}$	1,9	4,3	2,3	4,7	2,7	5,1	3,1	5,5	3,5	6,2
P_{BX} , Вт	3	13	5	15	7	17	9	19	11	21

Исходными данными для экспериментальных исследований являются: номера двух нагрузок и две рабочие частоты, на которых должны проводиться измерения (табл. 1.2). Номер измерительной установки (I, II или III) указывается преподавателем.

Таблица 1.2 — Исходные данные для экспериментальных исследований

M		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
номер нагрузки		1	2	3	4	5	6	7	8	9	5
		6	7	8	9	3	2	3	4	5	1
		N									
Номер установки	Частота генератора, ГГц	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
I	f_1	8,5	8,52	8,61	8,45	8,55	8,65	8,97	8,85	8,95	8,98
	f_2	9,05	9,15	9,25	9,35	9,45	9,55	9,65	9,75	9,85	9,95
II	f_1	8,05	8,1	8,2	8,3	8,4	8,5	8,6	8,7	8,8	8,9
	f_2	9,0	9,1	9,2	9,4	9,5	9,6	9,7	9,8	9,9	10,0
III	f_1	10,1	10,2	10,3	10,4	10,5	10,6	10,7	10,8	10,9	11,0
	f_2	11,05	11,1	11,2	11,3	11,4	11,5	11,6	11,7	11,75	11,8

1.4. Модель линии передачи

В лабораторной работе используется измерительная линия P1-4, выполненная на основе отрезка регулярного прямоугольного волновода. В технике

сверхвысоких частот (СВЧ) обычно геометрические размеры сечения волновода выбираются такими, чтобы по нему распространялась волна одного типа: для прямоугольного волновода это волна H_{10} .

Теоретически в одномодовом режиме прямоугольный волновод может быть заменён двухпроводной линией с таким же коэффициентом фазы распространения волны и переносящей сигнал с той же мощностью. Для прямоугольного волновода с воздушным заполнением при распространении в нём волны H_{10} волновое сопротивление линии равно [2]

$$\rho_{\text{в}} = \frac{b}{a} \frac{120\pi}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}}, \quad (1.1)$$

где a, b — соответственно размеры широкой и узкой стенок волновода.

Введем в рассмотрение эквивалентную двухпроводную линию передачи без потерь, с постоянным по всей длине волновым сопротивлением ρ , которое рассчитывается по формуле

$$\rho = 120 \ln \left(\frac{d}{r} \right),$$

где d — расстояние между проводами;

r — радиус поперечного сечения проводов.

Очевидно, что параметры этой линии можно подобрать для выполнения условия $\rho = \rho_{\text{в}}$.

Пусть двухпроводная линия длиной l , к входу которой подключен генератор, нагружена на сопротивление $Z_{\text{н}} = R_{\text{н}} + jX_{\text{н}}$. Поместим начало отсчета координаты x в сечение нагрузки (рис. 1.2).

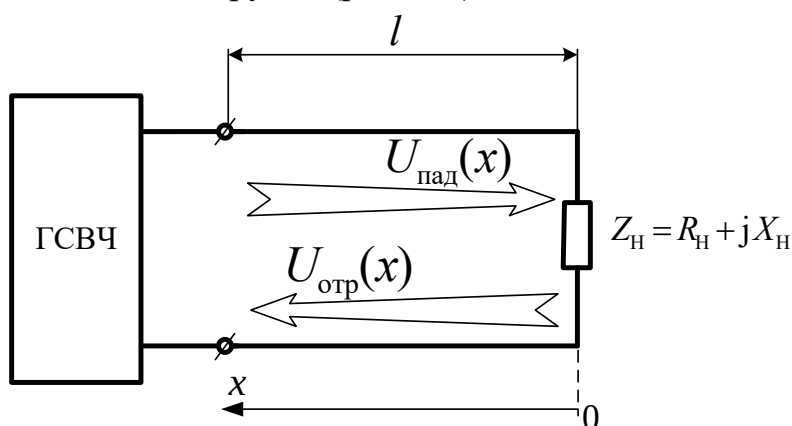


Рисунок 1.2 — Модель двухпроводной линии, нагруженной на сопротивление $Z_{\text{н}}$

Генератор СВЧ (ГСВЧ) создает падающую волну $U_{\text{пад}}(x)$, которая распространяется в направлении нагрузки (см. рис. 1.2). Если энергия генератора не полностью поглощается нагрузкой, то образуется отраженная волна $U_{\text{отр}}(x)$, которая распространяется в направлении генератора (см. рис. 1.2). Все разнообразие процессов, происходящих в длинной линии, определяется

амплитудно-фазовыми соотношениями между падающей и отраженной волнами.

Распределение комплексной амплитуды напряжения вдоль линии передачи можно описать с помощью уравнения

$$U(x) = U_{\text{пад}}(x) + U_{\text{отр}}(x). \quad (1.2)$$

В линии передачи без потерь амплитуды падающей $U_{\text{пад}}(x)$ и отраженной $U_{\text{отр}}(x)$ волн от переменной x не зависят, поэтому:

$$|U_{\text{пад}}(x)| = U_{\text{пад}}; \quad |U_{\text{отр}}(x)| = U_{\text{отр}}.$$

С учетом выбранного начала отсчета фазы в точке подключения нагрузки и направления отсчета продольной координаты x (от нагрузки к генератору) падающие и отраженные волны можно записать в виде

$$\begin{cases} U_{\text{пад}}(x) = U_{\text{пад}} e^{jkx}; \\ U_{\text{отр}}(x) = U_{\text{отр}} e^{j(\Psi_H - kx)}. \end{cases} \quad (1.3)$$

Так как отраженная волна порождается падающей в точке $x = 0$, обычно вводят в рассмотрение коэффициент отражения по напряжению $\Gamma(x)$:

$$\Gamma(x) = \frac{U_{\text{отр}}(x)}{U_{\text{пад}}(x)} = \frac{U_{\text{отр}}}{U_{\text{пад}}} e^{j(\Psi_H - 2kx)}.$$

Таким образом, модуль коэффициента отражения в каждой точке линии постоянен и определяется коэффициентом отражения в нагрузке Γ_H

$$\Gamma(x=0) = |\Gamma_H| e^{j\Psi_H}, \quad (1.4)$$

где Ψ_H — аргумент коэффициента отражения в плоскости подключения нагрузки.

Аналогично формулам (1.2) и (1.3) можно записать выражения для распределения вдоль линии передачи комплексных амплитуд падающей и отраженной волн тока. Так как комплексные амплитуды отраженных волн тока и напряжения отличаются по фазе на 180° , то комплексный коэффициент отражения по току $\Gamma_I(x)$ связан с $\Gamma(x)$ соотношением

$$\Gamma_I(x) = -\Gamma(x).$$

В уравнениях (1.2) это можно учесть следующим образом:

$$\begin{cases} U(x) = U_{\text{пад}}(x)[1 + \Gamma(x)]; \\ I(x) = I_{\text{пад}}(x)[1 - \Gamma(x)]. \end{cases} \quad (1.5)$$

После подстановки (1.4) в (1.5) получим выражения для распределений амплитуд напряжения и тока вдоль линии передачи:

$$\begin{cases} |U(x)| = U_{\text{пад}} \sqrt{1 + |\Gamma_H|^2 + 2|\Gamma_H| \cos(\Psi_H - 2kx)}; \\ |I(x)| = I_{\text{пад}} \sqrt{1 + |\Gamma_H|^2 - 2|\Gamma_H| \cos(\Psi_H - 2kx)}. \end{cases} \quad (1.6)$$

Коэффициент отражения в нагрузке Γ_H можно рассчитать по формуле

$$\Gamma_H = \frac{Z_H - \rho}{Z_H + \rho}. \quad (1.7)$$

Модуль и аргумент коэффициента отражения в нагрузке будут равны, соответственно:

$$|\Gamma_H| = \frac{\sqrt{(R_H - \rho)^2 + X_H^2}}{\sqrt{(R_H + \rho)^2 + X_H^2}}; \quad (1.8)$$

$$\Psi_H = \begin{cases} \arctg\left(\frac{X_H}{R_H - \rho}\right) - \arctg\left(\frac{X_H}{R_H + \rho}\right), & \text{при } R_H > \rho; \\ \pi - \arctg\left(\frac{X_H}{R_H - \rho}\right) - \arctg\left(\frac{X_H}{R_H + \rho}\right), & \text{при } R_H < \rho, X_H > 0; \\ \pi + \arctg\left(\frac{X_H}{R_H - \rho}\right) - \arctg\left(\frac{X_H}{R_H + \rho}\right), & \text{при } R_H < \rho, X_H < 0. \end{cases} \quad (1.9)$$

При расчете $|\Gamma_H|$ и Ψ_H с помощью программы *Mathcad* величину $|\Gamma_H|$ можно определить используя действия «Модуль» («Absolute Value»), а величину Ψ_H — используя команду «arg(Γ_H)», при этом необходимо учесть, что результат выполнения команды «arg(Γ_H)» выдается в радианах и его необходимо перевести в градусы.

Рассмотрим особенности распределения напряжения и тока вдоль линии. Из (1.6) следует, что амплитуда напряжения максимальна в сечениях $x_{\max}$, которые удовлетворяют условию

$$\Psi_H - 2kx_{\max} = 2\pi n, \quad (1.10)$$

где $n=0, 1, 2, \dots$

Соседние максимумы отстоят друг от друга на $\lambda/2$.

Амплитуда напряжения минимальна в сечениях $x_{\min}$, которые удовлетворяют условию

$$\Psi_H - 2kx_{\min} = \pm\pi + 2\pi n,$$

где $n=0, 1, 2, \dots$

Соседние минимумы отстоят друг от друга на $\lambda/2$. Между соседними минимумами и максимумами расстояние составляет $\lambda/4$, поэтому достаточно найти, например, местоположение первого максимума напряжения из (1.10)

$$x_{\max 1} = \frac{\Psi_H}{4\pi} \lambda. \quad (1.11)$$

В линии передачи положение первого минимума амплитуды напряжения (относительно точки подключения нагрузки) определяется по одной из формул:

$$\begin{cases} x_{\min 1} = \frac{\Psi_H}{4\pi} \lambda + \lambda/4 = x_{\max 1} + \lambda/4, \text{ если } x_{\max 1} \in [0; \lambda/4); \\ x_{\min 1} = \frac{\Psi_H}{4\pi} \lambda - \lambda/4 = x_{\max 1} - \lambda/4, \text{ если } x_{\max 1} \in [\lambda/4; \lambda/2). \end{cases} \quad (1.12)$$

При этом максимальные и минимальные значения напряжения и тока в линии определяются соотношениями, следующими из (1.6)

$$\begin{cases} U_{\max} = U_{\text{пад}} (1 + |\Gamma_H|); & I_{\max} = I_{\text{пад}} (1 + |\Gamma_H|); \\ U_{\min} = U_{\text{пад}} (1 - |\Gamma_H|); & I_{\min} = I_{\text{пад}} (1 - |\Gamma_H|). \end{cases} \quad (1.13)$$

Для удобства описания режимов работы линии передачи вводят понятие коэффициента стоячей волны КСВ ($K_{\text{СТУ}}$), как отношение максимального и минимального напряжений в линии

$$K_{\text{СТУ}} = \frac{U_{\max}}{U_{\min}}.$$

Из (1.13) нетрудно получить соотношения, связывающие КСВ и $|\Gamma_H|$

$$K_{\text{СТУ}} = \frac{1 + |\Gamma_H|}{1 - |\Gamma_H|}; \quad |\Gamma_H| = \frac{K_{\text{СТУ}} - 1}{K_{\text{СТУ}} + 1}. \quad (1.14)$$

Рассмотрим особенности распределений напряжения и тока в линии для случаев подключения к ней различных нагрузок Z_H .

Рассмотрим случай линии, разомкнутой на конце, когда $Z_H \rightarrow \infty$ (при этом $|\Gamma_H| = 1$ и $K_{\text{СТУ}} \rightarrow \infty$). Перед построением распределений напряжения и тока выполним их нормировку следующим образом:

$$|U^{\text{норм}}(x)| = \frac{|U(x)|}{U_{\text{пад}}}, \quad |I^{\text{норм}}(x)| = \frac{|I(x)|}{I_{\text{пад}}}.$$

Распределения нормированных амплитуд напряжения и тока вдоль разомкнутой линии передачи имеют вид отрезков синусоид, смещенных относительно друг друга на $\lambda/4$ (рис. 1.3, а).

По аналогии с другими волновыми процессами максимумы распределения напряжения и тока принято называть «пучностями», а минимумы — «узлами». Видно (см. рис. 1.3, а), что при холостом ходе на выходе линии (координата $x=0$) устанавливается пучность напряжения и узел тока.

Рассмотрим случай короткозамкнутой линии, когда $Z_H = 0$ (при этом $|\Gamma_H| = -1$ и $K_{\text{СТУ}} \rightarrow \infty$). Распределения $|U^{\text{норм}}(x)|$ и $|I^{\text{норм}}(x)|$ (см. рис. 1.3, б) будут отличаться тем, что теперь в сечении нагрузки будут наблюдаться узел напряжения и пучность тока.

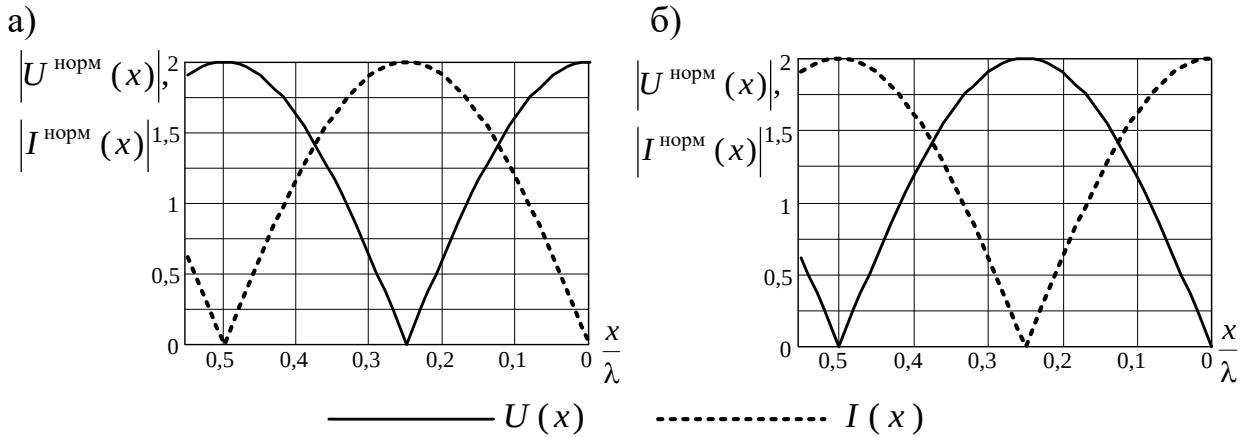


Рисунок 1.3 — Распределения нормированных амплитуд напряжения и тока вдоль линии передачи при $Z_H \rightarrow \infty$ (а) и $Z_H = 0$ (б)

Рассмотрим случай реактивной нагрузки, когда $Z_H = jX_H$ (при этом $\Gamma_H = e^{j\Psi_H}$ и $K_{CTU} \rightarrow \infty$). Порядок построения распределений $|U^{\text{норм}}(x)|$, $|I^{\text{норм}}(x)|$ вид этих распределений показаны в Приложении В. Из рис. В.2 видно, что распределения отличаются показанных на рис. 1.3 тем, что теперь узлы и пучности смещены относительно сечения нагрузки. Для индуктивной нагрузки ($X_H > 0$) на интервале $x \in (0, \lambda/4)$ будут наблюдаться пучность напряжения и узел тока. Для емкостной нагрузки ($X_H < 0$) на интервале $x \in (0, \lambda/4)$ будут наблюдаться наоборот, пучность тока и узел напряжения.

Во всех рассмотренных выше случаях $|\Gamma_H| = 1$ и $K_{CTU} \rightarrow \infty$, узлы распределений имеют нулевой уровень, а пучности — уровень, равный удвоенной амплитуде падающей волны. По аналогии с известными волновыми процессами такой режим называют режимом «стоячих волн».

Рассмотрим случай активной нагрузки $Z_H = R_H$.

Пусть $Z_H = \rho$ ($|\Gamma_H| = 0$ и $K_{CTU} = 1$). В данном случае отраженная волна отсутствует, распределения амплитуд и фаз тока и напряжения определяются выражениями (1.3) для падающих волн тока и напряжения (рис. 1.4).

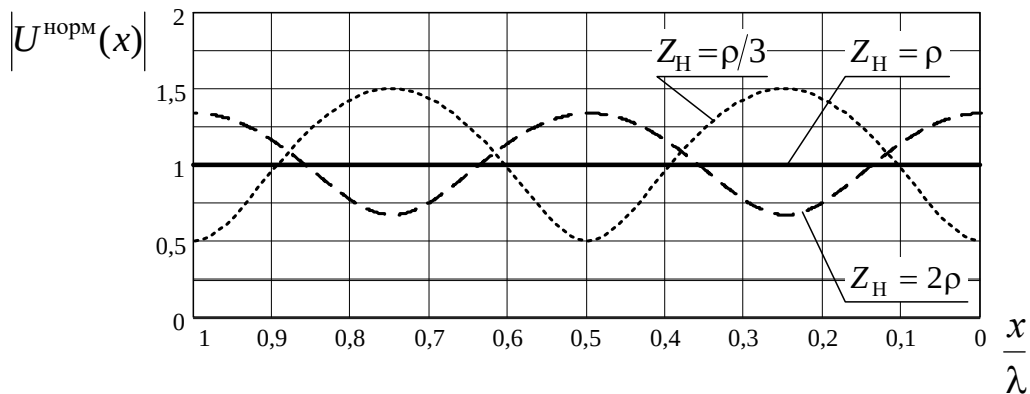


Рисунок 1.4 — Распределения нормированных амплитуд напряжений в линии передачи при активной нагрузке

Таким образом, при $Z_H = \rho$ распределения напряжения и токов будут равномерными из-за отсутствия отраженной волны. Такой режим принято называть режимом «бегущих волн».

Если $Z_H = R_H \neq \rho$, то фаза коэффициента отражения в нагрузке может принимать только два значения: 0° или 180° . Это означает, что в нагрузке может находиться либо узел, либо пучность распределения напряжения. В частности, для распределений напряжений (рис. 1.4) на нагрузку приходятся:

- узел (минимум), $\Psi_H = 180^\circ$, если $R_H < \rho$;
- пучность (максимум), $\Psi_H = 0^\circ$, если $R_H > \rho$.

При $Z_H = R_H \neq \rho$ распределения будут иметь вид цепной линии (рис. 1.4). Так как амплитуда отраженной волны меньше амплитуды падающей волны, данный режим называют режимом «смешанных волн».

Проанализируем мощность, выделяемую в нагрузке. Мощность $P_{ВХ}$, подводимая к входу линии передачи от генератора, связана с амплитудой падающей волны напряжения соотношением

$$P_{ВХ} = \frac{U_{\text{пад}}^2}{2\rho}. \quad (1.15)$$

Для линии передачи без потерь введем в рассмотрение коэффициент полезного действия η , значение которого определяется по формуле

$$\eta = 1 - \Gamma_0^2 = \frac{4K_{CTU}}{(1 + K_{CTU})^2}. \quad (1.16)$$

Мощность P_H , поступающая в нагрузку, определяется выражением

$$P_H = P_{ВХ} (1 - \Gamma_0^2). \quad (1.17)$$

Видно, что:

- для режима стоячих волн $\eta = 0$: мощность в нагрузку не поступает, а полностью отражается в направлении источника сигнала;
- для режима бегущих волн $\eta = 1$: при полном согласовании нагрузки и линии передачи вся мощность поступает в нагрузку;
- при частичном рассогласовании нагрузки и линии передачи формула (1.15) позволяет установить предел рассогласования по КСВ, задавшись минимально допустимым значением коэффициента полезного действия.

На практике чаще всего принимают предел $K_{CTU}^{\text{доп}} = 2$, при этом $\eta \approx 0,9$.

1.5. Порядок выполнения работы

1.5.1. Теоретические исследования

Задача ставится следующим образом. При подключении генератора к двухпроводной линии длиной l с волновым сопротивлением ρ на вход линии подается мощность $P_{ВХ}$. Для случая, когда линия нагружена на сопротивление Z_H , требуется определить:

- а) модуль и фазу коэффициента отражения в нагрузке по формулам (1.7) — (1.9), а также K_{CTU} по формуле (1.14);
- б) амплитуду напряжения падающей волны по формуле (1.15);
- в) максимальные и минимальные значения амплитуд напряжения и тока по формулам (1.13);
- г) местоположения первого минимума и первого максимума амплитуд напряжения и тока по формулам (1.11), (1.12);
- д) коэффициент полезного действия по формуле (1.16);
- е) построить графики распределения амплитуд напряжения и тока вдоль линии передачи с заданными параметрами с помощью формул (1.6); пример выполнения задания рассмотрен в Приложении В.

1.5.2. Экспериментальные исследования

В ходе экспериментальных исследований необходимо выполнить следующее.

1.5.2.1. Настроить генератор на частоту f_1 .

В состав лабораторной установки может входить один из генераторов типа Г4-108, Г4-109 или Г4-83.

1.5.2.1.1. Для генератора Г4-83 настройка осуществляется при помощи ручки «Частота».

1.5.2.1.2. Для генераторов типа Г4-108 или Г4-109 настройка осуществляется следующим образом:

- ручкой «Поддиапазоны» установить нужный диапазон частот;
- при помощи ручки «Частотомер» установить требуемую по заданию частоту СВЧ колебаний;
- повернуть ручку «Чувствительность» по часовой стрелке до упора;
- плавно поворачивая ручку «Установка частоты» (нужного поддиапазона), добиться максимального отклонения стрелки индикатора настройки.

Внимание! Выполняя настройку генератора, нельзя допускать «зашкала» индикатора! Для этого необходимо ручкой «Чувствительность» постепенно понижать чувствительность прибора и подстраиваться ручкой «Установка частоты» на максимум показаний индикатора настройки до тех пор, пока в максимуме показаний не будет «зашкала».

1.5.2.2. Снять распределение напряженности электрического поля в линии передачи в режиме «стоячей волны». Для этого в ходе работы с измерительной линией Р1-4 выполнить следующие действия:

- подключить к выходу измерительной линии короткозамыкатель;
- перемещая каретку измерительной линии, найти положение минимума в распределении напряжения, ближайшего к выходу линии (к короткозамыкателю);
- произвести с помощью линейки и нониуса измерительной линии отсчет координаты этого минимума x_{min1} (рис. 1.5), **который принимается за начало отсчета** («условный ноль») для ВСЕХ дальнейших измерений; опи-

сание методики измерений по нониусной шкале приведено в Приложении Б;

— перемещая зонд в сторону генератора, определить координату x_{min2} второго узла напряжения (рис. 1.5);

— определить координату x_{max} пучности напряжения (рис. 1.5) как среднее арифметическое между x_{min1} и x_{min2} ;

— занести результаты измерений в табл. 1.3.

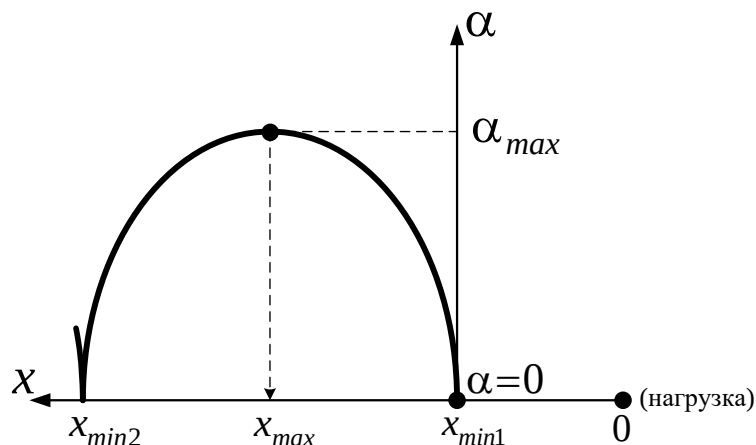


Рисунок 1.5 — Измерение распределения напряжения в линии передачи при режиме «стоячей волны»

Таблица 1.3 — Пример оформления результатов измерений на заданной частоте при различных нагрузках линии передачи

	Режим стоячей волны (короткое замыкание)			Нагрузка Z_{H1}		Нагрузка Z_{H2}	
	α_{min1}	α_{max}	α_{min2}	α_{min}	α_{max}	α_{min}	α_{max}
α'	0	2,5	0	0,8	1,7	0,2	2,3
$\alpha = \sqrt{\alpha'}$	0	1,58	0	0,89	1,3	0,45	1,52
x , см	3 (x_{min1})	2 (x_{max})	1 (x_{min2})	2,7	1,7	1,4	2,4
$x_{рез}$, см	0	1	2	0,3	1,3	1,6	0,6

Примечание: α' — непосредственные показания измерительного прибора;

$\alpha = \sqrt{\alpha'}$ — восстановленное значение измеряемой величины с учетом нелинейности вольт-амперной характеристики детекторного диода;

$x_{рез} = |x - x_{min1}|$ — координаты точек экстремумов в распределении напряжения в линии передачи, пересчитанные с учетом значения точки отсчета x_{min1} .

1.5.2.3. Снять распределения напряженности электрического поля в линии передачи для нагрузок Z_{H1} и Z_{H2} , выполнив для каждой из нагрузок следующие действия:

— подключить нагрузку Z_H к выходу измерительной установки в соответствии с функциональной схемой (см. рис. 1.1);

— установить каретку измерительной линии в точку с координатой x_{min1} , определенной при выполнении п.п. 1.5.2.2.;

— перемещая каретку вдоль линии в сторону генератора, найти положение точки первого экстремума поля (максимума или минимума);

— записать в табл. 1.3 показание индикатора α'_{max} (или α'_{min}) и соответствующую ему координату x_{max} (или x_{min});

— продолжить перемещение каретки вдоль измерительной линии до точки следующего экстремума поля;

— записать в табл. 1.3 новое показание индикатора α'_{min} (или α'_{max}) и соответствующую ему координату x_{min} (или x_{max});

— сменить нагрузку измерительной линии и повторить измерения пп. 1.5.2.3.

1.5.2.4. Настроить генератор на частоту f_2 и повторить действия по пунктам 1.5.2.2. — 1.5.2.3.

1.5.3. Обработка результатов измерений

По результатам измерений (табл. 1.3), проведенных на частоте f_1 для короткозамкнутой линии, выполнить следующие действия.

1.5.3.1. Рассчитать длину волны в волноводе по формуле

$$\Lambda = 2 \cdot |x_{min1} - x_{min2}|.$$

1.5.3.2. Для каждой из исследованных нагрузок (Z_{H1} и Z_{H2}) определить величину коэффициента стоячей волны (КСВ) по формуле

$$K_{CTU} = \frac{\alpha_{max}}{\alpha_{min}},$$

где $\alpha_{max} = \sqrt{\alpha'_{max}}$, $\alpha_{min} = \sqrt{\alpha'_{min}}$.

1.5.3.3. Для каждой из исследованных нагрузок (Z_{H1} и Z_{H2}) рассчитать значение модуля коэффициента отражения в нагрузке по формуле

$$|\Gamma_H| = \frac{K_{CTU} - 1}{K_{CTU} + 1}.$$

1.5.3.4. Для каждой из исследованных нагрузок (Z_{H1} и Z_{H2}) рассчитать фазу коэффициента отражения Ψ_H в нагрузке следующим образом:

— в том случае, если $x_{рез}(\alpha_{min}) < x_{рез}(\alpha_{max})$, то использовать соотношение

$$\Psi_H - 2k \cdot x_{рез}(\alpha_{min}) = \pi;$$

— в том случае, если $x_{рез}(\alpha_{min}) > x_{рез}(\alpha_{max})$, то использовать соотношение

$$\Psi_H - 2k \cdot x_{рез}(\alpha_{max}) = 0.$$

1.5.3.5. Для каждой из исследованных нагрузок (Z_{H1} и Z_{H2}) записать выражение для коэффициента отражения в нагрузке в виде

$$\Gamma_H = |\Gamma_H| e^{j\Psi_H}.$$

1.5.3.6. Для каждой из исследованных нагрузок ($Z_{Н1}$ и $Z_{Н2}$) рассчитать сопротивление нагрузки $Z_{Н}$ по формуле

$$Z_{Н} = \rho_{В} \frac{1 + \Gamma_{Н}}{1 - \Gamma_{Н}},$$

где для определения величины $\rho_{В}$ использовать формулу (1.1).

1.5.3.7. По результатам измерений, выполненных на частоте f_2 , повторить расчеты согласно п. 1.5.3.1 — 1.5.3.6.

1.5.3.8. Для рассчитанных на частоте f_1 значений $Z_{Н1}$ и $Z_{Н2}$ построить на одном графике нормированные распределения $|U^{\text{норм}}(x)|$ по формуле (1.6). На построенные графики нанести точками нормированные значения $\frac{\alpha_{\max}}{\alpha_{\text{средн}}}$ и

$\frac{\alpha_{\min}}{\alpha_{\text{средн}}}$ с учетом соответствующих им координат $x_{\text{рез}}(\alpha_{\max})$ и $x_{\text{рез}}(\alpha_{\min})$. Значение нормировочного множителя определяется по формуле

$$\alpha_{\text{средн}} = \frac{\alpha_{\max} + \alpha_{\min}}{2}.$$

1.5.3.9. Для рассчитанных на частоте f_2 значений $Z_{Н1}$ и $Z_{Н2}$ на одном графике построить нормированные распределения $|U^{\text{норм}}(x)|$ по формуле (1.6).

На построенные графики нанести нормированные значения $\frac{\alpha_{\max}}{\alpha_{\text{средн}}}$ и $\frac{\alpha_{\min}}{\alpha_{\text{средн}}}$ с учетом соответствующих им координат $x_{\text{рез}}(\alpha_{\max})$ и $x_{\text{рез}}(\alpha_{\min})$.

1.6. Контрольные вопросы

1.6.1. Вопросы для допуска к лабораторной работе

а) Опишите порядок настройки генераторов Г4-108 и Г4-109 на заданную частоту.

б) Опишите порядок измерений при коротком замыкании в нагрузке линии передачи.

в) Опишите порядок измерений при подключенной комплексной нагрузке линии передачи.

г) Как определить коэффициента стоячей волны с помощью измерительной линии Р1-4?

д) Как определить длину волны в волноводе с помощью измерительной линии Р1-4?

е) Опишите порядок измерения распределения напряжения в короткозамкнутой линии передачи.

ж) Опишите порядок измерения распределения напряжения в линии передачи, нагруженной диафрагмой и согласованной нагрузкой.

з) Поясните, как снимаются показания с нониусной шкалы измерительной линии.

и) В каком режиме работает линия передачи, нагруженная на короткозамыкатель?

к) Для чего в лабораторной работе необходимы измерения распределения напряжения в длинной линии, нагруженной короткозамыкателем?

1.6.2. Вопросы для подготовки к защите лабораторной работы

а) Изложите методику расчета модуля и фазы коэффициента отражения для заданного сопротивления нагрузки.

б) Изложите методику определения по результатам измерений модуля коэффициента отражения в нагрузке.

в) Изложите методику определения по результатам измерений фазы коэффициента отражения в нагрузке.

г) Изложите методику определения по результатам измерений полного сопротивления нагрузки.

д) Чем отличаются распределения напряжения в линии передачи для активных нагрузок $Z_H = \rho$, $Z_H > \rho$ и $Z_H < \rho$?

е) Чем отличаются распределения напряжения в линии передачи для нагрузок $Z_H = 2\rho$, $Z_H = 2\rho + j\rho$?

ж) Какой режим работы линии передачи является для нее оптимальным по критерию максимума коэффициента полезного действия передачи мощности в нагрузку?

з) Как изменится распределение амплитуд напряжения в линии передачи при изменении знака реактивной составляющей сопротивления нагрузки?

и) При каких нагрузках линии передачи в ней устанавливается режим стоячих волн?

к) В каком случае линия передачи будет согласована с нагрузкой, и какой характер будет иметь распределение напряжения в линии передачи?

л) При каких условиях мощность от генератора полностью попадает в нагрузку, попадает в нагрузку лишь частично или не попадает совсем?

2. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТНЫХ СВОЙСТВ КОМПЛЕКСНЫХ НАГРУЗОК

2.1. Цель работы

Изучить методику расчета и особенности анализа входного сопротивления линий передачи при различных сопротивлениях нагрузки и на разных частотах, освоить методику экспериментального определения входного сопротивления линии передачи.

2.2. Описание измерительной установки

Измерительная установка 1 состоит из СВЧ генератора 3 и измерительной линии 4. Исследуемая нагрузка 2 содержит диафрагму 5 (исследуемая нагрузка) и согласованную нагрузку 6 (рис. 2.1).

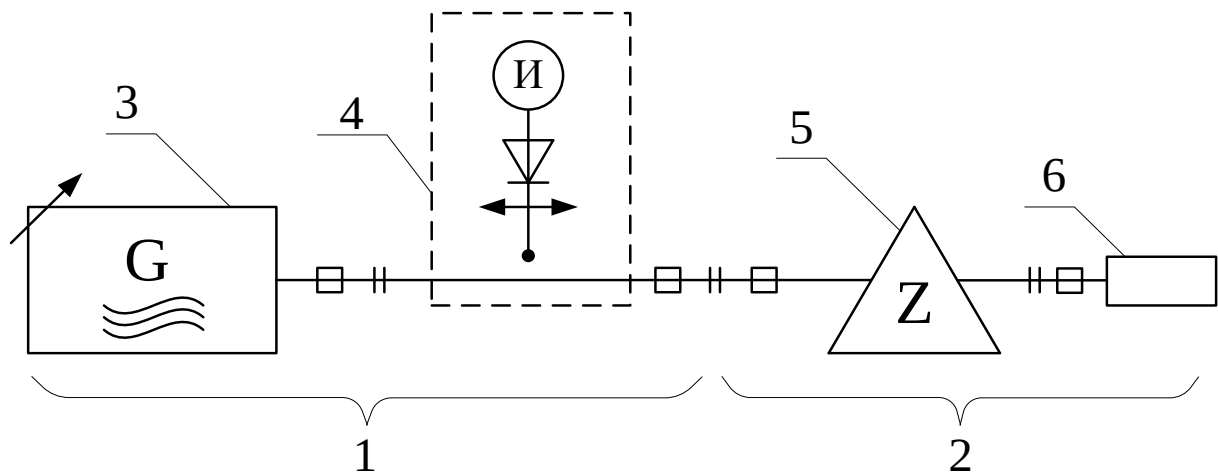


Рисунок 2.1 — Функциональная схема измерительной установки

Распределение напряжения в линии передачи измеряется при помощи волноводной измерительной линии.

Предусмотрены следующие варианты комплектации измерительной установки:

- вариант I: измерительная линия P1-4 на волноводе типа R84: размер волновода 28,50×12,62 мм; длина 23 см;
- вариант II: измерительная линия P1-4 на волноводе типа R100: размер волновода 22,66×10,16 мм; длина 29,5 см;
- вариант III: измерительная линия P1-4 на волноводе типа R140: размер волновода 15,80×7,90 мм; длина 25 см.

Описание измерительной линии приведено в Приложении Б.

2.3. Исходные данные

Исходными данными для теоретических исследований являются: волновое сопротивление линии передачи ρ ; электрическая длина линии передачи l/λ ; сопротивление нагрузки $Z_H = R_H + jX_H$ (табл. 2.1).

Таблица 2.1 — Исходные данные для теоретических исследований

M	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
ρ , Ом	180	360	120	300	50	250	90	200	75	150
$\frac{R_H}{\rho}$	4	0,5	3,5	0,4	3	0,3	2,5	0,2	1,5	0,1
N	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\frac{X_H}{\rho}$	4	−3,5	2,5	−4	2	−3	1,5	−2	0,5	−1
$\frac{l}{\lambda}$	6,2	3,5	5,5	3,1	5,1	2,7	4,7	2,3	4,3	1,9

Исходными данными для экспериментальных исследований являются: номера двух нагрузок и три рабочие частоты, на которых должны проводиться измерения (табл. 2.2). Номер измерительной установки (I, II или III) указывается преподавателем.

Таблица 2.2 — Исходные данные для экспериментальных исследований

M		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
номер нагрузки		1	2	3	4	5	6	7	8	9	5
		6	7	8	9	3	2	3	4	5	1
		N									
Номер установки	Частота генератора, ГГц	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
I	f_1	8,5	8,52	8,61	8,45	8,55	8,65	8,97	8,85	8,95	8,98
	f_2	9,05	9,15	9,25	9,35	9,45	9,55	9,65	9,75	9,85	9,95
II	f_1	8,05	8,1	8,2	8,3	8,4	8,5	8,6	8,7	8,8	8,9
	f_2	9,0	9,1	9,2	9,4	9,5	9,6	9,7	9,8	9,9	10,0
III	f_1	10,1	10,2	10,3	10,4	10,5	10,6	10,7	10,8	10,9	11,0
	f_2	11,05	11,1	11,2	11,3	11,4	11,5	11,6	11,7	11,75	11,8

При обработке результатов измерений длина линии передачи l выбирается в зависимости от варианта измерительной установки I, II или III.

2.4. Методика расчета сопротивления в различных сечениях линии передачи

В лабораторной работе используется измерительная линия Р1-4, выполненная на основе отрезка регулярного прямоугольного волновода.

Для прямоугольного волновода с воздушным заполнением при распространении в нём волны H_{10} волновое сопротивление линии этого типа равно [2]

$$\rho_B = \frac{2b}{a} \frac{120\pi}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}}, \quad (2.1)$$

где a, b — соответственно размеры широкой и узкой стенок волновода.

Введем в рассмотрение эквивалентную двухпроводную линию передачи без потерь (рис. 2.2), с постоянным по всей длине волновым сопротивлением ρ , которое рассчитывается по формуле

$$\rho = 120 \ln \left(\frac{d}{r} \right),$$

где d — расстояние между проводами линии передачи;

r — радиус поперечного сечения проводов.

Очевидно, что параметры этой линии можно подобрать для выполнения условия

$$\rho = \rho_B.$$

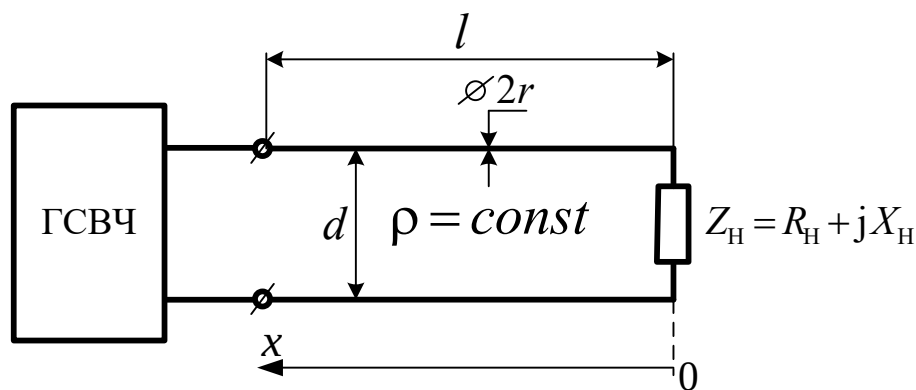


Рисунок 2.2 — Модель двухпроводной линии, нагруженной на сопротивление Z_H

Распределения напряжения $U(x)$ и тока $I(x)$ в линии передачи подчиняются телеграфным уравнениям (более подробный анализ выполнен в лабораторной работе № 1).

На основании формулы (1.2) показано, что распределения $U(x)$ и $I(x)$ определяются через сумму соответствующих падающих и отраженных волн напряжений $U_{\text{пад}}(x)$, $U_{\text{отр}}(x)$ и токов $I_{\text{пад}}(x)$, $I_{\text{отр}}(x)$.

При дальнейшем выводе уравнений для расчета $U(x)$ и $I(x)$ для произвольного сечения линии введено понятие коэффициентов отражения по напряжению $\Gamma(x)$ и по току $\Gamma_I(x)$:

$$\Gamma(x) = \Gamma_H e^{-j2kx};$$

$$\Gamma_I(x) = -\Gamma(x),$$

где $\Gamma_H = |\Gamma_H| e^{j\Psi_H}$ — коэффициентом отражения по напряжению в нагрузке; $|\Gamma_H|$, Ψ_H — модуль и аргумент коэффициента отражения в точке подключения нагрузки, которые определяются по формулам:

$$|\Gamma_H| = \frac{\sqrt{(R_H - \rho)^2 + X_H^2}}{\sqrt{(R_H + \rho)^2 + X_H^2}}; \quad (2.2)$$

$$\Psi_H = \begin{cases} \arctg\left(\frac{X_H}{R_H - \rho}\right) - \arctg\left(\frac{X_H}{R_H + \rho}\right), & \text{при } R_H > \rho; \\ \pi - \arctg\left(\frac{X_H}{R_H - \rho}\right) - \arctg\left(\frac{X_H}{R_H + \rho}\right), & \text{при } R_H < \rho, X_H > 0; \\ \pi + \arctg\left(\frac{X_H}{R_H - \rho}\right) - \arctg\left(\frac{X_H}{R_H + \rho}\right), & \text{при } R_H < \rho, X_H < 0. \end{cases} \quad (2.3)$$

С учетом (1.5) можно получить формулы:

$$\begin{cases} U(x) = U_H \cos(kx) + jI_H \rho \sin(kx); \\ I(x) = I_H \cos(kx) + j\frac{U_H}{\rho} \sin(kx). \end{cases} \quad (2.4)$$

Поделив уравнения (2.4) одно на другое, можно вывести функцию $Z(x)$, являющуюся сопротивлением в произвольном сечении линии передачи:

$$Z(x) = \rho \frac{Z_H + j\rho \operatorname{tg}(kx)}{\rho + jZ_H \operatorname{tg}(kx)}. \quad (2.5)$$

При заданной длине отрезка линии l величина $Z(l)$ равна входному сопротивлению, а $Z(0)$ равна сопротивлению нагрузки. Из формулы (2.5) видно, что в общем случае входное сопротивление линии передачи не равно сопротивлению нагрузки Z_H : отрезок линии передачи является как бы трансформатором сопротивления. В зависимости от характера нагрузки и режима работы линии передачи ее входное сопротивление может иметь различный характер, в том числе и комплексный, даже при чисто активном сопротивлении нагрузки.

В сечениях $x_{\max}$ сопротивление $Z(x)$ всегда чисто активно и принимает значение

$$Z(x_{\max}) = R_{\max},$$

при этом выполняется условие

$$\Psi_H - 2kx_{\max} = 2\pi n, \quad (2.6)$$

где $n=0, 1, 2, \dots$

В сечениях $x_{\min}$ сопротивление $Z(x)$ также чисто активно и принимает значение

$$Z(x_{\min}) = R_{\min},$$

при этом выполняется условие

$$\Psi_H - 2kx_{\min} = \pm\pi + 2\pi n,$$

где $n=0, 1, 2, \dots$

С учетом (2.6) местоположение первого сечения $x_{\max 1}$ определяется по формуле

$$x_{\max 1} = \frac{\Psi_H}{4\pi} \lambda. \quad (2.7)$$

Положение первого относительно плоскости подключения нагрузки минимума амплитуды напряжения в линии передачи определяется по одной из формул:

$$\begin{cases} x_{\min 1} = \frac{\Psi_H}{4\pi} \lambda + \lambda/4 = x_{\max 1} + \lambda/4, \text{ если } x_{\max 1} \in [0; \lambda/4); \\ x_{\min 1} = \frac{\Psi_H}{4\pi} \lambda - \lambda/4 = x_{\max 1} - \lambda/4, \text{ если } x_{\max 1} \in [\lambda/4; \lambda/2). \end{cases} \quad (2.8)$$

Для произвольной нагрузки в зависимости от исходных данных распределение сопротивления вдоль линии передачи можно построить по формулам (2.1), (2.2), (2.3), (2.5), (2.7), (2.8). Рассмотрим эти распределения для различных случаев.

Для линии передачи, разомкнутой на конце, когда $Z_H \rightarrow \infty$ («холостой ход»), выражение (2.5) примет вид

$$Z_{XX}(x) = -j\rho \operatorname{ctg}(kx) = -jX_{XX}(x).$$

Таким образом, в любом сечении линии передачи входное сопротивление имеет реактивный характер (рис. 2.3), причем на интервале в половину длины волны $X_{XX}(x)$ изменяется в пределах $(-\infty, \infty)$.

Для случая линии, замкнутой на конце, когда $Z_H = 0$ («короткое замыкание») выражение (2.5) примет вид

$$Z_{K3}(x) = j\rho \operatorname{tg}(kx) = jX_{K3}(x).$$

Значит, во всех сечениях линии передачи входное сопротивление также имеет реактивный характер (рис. 2.3).

Из рис. 2.3 видно, что функции $X_{XX}(x)$ и $X_{K3}(x)$ переходят одна в другую при смещении на четверть длины волны. При этом в линии устанавливается режим «стоячей волны».

Рассмотрим случай чисто активной нагрузки $Z_H = R_H$. Для определенности зададимся величиной $\rho = 50$ Ом и тремя значениями сопротивления нагрузки: $Z_{H1} = \rho/10$, $Z_{H2} = \rho$ и $Z_{H3} = 10\rho$ (рис. 2.4).

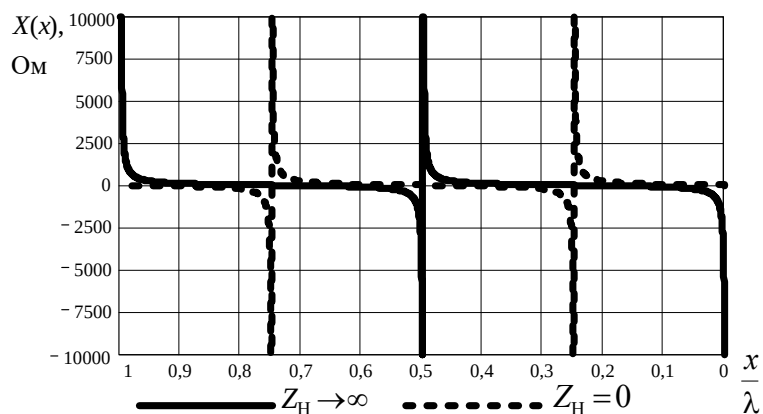


Рисунок 2.3 — Распределение сопротивления вдоль линии передачи в режимах холостого хода и короткого замыкания

Из рис. 2.4 видно следующее:

- при $Z_H = R_H = \rho$ в каждом сечении $Z(x) = \rho$: устанавливается режим «бегущей волны»;
- при активной нагрузке $Z_H = R_H > \rho$ величина $Z(x)$ комплексная, кроме отдельных сечений $Z(0) = R_{\max}$; $Z(\lambda/4) = R_{\min}$: устанавливается режим «смешанных волн»;
- при активной нагрузке $Z_H = R_H < \rho$ величина $Z(x)$ комплексная, кроме отдельных сечений $Z(0) = R_{\min}$; $Z(\lambda/4) = R_{\max}$: устанавливается режим «смешанных волн».

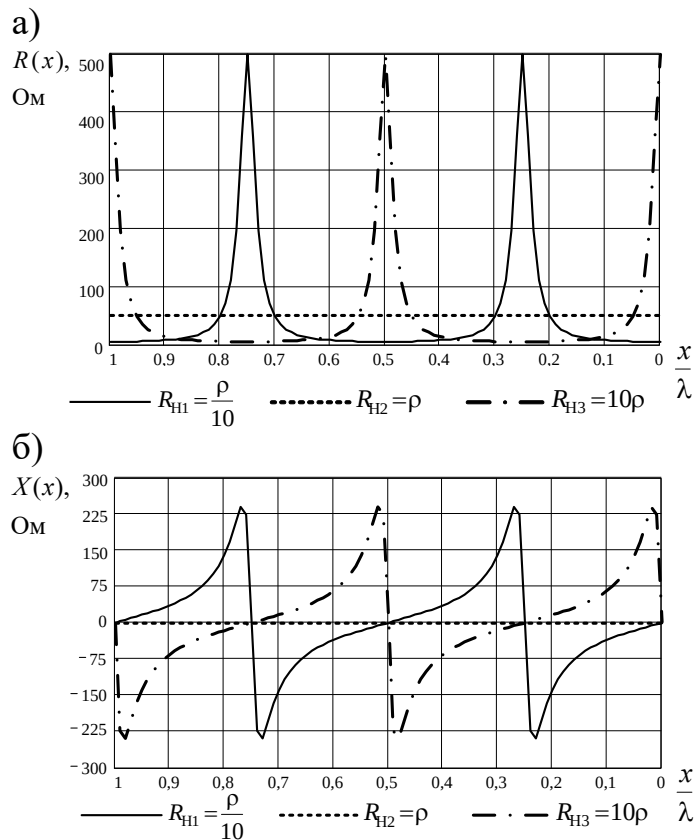


Рисунок 2.4 — Распределения активной (а) и реактивной (б) составляющих сопротивления $Z(x)$ вдоль линии передачи при чисто активных нагрузках

2.5. Порядок выполнения работы

2.5.1. Теоретические исследования

Задача ставится следующим образом. При подключении к двухпроводной линии длиной l с волновым сопротивлением ρ поочередно трех различных сопротивлений нагрузки: $Z_{H1} = R_H + jX_H$; $Z_{H2} = R_H$; $Z_{H3} = jX_H$ для двух частот f_1, f_2 требуется выполнить следующее:

- а) рассчитать модуль и фазу коэффициента отражения в нагрузке по формулам (2.2), (2.3), а также величину КСВ по формуле (1.14);
- б) определить местоположение первого минимума и первого максимума ($x_{\max}$ и $x_{\min}$) активного сопротивления по формулам (2.7), (2.8);
- в) рассчитать входное сопротивление линии передачи по формуле (2.5);
- г) построить графики зависимостей активной и реактивной составляющих входного сопротивления линии передачи в диапазоне частот $f_1 — f_2$;
- д) построить на одном графике распределения вдоль линии передачи активной составляющей $Z(x)$ на частотах f_1, f_2 ;
- е) построить на одном графике распределения вдоль линии передачи реактивной составляющей $Z(x)$ на частотах f_1, f_2 .

2.5.2. Экспериментальные исследования

В ходе экспериментальных исследований необходимо выполнить следующее.

2.5.2.1. Настроить генератор на частоту f_1 . При использовании в составе лабораторного стенда генератора Г4-108 или Г4-109, его настройка осуществляется следующим образом:

- ручкой «**Поддиапазоны**» установить нужный диапазон частот;
- при помощи ручки «**Частотомер**» установить требуемую по заданию частоту СВЧ колебаний;
- повернуть ручку «**Чувствительность**» по часовой стрелке до упора;
- добиться заметного отклонения стрелки индикатора настройки, вращая вправо-влево ручку «**Установка частоты**» нужного поддиапазона;
- плавно поворачивая ручку «**Установка частоты**», добиться максимального отклонения стрелки индикатора настройки.

Внимание! Выполняя настройку генератора, нельзя допускать «зашкала» индикатора! Для этого необходимо ручкой «Чувствительность» постепенно понижать чувствительность прибора и подстраиваться ручкой «Установка частоты» на максимум показаний индикатора настройки до тех пор, пока в максимуме показаний не будет «зашкала».

2.5.2.2. Снять калибровочную кривую детектора измерительной линии. Для этого в ходе работы с измерительной линией Р1-4 выполнить следующие действия:

- подключить к выходу измерительной линии короткозамыкатель;
- перемещая каретку измерительной линии, найти положение миниму-

ма в распределении напряжения, ближайшего к выходу линии (к короткозамыкателю);

— произвести с помощью линейки и нониуса измерительной линии отсчет координаты этого положения x_{min1} (рис. 2.5), **который принимается за начало отсчета** («условный ноль») для ВСЕХ дальнейших измерений; описание методики измерений по нониусной шкале приведено в Приложении Б;

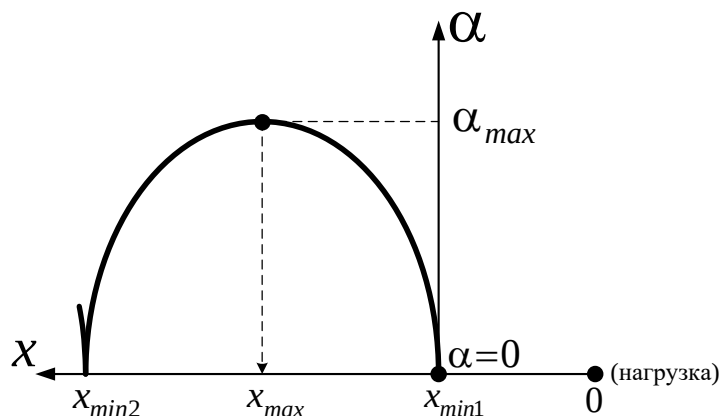


Рисунок 2.5 — Измерение распределения напряжения в линии передачи при режиме «стоячей волны»

— перемещая зонд в сторону генератора, определить координату x_{min2} второго узла напряжения (рис. 2.5);

— определить координату x_{max} пучности напряжения (рис. 2.5) как среднее арифметическое между x_{min1} и x_{min2} ;

— занести результаты измерений в табл. 2.3.

Таблица 2.3 — Пример оформления результатов измерений на заданной частоте при различных нагрузках линии передачи

	Режим стоячей волны (короткое замыкание)			Нагрузка Z_{H1}		Нагрузка Z_{H2}	
	α_{min1}	α_{max}	α_{min2}	α_{min}	α_{max}	α_{min}	α_{max}
α'	0	2,5	0	0,8	1,7	0,2	2,3
$\alpha = \sqrt{\alpha'}$	0	1,58	0	0,89	1,3	0,45	1,52
x , см	3 (x_{min1})	2 (x_{max})	1 (x_{min2})	2,7	1,7	1,4	2,4
$x_{рез}$, см	0	1	2	0,3	1,3	1,6	0,6

Примечание: α' — непосредственные показания измерительного прибора;

$\alpha = \sqrt{\alpha'}$ — восстановленное значение измеряемой величины с учетом нелинейности вольтамперной характеристики детекторного диода;

$x_{рез} = |x - x_{min1}|$ — координаты точек экстремумов в распределении напряжения в линии передачи, пересчитанные с учетом значения точки отсчета x_{min1} .

2.5.2.3. Снять распределения напряженности электрического поля в линии передачи для нагрузок Z_{H1} и Z_{H2} , выполнив для каждой из нагрузок следующие действия:

- подключить нагрузку к выходу измерительной установки в соответствии с функциональной схемой (см. рис. 2.1);
- установить каретку в точку с координатой x_{min1} , определенной при измерении распределения напряжения в короткозамкнутой линии передачи;
- перемещая каретку вдоль линии в сторону генератора, найти положение точки первого экстремума поля (максимума или минимума);
- записать в табл. 2.3 показание индикатора α'_{max} (или α'_{min}) и соответствующую ему координату x_{max} (или x_{min});
- продолжить перемещение каретки вдоль измерительной линии до точки следующего экстремума поля;
- записать в табл. 2.3 показание индикатора α'_{min} (или α'_{max}) и соответствующую ему координату x_{min} (или x_{max}).

2.5.2.4. Настроить генератор на частоту f_2 и повторить действия по пп. 2.5.2.2, 2.5.2.3.

2.5.3. Обработка результатов измерений

По результатам измерений, проведенных на частоте f_1 для короткозамкнутой линии, выполнить следующие действия.

2.5.3.1. Рассчитать длину волны в волноводе по формуле

$$\Lambda = 2 \cdot |x_{min1} - x_{min2}|.$$

2.5.3.2. Для каждой из исследованных нагрузок (Z_{H1} и Z_{H2}) определить величину коэффициента стоячей волны (КСВ) по формуле

$$K_{CTU} = \frac{\alpha_{max}}{\alpha_{min}},$$

где $\alpha_{max} = \sqrt{\alpha'_{max}}$, $\alpha_{min} = \sqrt{\alpha'_{min}}$.

2.5.3.3. Для каждой из исследованных нагрузок (Z_{H1} и Z_{H2}) рассчитать значение модуля коэффициента отражения в нагрузке по формуле

$$|\Gamma_H| = \frac{K_{CTU} - 1}{K_{CTU} + 1}.$$

2.5.3.4. Для каждой из исследованных нагрузок (Z_{H1} и Z_{H2}) рассчитать фазу коэффициента отражения Ψ_H в нагрузке следующим образом:

— в том случае, если $x_{рез}(\alpha_{min}) < x_{рез}(\alpha_{max})$, то использовать соотношение

$$\Psi_H - 2k \cdot x_{рез}(\alpha_{min}) = \pi;$$

— в том случае, если $x_{рез}(\alpha_{min}) > x_{рез}(\alpha_{max})$, то использовать соотношение

$$\Psi_H - 2k \cdot x_{рез}(\alpha_{max}) = 0.$$

2.5.3.5. Для каждой из исследованных нагрузок (Z_{H1} и Z_{H2}) записать выражение для коэффициента отражения в нагрузке в виде

$$\Gamma_H = |\Gamma_H| e^{j\Psi_H}.$$

2.5.3.6. Для каждой из исследованных нагрузок (Z_{H1} и Z_{H2}) рассчитать сопротивление нагрузки Z_H по формуле

$$Z_H = \rho_B \frac{1 + \Gamma_H}{1 - \Gamma_H},$$

где для определения величины ρ_B использовать формулу (2.1).

2.5.3.7. Для каждой из исследованных нагрузок (Z_{H1} и Z_{H2}) рассчитать входное сопротивление линии передачи по формуле (2.5), полагая $x = l$.

2.5.3.8. Для каждой из исследованных нагрузок (Z_{H1} и Z_{H2}) по формуле (2.5) построить распределение активной и реактивной составляющих сопротивления вдоль линии передачи, длина которой выбирается из исходных данных для заданного типа волновода измерительной установки.

2.5.3.9. По результатам измерений, выполненных на частоте f_2 , повторить расчеты согласно пп. 2.5.3.1 — 2.5.3.7.

2.6. Контрольные вопросы

2.6.1. Вопросы для допуска к лабораторной работе

- а) Опишите порядок настройки генераторов Г4-108 и Г4-109 на заданную частоту.
- б) Опишите порядок измерений при коротком замыкании в нагрузке линии передачи.
- в) Опишите порядок измерений при подключении комплексной нагрузки к линии передачи.
- г) Как определить коэффициента стоячей волны с помощью измерительной линии Р1-4?
- д) Как определить длину волны в волноводе с помощью измерительной линии Р1-4?
- е) Изложите порядок определения коэффициента стоячей волны с помощью измерительной линии Р4-1.
- ж) Как определить длину волны в волноводе с помощью измерительной линии Р4-1?
- з) Опишите особенности распределения сопротивления в линии передачи в режиме «стоячей волны».
- и) Опишите особенности распределения сопротивления в линии передачи в режиме «бегущей волны».

2.6.2. Вопросы для подготовки к защите лабораторной работы

- а) Опишите особенности распределения сопротивления в линии передачи при $Z_H > \rho$ и сравните его с распределением сопротивления при $Z_H = \rho$.
- б) Опишите особенности распределения сопротивления в линии передачи при $Z_H < \rho$ и сравните его с распределением сопротивления при $Z_H = \rho$.
- в) Покажите на примере, как будет выглядеть распределение сопротивления в линии передачи, нагруженной на сопротивление $Z_H = 0$.
- г) Покажите на примере, как будет выглядеть распределение сопро-

тивления в линии передачи, нагруженной на сопротивление $Z_H = jX_H$.

д) Определите входное сопротивление линии передачи, структура которой приведена на рис. 2.8, а исходные данные к расчету приведены в табл. 2.4 (вариант задания выдается преподавателем).

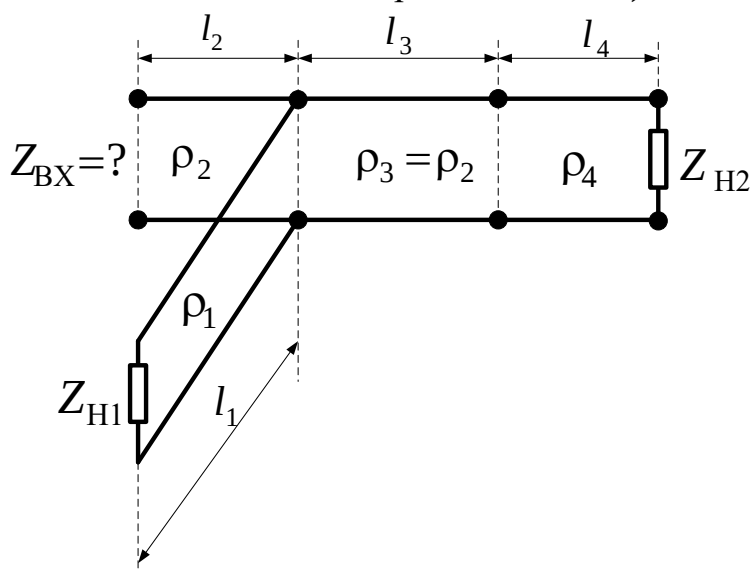


Рисунок 2.8 — Модель линии передачи к расчетной задаче

Таблица 2.4 — Исходные данные к расчетной задаче

Вариант	ρ_1	ρ_2	ρ_4	l_1	l_2	l_3	l_4	Z_{H1}	Z_{H2}
1.	ρ	ρ	—	$4\lambda/8$	$2\lambda/8$	$\lambda/8$	—	∞	$\rho/2$
2.	ρ	ρ	—	$3\lambda/8$	$3\lambda/8$	$2\lambda/8$	—	∞	$-j\rho$
3.	ρ	ρ	—	$\lambda/8$	$\lambda/2$	$2\lambda/8$	—	∞	2ρ
4.	ρ	ρ	—	$4\lambda/8$	$\lambda/8$	$2\lambda/8$	—	∞	2ρ
5.	ρ	ρ	—	$\lambda/8$	$2\lambda/8$	$2\lambda/8$	—	∞	$j2\rho$
6.	ρ	ρ	—	$3\lambda/8$	$\lambda/8$	$2\lambda/8$	—	∞	$\rho/2$
7.	ρ	ρ	—	$\lambda/8$	$2\lambda/8$	$\lambda/8$	—	∞	$j\rho$
8.	ρ	ρ	—	$\lambda/8$	$3\lambda/8$	$\lambda/8$	—	∞	ρ
9.	5ρ	5ρ	ρ	$3\lambda/8$	$3\lambda/8$	$2\lambda/8$	$\lambda/8$	0	∞
10.	6ρ	6ρ	ρ	$3\lambda/8$	$5\lambda/8$	$\lambda/8$	$2\lambda/8$	0	∞
11.	4ρ	4ρ	ρ	$5\lambda/8$	$5\lambda/8$	$2\lambda/8$	$5\lambda/8$	0	∞
12.	4ρ	4ρ	ρ	$5\lambda/8$	$3\lambda/8$	$2\lambda/8$	$3\lambda/8$	0	∞
13.	2ρ	2ρ	ρ	$7\lambda/8$	$7\lambda/8$	$3\lambda/8$	$5\lambda/8$	0	∞
14.	2ρ	2ρ	ρ	$3\lambda/8$	$2\lambda/8$	$\lambda/8$	$3\lambda/8$	0	∞
15.	3ρ	3ρ	ρ	$2\lambda/8$	$2\lambda/8$	$2\lambda/8$	$3\lambda/8$	0	∞

3. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

АНАЛИЗ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДОВ СОГЛАСОВАНИЯ ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ С НАГРУЗКОЙ В AWR DESIGN ENVIRONMENT

3.1. Цель работы

Исследование частотных характеристик планарных согласующих устройств с применением САПР *AWR Design Environment*.

3.2. Исходные данные

К линии передачи с волновым сопротивлением ρ подключается сопротивление нагрузки $Z_H = R_H + jX_H$. Для обеспечения максимального коэффициента полезного действия линии передачи нагрузка подключается через согласующее устройство (СУ), которое позволяет в некоторой относительной полосе частот $\xi = \frac{\Delta f}{f_0}$ обеспечить в точке подключения СУ коэффициент стоячей волны $K_{CB} \leq K_{CB}^{доп}$.

В соответствии с индивидуальным заданием (табл. 3.1 и 3.2) необходимо выполнить расчет и моделирование характеристик различных планарных согласующих устройств микроволнового диапазона.

В лабораторной работе исследуются следующие типы согласующих устройств:

- одноступенчатый четвертьволновый трансформатор (ЧВТ);
- согласующий шунт (СШТ);
- двухступенчатый четвертьволновый трансформатор (ЧВТ2);
- комбинированное согласующее устройство (КСУ).

Исходные данные для выполнения лабораторной работы:

- волновое сопротивление линии передачи: $\rho = 50 \text{ Ом}$;
- активная составляющая сопротивления нагрузки

$$R_H = 100 + 3(10n + m);$$

- реактивная составляющая сопротивления нагрузки

$$X_H = 10 + 3(10n + m) + 100;$$

- комплексное сопротивление нагрузки

$$Z_H = R_H + jX_H.$$

- допустимое значение K_{CB}

$$K_{CB}^{доп} = 1,25 + 0,04(m+n);$$

- центральная частота

$$f_0 = 4 + 0,15(m+n);$$

- диапазон частот для экспериментального исследования

$$2\Delta f / f_0 = 0,7.$$

Примечание: m, n — предпоследняя и последняя цифры зачетной книжки.

Таблица 3.1 — Параметры модуля подложки несимметричной полосковой линии *MSUB* в *AWR Design Environment*

<i>N</i>	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<i>E_r</i> , <i>E_{rNom}</i>	3	2,6	2,6	2,6	2,4	2,4	2,4	2,2	2,2	2,2
<i>H</i> , мм	0,813	1,27	1,524	1,905	1,27	1,524	1,27	1,524	1,905	1,27
<i>Tand</i>	0,0012	0,0009	0,0019	0,0023	0,02	0,0023	0,002	0,0027	0,001	0,0027

Примечание: *N* — последняя цифра номера зачетной книжки студента; *E_r* — диэлектрическая проницаемость; *H* — толщина подложки; *Tand* — тангенс угла потерь диэлектрика.

3.3. Методика расчета параметров согласующих устройств

Под согласованием понимается обеспечение в заданной полосе частот в линии передачи режима, близкого к режиму бегущей волны, который характеризуется соблюдением условия $K_{CB} \leq K_{CB}^{доп}$. Будем считать, что исследуемое согласующее устройство:

— является узкополосным, если условие $K_{CB} \leq K_{CB}^{доп}$ выполняется в относительной полосе частот $\xi = \frac{\Delta f}{f_0} \leq 15\%$;

— является широкополосным, если условие $K_{CB} \leq K_{CB}^{доп}$ выполняется в относительной полосе частот $\xi > 15\%$.

Типичный график зависимости K_{CB} на входе от частоты представлен на рис. 3.1.

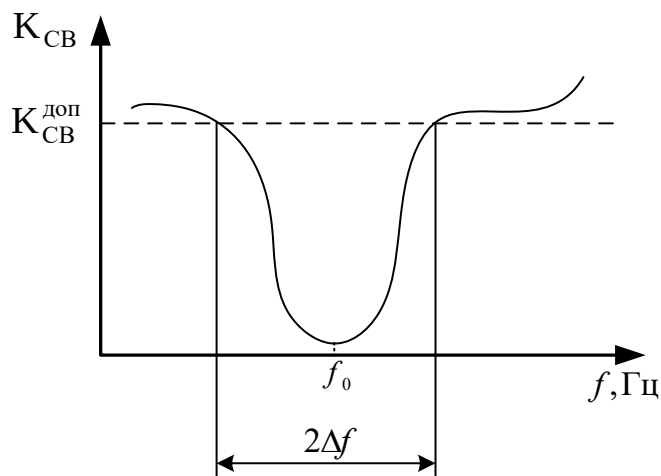


Рисунок 3.1 — Зависимость K_{CB} от частоты

При выполнении расчетов характеристик отрезков линий передачи следует учитывать, что длина волны в свободном пространстве λ и в диэлектрике λ' с диэлектрической проницаемостью материала ϵ связаны соотношением

$$\lambda' = \frac{\lambda}{\sqrt{\epsilon}}.$$

3.3.1. Методы узкополосного согласования

3.3.1.1. Четвертьволновый трансформатор

Данный метод реализуется при включении нагрузки Z_H в линию передачи через трансформатор, роль которого играет отрезок линии иного волнового сопротивления ρ_t (рис. 3.2).



Рисунок 3.2 — Эквивалентная схема четвертьволнового трансформатора

При согласовании входное сопротивление трансформатора $Z_{BX}(l_t)$ должно быть равно ρ , поэтому для его действительной и мнимой частей должны выполняться условия:

$$\begin{cases} \operatorname{Re} Z_{BX}(l_t) = \rho; \\ \operatorname{Im} Z_{BX}(l_t) = 0. \end{cases} \quad (3.1)$$

Распределение комплексного сопротивления вдоль линии передачи можно рассчитывается по формуле

$$Z(x) = \rho \frac{Z_H + j\rho \operatorname{tg} kx}{\rho + jZ_H \operatorname{tg} kx}, \quad (3.2)$$

где $k = \frac{2\pi}{\lambda'}$ — волновое число.

Используя общую формулу (3.2) можно получить общее решение системы уравнений (3.1) в виде:

$$\begin{cases} l_t = \frac{\lambda'}{2\pi} \operatorname{arctg} \left(\sqrt{\frac{\rho(\rho - R_H) \cdot (R_H \rho - R_H^2 - X_H^2)}{X_H \rho}} \right); \\ \rho_t = \sqrt{\frac{\rho(R_H \rho - R_H^2 - X_H^2)}{\rho - R_H}}. \end{cases} \quad (3.3)$$

Место включения и параметры четвертьволнового трансформатора определяются характером нагрузки.

В случае **чисто активной нагрузки трансформатора** (то есть $Z_H = R_H$) трансформатор подключается непосредственно между линией передачи и нагрузкой, в этом случае сопротивление нагрузки трансформатора

$R_{HT} = Z_H = R_H$, на основании (3.3) получим:

$$\begin{cases} \rho_t = \sqrt{\rho R_{HT}}; \\ l_t = \frac{\lambda'}{4}. \end{cases} \quad (3.4)$$

Так как физическая длина трансформатора составляет $l_t = \frac{\lambda'}{4}$, то говорят, что его электрическая длина составляет

$$\theta_t = 90^\circ.$$

При комплексном значении Z_H ЧВТ включается в определенное сечение линии передачи, в котором $Z(x)$, определяемое по формуле (3.2), является чисто активным, то есть $\text{Im}(Z(x))=0$, что соответствует положению пучности ($x_{\max}$) или узла ($x_{\min}$) напряжения в линии передачи. **Местоположения этих точек** определяется по формулам (1.7), (1.9), (1.11) и (1.12), значение $Z(x)$ в этих точках — по формуле (3.2), а сопротивление нагрузки трансформатора равно:

$$R_{HT} = Z(x_{\max}) = R(x_{\max}) \text{ или } R_{HT} = Z(x_{\min}) = R(x_{\min}),$$

в зависимости от того, какая точка ближе к нагрузке линии передачи.

Пример расчета точки подключения четвертьволнового трансформатора и его волнового сопротивления приведен в Приложении Г.

Предположим, что в полосе частот $f_0 \pm \Delta f$ сопротивление нагрузки трансформатора R_{HT} не меняется.

В этом случае относительная рабочая полоса частот $\xi = \frac{2\Delta f}{f_0} 100\%$ определяется по формуле

$$\xi = \frac{\pi}{4} \arctg \left(\frac{2(K_{CB}^{\text{доп}} - 1)\sqrt{N}}{(K_{CB}^{\text{доп}} + 1)(N - 1)} \right) 100\%, \quad (3.5)$$

где $N = \frac{R_{HT}}{\rho}$ — коэффициент трансформации, при $N > 1$ — понижающий трансформатор, при $N < 1$ — повышающий трансформатор.

Из (3.5) следует, что с увеличением отклонения N от единицы полоса согласования сужается.

3.3.1.2. Согласующий реактивный шунт

В качестве согласующего устройства в микроволновом тракте может использоваться короткозамкнутый отрезок линии передачи (шунт), подключаемый к основному тракту параллельно вблизи от комплексной нагрузки (рис. 3.3).

Так как идеальный короткозамкнутый отрезок линии передачи (без потерь) имеет чисто реактивное входное сопротивление, которое может быть любой величины и любого знака, то можно скомпенсировать произвольную реактивность нагрузки, подобрав реактивное сопротивление шунта равное мнимой части сопротивления нагрузки, но противоположное ей по знаку. Для полного согласования линии передачи с нагрузкой шунт включается в линию передачи в такую точку, в которой активная часть сопротивления линии передачи $\text{Re}(Z(x)) = \rho$.

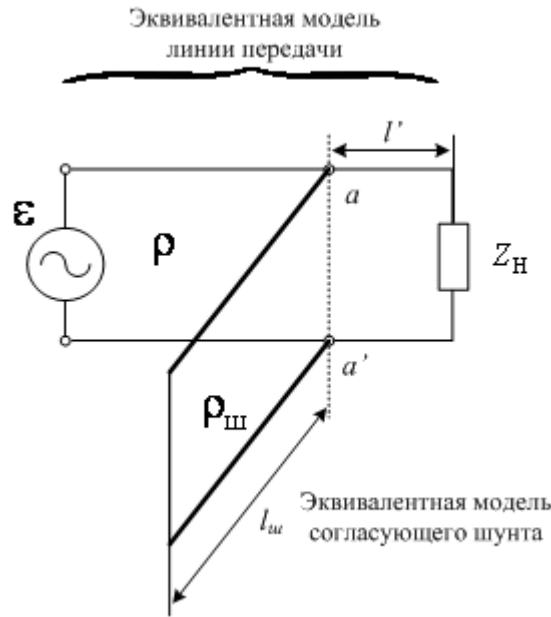


Рисунок 3.3 — Эквивалентная схема линии передачи с согласующим шунтом

Согласующий шунт (рис. 3.3) состоит из короткозамкнутого отрезка линии длиной $l_{\text{ш}}$ — собственно шунта с волновым сопротивлением $\rho_{\text{ш}}$, подключенного параллельно к основной линии на расстоянии l' от нагрузки. При согласовании суммарная входная проводимость $Y_{aa'}$ в сечении $a-a'$ равна величине, обратной волновому сопротивлению

$$Y_{aa'} = Y_{\text{ш}}(l_{\text{ш}}) + Y(l') = \frac{1}{\rho}, \quad (3.6)$$

где $Y(l')$ — проводимость линии передачи, нагруженной на сопротивление $Z_{\text{Н}}$, определяемая на расстоянии l' от точки подключения нагрузки (то есть в точке подключения шунта);

$Y_{\text{ш}}(l_{\text{ш}}) = jB_{\text{ш}}(l_{\text{ш}})$ — входная проводимость шунта;

$B_{\text{ш}}(l_{\text{ш}})$ — реактивная составляющая входной проводимости шунта длиной $l_{\text{ш}}$.

Для согласования линии передачи с нагрузкой должны выполняться условия:

$$\begin{cases} \operatorname{Re} Y(l') = \frac{1}{\rho}; \\ \operatorname{Im} Y(l') = -B_{ш}(l_{ш}). \end{cases} \quad (3.7)$$

Проводимость линии передачи, нагруженной на сопротивление Z_H , определяется с учетом (3.2) на расстоянии l' по формуле

$$Y(l') = \frac{1}{Z(l')} = \frac{1}{\rho} \frac{\rho + jZ_H \operatorname{tg} kl'}{Z_H + j\rho \operatorname{tg} kl'}, \quad (3.8)$$

где $k = \frac{2\pi}{\lambda'}$ — волновое число.

Реактивная составляющая входной проводимости шунта длиной $l_{ш}$ определяется по формуле

$$B_{ш}(l_{ш}) = -\frac{1}{\rho} \operatorname{ctg}(kl_{ш}). \quad (3.9)$$

Из формул (3.7) — (3.9) получим расчетные формулы:

$$\begin{cases} l' = \frac{\lambda'}{2\pi} \operatorname{arctg} \left(\frac{X_H}{R_H - \rho} + \sqrt{\frac{X_H^2}{(R_H - \rho)^2} + \frac{R_H^2 + X_H^2 - R_H \rho}{\rho(R_H - \rho)}} \right); \\ l_{ш} = \frac{\lambda'}{2\pi} \left[\frac{\pi}{2} - \operatorname{arctg} \left(\frac{\rho_{ш}}{\rho} \sqrt{\frac{X_H^2}{(R_H - \rho)^2} + \frac{R_H^2 + X_H^2 + \rho^2 - 2 \cdot R_H \cdot \rho}{R_H \rho}} \right) \right]. \end{cases} \quad (3.10)$$

Если при расчете l' или $l_{ш}$ получено $l', l_{ш} < 0$, то следует к полученному значению прибавить $\frac{\lambda'}{2}$.

Волновое сопротивление шунта $\rho_{ш}$ следует выбирать из соотношения

$$\rho_{ш} = \rho \sqrt{2}.$$

3.3.2. Методы широкополосного согласования

Общий принцип расширения полосы согласования линии передачи с нагрузкой состоит в том, что используются дополнительные элементы согласующего устройства для согласования на частотах, отличных от центральной. Число и параметры дополнительных элементов зависят от вида требуемой частотной характеристики (максимально плоской или «Чебышевской»), полосы частот и величины активного сопротивления нагрузки.

3.3.2.1. Двухступенчатый трансформатор

Как показано в пп. 3.3.1.1, частотные свойства ЧВТ ограничены коэффициентом трансформации. При необходимости расширения полосы рабочих частот можно использовать несколько последовательно включаемых ЧВТ с распределенным общим коэффициентом трансформации, что позволит приблизить

коэффициент трансформации каждого из ЧВТ к единице и, как следствие, существенно расширить рабочую полосу частот согласующего устройства.

На практике часто используется двухступенчатый трансформатор (рис. 3.4), для каждой из ступеней которого коэффициент трансформации выбирается одинаковыми и равным $N_{t1,2} = \sqrt{N_{\text{Общ}}}$, где $N_{\text{Общ}} = \frac{R_{\text{НТ}}}{\rho}$.



Рисунок 3.4 — Эквивалентная схема двухступенчатого четвертьволнового трансформатора

Для определения ρ_{t1} и ρ_{t2} с учетом (3.4) и получены формулы:

$$\begin{cases} \rho_{t1} = \sqrt{\rho \sqrt{\rho R_{\text{НТ}}}}; \\ \rho_{t2} = \sqrt{R_{\text{НТ}} \sqrt{\rho R_{\text{НТ}}}}. \end{cases} \quad (3.15)$$

Относительную полосу рабочих частот ξ двухступенчатого трансформатора можно приблизительно оценить по формуле

$$\xi = \frac{4}{\pi} \sqrt{\frac{(K_{\text{СВ}}^{\text{доп}} - 1) \sqrt{N_{\text{Общ}}}}{K_{\text{СВ}}^{\text{доп}} |N_{\text{Общ}} - 1|}} 100\%. \quad (3.16)$$

При согласовании комплексной нагрузки, также как и в случае ЧВТ следует подключить широкополосный трансформатор в точку экстремума активной составляющей $Z(x)$ (см. пп. 3.3.1.1.).

3.3.2.2. Четвертьволновый трансформатор с компенсатором

Полосу согласования рассмотренного в п. 3.3.1.1 четвертьволнового трансформатора можно расширить, если скомпенсировать реактивную составляющую сопротивления, возникающую при отклонении от резонансной частоты настройки трансформатора. Для этого необходимо использовать реактивный согласующий короткозамкнутый шунт (п. 3.3.2.2) или разомкнутый четвертьволновый шлейф. Далее рассмотрим особенности построения этих согласующих устройств.

а) *Согласующее устройство на основе комбинации четвертьволновых трансформатора и шлейфа.* При использовании этого согласующего устройства разомкнутый четвертьволновый шлейф подключается со стороны

четвертьволнового трансформатора с **большим** сопротивлением, как показано на рис. 3.5.

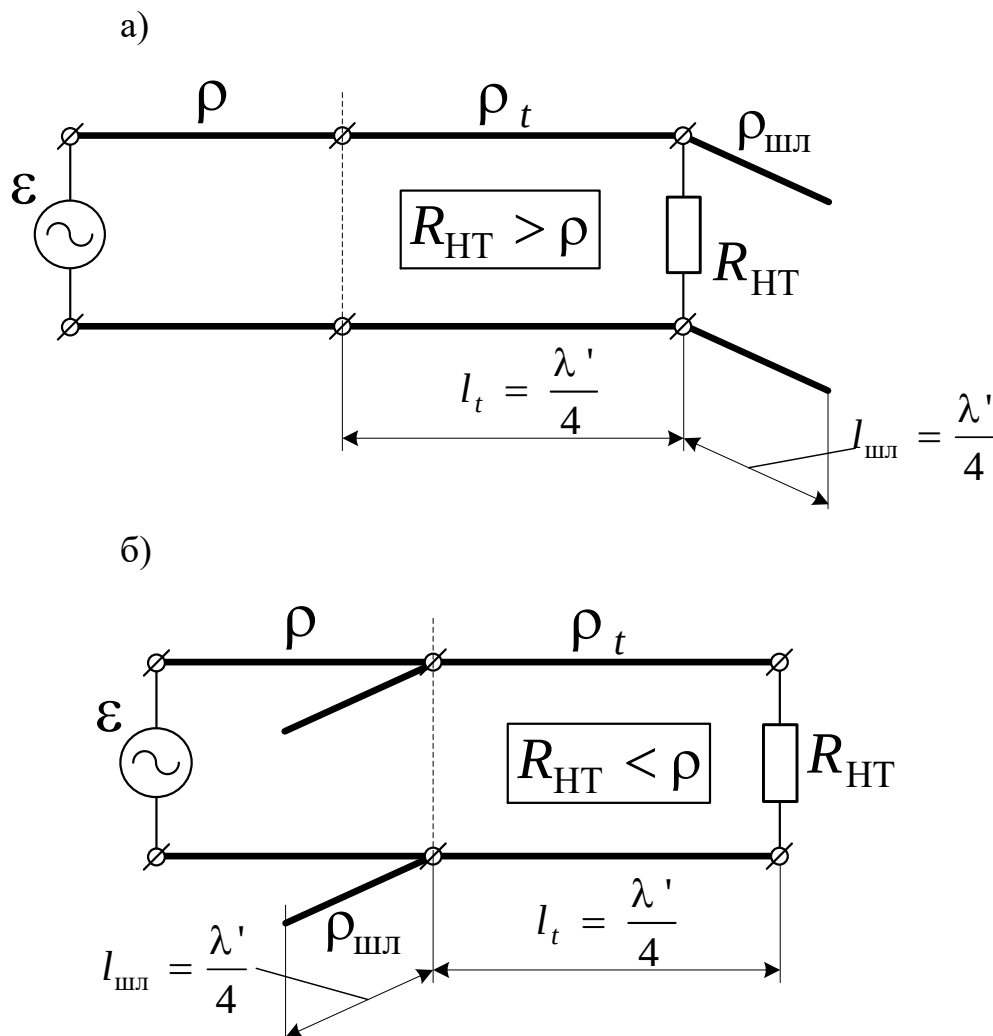


Рисунок 3.5 — Эквивалентная схема согласующего устройства на основе комбинации четвертьволновых трансформатора и шлейфа при $R_{HT} > \rho$ (а) и $R_{HT} < \rho$ (б)

В зависимости от соотношения R_{HT} и ρ волновое сопротивление разомкнутого четвертьволнового шлейфа $\rho_{шл}$ рассчитывается по формулам:

$$\rho_{шл} = \begin{cases} \sqrt{\frac{R_{HT}}{\rho}} (R_{HT} - \rho), & \text{при } R_{HT} > \rho; \\ \sqrt{\frac{\rho}{R_{HT}}} (\rho - R_{HT}), & \text{при } R_{HT} < \rho. \end{cases} \quad (3.17)$$

б) *Согласующее устройство на основе комбинации четвертьволновых трансформатора и короткозамкнутого шунта.* При использовании этого согласующего устройства короткозамкнутый четвертьволновый шунт подключается со стороны четвертьволнового трансформатора с **меньшим** сопротивлением, как показано на рис. 3.6.

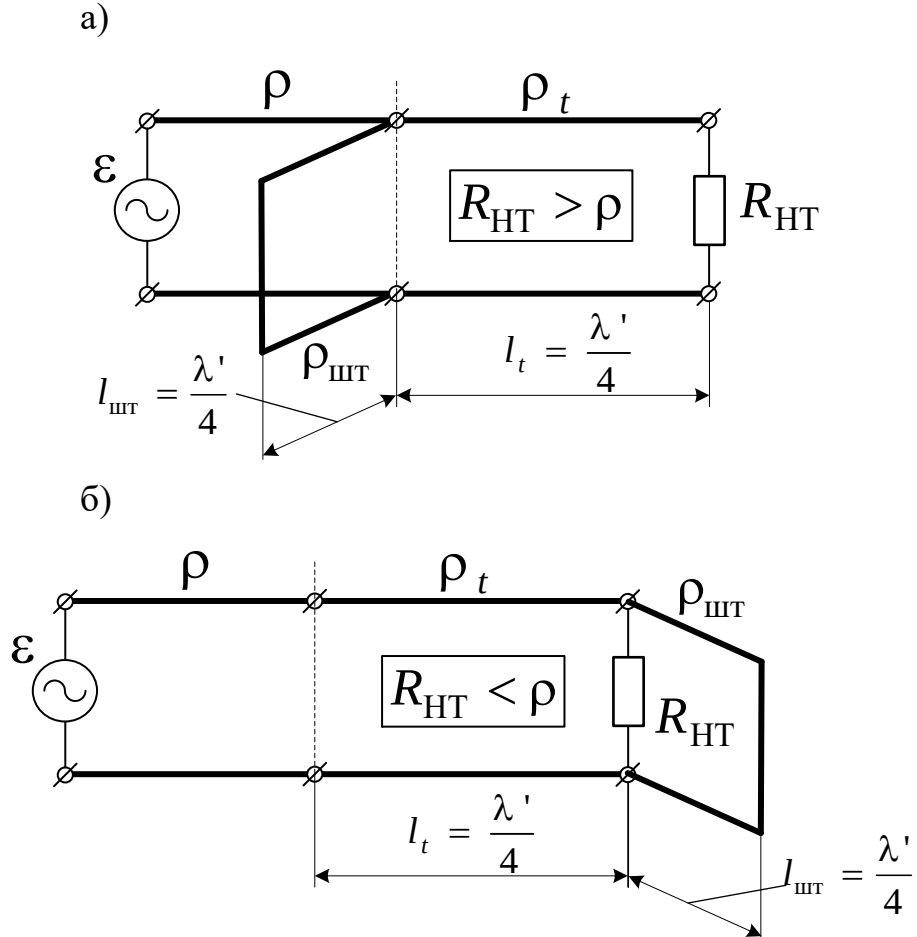


Рисунок 3.6 — Эквивалентная схема согласующего устройства на основе комбинации четвертьволновых трансформатора и шлейфа при $R_{HT} > \rho$ (а) и $R_{HT} < \rho$ (б)

В зависимости от соотношения R_{HT} и ρ волновое сопротивление разомкнутого четвертьволнового шунта $\rho_{шт}$ рассчитывается по формулам:

$$\rho_{шт} = \begin{cases} \sqrt{R_{HT} \rho} \frac{\rho}{R_{HT} - \rho}, & \text{при } R_{HT} > \rho; \\ \sqrt{R_{HT} \rho} \frac{R_{HT}}{\rho - R_{HT}}, & \text{при } R_{HT} < \rho. \end{cases} \quad (3.18)$$

Примечание 1. Напоминаем, что показанные на рис. 3.5 и 3.6 эквивалентные схемы согласующих устройств применяются для согласования линии передачи с чисто активной нагрузкой.

При комплексном значении Z_H четвертьволновый трансформатор включается в определенное сечение линии передачи, в котором $Z(x)$, определяемое по формуле (3.2), является чисто активным, то есть $\text{Im}(Z(x))=0$, что соответствует положению пучности ($x_{\max}$) или узла ($x_{\min}$) напряжения в линии передачи. Местоположения этих точек определяется по формулам (1.7), (1.9), (1.11) и (1.12), значение $Z(x)$ в этих точках — по формуле (3.2), а сопротивление нагрузки трансформатора равно:

$$R_{HT} = Z(x_{\max}) = R(x_{\max}) \text{ или } R_{HT} = Z(x_{\min}) = R(x_{\min}),$$

в зависимости от того, какая точка ближе к нагрузке линии передачи.

Пример расчета точки подключения четвертьволнового трансформатора и его волнового сопротивления приведен в Приложении Г.

Примечание 2. Критерием выбора типа компенсатора (шлейф или шунт) является практическая целесообразность применения каждого из компенсаторов.

Например, при значении сопротивления нагрузки $Z_n = 200 + j200$ Ом для линии передачи с волновым сопротивлением 50 Ом, согласно примера расчета в Приложении Г, в ближайшем от нагрузки экстремуме сопротивление $R_{HT} = 406$ Ом.

При расчете $\rho_{шт}$ и $\rho_{шл}$ по формулам (3.17) и (3.18) получены значения:

$$\rho_{шл} = 1016 \text{ Ом и } \rho_{шт} = 20 \text{ Ом.}$$

Реализовать полосковую линию передачи с $\rho_{шл} = 1016$ Ом невозможно.

Поэтому в данном случае следует выбрать в качестве компенсатора короткозамкнутый шунт с $\rho_{шт} = 20$ Ом.

Следует учесть, что нежелательно выбирать варианты компенсаторов с волновым сопротивлением большим 150 Ом, что обусловлено трудностью их физической реализации на основе несимметричной полосковой линии передачи.

3.3.2.3. Сверхширокополосный плавный согласующий переход

Известно, что переходы с непрерывным изменением электрофизических параметров (плавные переходы) по сравнению со ступенчатыми переходами при прочих равных условиях обеспечивают наименьшее отражение в широкой полосе частот.

Модель такого согласующего перехода показана на рис. 3.7. Практическое применение его связано с тем, что в ряде случаев возникает необходимость соединить линии передачи с разным волновым сопротивлением, как это и показано на рис. 3.7.

При этом параметры перехода выбираются на основании простых условий:

— волновое сопротивление на внешних границах перехода должно совпадать с волновыми сопротивлениями соответствующих линий передачи, т.е. ширина торцов полоскового согласующего перехода должна совпадать с шириной соответствующих соединяемых полосковых линий передачи;

— длина перехода выбирается равной от λ_0 до $3\lambda_0$; с практической точки зрения целесообразно выбирать наименьшее допустимое значение длины перехода.

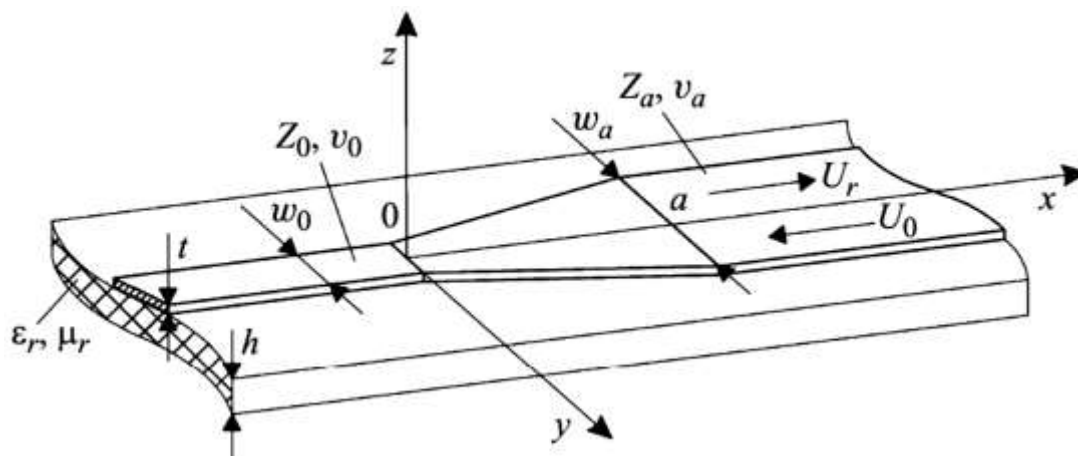


Рисунок 3.7 — Модель плавного полоскового согласующего перехода

3.4. Порядок выполнения работы

3.4.1. Предварительные расчеты

3.4.1.1. Рассчитать параметры согласующего устройства, выполненного на основе шунта, для комплексной нагрузки Z_{H1} . Результаты расчетов занести в табл. 3.2.

Таблица 3.2 — Результаты предварительных расчетов согласующего устройства, выполненного на основе шунта

λ' , м	ρ , Ом	Z_{H1} , Ом	$\rho_{ш}$, Ом	l' , см	$l_{ш}$, см

3.4.1.2. Рассчитать параметры согласующего устройства, выполненного на основе четвертьволнового трансформатора, для активной нагрузки R_{H2} и комплексной нагрузки Z_{H2} . Результаты расчетов занести в табл. 3.3.

Таблица 3.3 — Результаты предварительных расчетов согласующего устройства, выполненного на основе четвертьволнового трансформатора

λ' , м	ρ , Ом	Нагрузка, Ом		ρ_t , Ом	l' , см	θ_t
		R_{H2}				90°
		Z_{H2}				

Примечание: l' — расстояние от точки подключения нагрузки к линии передачи до точки включения в линию передачи ЧВТ; при чисто активной нагрузке $l'=0$, при комплексной нагрузке l' определяется согласно рекомендациям пп. 3.3.1.1 и Приложению Г; θ_t — электрическая длина.

3.4.1.3. Рассчитать параметры согласующего устройства, выполненного на основе двухступенчатого трансформатора, для активной нагрузки R_{H2} и комплексной нагрузки Z_{H2} . Результаты расчетов занести в табл. 3.4.

Таблица 3.4 — Результаты предварительных расчетов согласующего устройства, выполненного на основе двухступенчатого трансформатора

λ' , м	ρ , Ом	Нагрузка, Ом	ρ_{t1} , Ом	ρ_{t2} , Ом	l' , см	θ_t
		R_{H2}				90°
		Z_{H2}				

Примечание: l' — расстояние от точки подключения нагрузки к линии передачи до точки включения в линию передачи двухступенчатого трансформатора; θ_t — электрическая длина.

3.4.1.4. Рассчитать параметры согласующего устройства, выполненного на основе четвертьволнового трансформатора для комплексной нагрузки Z_{H2} . Результаты расчетов занести в табл. 3.5.

Таблица 3.5 — Результаты предварительных расчетов согласующего устройства, выполненного на основе двухступенчатого трансформатора

λ' , м	ρ , Ом	Z_{H2} , Ом	ρ_t , Ом	l' , см	θ_t	Компенсатор	
					90°	Тип	
						ρ , Ом	

Примечание: l' — расстояние от точки подключения нагрузки к линии передачи и точкой включения в линию передачи четвертьволнового трансформатора; θ_t — электрическая длина; «Тип» компенсатора — шлейф или шунт.

3.4.2. Экспериментальные исследования

Программа экспериментальных исследований в лабораторной работе реализована в среде САПР *AWR Design Environment*, предназначенной для моделирования характеристик микроволновых устройств. Для выполнения программы исследования следуем в предложенной САПР реализовать схемотехнические проекты исследуемых согласующих устройств — согласно приведенных ниже рекомендаций, где также представлены образцы проектов. В этих образцах следует задать численные значения переменных, полученные в ходе выполнения предварительных расчетов.

Внешний вид окна интерфейса САПР *AWR Design Environment* показан на рис. 3.8, где обозначены наиболее важные разделы интерфейса, необходимые для выполнения работы.

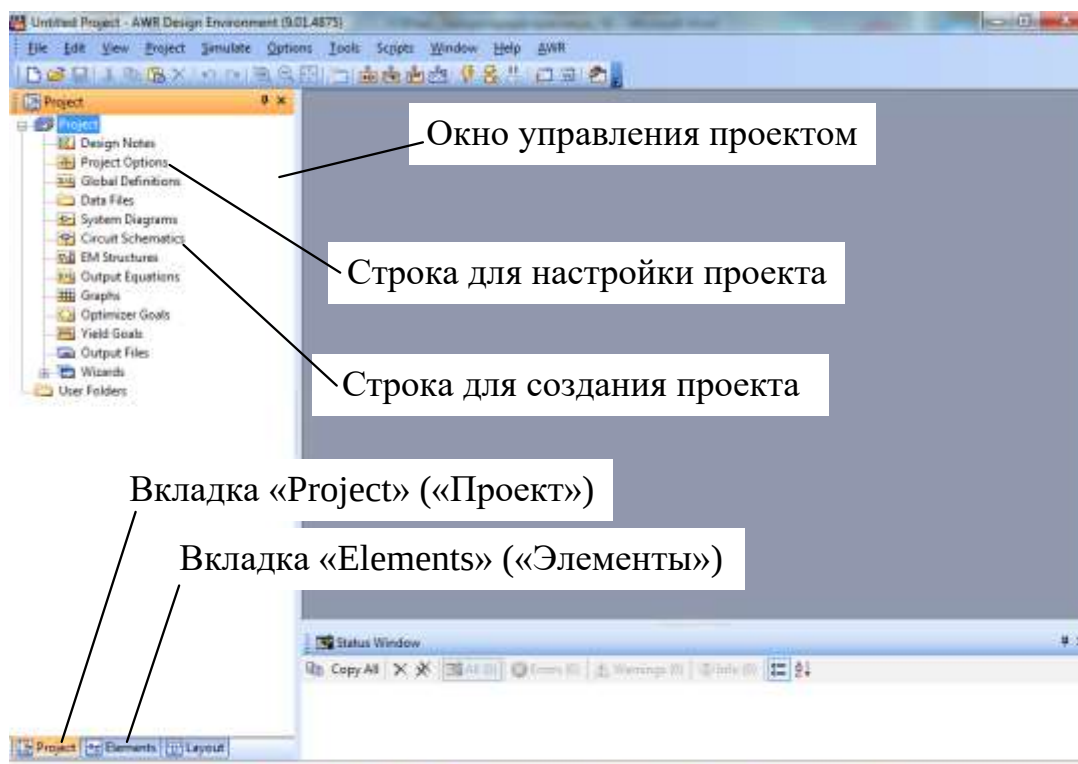


Рисунок 3.8 — Окно интерфейса AWR Design Environment

Для подготовки проекта требуется выполнить следующие операции.

Запустить программу AWR Design Environment;

В строке для настройки проекта двойным кликом вызвать окно настроек проекта (рис. 3.9). Во вкладке «Global Units» задать размерность частот «GHz» и длины — «mm» (рис. 3.9, а). Во вкладке «Frequencies» численно задать диапазон частот с учетом исходных данных по формулам

$$\text{Start: } f_{\min} = 0,65 f_0;$$

$$\text{Stop: } f_{\max} = 1,35 f_0;$$

$$\text{Step: } 0,01 \text{ GHz}$$

и нажать «Apply» (рис. 3.9, б).

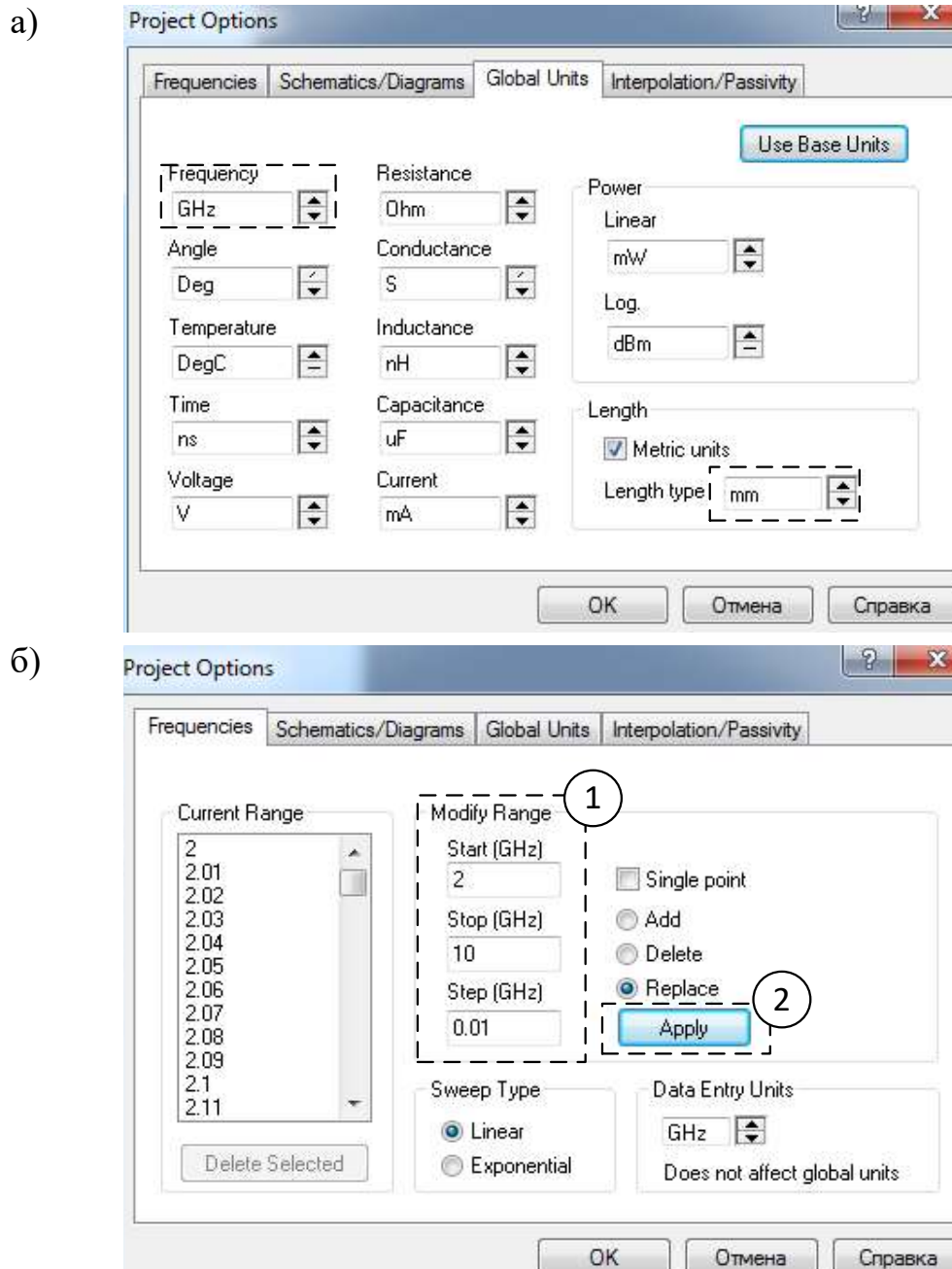


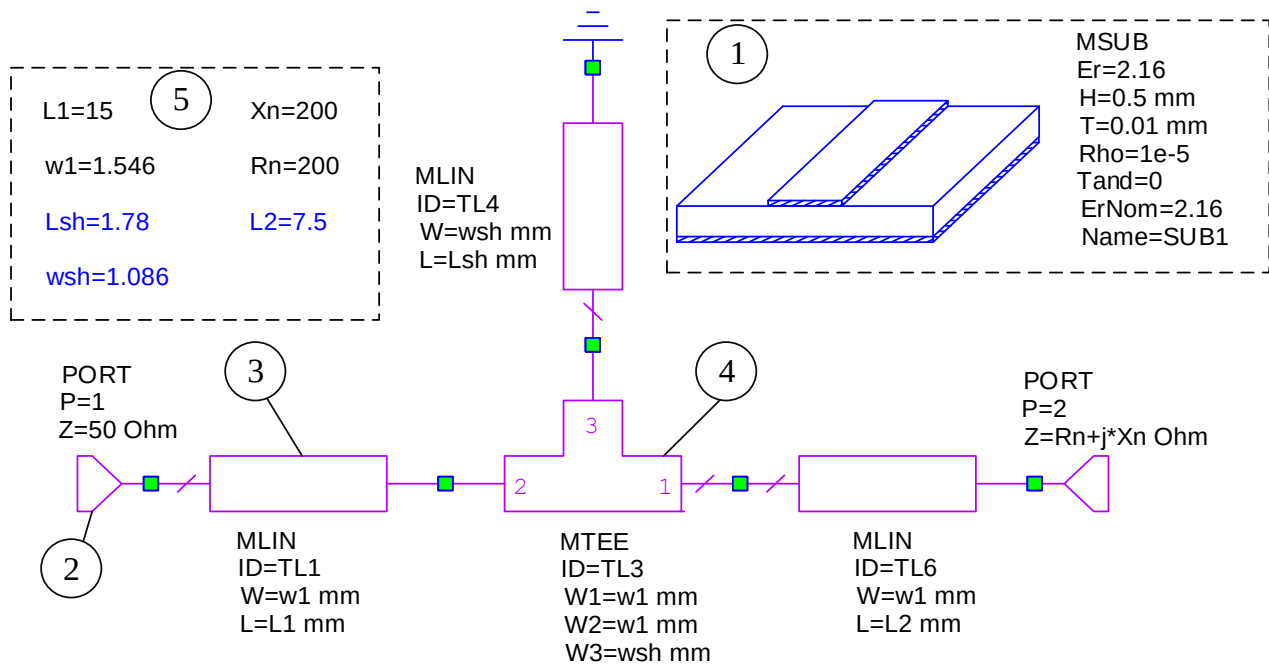
Рисунок 3.9 — Настройка метрологических размерностей (а) и диапазона частот моделирования (б)

3.4.2.1. Моделирование частотных характеристик линии передачи с комплексной нагрузкой и с согласующим реактивным шунтом

Создать новый проект в строке создания проектов (*Circuit Schematics* / всплывающее меню / *New Schematic*) с названием «*MatchingCircuit_1*».

В окно проекта перенести модуль 1 (*MSUB*) на рис. 3.10, параметры которого задаются согласно исходных данных в табл. 3.1.

В окне проекта следует собрать модель согласующего устройства, выполненного на основе шунта, предварительно рассчитанного в пп. 3.4.1.1. Пример модели согласующего устройства показан на рис. 3.10.



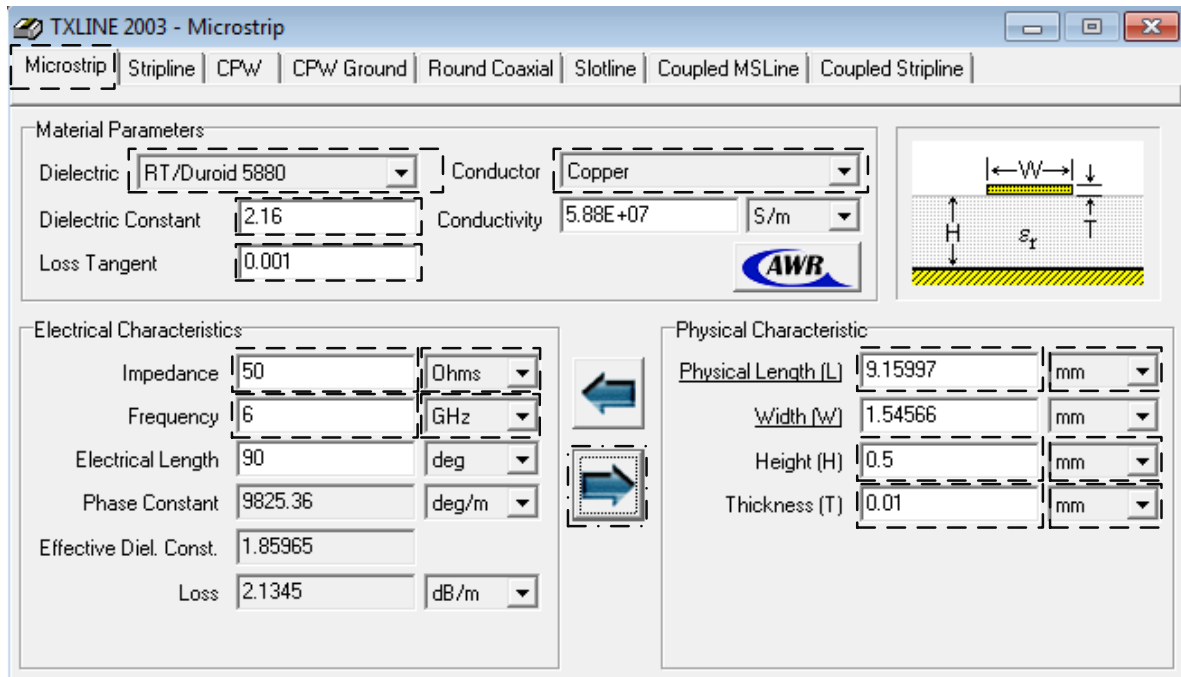
- 1 — блок, определяющий тип микроволновой линии передачи — несимметричная полосковая линия (*Elements / Substrates / MSUB*);
- 2 — линейный порт (*Elements / Ports* (выделить непосредственно группу, не раскрывая ее) / *PORT*);
- 3 — отрезок линии передачи (*Elements / Microstrip / Lines / MLIN*);
- 4 — точка ветвления линий передачи (*Elements / Microstrip / Junctions / MTEE*);
- 5 — заданные переменные (верхнее меню, кнопка 

Рисунок 3.10 — Пример модели линии передачи с комплексной нагрузкой и с согласующим реактивным шунтом

В данной модели параметры линий задаются в виде переменных (блок 5 на рис. 3.10):

— $L1$ — длина основной полосковой линии передачи; принять $L1=20$ мм — для всех;

— $w1$ — ширина основной полосковой линии передачи; ее значение выбрать для волнового сопротивления линии 50 Ом с помощью программы *TXLine* (верхнее меню «Tools» / *TXLine*), показанной на рис. 3.11, в которой необходимо во вкладке *Microstrip* заполнить поля, выделенные курсивом (*Dielectric Constant* = ϵ_r , *Loss Tangent* = $\tan \delta$, *Impedance* = 50, *Frequency* = f_0 , *Electrical Length* = 360 град., *Height* = H мм, *Thickness* = 0,01 мм); после этого нажать на кнопку, выделенную штрихпунктирной линией и полученный результат для ширины линии записать как $w1 = \text{Width}$ (мм);

Рисунок 3.11 — Окно программы *TXLine*

- R_n , X_n — активная и реактивная составляющие сопротивления нагрузки Z_{H1} согласно исходных данных;
- L_2 — длина отрезка линии l' , рассчитанная в пп. 3.4.1.1;
- L_{sh} — длина шунта $l_{ш}$, рассчитанная в пп. 3.4.1.1;
- w_{sh} — ширина линии шунта, определяемая в программе *TXLine* так же, как и для w_1 , но при $Impedance = \rho_{ш}$ и

$$Electrical\ Length = \frac{360}{\lambda'} L_{sh}, \text{ град.}$$

Для разработанной схемы линии передачи с комплексной нагрузкой и согласующим шунтом построить график частотной зависимости КСВ на входе линии передачи. Для этого в окне программы (рис. 3.8) в строке «*Graphs*» в всплывающем меню создать новый график с названием «*MatchingCircuit_1_WSVR*». В созданной вкладке добавить измерение коэффициента стоячей волны (*Add Measurement*) в последовательности, показанной на рис. 3.12.

Двойным кликом по строке с названием графика вызвать окно графика и выполнить моделирование (*Simulate / Analyze, F8*).

Аналогичным образом построить график частотной зависимости модуля коэффициента передачи разработанной модели («*MatchingCircuit_1_S21*») — в соответствии с рис. 3.13.

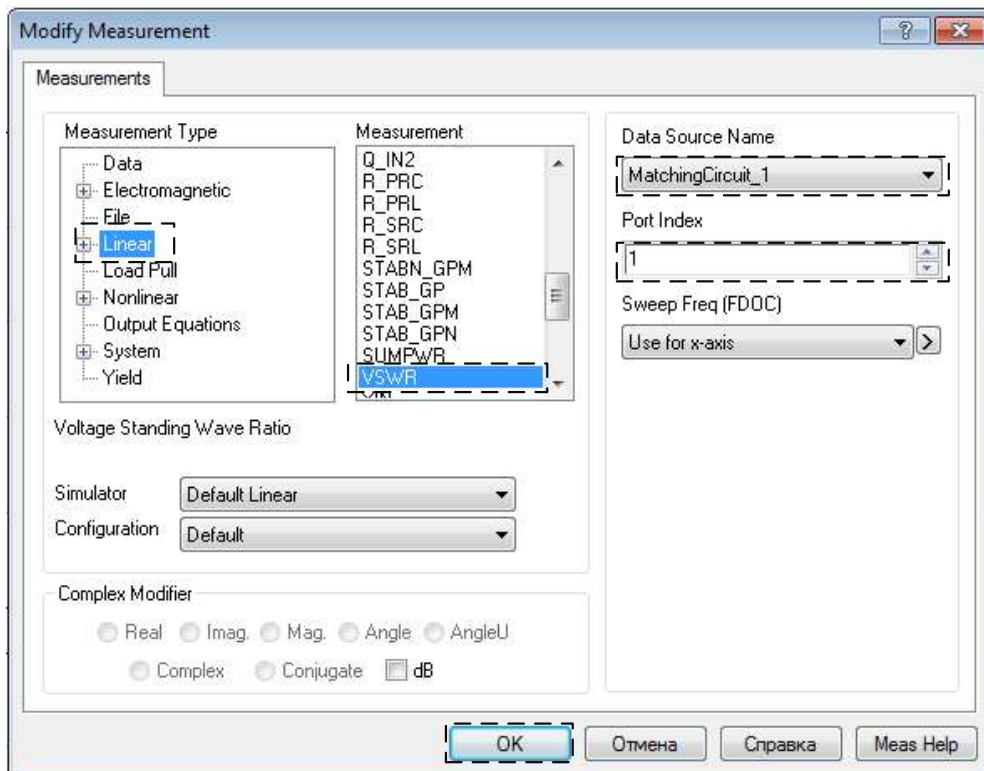


Рисунок 3.12 — Создание графика для измерения КСВ на входе линии передачи

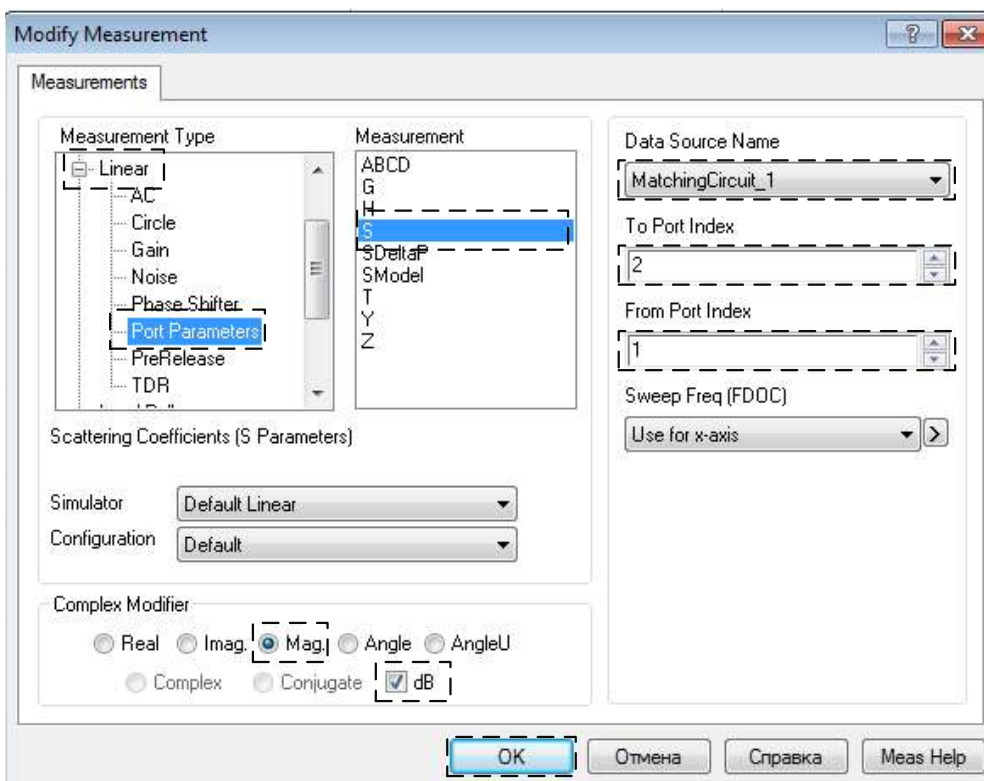


Рисунок 3.13 — Создание графика для измерения коэффициента передачи

С помощью инструмента «Tune Tool» (кнопка ) в блоке переменных (см. рис. 3.8) выделить Lsh, wsh, L2. Открыть вкладку графика «MatchingCircuit_1_WSVR». Нажать на кнопку  — появится панель коррекции значений переменных.

Корректируя в небольших пределах значения переменных L_{sh} , w_{sh} , L_2 , добиться такого вида графика «*MatchingCircuit_1_WSVR*», при котором минимум КСВ приходится точно на частоту f_0 . Сохранить поочередно полученные графики («*MatchingCircuit_1_WSVR*» и («*MatchingCircuit_1_S21*»)) в буфер обмена (*Edit / All to Clipboard*) и вставить их в Отчет по лабораторной работе.

3.4.2.2. Моделирование частотных характеристик линий передачи с нагрузками и согласующими четвертьволновыми трансформаторами

Следует создать в САПР *AWR Design Environment* модель «*MatchingCircuit_2*» для линии передачи с согласующим трансформатором, пример которой показан на рис. 3.14.

Исследуются случаи активной нагрузки (трансформатор подключается непосредственно к нагрузке, т.е. к порту) и случай комплексной нагрузки (трансформатор подключается к нагрузке через отрезок линии с рассчитанной длиной, см. Приложение Г).

На основании исходных и полученных данных в программе *TXLine* определить параметры отрезков линий передачи:

- w_1 — ширина основной линии передачи и отрезка линии вблизи комплексной нагрузки;
- L_T — физическая длина отрезка линии четвертьволнового трансформатора с электрической длиной $\theta_t = 90^\circ$;
- w_T — ширина отрезка линии четвертьволнового трансформатора.

Длина отрезка линии вблизи комплексной нагрузки определяется в ходе предварительных расчетов (пример — см. Приложение Г).

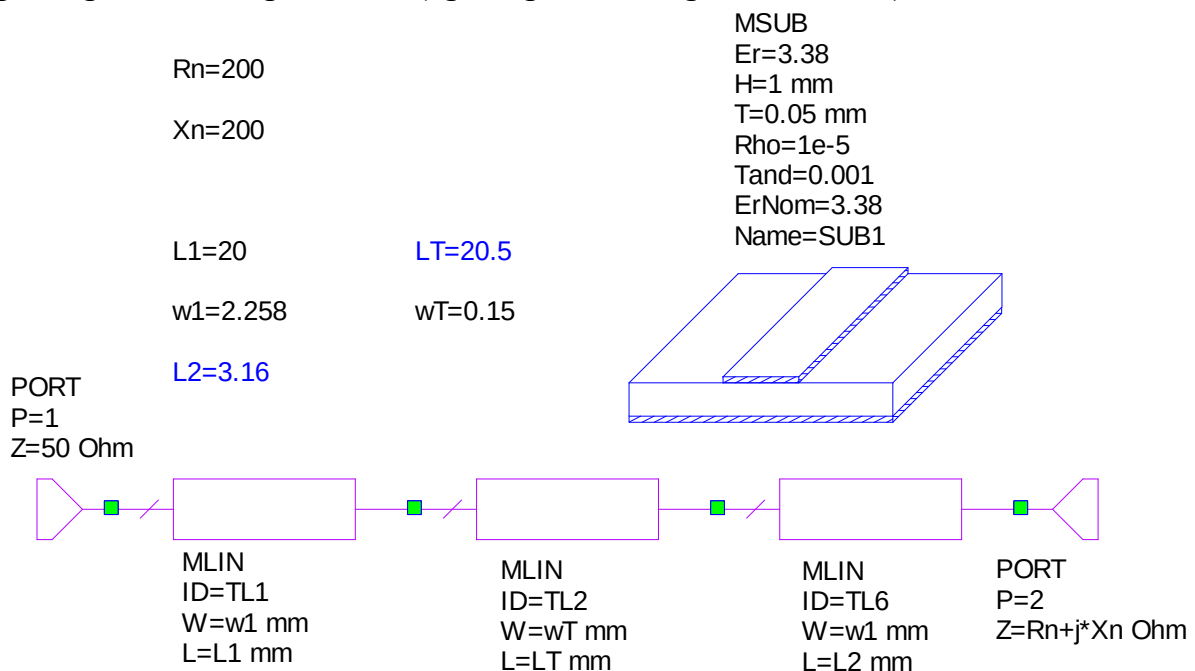


Рисунок 3.14 — Пример модели линии передачи с комплексной нагрузкой и с согласующим четвертьволновым трансформатором

Построить графики для частотных зависимостей коэффициента стоячей волны на входе линии (Port 1) и коэффициента передачи для разработанной модели.

Выполнить корректировку полученных характеристик, выделив инструментом «*Tune Tool*» (кнопка ) переменные L2 и LT.

3.4.2.3. Моделирование частотных характеристик линии передачи с комплексной нагрузкой и с широкополосным согласующим переходом

Следует создать в САПР *AWR Design Environment* модель «*MatchingCircuit_3*» для линии передачи с комбинированным согласующим устройством, образованным четвертьволновым трансформатором и реактивным четвертьволновым компенсатором (с короткозамкнутым шунтом или разомкнутым шлейфом). Вариант реактивного компенсатора выбирается на этапе предварительных расчетов (см. Примечание 2 в пп. 3.3.2.2).

Исследуется только случай комплексной нагрузки линии передачи.

Пример модели согласующего устройства, выполненного с применением компенсатора в виде шунта, показан на рис. 3.15.

Создать новую схемотехническую модель с названием «*MatchingCircuit_2*».

Создать модель линии передачи с комплексной нагрузкой и с широкополосным согласующим переходом, показанную на рис. 3.10.

Параметры подложки выбрать из табл. 3.1.

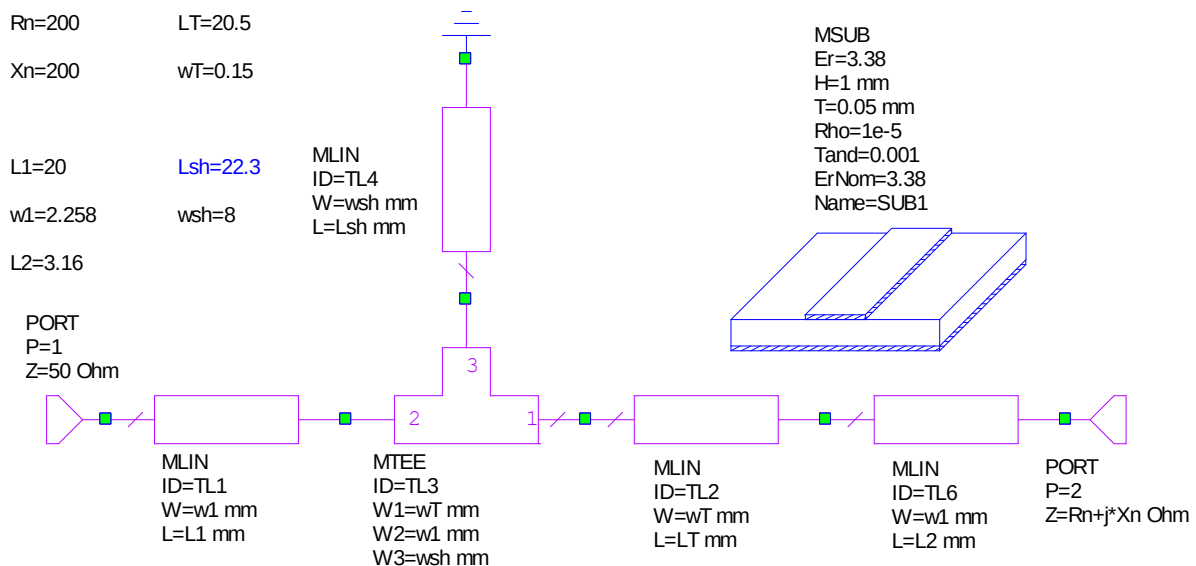


Рисунок 3.15 — Пример модели линии передачи с комплексной нагрузкой и с широкополосным согласующим переходом в виде трансформатора с шунтом

Построить графики для частотных зависимостей коэффициента стоячей волны на входе линии (Port 1) и коэффициента передачи для разработанной модели.

Выполнить корректировку полученных характеристик, выделив инструментом «*Tune Tool*» (кнопка ) переменную Lsh.

3.4.2.4. Моделирование частотных характеристик линий передачи с нагрузками и с двухступенчатыми трансформаторами

Следует создать в САПР *AWR Design Environment* модель «*MatchingCircuit_4*» для линии передачи с согласующим двухступенчатым трансформатором, пример которой показан на рис. 3.16.

Исследуются случаи активной нагрузки (трансформатор подключается непосредственно к нагрузке, т.е. к порту) и случай комплексной нагрузки (трансформатор подключается к нагрузке через отрезок линии с рассчитанной длиной, см. Приложение Г) (рис. 3.16).

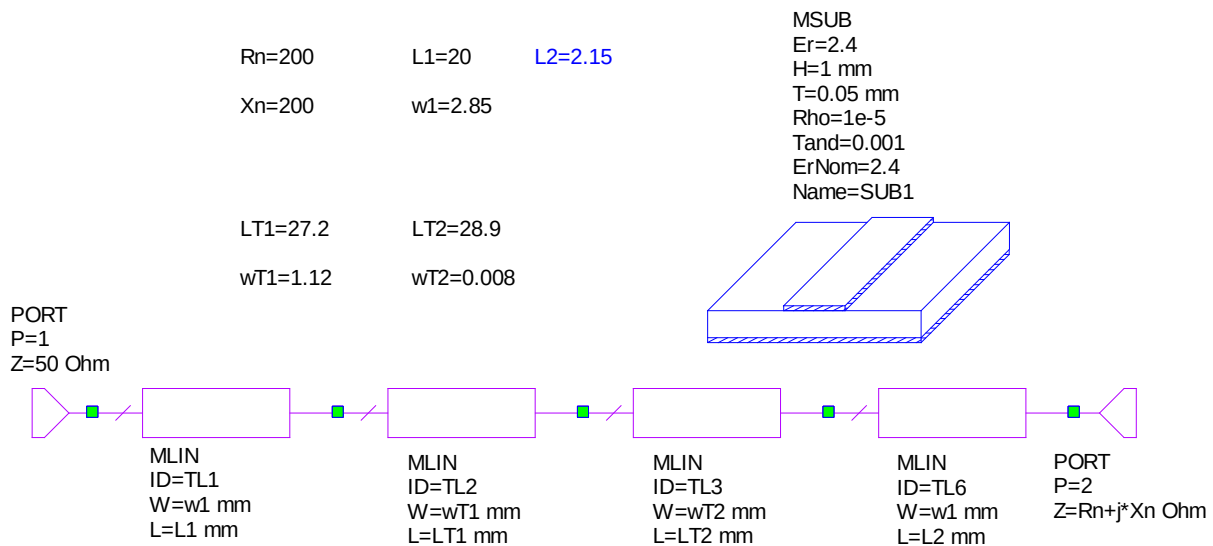


Рисунок 3.16 — Пример модели линии передачи с комплексной нагрузкой и с широкополосным согласующим переходом в виде двухступенчатого трансформатора

Построить графики для частотных зависимостей коэффициента стоячей волны на входе линии (*Port 1*) и коэффициента передачи для разработанной модели.

Выполнить корректировку полученных характеристик, выделив инструментом «*Tune Tool*» (кнопка ) переменную L2.

3.4.3. Содержание отчета

В отчет по лабораторной работе следует включить следующие материалы:

- цель работы;
- исходные данные;
- результаты предварительных расчетов;
- модель линии передачи с согласующим устройством в виде шунта и результаты ее исследования;

- модель линии передачи с согласующим устройством в виде четвертьволнового трансформатора и результаты ее исследования;
- модель линии передачи с согласующим устройством в виде четвертьволнового трансформатора с компенсатором и результаты ее исследования;
- модель линии передачи с согласующим устройством в виде двухступенчатого трансформатора и результаты ее исследования;
- по частотным характеристикам КСВ четырех исследованных моделей согласующих устройств для случаев согласования линии передачи с комплексной нагрузкой определить полосы рабочих частот Δf по уровню $КСВ_{доп} = 2$; сравнить полученные значения Δf ;
- выводы по работе.

3.5. Контрольные вопросы

3.5.1. Вопросы для допуска к лабораторной работе

- а) К линии передачи с волновым сопротивлением 50 Ом подключена нагрузка 75 Ом. Если нагрузка станет равной $75 + j50$ Ом, как при этом изменится КСВ?
- б) Для чего нужны согласующие устройства?
- в) Перечислите типы согласующих устройств, реализуемые на основе отрезков линий передачи.
- г) Определите с помощью программы TXLine параметры несимметричной полосковой линии передачи на частоте 4 ГГц, если волновое сопротивление равно 50 Ом, диэлектрическая проницаемость равна 6,15, толщина подложки 0,635 мм, электрическая длина линии передачи 120° .
- д) Определите с помощью программы TXLine параметры несимметричной полосковой линии передачи на частоте 3 ГГц, если волновое сопротивление равно 75 Ом, диэлектрическая проницаемость равна 3,48, толщина подложки 0,508 мм, электрическая длина линии передачи 45° .
- е) Определите с помощью программы TXLine параметры несимметричной полосковой линии передачи на частоте 5 ГГц, если волновое сопротивление равно 40 Ом, диэлектрическая проницаемость равна 10,2, толщина подложки 1,27 мм, электрическая длина линии передачи 90° .
- ж) Определите с помощью программы TXLine параметры несимметричной полосковой линии передачи на частоте 7 ГГц, если волновое сопротивление равно 50 Ом, диэлектрическая проницаемость равна 2,2, толщина подложки 0,381 мм, электрическая длина линии передачи 180° .
- з) Опишите порядок построения в *AWR Design Environment* графика частотной зависимости КСВ четырехполюсника.
- и) Опишите порядок построения в *AWR Design Environment* графика частотной зависимости модуля коэффициента передачи четырехполюсника.

3.5.2. Вопросы для подготовки к защите лабораторной работы

- а) Структура и принцип работы согласующего устройства, выполненного на основе короткозамкнутого шунта.
- б) Структура и принцип работы согласующего устройства, выполненного на основе четвертьволнового трансформатора.
- в) От чего зависит ширина рабочей полосы частот согласующего устройства, выполненного на основе четвертьволнового трансформатора.
- г) Структура и принцип работы широкополосного согласующего устройства, выполненного на основе двухступенчатого трансформатора.
- д) Структура и принцип работы широкополосного согласующего устройства, выполненного на основе четвертьволнового трансформатора с компенсатором.
- е) Сравните частотные свойства исследованных согласующих устройств.
- ж) Опишите особенности построения модели согласующего устройства на основе четвертьволнового трансформатора при подключении к линии передачи комплексной нагрузки.
- з) Если к линии передачи подключена комплексная нагрузка, чем будут отличаться режимы работы линии передачи до и после согласования?
- и) Как связаны между собой значения коэффициента стоячей волны и модуля коэффициента передачи полосковой линии?
- к) Опишите особенности построения модели широкополосного согласующего устройства на основе четвертьволнового трансформатора с компенсатором при подключении к линии передачи комплексной нагрузки.
- л) Какие параметры модели двухступенчатого трансформатора определяют значение центральной частоты согласования?
- м) Сравните частотные характеристики согласующих устройств: четвертьволнового трансформатора и двухступенчатого трансформатора.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Оформление текстовых работ: методические указания / СевГУ; сост. В. Г. Слёзкин, П. П. Ермолов. — Севастополь : Изд-во СевГУ, 2015. — 19 с.
2. Гошин, Г.Г. Устройства СВЧ и антенны. Часть 2. Антенны: учебное пособие / Гошин Г.Г.— Электрон. текстовые данные.— Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2012. — 159 с.
3. Устройства СВЧ и антенны. Проектирование фазированных антенных решеток / Под ред. Д.И. Воскресенского. — М.: Радиотехника, 2012. — 744 с.
4. Устройства СВЧ и антенны / Д.И. Воскресенский, В.Л. Гостюхин, В.М. Максимов, Л.И. Пономарев; под ред. Д.И. Воскресенского. — М.: Радиотехника, 2005. — 450 с.
5. Коротковолновые антенны / Г.З. Айзенберг [и др.]; под ред. Айзенберга Г.З. — М.: Радио и связь, 1985. — 536 с.
6. Бова Н.Т. Антенны и устройства СВЧ / Н.Т. Бова, Г.Б. Резников. — К.: Вища школа, 1982. — 278 с.

Приложение А**ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ ТИТУЛЬНОГО ЛИСТА ОТЧЕТА
ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ**

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»
Институт радиоэлектроники и информационной безопасности

Кафедра «Радиоэлектроника и телекоммуникации»

ОТЧЕТ ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ
«ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЛИНИЙ ПЕРЕДАЧИ»
по дисциплине «Антенные системы»

Выполнил студент _____
фамилия и инициалы

Группа _____

Отчет защищён с оценкой _____

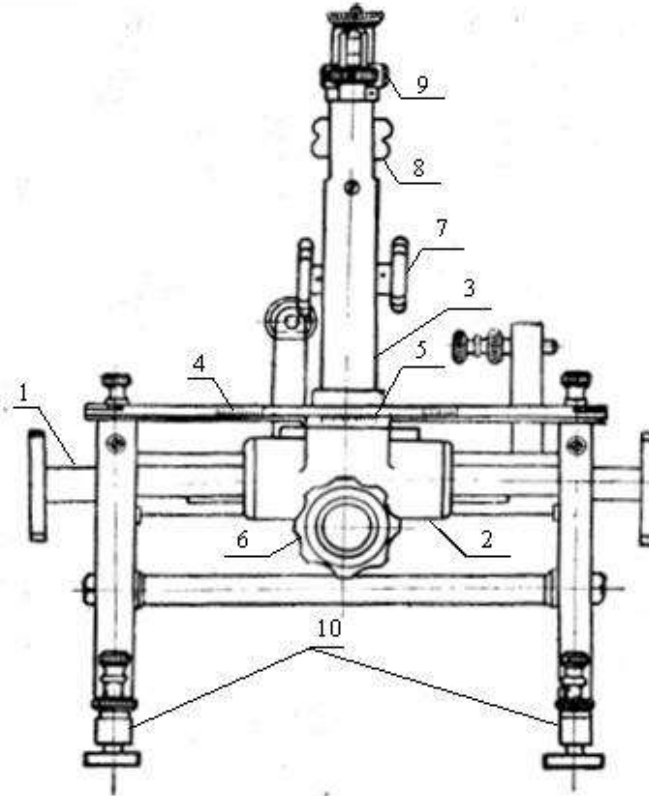
Преподаватель _____

Севастополь
2021

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

ОПИСАНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ВОЛНОВОДНОЙ ЛИНИИ Р1-4

Измерительная линия (рис. Б.1) используется при настройке и испытаниях радиотехнической аппаратуры сантиметрового диапазона воли.



- 1 — волновод; 2 — каретка; 3 — измерительная головка; 4 — линейка;
 5 — нониус; 6 — ручка верньера; 7 — рукоятка для перемещения контактного поршня;
 8 — выступы для перемещения емкостного поршня;
 9 — гайка регулировочная; 10 — стойки

Рис. Б.1 — Общий вид измерительной линии Р1-4

Основой измерительной линии является отрезок волновода (1), имеющий продольную узкую щель посередине широкой стенки. Через щель во внутреннюю полость волновода проходит тонкий металлический зонд, укрепленный на каретке (2), которая перемещается вдоль линии. Зонд связан с настраиваемой измерительной головкой (3). Наведенная в зонде электро-движущая сила, пропорциональная напряженности электрического поля в месте расположения зонда, после выпрямления детектором через выходной разъем (7) подводится к индикатору.

Измерительная головка перемещается вдоль линии по направляющим цилиндрическим стержням с помощью каретки. Отсчет положения зонда производится по линейке (4), укрепленной на боковых стойках. Для точного отсчета долей миллиметра служит вспомогательная шкала нониуса (5), закрепленного на каретке. Она позволяет производить отсчет с точностью 0,05 деления основной шкалы линейки.

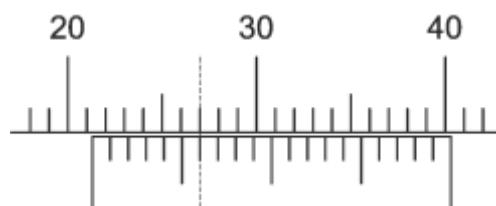


Рис. Б.2 — Шкала для измерения положения зонда

Показания отсчитывают по совмещению штрихов основной и нониусной шкал. При совпадении нулевого штриха шкалы нониуса со штрихом основной шкалы результат измерения считывают по соответствующей отметке основной шкалы. При сдвиге нулевого штриха шкалы нониуса относительно штриха основной шкалы к отсчету по основной шкале прибавляется дробная часть интервала этой шкалы, соответствующая цене деления нониуса (0,05 мм), умноженной на порядковый номер штриха нониусной шкалы, совпадающего со штрихом основной шкалы. Для примера, показанного на рис. Б.2, отсчет равен 21,30 мм (через совпадающие штрихи проведена штриховая линия).

ПРИЛОЖЕНИЕ В

ПРИМЕР РАСЧЕТА РАСПРЕДЕЛЕНИЙ АМПЛИТУДЫ НАПРЯЖЕНИЯ И ТОКА В ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ, НАГРУЖЕННОЙ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ НАГРУЗКИ

Расчет режима работы линии передачи на частоте f_1 начинаем с определения $|\Gamma_H|$ и Ψ_H .

Исходные данные: длина линии передачи $l = 35$ мм, волновое сопротивление линии передачи $\rho = 443$ Ом, $Z_H = j230$ Ом, частота $f_1 = 10$ ГГц ($\lambda = 30$ мм).

Подставляя исходные данные в формулу (1.7), запишем

$$\Gamma_H = \frac{j230 - 443}{j230 + 443}, \quad (\text{В.1})$$

Следовательно

$$|\Gamma_H| = \frac{|j230 - 443|}{|j230 + 443|} = 1.$$

Поскольку нагрузка чисто реактивная, модуль коэффициента отражения в нагрузке равен единице. Подставляя это значение в формулу (1.14), определяем КСВ в линии передачи

$$K_{\text{СТУ}} = \frac{1+1}{1-1} = \infty.$$

По формулам (1.13) определяем нормированную амплитуду напряжения в пучностях и узлах напряжения:

$$U_{\text{max}}^{\text{норм}} = \frac{U_{\text{max}}}{U_{\text{пад}}} = 1 + |\Gamma_H| = 2;$$

$$U_{\text{min}}^{\text{норм}} = \frac{U_{\text{min}}}{U_{\text{пад}}} = 1 - |\Gamma_H| = 0.$$

По формуле (1.9) определим фазу коэффициента отражения в нагрузке. Так как $R_H < \rho$, $X_H > 0$, то

$$\Psi_H = \pi - \arctg\left(\frac{X_H}{R_H - \rho}\right) - \arctg\left(\frac{X_H}{R_H + \rho}\right).$$

$$\Psi_H = 2,663 - 0,479 = 2,184 \text{ рад.}$$

Для определения координат пучностей и узлов напряжения необходимо определить координаты сечений линии передачи, в которых падающая и отраженная волны складываются в фазе (это будут пучности напряжения) или в противофазе (это будут узлы напряжения).

Вначале определяем координату местоположения первого максимума напряжения. Используя формулу (1.11), находим

$$x_{max1} = \frac{2,184 \cdot 30}{4 \cdot 3,142} = 5,22 \text{ мм.}$$

Поскольку узлы напряжения смещены относительно пучностей на $\lambda/4$ (1.12), то при $\lambda = 30$ мм первый минимум напряжения будет расположен в сечении линии с координатой

$$x_{min1} = 5,22 + \frac{30}{4} = 12,72 \text{ мм.}$$

Пользуясь формулой (1.6), определяем нормированную амплитуду напряжения в нагрузке $|U^{\text{норм}}(0)|$ и на входе линии передачи $|U^{\text{норм}}(l)|$

$$|U^{\text{норм}}(0)| = \frac{|U(0)|}{U_{\text{пад}}} = 0,922;$$

$$|U^{\text{норм}}(l)| = \frac{|U(l)|}{U_{\text{пад}}} = 1,998.$$

Графиков распределения амплитуды напряжения и тока строятся по формулам (1.6) в нормированном виде (рис. В.2):

$$|U^{\text{норм}}(x)| = \frac{|U(x)|}{U_{\text{пад}}}; \quad |I^{\text{норм}}(x)| = \frac{|I(x)|}{I_{\text{пад}}}.$$

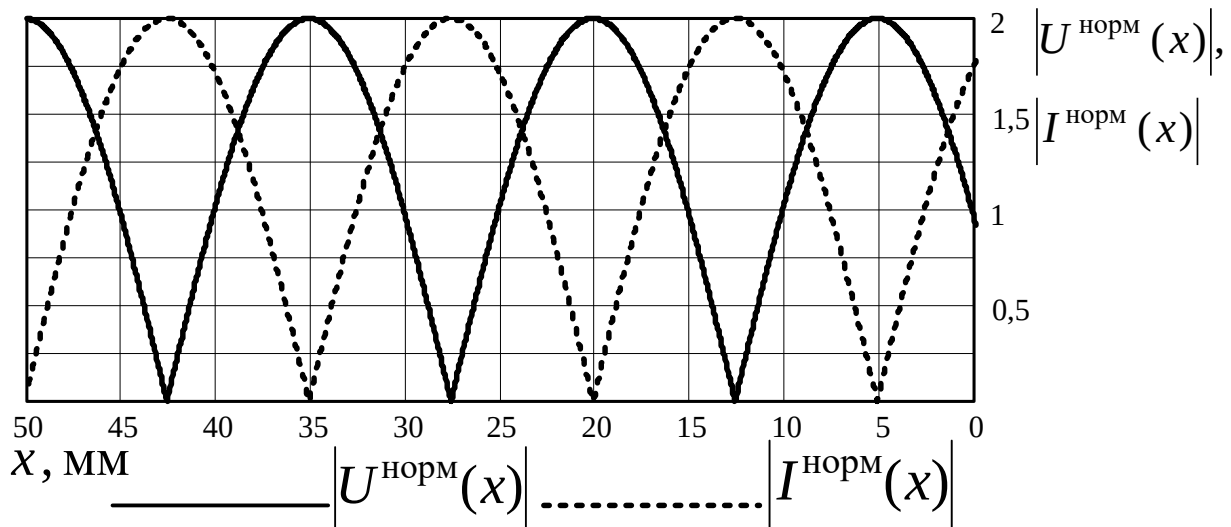


Рис. В.2 — Распределение нормированных амплитуд тока и напряжения вдоль линии передачи

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

ПРИМЕР РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ СОГЛАСУЮЩИХ УСТРОЙСТВ
В САПР *MATHCAD*

$$\rho := 50 \quad f := 2 \cdot 10^9 \quad R_n := 200 \quad X_n := 200 \quad \epsilon_r := 3.38$$

$$Z_n := R_n + i \cdot X_n \quad \lambda := \frac{3 \cdot 10^8}{f \cdot \sqrt{\epsilon_r}} = 0.082$$

$$G := \frac{Z_n - \rho}{Z_n + \rho} = 0.756 + 0.195i \quad \Psi := \arg(G) = 0.253$$

$$Z(x) := \rho \cdot \frac{Z_n + i \cdot \rho \cdot \tan\left(2 \cdot \frac{\pi}{\lambda} \cdot x\right)}{\rho + i \cdot Z_n \cdot \tan\left(2 \cdot \frac{\pi}{\lambda} \cdot x\right)}$$

$$X_{\max} := \frac{\Psi}{4 \cdot \pi} \cdot \lambda = 1.64 \times 10^{-3} \quad Z(X_{\max}) = 406.348$$

$$X_{\min 1} := X_{\max} - \frac{\lambda}{4} = -0.019 \quad Z(X_{\min 1}) = 6.152$$

$$X_{\min 2} := X_{\max} + \frac{\lambda}{4} = 0.022 \quad Z(X_{\min 2}) = 6.152$$

В качестве точки подключения трансформатора выбираем точку положительного экстремума, ближайшую к нагрузке.

В данном случае - это $X_{\max} = 1.6$ мм.

Рассчитаем волновое сопротивление четвертьволнового трансформатора

Так как точка подключения трансформатора соответствует $X_{\max}$, то сопротивление нагрузки для трансформатора в этой точке

$$R_{nT} := Z(X_{\max})$$

Волновое сопротивление четвертьволнового трансформатора:

$$\rho_T := \sqrt{\rho \cdot R_{nT}} = 142.539$$

АНТЕННЫЕ СИСТЕМЫ

Часть 1

*Учебно-методическое пособие
по выполнению лабораторного практикума*

*Составители : Головин Владислав Викторович,
Тыщук Юрий Николаевич, Громоздин Валентин Владимирович*

В авторской редакции

Изд. № 46/2021. Объем 3,75 п.л.
РИИЦМ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»