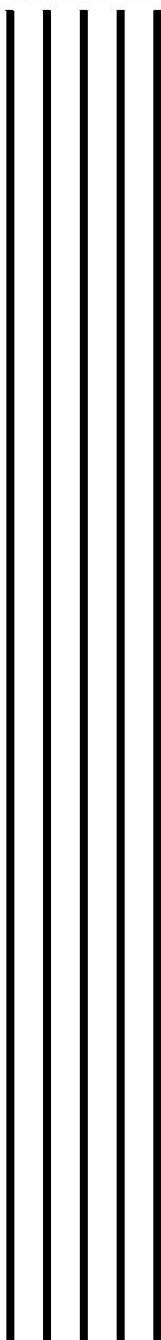


Министерство образования и науки, молодежи и спорта Украины
Севастопольский национальный технический университет
Кафедра радиотехники и телекоммуникаций



ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

по дисциплине

«УСТРОЙСТВА СВЧ И АНТЕННЫ»

Методические указания

для студентов направления 6.050901 — «Радиотехника»

дневной и заочной форм обучения

Севастополь

2013

УДК 621.396.62(75)

Лабораторный практикум по дисциплине «Устройства СВЧ и антенны»: методические указания для студентов направления 6.050901 — «Радиотехника» дневной и заочной форм обучения / СевНТУ; сост. В. В. Головин, А. В. Лукьянчиков, Ю.Н. Тыщук. — Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2013. — 76 с.

Целью методических указаний является оказание помощи студентам дневной и заочной форм обучения в подготовке и выполнении лабораторного практикума по дисциплине «Устройства СВЧ и антенны», а также в получении ими теоретических знаний и приобретении практических навыков исследования линий передачи СВЧ и устройств на их основе.

Методические указания рассмотрены и утверждены на заседании кафедры радиотехники и телекоммуникаций, протокол № 11 от «18» июня 2012 г.

Допущено учебно-методическим центром СевНТУ в качестве методических указаний.

Рецензент:

канд. техн. наук, доцент

Слезкин В.Г.

Ответственный за выпуск:

заведующий кафедрой радиотехники и телекоммуникаций

д-р техн. наук, профессор

Гимпилевич Ю.Б.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
1. Лабораторная работа №1. Исследование режимов работы линии передачи.....	6
2. Лабораторная работа № 2. Исследование входного сопротивления линии передачи.....	20
3. Лабораторная работа №3. Исследование элементов волноводного тракта.....	32
4. Лабораторная работа № 4. Исследование симметричного вибратора...	43
Библиографический список.....	54
Приложение А. Описание измерительной волноводной линии Р1-4.....	55
Приложение Б. Пример расчета распределений амплитуды напряжения и тока в линии передачи, нагруженной на сопротивление нагрузки.....	57
Приложение В. Пример написания программы для построения калибровочной кривой в MathCad.....	60
Приложение Г. Описание панорамного измерителя Р2-61.....	64
Приложение Д. Пример расчета матрицы рассеяния многополюсников...	65
Приложение Е. Принципы действия ферритовых устройств СВЧ.....	69
Приложение Ж. Образец оформления титульного листа отчета по лабораторной работе.....	74

ВВЕДЕНИЕ

Каждая лабораторная работа выполняется бригадой 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 отсчетами независимой переменной величины (частоты, напряжения и т.п.), пределы ее изменения, а также число отсчетов, 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 отчеты.

Защита отчета по выполненной лабораторной работе производится каждым студентом индивидуально на очередном лабораторном занятии. В процессе защиты проверяются: правильность оформления отчета, знание студентами методики проведения экспериментов и умение анализировать характер полученных зависимостей и обосновывать выводы к работе. Студенты, не защитившие отчет по текущей работе, к выполнению следующей работы не допускаются.

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

Отчет должен содержать:

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

Образец оформления титульного листа приведен в Приложении Е.

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 вместо результатов экспериментов 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 и согласованную нагрузку 6 (рис. 1.1).

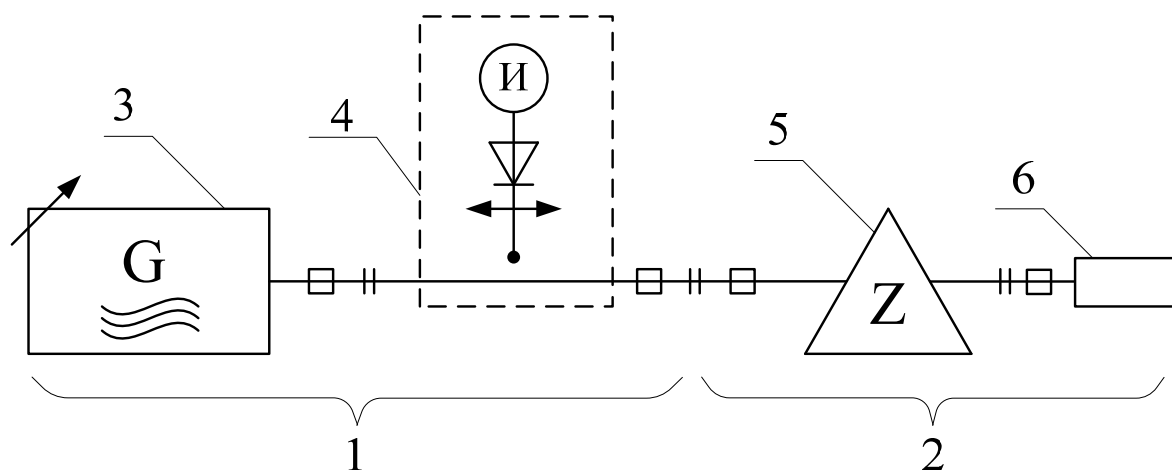


Рис. 1.1 — Функциональная схема измерительной установки

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 А.

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, $P_{ВХ}$ (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
$P_{ВХ}$, 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 Р1-4, 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 эквивалентной двухпроводной линии равно [2]

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

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

$$\rho = \rho_B.$$

Пусть двухпроводная линия длиной l , к входу которой подключен генератор, нагружена на сопротивление $Z_H = R_H + jX_H$. Поместим начало отсчета координаты x в сечение нагрузки (рис. 1.2).

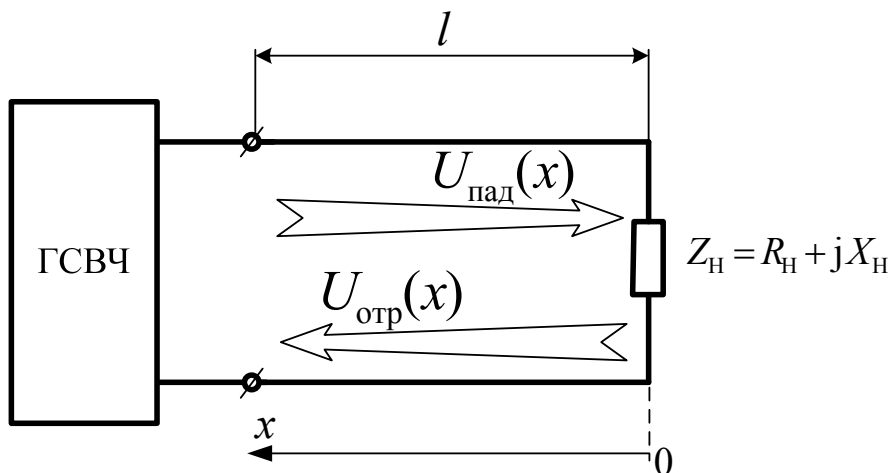


Рис. 1.2 — Модель двухпроводной линии, нагруженной на сопротивление Z_H

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:

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

$$\Psi_H = \arctg\left(\frac{X_H}{R_H - \rho}\right) - \arctg\left(\frac{X_H}{R_H + \rho}\right). \quad (1.9)$$

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

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

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

$$\Psi_H - 2kx_{\text{min}} = \pm\pi + 2\pi n, \quad (1.11)$$

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)

$$x_{\text{max1}} = \frac{\Psi_H}{4\pi} \lambda. \quad (1.12)$$

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

$$\begin{cases} x_{\text{min1}} = \frac{\Psi_H}{4\pi} \lambda + \lambda/4 = x_{\text{max1}} + \lambda/4, \text{ если } x_{\text{max1}} \in [0; \lambda/4); \\ x_{\text{min1}} = \frac{\Psi_H}{4\pi} \lambda - \lambda/4 = x_{\text{max1}} - \lambda/4, \text{ если } x_{\text{max1}} \in [\lambda/4; \lambda/2). \end{cases}$$

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

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

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 имеют вид отрезков синусоид, смещенных относительно друг друга на $\lambda/4$ (рис. 1.3 а).

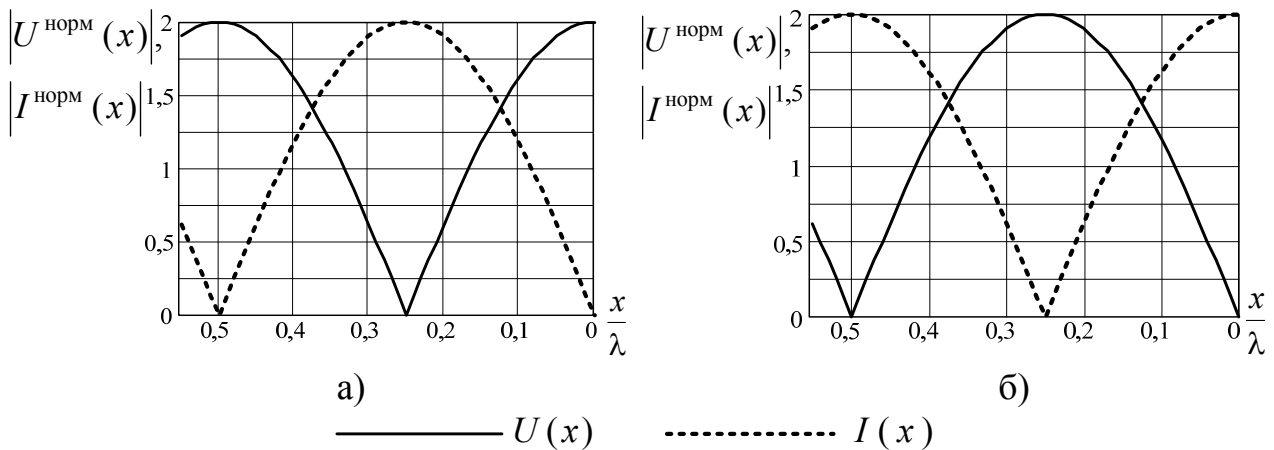


Рис. 1.3 — Распределения нормированных амплитуд напряжения и тока вдоль линии передачи при $Z_H \rightarrow \infty$ (а) и $Z_H = 0$ (б)

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 устанавливается пучность напряжения и узел тока.

Рассмотрим случай короткозамкнутой линии, когда $Z_H = 0$ (при этом $|\Gamma_H| = -1$ и $K_{CTU} \rightarrow \infty$). 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.

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 Б. Из рис. Б.2 видно, что распределения отличаются от представленных ранее 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 на интервале $x \in (0, \lambda/4)$ будут наблюдаться наоборот, пучность тока и узел напряжения.

Во всех рассмотренных 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).

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), если $R_H < \rho$;
- пучность (максимум), если $R_H > \rho$.

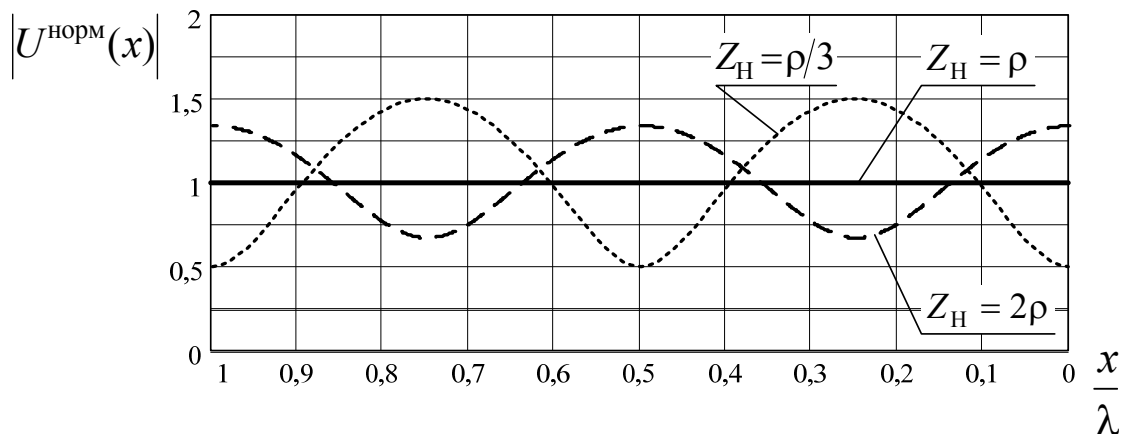


Рис. 1.4 — Распределения амплитуд напряжений в линии передачи при активной нагрузке

Таким образом, при $Z_H = \rho$ распределения напряжения и токов будут равномерными из-за отсутствия отраженной волны. Такой режим принято называть режимом «бегущих волн». При $Z_H = R_H \neq \rho$ распределения будут иметь вид цепной линии. Так как амплитуда отраженной волны меньше амплитуды падающей волны, данный режим называют режимом «смешанных волн».

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

$$P_{ВХ} = \frac{U_{\text{пад}}^2}{2\rho}.$$

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

$$\eta = 1 - \Gamma_0^2 = \frac{4K_{СТU}}{(1 + K_{СТU})^2}. \quad (1.15)$$

Мощность P_H , поступающая в нагрузку, определяется выражением

$$P_H = P_{ВХ} (1 - \Gamma_0^2). \quad (1.16)$$

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 $K_{СТU}^{\text{доп}} = 2$, 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) и (1.8), а также величину КСВ по формуле (1.14);
- б) максимальные и минимальные значения амплитуд напряжения и тока по формулам (1.13);
- в) местоположения первого минимума и первого максимума амплитуд напряжения и тока по формулам (1.11), (1.12);
- г) коэффициент полезного действия по формуле (1.15);

- д) построить графики распределения амплитуд напряжения и тока вдоль линии передачи с заданными параметрами с помощью формул (1.6); пример выполнения задания рассмотрен в Приложении Б.

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;
- 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» подбирать подходящую чувствительность прибора.

1.5.2.2. 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 минимума в распределении напряжения, ближайшего к выходу линии;
- произвести с помощью линейки и нониуса измерительной линии отсчет координаты этого минимума x_{min1} (рис. 1.5), которая принимается за начало отсчета;
- перемещая зонд в сторону генератора, определить координату x_{min2} второго узла напряжения (см. рис. 1.5);
- определить координату x_{max} пучности напряжения (см. рис. 1.5) как среднее арифметическое между x_{min1} и x_{min2} ;
- на интервале от x_{min1} до x_{max} снять зависимость показаний индикатора α_i от местоположения зонда x_i в 5...10 точках (см. рис. 1.5).

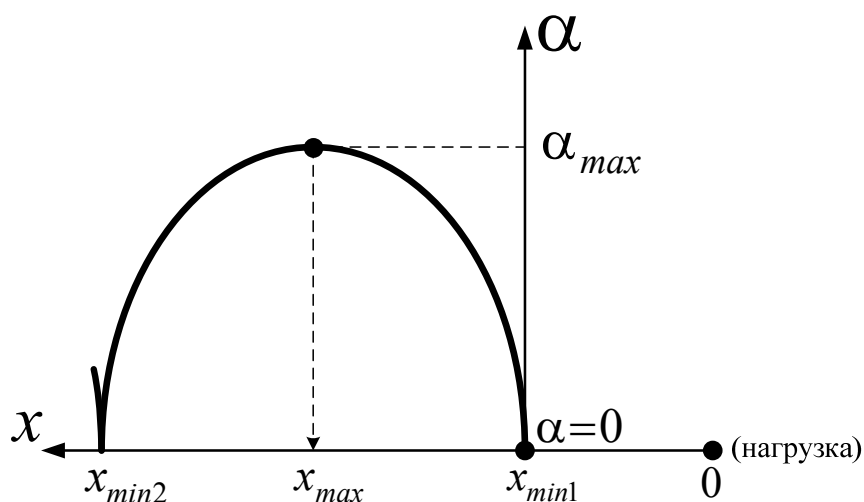


Рис. 1.5 — К пояснению действий при калибровке измерительной линии Р1-4

1.5.2.3. Снять распределения напряженности электрического поля в линии передачи для нагрузок $Z_{Н1}$ и $Z_{Н2}$, выполнив для каждой из нагрузок следующие действия:

- подключить нагрузку $Z_{Н}$ 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 снятии калибровочной кривой;
- перемещая каретку вдоль линии в сторону генератора, найти положение точки первого экстремума поля (максимума или минимума);
- записать 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 показание индикатора α'_{min} (или α'_{max}) и соответствующую ему координату x_{min} (или x_{max}).

1.5.2.4. Оформить результаты измерений по п. 1.5.2.2. — 1.5.2.3. в виде таблицы 1.3.

Таблица 1.3 — Пример оформления результатов снятия калибровочной кривой детектора измерительной линии Р1-4

α	0	20	40	50	60	70	80	90	100	0
x , см	3	2,59	2,45	2,33	2,26	2,2	2,12	2,06	2,0	1,0
	x_{min1}								x_{max}	x_{min2}

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

1.5.3. Обработка результатов измерений

По результатам измерений, 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 измеренных положений зонда x рассчитать соответствующие им **нормированные** значения напряженности электрического поля e по формуле

$$e = \sin\left(2\pi \frac{x_{min1} - x}{\Lambda}\right).$$

1.5.3.3. Построить зависимость e от α с применением программы «Lab_1.mcd», описание которой приведено в Приложении В.

Полученная с применением программы Lab_1.mcd зависимость $Kalibr(\alpha_{ish})$ представляет собой калибровочную кривую детектора измерительной линии (рис. 1.6).

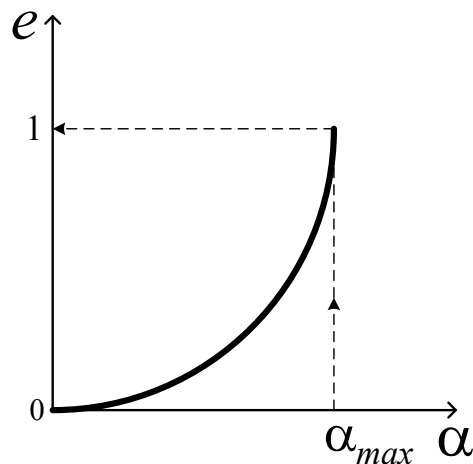


Рис. 1.6 — Пример калибровочной кривой детектора

1.5.3.4. Для каждой из исследованных нагрузок (Z_{H1} и Z_{H2}) определить величину коэффициента стоячей волны, выполнив следующие действия:

— используя калибровочную кривую детектора $Kalibr(\alpha_{ish})$, построенную с применением программы Lab_1.mcd, по отсчетам в максимуме и минимуме, α'_{max} и α'_{min} , определить соответствующие им значения e'_{max} и e'_{min} ;

— рассчитать КСВ по формуле

$$K_{CTU} = \frac{e'_{max}}{e'_{min}}.$$

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

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

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

— в том случае, если в распределении поля первым экстремумом после точки x_{min1} является минимум, то использовать соотношение

$$\Psi_H - 2kx'_{min} = \pi ;$$

— в том случае, если в распределении поля первым экстремумом после точки x_{min1} является максимум, то использовать соотношение

$$\Psi_H - 2kx'_{max} = 0 .$$

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

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

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

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

для ρ_B использовать формулу (1.1).

1.5.3.9. По результатам измерений, выполненных на частоте f_2 , повторить расчеты согласно п. 1.5.3.1 — 1.5.3.8.

1.5.3.10. Для рассчитанных на частоте f_1 значений Z_{H1} и Z_{H2} построить на одном графике нормированные распределения $|U^{\text{норм}}(x)|$ по формуле (1.6). На

построенные графики нанести нормированные значения $\frac{e'_{max}}{e'_{\text{средн}}}$ и $\frac{e'_{min}}{e'_{\text{средн}}}$,

полученные для соответствующих им координат x_{max} и x_{min} . Значение нормировочного множителя определяется по формуле

$$e'_{\text{средн}} = \frac{e'_{max} + e'_{min}}{2} .$$

1.5.3.11. Для рассчитанных на частоте f_2 значений Z_{H1} и Z_{H2} на одном графике построить нормированные распределения $|U^{\text{норм}}(x)|$ по формуле (1.6).

На построенные графики нанести нормированные значения $\frac{e'_{max}}{e'_{\text{средн}}}$ и $\frac{e'_{min}}{e'_{\text{средн}}}$,

полученные для соответствующих им координат x_{max} и x_{min} .

1.6. Контрольные вопросы

1.6.1. Вопросы для допуска к лабораторной работе

- а) Опишите условия возникновения и особенности «режима стоячей волны» в линии передачи.
- б) Опишите условия возникновения и особенности «режима бегущей волны» в линии передачи.
- в) Опишите условия возникновения и особенности «режима смешанных волн» в линии передачи.
- г) Опишите порядок настройки генераторов Г4-108 и Г4-109 на заданную частоту.
- д) Изложите порядок построения калибровочной кривой для детектора измерительной линии Р1-4.
- е) Изложите порядок определения коэффициента стоячей волны с помощью измерительной линии Р1-4.
- ж) Как определить длину волны в волноводе с помощью измерительной линии Р1-4?
- з) Опишите особенности распределения напряжения в короткозамкнутой линии передачи.
- и) Опишите особенности распределения напряжения в разомкнутой линии передачи.
- к) Что такое «узел» и «пучность» напряжения?
- л) Как в линии передачи располагаются относительно друг друга «узлы» и «пучности» напряжения?
- м) Как в линии передачи располагаются относительно друг друга «узлы» тока и напряжения?

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 ВХОДНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ

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 и согласованную нагрузку 6 (рис. 2.1).

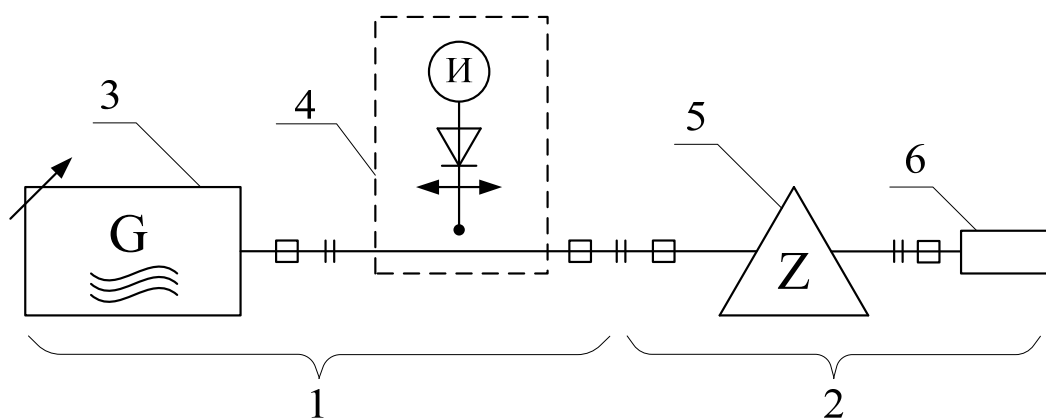


Рис. 2.1 — Функциональная схема измерительной установки

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 А.

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
	f_3	8,98	8,95	8,85	8,97	8,65	8,55	8,45	8,35	8,25	8,15
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
	f_3	8,5	8,4	8,7	8,6	8,8	8,9	8,3	8,2	8,1	8,05
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
	f_3	10,5	10,6	10,7	10,8	10,9	11	11,2	11,3	11,4	11,5

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

$$\rho = \rho_B.$$

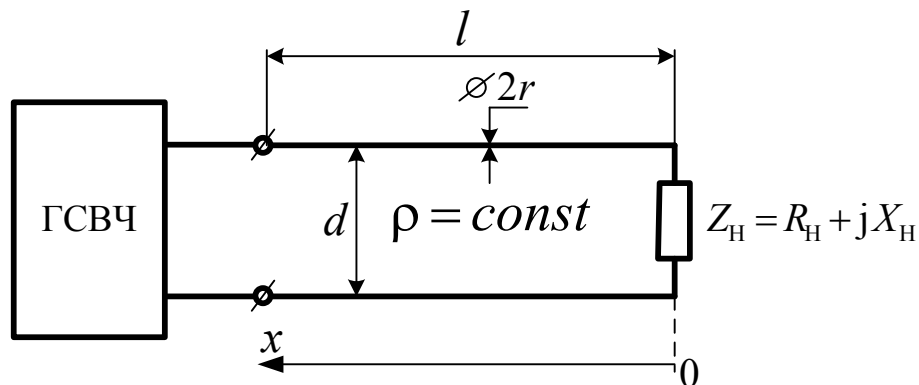


Рис. 2.2 — Модель двухпроводной линии, нагруженной на сопротивление Z_H

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:

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

$$\Psi_H = \arctg\left(\frac{X_H}{R_H - \rho}\right) - \arctg\left(\frac{X_H}{R_H + \rho}\right). \quad (2.3)$$

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 $Z(x)$ 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

$$\Psi_H - 2kx_{\min} = \pm\pi + 2\pi n, \quad (2.7)$$

где $n=0, 1, 2, \dots$

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

$$x_{\max 1} = \frac{\Psi_H}{4\pi} \lambda. \quad (2.8)$$

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

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

Для произвольной нагрузки в зависимости от исходных данных распределение сопротивления вдоль линии передачи можно построить по формулам (2.2), (2.3), (2.5), (2.6) — (2.8). Рассмотрим эти распределения для различных случаев.

Для линии, 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, практически 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

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

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

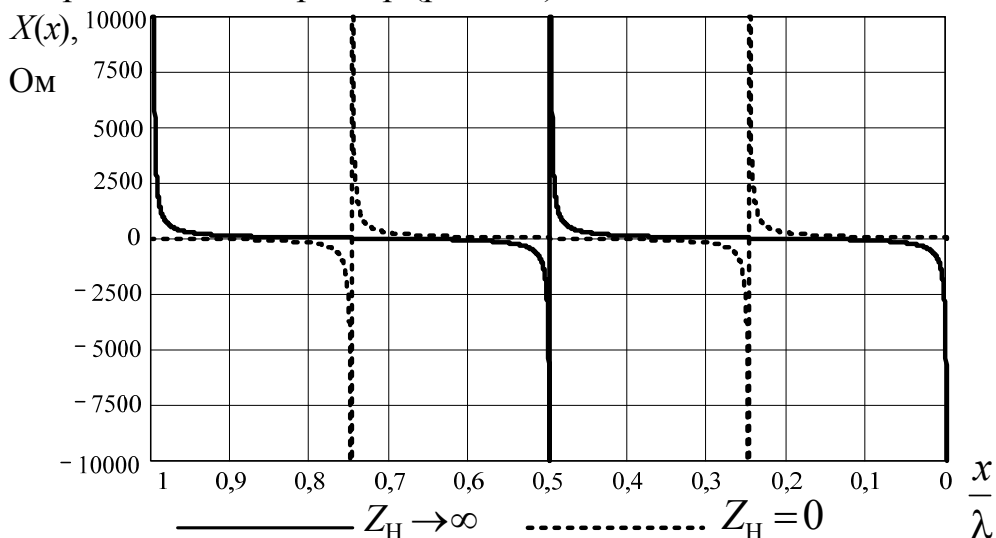


Рис. 2.3 — Распределение входного сопротивления вдоль линии передачи в режимах холостого хода и короткого замыкания

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

Рассмотрим случай чисто активной нагрузки $Z_{\text{Н}} = R_{\text{Н}}$. Для определенности зададимся величиной $\rho = 50$ Ом и тремя значениями сопротивления нагрузки: $Z_{\text{Н1}} = \rho/10$, $Z_{\text{Н2}} = \rho$ и $Z_{\text{Н3}} = 10\rho$ (рис. 2.4).

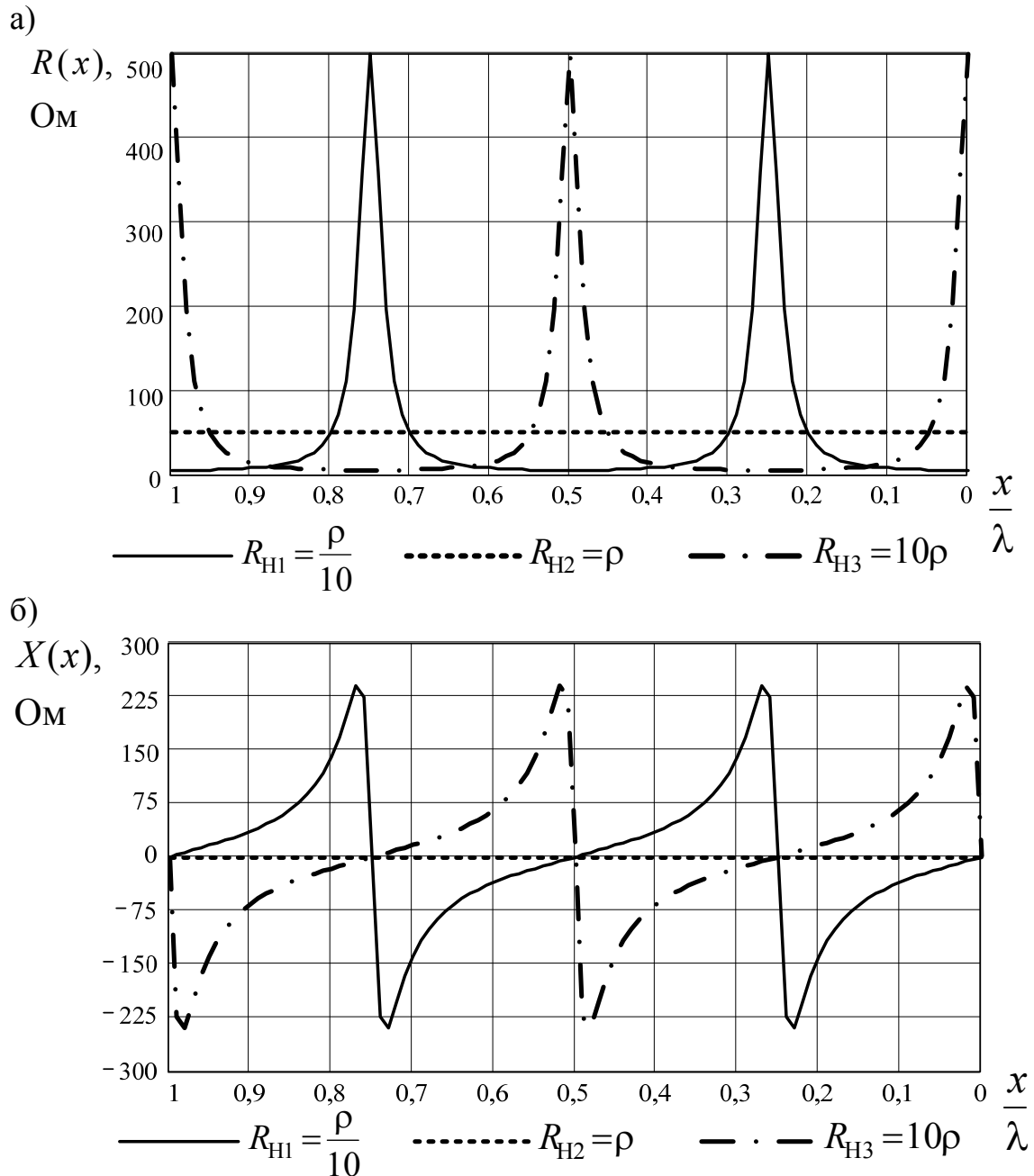


Рис. 2.4 — Распределения активной (а) и реактивной (б) составляющих сопротивления $Z(x)$ вдоль линии передачи при чисто активных нагрузках

Из рис. 2.4 видно следующее:

— при $Z_{\text{Н}} = R_{\text{Н}} = \rho$ 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».

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 трех частот f_1, f_2, f_3 требуется выполнить следующее:

- рассчитать модуль и фазу коэффициента отражения в нагрузке по формулам (2.2), (2.3), а также величину КСВ по формуле (1.14);
- определить местоположение первого минимума и первого максимума ($x_{\max}$ и $x_{\min}$) активного сопротивления по формулам (2.6) — (2.8);
- рассчитать входное сопротивление линии передачи по формуле (2.5);
- построить графики зависимостей активной и реактивной составляющих входного сопротивления линии передачи в диапазоне частот $f_1 \dots f_3$;
- построить на одном графике распределения вдоль линии передачи активной составляющей $Z(x)$ на частотах f_1, f_2, f_3 ;
- построить на одном графике распределения вдоль линии передачи реактивной составляющей $Z(x)$ на частотах f_1, f_2, f_3 .

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»

подбирать чувствительность прибора.

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 минимума в распределении напряжения, ближайшего к выходу линии;
- произвести с помощью линейки и нониуса измерительной линии отсчет координаты этого положения x_{min1} (рис. 2.5);

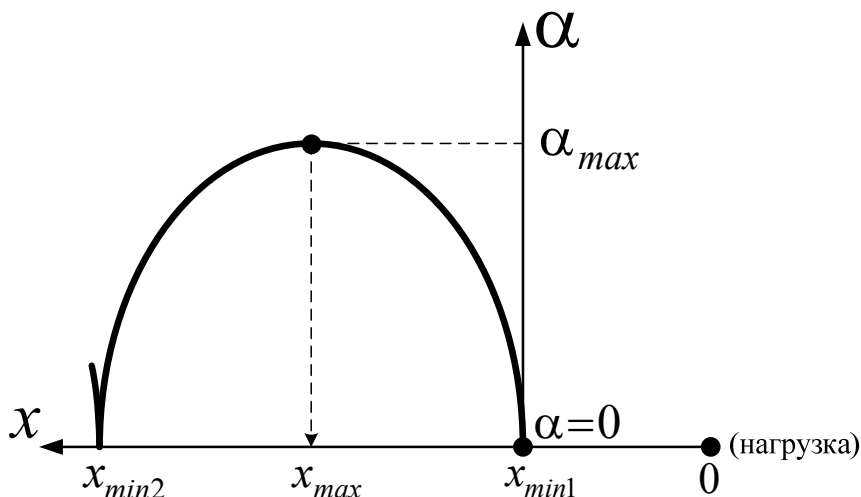


Рис. 2.5 — К пояснению действий при калибровке детектора измерительной линии Р1-4

- перемещая зонд в сторону генератора, определить координату x_{min1} второго узла напряжения (см. рис. 2.6);
- определить координату x_{max} пучности напряжения (см. рис. 2.5) как среднее арифметическое между x_{min1} и x_{min2} .
- на интервале от x_{min1} до x_{max} снять зависимость показаний индикатора α от местоположения зонда x в (5...10) точках (см. рис. 2.5).

2.5.2.3. Снять распределения напряженности электрического поля в линии передачи для нагрузок Z_{H1} , Z_{H2} и Z_{H3} , 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 калибровочной кривой;
- перемещая каретку вдоль линии в сторону генератора, найти положение точки первого экстремума поля (максимума или минимума);
- записать 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 показание индикатора α'_{min} (или α'_{max}) и соответствующую ему координату x_{min} (или x_{max}).

2.5.2.4. Оформить результаты измерений по п. 2.5.2.2 — 2.5.2.3 в виде таблиц.

2.5.2.5. Настроить генератор на частоту f_2 и повторить действия по пунктам 2.5.2.2 — 2.5.2.4.

2.5.2.6. Настроить генератор на частоту f_3 и повторить действия по пунктам 2.5.2.2 — 2.5.2.4.

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 измеренных положений зонда x рассчитать соответствующие им **нормированные** значения напряженности электрического поля e по формуле

$$e = \sin\left(2\pi \frac{x_{min1} - x}{\Lambda}\right).$$

2.5.3.3. Построить зависимость e от α с применением программы «Lab_1.mcd», описание которой приведено в Приложении В.

Полученная с применением программы Lab_1.mcd зависимость $Kalibr(\alpha_{ish})$ представляет собой калибровочную кривую детектора измерительной линии (рис. 2.7).

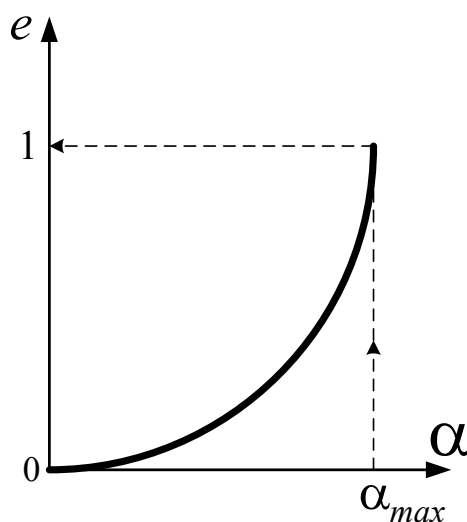


Рис. 2.7 — Пример калибровочной кривой детектора

2.5.3.4. Для каждой из исследованных нагрузок ($Z_{н1}$ и $Z_{н2}$) на частоте f_1 рассчитать коэффициент стоячей волны, выполнив следующие действия:

— используя калибровочную кривую детектора (рис. 2.7) по значениям α'_{max} и α'_{min} определить соответствующие им напряженности e'_{max} и e'_{min} ;

— рассчитать КСВ по формуле

$$K_{CTU} = \frac{e'_{max}}{e'_{min}}.$$

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

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

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

— в том случае, если в распределении поля первым экстремумом после точки x_{min0} является минимум, то Ψ_H определяется из соотношения

$$\Psi_H - 2kx'_{min} = \pi;$$

— в том случае, если в распределении поля первым экстремумом после точки x_{min0} является максимум, то Ψ_0 определяется из соотношения

$$\Psi_H - 2kx'_{max} = 0.$$

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

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

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

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

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

2.5.3.10. Для каждой из исследованных нагрузок на частотах f_2 и f_3 повторить расчеты по п. 2.5.3.1 — 2.5.3.9.

2.5.3.11. Для исследованных нагрузок Z_{H1} и Z_{H2} на одном графике построить зависимости активной и реактивной составляющих сопротивления нагрузки от частоты.

2.5.3.12. Для исследованных нагрузок Z_{H1} и Z_{H2} на одном графике построить зависимости активной и реактивной составляющих входного сопротивления линии передачи от частоты.

2.5.3.13. Для определенных на частоте f_1 сопротивлений нагрузки Z_{H1} и Z_{H2} построить по формуле (2.3) графики распределения активной и реактивной составляющих $Z(x)$.

2.6. Контрольные вопросы

2.6.1. Вопросы для допуска к лабораторной работе

а) Изложите порядок построения калибровочной кривой для детектора измерительной линии Р4-1.

б) Изложите порядок определения коэффициента стоячей волны с помощью измерительной линии Р4-1.

в) Как определить длину волны в волноводе с помощью измерительной линии Р4-1?

г) Опишите особенности распределения сопротивления в линии передачи в режиме «холостого хода».

д) Опишите особенности распределения сопротивления в линии передачи в режиме «короткого замыкания».

е) Опишите особенности распределения сопротивления в линии передачи при $Z_H > \rho$ и сравните его с распределением сопротивления при $Z_H = \rho$.

ж) Опишите особенности распределения сопротивления в линии передачи при $Z_H < \rho$ и сравните его с распределением сопротивления при $Z_H = \rho$.

2.6.2. Вопросы для подготовки к защите лабораторной работы

а) Покажите на примере, как будет выглядеть распределение сопротивления в линии передачи, нагруженной на активное сопротивление $R_H > \rho$.

б) Покажите на примере, как будет выглядеть распределение сопротивления в линии передачи, нагруженной на активное сопротивление $R_H < \rho$.

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 сопротивления в линии передачи, нагруженной на сопротивление $Z_H = \infty$.

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).

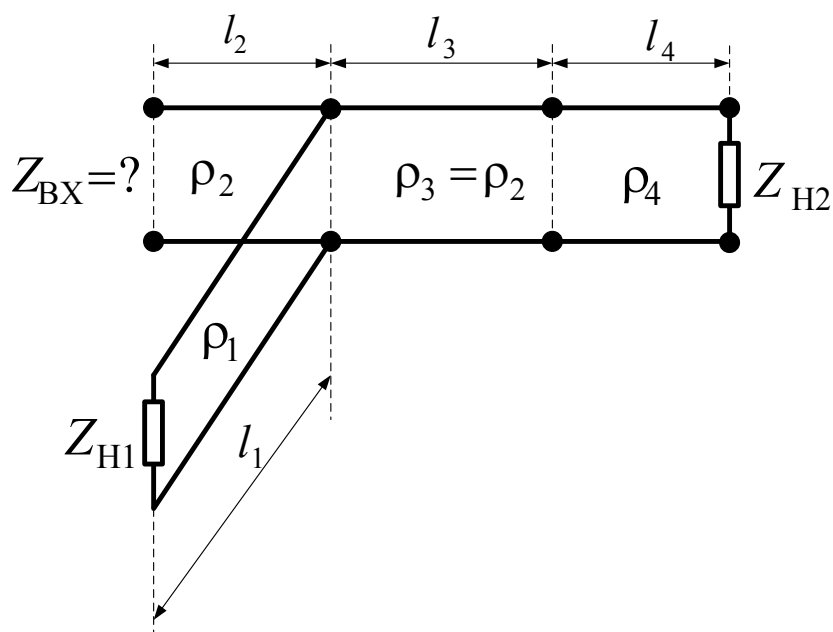


Рис. 2.8 — Модель линии передачи к расчетной задаче

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	ρ	ρ	—	$2\lambda/4$	$\lambda/8$	$2\lambda/8$	—	∞	2ρ
10	ρ	ρ	—	$\lambda/8$	$2\lambda/8$	$2\lambda/8$	—	∞	$\rho/2$
11	5ρ	5ρ	ρ	$3\lambda/8$	$3\lambda/8$	$2\lambda/8$	$\lambda/8$	0	∞
12	5ρ	5ρ	ρ	$2\lambda/8$	$2\lambda/8$	$\lambda/8$	$\lambda/8$	0	∞
13	6ρ	6ρ	ρ	$3\lambda/8$	$5\lambda/8$	$\lambda/8$	$2\lambda/8$	0	∞
14	4ρ	4ρ	ρ	$5\lambda/8$	$5\lambda/8$	$2\lambda/8$	$5\lambda/8$	0	∞
15	4ρ	4ρ	ρ	$5\lambda/8$	$3\lambda/8$	$2\lambda/8$	$3\lambda/8$	0	∞
16	2ρ	2ρ	ρ	$7\lambda/8$	$7\lambda/8$	$3\lambda/8$	$5\lambda/8$	0	∞
17	2ρ	2ρ	ρ	$3\lambda/8$	$2\lambda/8$	$\lambda/8$	$3\lambda/8$	0	∞
18	2ρ	2ρ	ρ	$5\lambda/8$	$7\lambda/8$	$\lambda/8$	$7\lambda/8$	0	∞
19	3ρ	3ρ	ρ	$2\lambda/8$	$2\lambda/8$	$2\lambda/8$	$3\lambda/8$	0	∞
20	4ρ	4ρ	ρ	$5\lambda/8$	$5\lambda/8$	$\lambda/8$	$\lambda/8$	0	∞

3. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ВОЛНОВОДНОГО ТРАКТА

3.1. Цель работы

Изучить принципы действия волноводных сверхвысокочастотных (СВЧ) узлов основных типов.

Приобрести навыки экспериментального исследования параметров волноводных СВЧ узлов при помощи панорамного измерителя коэффициента стоячей волны (КСВ) и ослаблений.

3.2. Описание лабораторного стенда

Измерительный стенд состоит из измерителя $K_{\text{СВ}}$ и исследуемого элемента. В комплект измерителя КСВ входят: генератор качающейся частоты (ГКЧ), индикатор и рефлектометр (рис. 3.1).

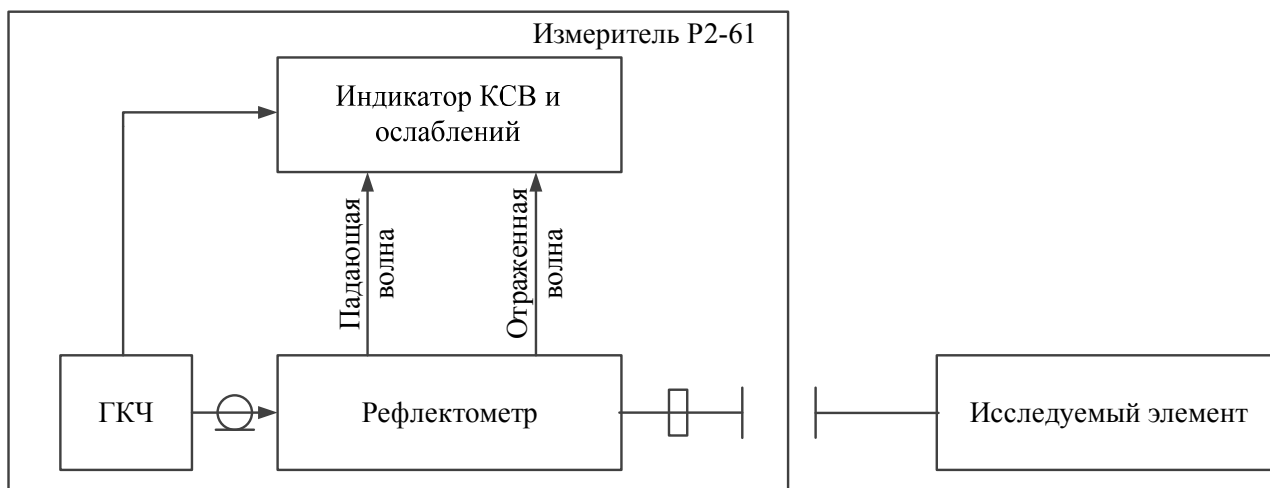


Рис. 3.1 — Структурная схема измерительного стенда

Панорамный измеритель Р2-61 позволяет выполнить измерения КСВ конечных нагрузок волноводного тракта, а также коэффициентов передачи многополюсников (Приложение Г).

3.3. Задание к лабораторной работе

В соответствии с индивидуальным заданием (табл. 3.1) необходимо выполнить расчеты и экспериментальные исследования для одного-двух элементов следующих типов:

- 1 — волноводный H -тройник;
- 2 — волноводный E -тройник;
- 3 — направленный ответвитель с равным делением мощностей;
- 4 — ферритовый вентиль на смещении поля № 1;
- 5 — ферритовый вентиль на смещении поля № 2;
- 6 — Y -циркулятор.

Таблица 3.1 — Исходные данные для выполнения теоретического и экспериментального исследований

M		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Номера элементов	теор.	1, 2	4	1, 3	3, 6	1, 6	4	1, 3	1, 6	4	1, 2
	экспер.	1	4, 5	1	3	1	4, 5	3	1	4, 5	1
N		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Диапазон частот, ГГц		8,0...8,4	8,4...8,8	8,8...9,2	9,2...9,6	9,6...10,0	10,0...10,4	10,4...10,8	10,8...11,2	11,2...11,6	11,6...12,0
Коэффициент отражения в нагрузке	Γ_{H1}	$0,2e^{-j0,1}$	0	$0,1e^{j0,2}$	$0,15e^{-j0,18}$	$0,11e^{-j0,5}$	0	$0,1e^{-j0,2}$	$0,2e^{-j0,1}$	0	$0,35e^{j0,4}$
	Γ_{H2}	$0,25e^{j0,15}$	$0,3e^{-j0,1}$	$0,18e^{-j0,2}$	$0,2e^{-j0,09}$	$0,13e^{j0,16}$	$0,15e^{-j0,15}$	$0,1e^{-j0,2}$	$0,2e^{-j0,3}$	$0,5e^{-j0,6}$	$0,15e^{-j0,1}$

3.4. Характеристики исследуемых элементов волноводного тракта

3.4.1. Матрица рассеяния СВЧ устройств

В инженерной практике реальную линию передач СВЧ заменяют эквивалентной двухпроводной линией, поэтому многополюстник всегда содержит четное число зажимов (полюсов) при N входах (рис. 3.2).



Рис. 3.2 — Эквивалентная схема $2N$ -полюсника

Характеристики многополюсника полностью описываются коэффициентами, связывающими падающие и отраженные волны на его входах в режиме согласования: $U_{\text{пад}i}$ и $U_{\text{отр}i}$ ($i=1,2,\dots,N$), соответственно. Эти коэффициенты принято записывать в виде матрицы, которую называют матрицей рассеяния S

$$S = \begin{vmatrix} S_{11} & S_{12} & \dots & S_{1n} \\ S_{21} & & & \\ \dots & & & \\ S_{n1} & S_{n2} & \dots & S_{nn} \end{vmatrix}.$$

Для примера рассмотрим шестиполюсник (устройство с тремя входами). Пусть источник включен в третье плечо, $U_{\text{пад}3} \neq 0$, а к остальным плечам подключены нагрузки Z_{H1} и Z_{H2} (рис. 3.3).

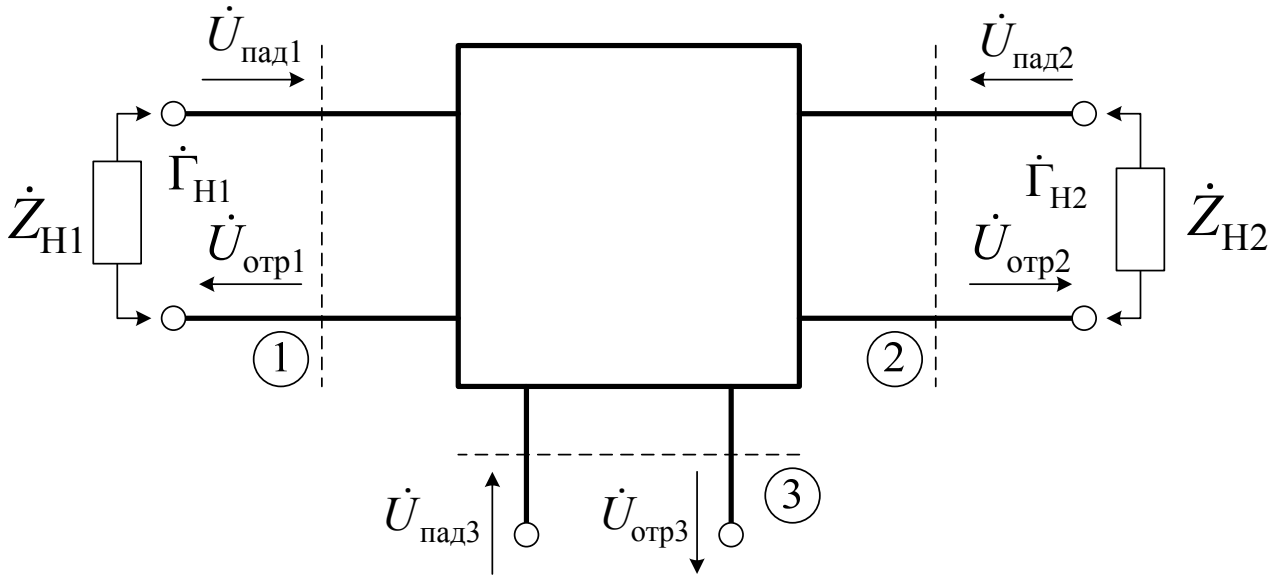


Рис. 3.3 — Модель шестиполюсника

Плоскости отсчета фазы в каждом плече выбираем произвольно. Для фиксированных положений этих плоскостей можем записать:

$$\begin{cases} \dot{U}_{отр1} = S_{11}\dot{U}_{пад1} + S_{12}\dot{U}_{пад2} + S_{13}\dot{U}_{пад3}; \\ \dot{U}_{отр2} = S_{21}\dot{U}_{пад1} + S_{22}\dot{U}_{пад2} + S_{23}\dot{U}_{пад3}; \\ \dot{U}_{отр3} = S_{31}\dot{U}_{пад1} + S_{32}\dot{U}_{пад2} + S_{33}\dot{U}_{пад3}, \end{cases} \quad (3.1)$$

Коэффициенты S_{ii} представляют собой коэффициенты отражения в i -ом плече, а S_{ij} — коэффициенты передачи из j -го плеча в i -ое плечо.

Систему (3.1) можно записать в матричном виде

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{отр1} \\ \dot{U}_{отр2} \\ \dot{U}_{отр3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \dot{U}_{пад1} \\ \dot{U}_{пад2} \\ \dot{U}_{пад3} \end{bmatrix}, \quad (3.2)$$

Величины элементов матрицы рассеяния полностью определяются устройством волноводного узла и не зависят от того, какие нагрузки и источники подключены к его входам.

На практике широко применяют как взаимные устройства (элементы матрицы рассеяния не зависят от направления передачи сигнала), так и невзаимные. К последним относятся вентили и циркуляторы, выполненные на основе ферритов.

Принципы действия ферритовых невзаимных устройств подробно рассмотрены в [6], их краткое описание приведено в Приложении Е. Для примера рассмотрим матрицу рассеяния $[S]$ трехплечевого циркулятора (рис. 3.4).

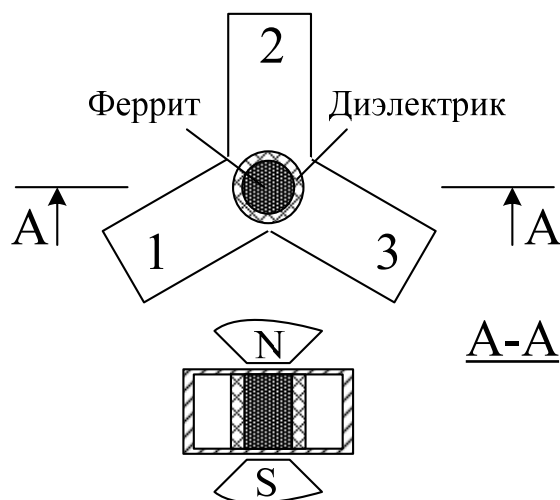


Рис. 3.4 — Схема конструкции трехплечего Y-циркулятора

$$S = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (3.3)$$

Приведенные в (3.3) значения соответствуют полному согласованию по входам и полной передаче энергии в нужных направлениях, то есть идеальным характеристикам. В реальных устройствах они не достигаются, поэтому на практике вводят следующие параметры:

- $L_{\text{пр}}$, дБ — прямое ослабление;
- $L_{\text{обр}}$, дБ — обратное ослабление.

Они связаны с элементами матрицы рассеяния следующими соотношениями:

$$S_{21} = S_{32} = S_{13} = 10^{\frac{-L_{\text{пр}}}{20}};$$

$$S_{12} = S_{23} = S_{31} = 10^{\frac{-L_{\text{обр}}}{20}}.$$

При выполнении теоретических расчетов можно использовать характеристики некоторых циркуляторов, приведенные в приложении Е, или из справочной литературы.

3.5. Порядок выполнения работы

3.5.1. Изучение измерительной установки

Ознакомиться с характеристиками и составом измерительной установки (приложение Г).

3.5.2. Теоретические исследования

Согласно варианту индивидуального задания необходимо выполнить следующее.

- а) Ознакомиться с принципом работы элемента волноводного тракта, выбранного согласно индивидуальному заданию. Изобразить модель элемента

волноводного тракта в виде многополюсника и пронумеровать его выходы.

б) Составить матрицу рассеяния $[S]$ элемента волноводного тракта.

в) Проанализировать режим работы многополюсника (см. табл. 3.1) для случая **произвольных нагрузок** с учетом заданных значений коэффициентов отражения в соответствующих плечах (основные параметры исследуемых вентилей и циркуляторов сведены в приложение Е (табл. Е.2 и Е.3). Составить матрицу $[S']$ коэффициентов передачи и отражения, аналогичную по структуре с матрицей $[S]$.

г) Описать результаты сравнения соответствующих значений элементов матриц $[S]$ и $[S']$.

Пример анализа режима работы многополюсника для случая **несогласованных нагрузок** представлен в приложении Д.

3.5.3. Экспериментальные исследования

3.5.3.1. Выполнить измерения частотной зависимости $K_{\text{СВ}}$ на входах заданных элементов волноводного тракта (табл. 3.1), в соответствии со следующей методикой.

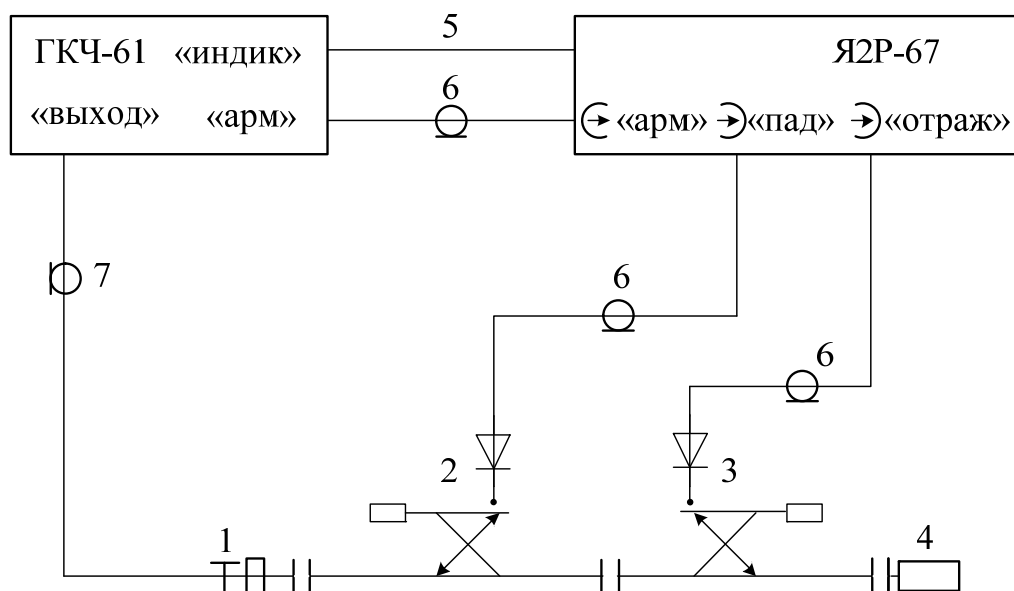
а) Установить исходное положение для каждого из органов управления на индикаторном приборе Я2Р-67:

- переключатель «Сеть» установить в нижнее положение (сеть отключена);
- переключатель «Пределы» — «0»;
- регулятор «Метка» — крайнее левое положение;
- кнопка «» — нажата;
- кнопки «Коррект.», «Лог.», «-10 dB» — отжаты.

б) Установить исходное положение для каждого из органов управления на генераторе качающейся частоты ГКЧ-61:

- переключатель «Сеть» установить в нижнее положение (сеть отключена);
- кнопка «АМ» — «внутр.»;
- переключатель «Вр. Перестройки S» — в положение 1;
- переключатель «Режим перестройки» — « $F_1 - F_2$ »;
- ручка « F_1, F_0 » — крайнее левое положение;
- ручка « $F_2, \Delta F$ » — крайнее правое положение.

в) Генератор качающейся частоты ГКЧ-61, индикаторный прибор Я2Р-67 и СВЧ узлы соединить согласно структурной схеме, показанной на рис. 3.5, подсоединив к выходу направленного ответвителя 3 короткозамыкающую пластину вместо исследуемого элемента 4.



- 1 — переход коаксиально-волноводный; 2 — направленный ответвитель «Падающая»; 3 — направленный ответвитель «Отраженная»; 4 — исследуемый элемент волноводного тракта; 5 — интерфейсный кабель; 6, 7 — кабели соединительные коаксиальные.

Рис. 3.5 — Схема соединений для измерения КСВ

г) Переключатели «Сеть» на Я2Р-67 и ГКЧ-61 установить в верхнее положение (сеть включена).

д) Установить диапазон качания частоты, выполнив следующие действия:

— нажать кнопку « F_1, F_0 » переключателя отсчетов и ручкой « F_1, F_0 » установить на цифровом индикаторе ГКЧ-61 нижнюю частоту заданного интервала частот;

— нажать кнопку « $F_2, \Delta F$ » и ручкой « $F_2, \Delta F$ » установить верхнюю частоту заданного интервала частот.

е) Выполнить калибровку измерительной установки:

— регулятор «Отсчет» установить в положение, при котором стрелка по нижней шкале (для измерения КСВ, рис. 3.6) совмещается с отметкой « ∞ »;

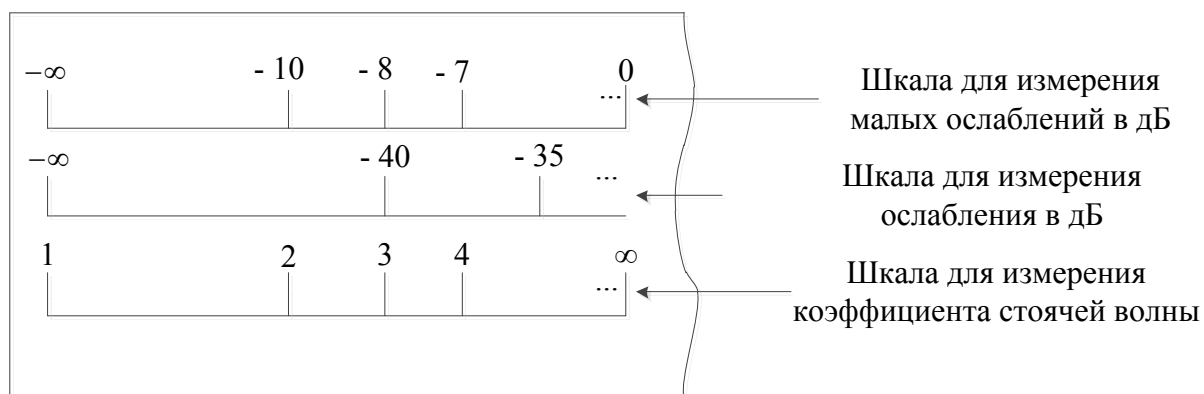


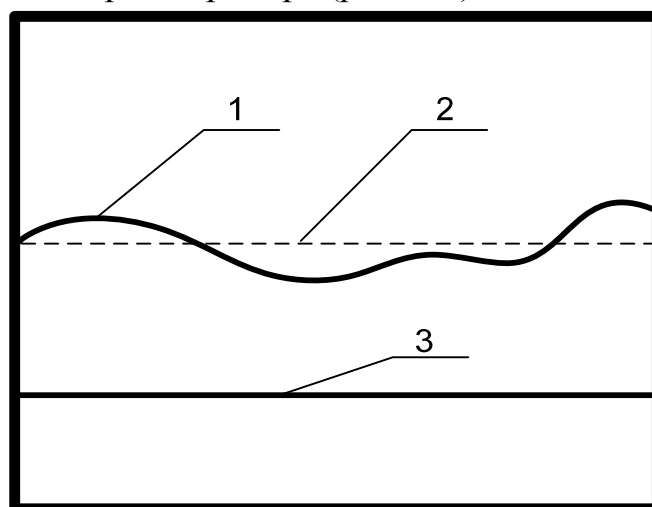
Рис. 3.6 — Размещение измерительных шкал индикатора Я2Р-67

— поворачивая на индикаторе Я2Р-67 ручку «**Калибр**», добиться совмещения отображаемой на экране индикатора кривой, характеризующей частотную зависимость КСВ нагрузки, с линией отсчета.

ж) Подключить к выходу направленного ответвителя 3 один из входов исследуемого элемента волноволнового тракта 4 (см. рис. 3.5). К остальным его входам подсоединить согласованные нагрузки.

з) Переключатель «**Пределы**» на индикаторе Я2Р-67 установить в положение, при котором характеристика КСВ отображается примерно посередине экрана прибора.

и) Поворачивая на индикаторе Я2Р-67 ручку «**Отсчет**», переместить линию отсчета КСВ до совмещения ее со средним значением частотной зависимости КСВ, отображаемой на экране прибора (рис. 3.7).



1 — частотная зависимости КСВ

2 — среднее значение частотной зависимости КСВ

3 — линия отсчета КСВ

Рис. 3.7 — Изображение на индикаторе Я2Р-67, поясняющее методику калибровки прибора при измерении КСВ

к) Провести измерения частотной зависимости КСВ в следующей последовательности:

— на ГКЧ-61 переключатель «**Время перестройки S**» установить в положение «руч.»;

— с помощью регулятора, обозначенного на ГКЧ-61 как «**РУЧ.**» (для работы в ручном режиме перестройки), выставить по цифровой шкале ГКЧ-61 значение нижней частоты заданного диапазона;

— с помощью регулятора «**Отсчет**» на Я2Р-67 добиться совмещения на экране прибора точки отсчета с точкой частотной характеристики КСВ;

— выполнить по цифровой шкале ГКЧ-61 измерение установленной частоты, а также записать значение КСВ, измеренное по соответствующей шкале индикатора Я2Р-67 (см. рис. 3.6);

— повторить измерения КСВ, на средней и верхней частотах заданного диапазона.

— с помощью регулятора, обозначенного на ГКЧ-61 как «**РУЧ.**» (для работы в ручном режиме перестройки), изменять частоту в пределах рабочей

полосы и измерить минимальное и максимальное значения КСВ, а также частоты, на которых достигаются эти значения КСВ.

л) Подключая к выходу направленного ответвителя 3 (см. рис. 3.5) поочередно остальные входы исследуемого элемента волноводного тракта, произвести измерения КСВ в соответствии с п. з) — к). При этом к свободным входам исследуемого элемента необходимо подсоединять согласованные нагрузки.

3.5.3.2. Выполнить измерения ослабления в исследуемом элементе в соответствии со следующей методикой.

а) Установить исходное положение органов управления на индикаторном приборе Я2Р-67:

— переключатель «Сеть» установить в нижнее положение (сеть выключена);

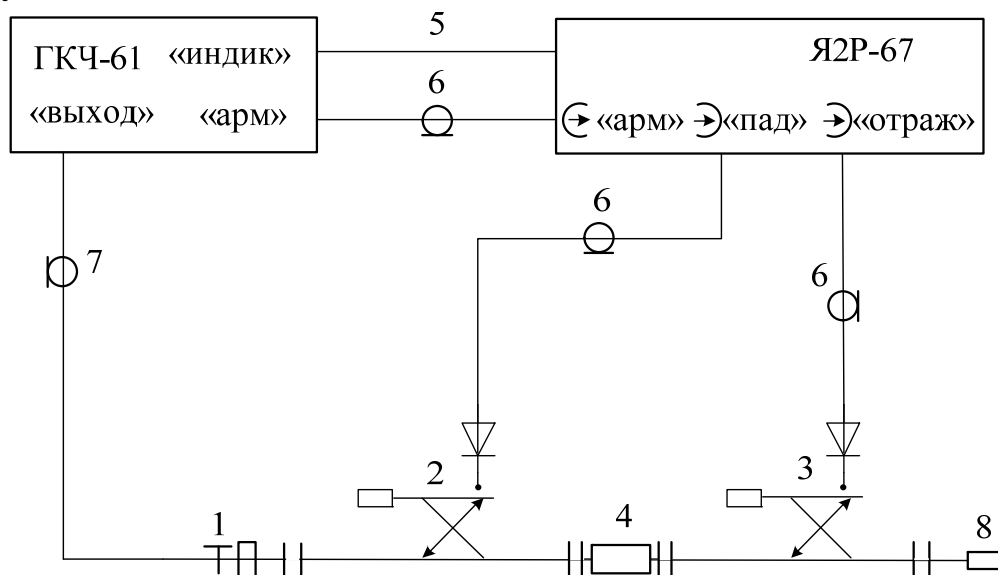
— переключатель «Пределы» — «0».

б) Установить исходное положение для каждого из органов управления на ГКЧ-61:

— переключатель «Сеть» установить в нижнее положение (сеть выключена);

— переключатель «Вр. Перестройки S» — в положение «1 с».

в) Генератор ГКЧ-61 и индикатор Я2Р-67 соединить по схеме, приведенной на рис. 3.8. Для выполнения калибровки соединить направленные ответвители 2 и 3 непосредственно, а к выходу ответвителя 3 подключить согласованную нагрузку 8.



1 — переход коаксиально-волноводный; 2 — направленный ответвитель «Падающая»; 3 — направленный ответвитель «Отраженная»; 4 — исследуемый элемент волноводного тракта; 5 — интерфейсный кабель; 6 — кабель соединительный; 7 — кабель соединительный ВЧ; 8 — согласованная нагрузка.

Рис. 3.8 — Схема соединений при измерении ослабления

г) Переключателями «Сеть» включить приборы Я2Р-67 и ГКЧ-61.

д) Выполнить калибровку измерительной установки:

— ручкой «Отсчет» на индикаторе Я2Р-67 совместить отсчётную стрелку с отметкой «0» на шкале для измерения малы ослаблений (см. рис. 3.6);

— вращая ручку «Калибр», добиться совмещения отображаемой на экране прибора частотной характеристики ослаблений с линией отсчета.

е) Подключить между направленными ответвителями 2 и 3 исследуемый элемент волноводного тракта 4 (см. рис. 3.7). К свободным входам элемента подсоединить согласованные нагрузки.

ж) Переключатель «Пределы» на приборе Я2Р-67 установить в положение, при котором характеристика ослабления отображается приблизительно на уровне середины экрана индикатора.

з) Поворачивая ручку «Отсчет», переместить линию отсчета ослабления до совмещения ее с близким к среднему значению частотной зависимости ослабления, отображаемой на экране индикаторного прибора Я2Р-67.

и) Провести измерения в трех точках наблюдаемой частотной зависимости ослабления:

— на генераторе ГКЧ-61 переключатель «Время перестройки S» установить в положение «руч.»;

— с помощью регулятора, обозначенного на ГКЧ как «РУЧ.» (для работы в ручном режиме перестройки), выставить по цифровой шкале ГКЧ значение нижней частоты заданного диапазона;

— с помощью регулятора «Отсчет» на Я2Р-67 добиться совмещения на экране прибора точки отсчета с точкой частотной характеристики ослабления;

— зафиксировать на цифровой шкале ГКЧ значение установленной частоты, а также зафиксировать значение ослабления на верхней шкале прибора Я2Р-67 (см. рис. 3.6);

— повторить измерения ослабления, перестроив ГКЧ последовательно на среднюю и верхнюю частоты заданного диапазона.

к) Провести измерения частотной зависимости ослабления между всеми остальными парами плеч исследуемого элемента волноводного тракта в соответствии с п. е) — и).

3.5.4. Обработка результатов измерений

а) Построить на одной координатной сетке графики зависимостей от частоты КСВ на входах для каждого из исследованных элементов волноводного тракта, используя результаты измерений, полученные в трех точках диапазона частот, а также на частотах, где наблюдаются минимальное и максимальное значения КСВ.

б) Построить на одной координатной сетке графики зависимостей от частоты ослабления между плечами для каждого из исследованных элементов волноводного тракта.

3.6. Контрольные вопросы

3.6.1. Вопросы для допуска к лабораторной работе

- а) Перечислите, какие измерения необходимо провести в ходе экспериментального исследования.
- б) Какой тип электромагнитной волны является основным для прямоугольного волновода?
- в) Опишите порядок подготовки к работе индикаторного прибора Я2Р-67.
- г) Опишите порядок подготовки к работе генератора качающейся частоты ГКЧ-61.
- д) Опишите порядок проведения калибровки измерительного прибора Р2-61 при измерениях $K_{\text{СВ}}$.
- е) Опишите порядок проведения калибровки измерительного прибора Р2-61 при измерениях ослабления.
- ж) Опишите порядок проведения измерения $K_{\text{СВ}}$ на входах исследуемого элемента волноводного тракта.
- з) Опишите порядок проведения измерения ослабления между плечами исследуемого элемента волноводного тракта.
- и) Поясните, как необходимо собрать направленные ответвители при подготовке прибора к измерениям $K_{\text{СВ}}$ и ослабления.
- к) Опишите, какие режимы индикации обеспечивает индикаторный прибор Я2Р-67 и как осуществлять переходы между режимами.

3.6.2. Вопросы для подготовки к защите лабораторной работы

- а) Объясните физический смысл элементов матрицы рассеяния.
- б) Нарисуйте структуру поля основной волны в прямоугольном волноводе. Укажите плоскости, в которых лежат, соответственно, силовые линии электрического и магнитного полей.
- в) Нарисуйте схему конструкции Т-образного волноводного H -тройника. Какими свойствами обладает волноводный H -тройник? Объясните свойства H -тройника, рассматривая случай синфазного и противофазного питания со стороны боковых плеч.
- г) Нарисуйте схему конструкции Т-образного волноводного E -тройника. Какими свойствами обладает волноводный E -тройник? Объясните свойства E -тройника, рассматривая случай синфазного и противофазного питания со стороны боковых плеч.
- д) Нарисуйте схему конструкции двойного волноводного тройника. Какими свойствами обладает двойной волноводный тройник?
- е) Нарисуйте схему конструкции направленного ответвителя. Какими свойствами обладает направленный ответвитель?
- ж) Нарисуйте схему конструкции ферритового вентиля. Какими свойствами обладает ферритовый вентиль?
- з) Нарисуйте схему конструкции ферритового Y -циркулятора. Какими свойствами обладает ферритовый Y -циркулятор?

4. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

ИССЛЕДОВАНИЕ ВНЕШНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИММЕТРИЧНОГО ВИБРАТОРА

4.1. Цель работы

Освоить методику расчета диаграммы направленности и входного сопротивления симметричного вибратора.

Освоить методику экспериментального исследования диаграммы направленности симметричного вибратора.

Теоретически и экспериментально исследовать влияние геометрических параметров симметричного вибратора на его направленные свойства.

4.2. Описание измерительной установки

Измерительная установка (рис. 4.1) включает: исследуемую антенну 1, вспомогательную антенну 2, однокоординатное опорно-поворотное устройство 3, СВЧ генератор 4, детекторную секцию 5, селективный микровольтметр 6, фиксированный аттенюатор 7, опорное устройство для вспомогательной антенны 8.

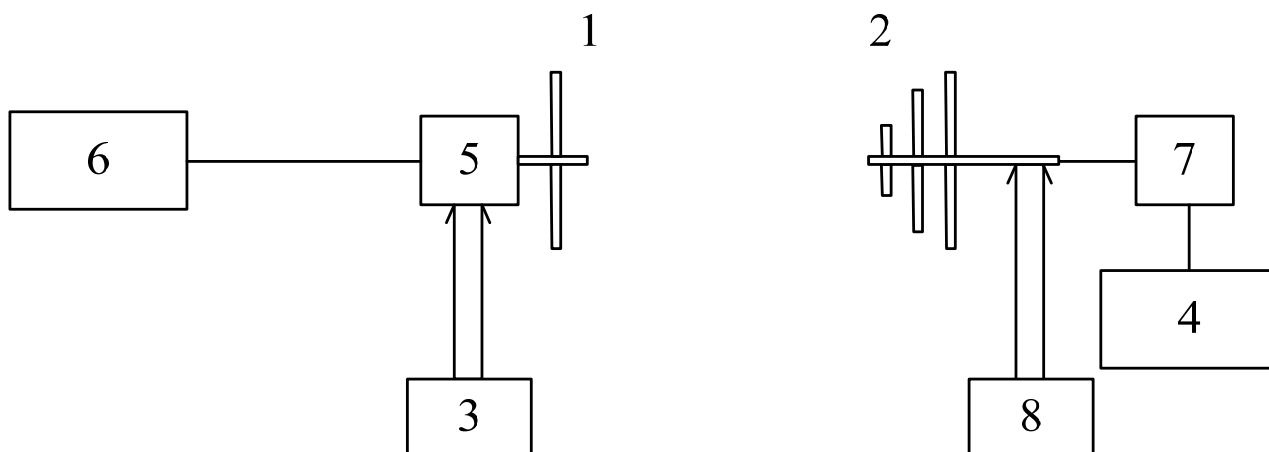


Рис. 4.1 — Структурная схема измерительной установки

Расстояние между исследуемой и вспомогательной антеннами выбирается из условия размещения приемной антенны в дальней зоне передающей антенны. Высота подвеса антенн выбирается из условия минимального влияния волны, отраженной от подстилающей поверхности.

Однокоординатные опорно-поворотные устройства позволяют вращать антенны в азимутальной плоскости.

4.3. Исходные данные

Исходными данными к индивидуальным заданиям для теоретических и экспериментальных исследований являются: рабочая частота f , три значения длин плеч симметричного вибратора l_1, l_2, l_3 , указанные в долях длины волны λ (табл. 4.1).

Таблица 4.1 — Исходные данные для теоретических и экспериментальных исследований

M	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
f , МГц	600	610	620	630	640	650	660	670	680	690
N	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
l_1/λ	0,3	0,33	0,36	0,39	0,42	0,45	0,48	0,51	0,54	0,6
l_2/λ	0,62	0,63	0,64	0,65	0,66	0,67	0,68	0,69	0,7	0,72
l_3/λ	0,7	0,75	0,8	0,85	0,9	0,95	1,05	1,1	1,15	1,2

Радиус проводников симметричного вибратора $a = 3,5$ мм.

4.4. Методика расчета диаграммы направленности и входного сопротивления симметричного вибратора

4.4.1. Расчет диаграммы направленности

Симметричный вибратор (СВ) состоит из двух прямолинейных плеч длиной l , разделенных малым по сравнению с длиной волны зазором (рис. 4.2). Источник сторонней ЭДС $\varepsilon_{\text{ст}}$ для упрощения модели СВ считают подключенным между входными зажимами. За начало отсчета вдоль оси Z принимается середина зазора между входными зажимами. Положение точки наблюдения $M(r, \theta, \varphi)$ в сферической системе координат задается модулем радиус-вектора r , углом θ , отсчитываемым от положительного направления оси Z , и углом φ в поперечной плоскости.

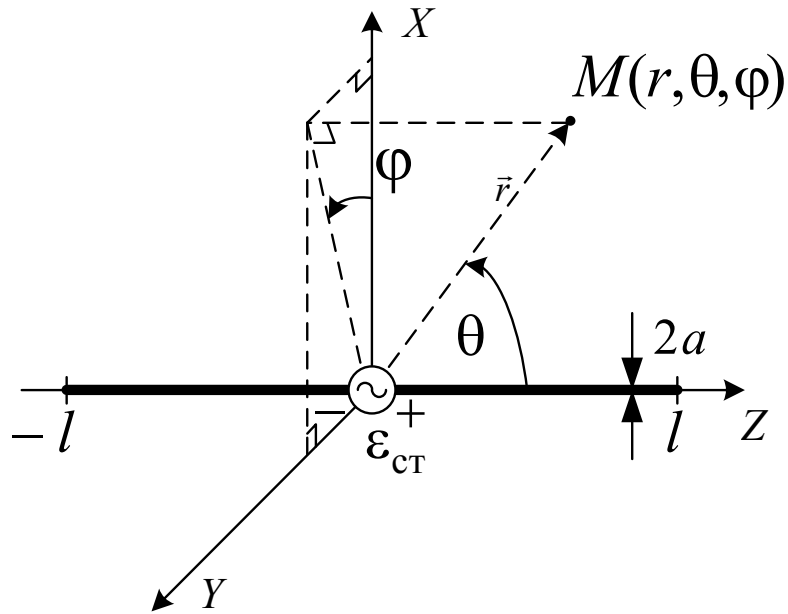


Рис. 4.2 — Схема симметричного вибратора

В первом приближении для описания распределения токов $I(z)$ и потенциалов $U(z)$ вдоль плеч тонкого симметричного вибратора используют модель симметричного вибратора в виде эквивалентной разомкнутой длинной линии (рис. 4.3).

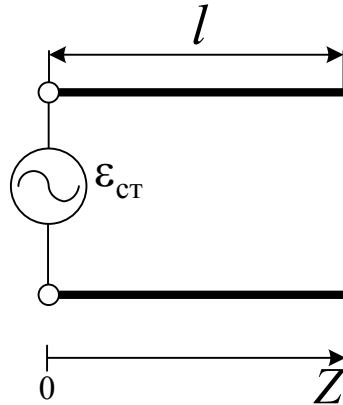


Рис. 4.3 — Эквивалентная схема симметричного вибратора в виде разомкнутой длинной линии

В этом случае $I(z)$ и $U(z)$, как ток и напряжение в разомкнутой линии, задаются выражениями

$$\begin{cases} U(z) = \pm \frac{U_H}{2} \cos[k(l - |z|)] \\ I(z) = j \frac{U_H}{2\rho_B} \sin[k(l - |z|)] \end{cases}, \quad (4.1)$$

где U_H — напряжение на конце эквивалентной длинной линии;

$\rho_B = 120(\ln \frac{l}{a} - 1)$ — волновое сопротивление симметричного вибратора.

В соответствии со схемой СВ (см. рис. 4.2), принят знак «+» для правого плеча, знак «-» — для левого.

Для симметричного вибратора с длинами плеч $l = \lambda/2$ и $l = 3\lambda/4$ распределения тока и потенциалов представлены на рис. 4.4 и 4.5, соответственно.

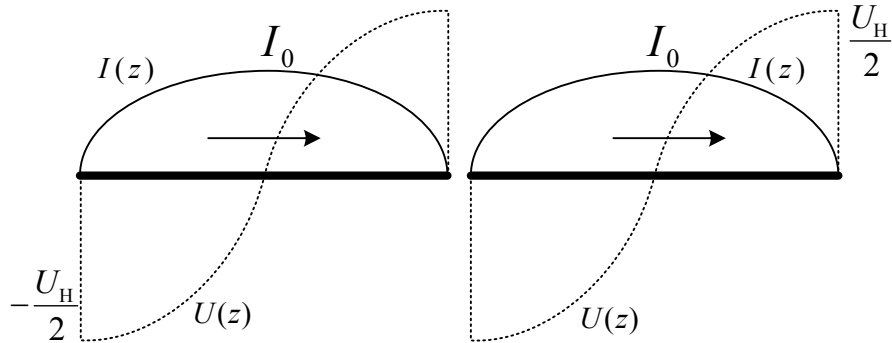


Рис. 4.4 — Распределение тока и потенциалов вдоль плеч симметричного вибратора при длинах плеч $l = \lambda/2$

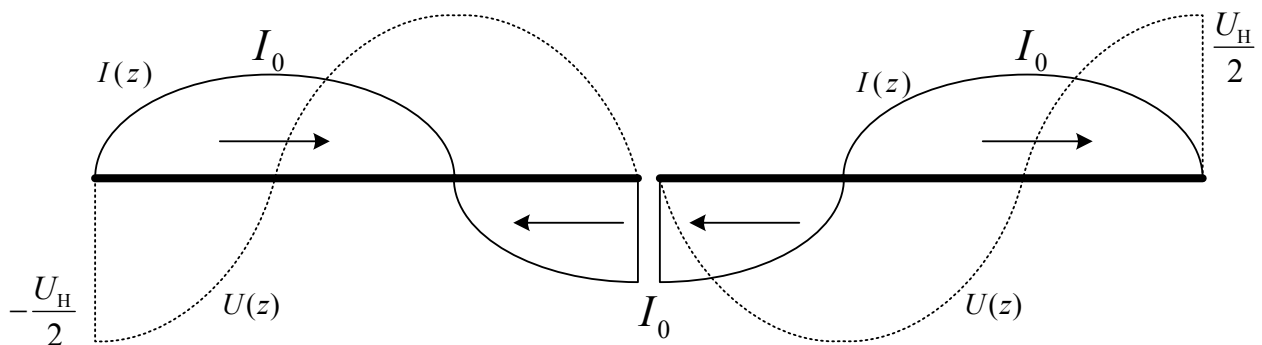


Рис. 4.5 — Распределение тока и потенциалов вдоль плеч симметричного вибратора при длинах плеч $l = 3\lambda/4$

Путем интегрирования распределения тока можно получить выражение для пространственной диаграммы направленности (ДН) по полю $f(\theta, \varphi)$ (4.1)

$$f(\theta, \varphi) = \left| \frac{\cos(kl \cos(\theta)) - \cos(kl)}{\sin(\theta)} \right|, \quad (4.2)$$

где $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число.

Принято анализировать ДН антенны в двух основных сечениях: E -плоскости и H -плоскости. Так как $\vec{E}$, порождаемый электрическими токами, параллелен этим токам, то в нашем случае плоскость XOZ на рис. 4.2 ($\theta = 0^\circ \dots 360^\circ, \varphi = 0^\circ$) является E -плоскостью, а XOY ($\theta = 90^\circ, \varphi = 0^\circ \dots 360^\circ$) — H -плоскостью. ДН СВ (4.2) в E - и H -плоскостях рассчитываются с учетом указанных пределов изменения углов θ и φ . Поскольку в (4.2) $f(\theta, \varphi)$ не зависит от угла φ , СВ в H -плоскости имеет круговую ДН. Для анализа характеристик поля излучения СВ в дальнейшем будем рассматривать ДН только в E -плоскости: $f(\theta)$.

При построении ДН в ходе теоретических исследований обычно выполняют ее нормировку к максимальному значению. Направления

максимального излучения симметричного вибратора при $l \leq 0,625\lambda$ соответствуют углам $\theta_{\max 1,2} = \pm 90^\circ$, для которых

$$f(\pm 90^\circ) = 1 - \cos kl.$$

Следовательно, нормированную ДН по полю СВ $f^{\text{норм}}(\theta)$ при $l \leq 0,625\lambda$ можно выразить формулой

$$f^{\text{норм}}(\theta) = \left| \frac{\cos(kl \cos \theta) - \cos kl}{\sin \theta (1 - \cos kl)} \right|. \quad (4.3)$$

При анализе формы ДН СВ выполняют следующее:

— определяют направления нулей ДН θ_{0n} из условия

$$\cos \theta_{0n} = \pm 1 \pm n \cdot \frac{\lambda}{l}, \text{ где } n = 0, 1, 2, \dots; \quad (4.4)$$

— предварительно оценивают направления максимумов ДН $\theta_{\max m}$ ($m = 1, 2, \dots$) как биссектрисы углов между двумя соседними направлениями нулевого излучения;

— определяют уровни ДН в максимумах $f(\theta_{\max m})$.

За направление главных максимумов ДН симметричного вибратора принимают углы $\theta_{\max 1,2} = \pm 90^\circ$. Если дополнительные (побочные) максимумы в ДН СВ $f(\theta_{\max m})$ будут больше уровня излучения в главном направлении, то нормировку ДН необходимо производить к этим максимальным значениям.

Принято строить ДН СВ в полярной системе координат в нормированном виде (рис. 4.6).

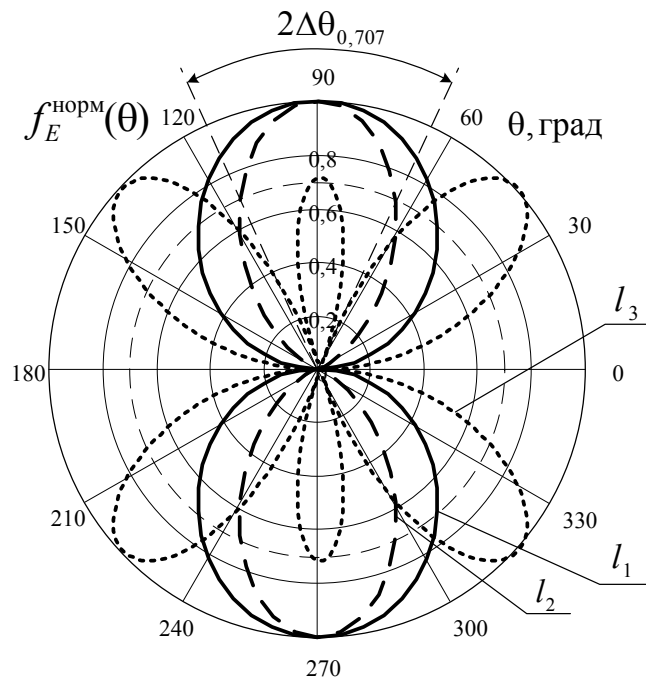


Рис. 4.6 — Нормированные диаграммы направленности СВ в E -плоскости при $l_1 = 0,25\lambda$, $l_2 = 0,5\lambda$, $l_3 = 0,75\lambda$

На рис. 4.6 видно, что при $l > \lambda/2$ на плечах симметричного вибратора появляются противофазные участки тока, которые неблагоприятно сказываются на характеристиках излучения антенны:

- уменьшается интенсивность излучения в главном направлении ДН;
- уменьшается ширина главного лепестка ДН;
- увеличивается относительный уровень бокового излучения.

Для случаев, когда наибольший уровень излучения наблюдается при $\theta = \pm 90^\circ$, ширину главного лепестка нормированной ДН, представленной по полю, будем определять по уровню 0,707 от максимума, как показано на рис. 4.5 на примере ДН симметричного вибратора при $l = 0,5\lambda$.

Диаграмма направленности антенны по мощности $F(\theta)$ связана с ДН антенны по полю $f(\theta)$ соотношением

$$F(\theta) = f^2(\theta).$$

Для ДН по мощности $F(\theta)$ ширину главного лепестка определяют по уровню 0,5 («половинной мощности»).

На практике часто используют нормированные ДН, выраженные в децибелах. Нормированные диаграммы направленности по полю пересчитывают по формулам

$$f_{\text{дБ}}(\theta) = 20 \lg f^{\text{норм}}(\theta). \quad (4.5)$$

Для пересчета нормированной диаграммы направленности по мощности используют выражение

$$f_{\text{дБ}}(\theta) = 10 \lg F^{\text{норм}}(\theta).$$

Таким образом, ДН в децибелах становится единственной, ширину ее главного лепестка определяют по уровню -3 дБ.

4.4.2. Методика расчета входного сопротивления симметричного вибратора

Входное сопротивление симметричного вибратора произвольной длины является комплексным, то есть состоит из активной и реактивной составляющих

$$Z_{\text{ВХ}} = R_{\text{ВХ}} + jX_{\text{ВХ}}.$$

Величины этих составляющих зависят от электрической длины и радиуса поперечного сечения плеч симметричного вибратора.

Идеальная двухпроводная линия передачи не излучает электромагнитного поля в пространство, поэтому представленная на рис. 4.3 модель симметричного вибратора в виде эквивалентной длинной линии требует уточнения.

Введем понятие сопротивления излучения R_Σ , как величины, имеющей размерность сопротивления и связывающей излучаемую антенной мощность P_Σ с током I_0 в пучности его распределения вдоль плеч СВ

$$R_{\Sigma} = \frac{P_{\Sigma}}{I_0^2}.$$

Величину P_{Σ} найдем путем интегрирования потока мощности излучения по сфере произвольного радиуса r

$$P_{\Sigma} = \frac{1}{120\pi} \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\pi} E_m^2(\theta) r^2 \sin \theta d\theta,$$

где r, θ, φ — координаты точки наблюдения;

$E_m(\theta) = \frac{60I_0}{r} \frac{\cos(kl \cos \theta) - \cos kl}{\sin \theta}$ — амплитуда напряженности электрического поля, создаваемого СВ в точке наблюдения.

Тогда для сопротивления излучения СВ можно получить формулу

$$R_{\Sigma} = 60 \int_0^{\pi} \frac{(\cos(kl \cos \theta) - \cos kl)^2}{\sin \theta} d\theta.$$

Обозначим через $R_{\Sigma l}$ сопротивление излучения, отнесенное к входным зажимам симметричного вибратора. При синусоидальном распределении токов

$$R_{\Sigma l} = R_{\Sigma} / \sin^2(kl).$$

Теперь можем уточнить модель эквивалентной длинной линии. Для «коротких» СВ ($l/\lambda \leq 0,25$) в каждый проводник введем половину $R_{\Sigma l}$ у входных зажимов (рис. 4.7, а), а для «длинных» СВ ($l/\lambda > 0,25$) — половину R_{Σ} в точках, отстоящих на $\lambda/4$ от концов плеч (рис. 4.7, б).

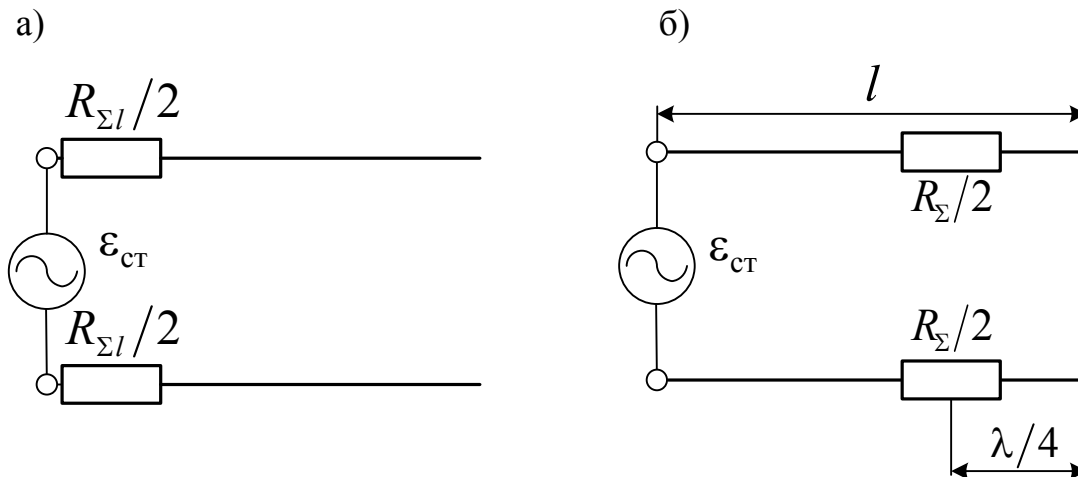


Рис. 4.7 — Уточненная модель эквивалентной длинной линии для $l/\lambda \leq 0,25$ (а) и $l/\lambda > 0,25$ (б)

Для входного сопротивления СВ получим формулы:

$$\begin{cases} Z_{\text{вх}} = R_{\Sigma l} - j\rho_{\epsilon} \operatorname{ctg}(kl), \text{ при } l \leq \lambda/4; \\ Z_{\text{вх}} = \frac{R_{\Sigma} - j0,5\rho_{\epsilon} \left(1 - \left(\frac{R_{\Sigma}}{\rho_{\epsilon}}\right)^2\right) \sin(2kl)}{\sin^2(kl) + \left(\frac{R_{\Sigma}}{\rho_{\epsilon}}\right)^2 \cos^2(kl)}, \text{ при } l > \lambda/4. \end{cases} \quad (4.6)$$

Для оценки характеристик вибраторных антенн часто вводят расчётный параметр, называемый **действующей длиной антенны** — это длина воображаемого СВ с равномерным распределением тока, создающего в направлении максимального излучения (при $\theta = \pm 90^\circ$) поле, равное по уровню полю данной антенны в направлении её максимального излучения.

При этом токи в точках питания обеих антенн считаются равными.

Используя выражение (4.3) для ДН СВ, для действующей длины $l_{\text{д}}$ можно получить выражения:

$$\begin{cases} l_{\text{д}} = \frac{2}{k} \frac{(1 - \cos kl)}{\sin kl}, \text{ при } l \leq \frac{\lambda}{4}; \\ l_{\text{д}} = \frac{2}{k} (1 - \cos kl), \text{ при } \frac{\lambda}{2} > l > \frac{\lambda}{4}. \end{cases} \quad (4.7)$$

Направленные свойства антенн часто характеризуют **коэффициентом направленного действия** (КНД), величиной, которая показывает, во сколько раз напряженность поля реальной антенны в направлении максимума излучения больше напряженности поля эквивалентной ненаправленной антенны при одинаковых мощностях излучения.

Обычно КНД СВ определяют в направлениях $\theta = \pm 90^\circ$ по формуле

$$D = \frac{2(1 - \cos kl)^2}{\int_0^\pi \frac{[\cos(kl \cos \theta) - \cos kl]^2}{\sin \theta} d\theta}. \quad (4.8)$$

Если требуется определить КНД в произвольном направлении θ' , то в формулу (4.8) в числителе вместо множителя $1 - \cos kl$ вводят значение $f(\theta')$.

Для инженерных расчетов КНД при длине плеч симметричного вибратора $l \leq 0,5\lambda$ можно пользоваться приближенной формулой

$$D \approx \frac{30k^2 l_{\text{д}}^2}{R_{\Sigma}}. \quad (4.9)$$

4.5. Порядок выполнения работы

4.5.1. Теоретические исследования

Для симметричного вибратора с относительной длиной плеча l/λ ,

работающего на частоте f , необходимо выполнить следующее.

а) Для трех значений длин плеч симметричного вибратора рассчитать по формулам (4.2), (4.3) и построить амплитудные ДН антенны в E -плоскости, проанализировав при этом местоположение нулей (4.4) и максимумов ДН.

б) Рассчитать для трех значений длин плеч входное сопротивление симметричного вибратора (4.6). Построить графики зависимостей $R_{\text{вх}}$ и $X_{\text{вх}}$ симметричного вибратора от l/λ .

в) Определить для трех значений длин плеч действующую длину (4.7) и КНД (4.8) симметричного вибратора.

4.5.2. Экспериментальные исследования

а) Согласно индивидуальному заданию выставить длину плеч симметричного вибратора, равную l_1 .

б) Установив исследуемую антенну на опорно-поворотное устройство, выполнить юстировку исследуемой и вспомогательной антенн. Для этого антенны сориентировать так, чтобы направления максимумов их диаграмм направленности находились на одной линии (рис. 4.8).

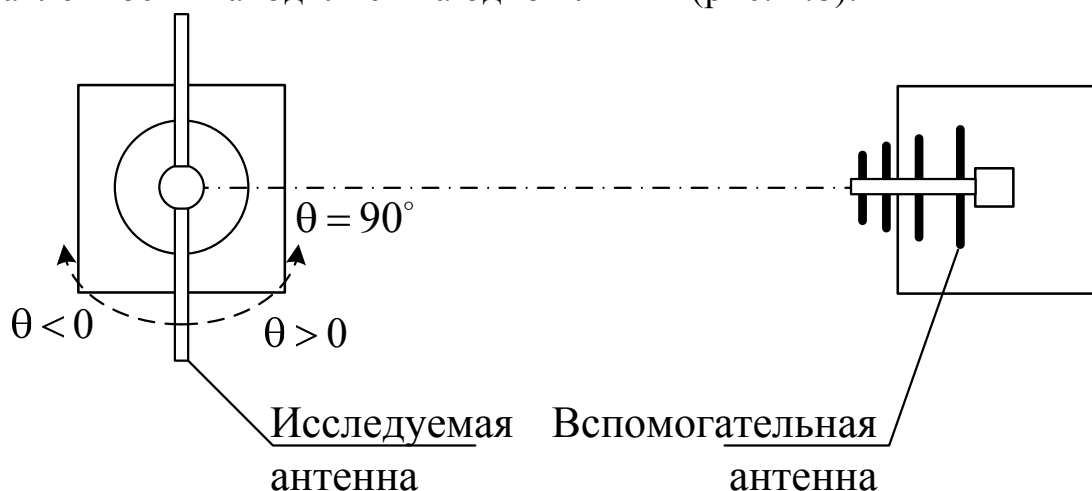


Рис. 4.8 — Схема установки антенны перед измерениями ДН

Предварительно направление $\theta = 90^\circ$ фиксируется по максимуму показаний селективного микровольтметра $\alpha(90^\circ)$. Затем положение максимума следует уточнить методом «двух засечек», выполнив следующие действия:

— повернуть исследуемую антенну из положения, соответствующего максимуму, вправо (по часовой стрелке) до угла θ_1 , на котором уровень измеренного сигнала составит $\alpha(\theta_1) = \alpha(90^\circ)/2$;

— повернуть исследуемую антенну из положения, соответствующего максимуму, влево (против часовой стрелки) до угла θ_2 , на котором уровень измеренного сигнала составит $\alpha(\theta_2) = \alpha(\theta_1) = \alpha(90^\circ)/2$;

— определить отсчетный угол положения максимума ДН θ_{max} , как среднее арифметическое измеренных значений

$$\theta_{\max} = \frac{\theta_1 + \theta_2}{2}.$$

В дальнейшем при построении ДН положение максимума следует принять за 90° , и если отсчитываемая величина $\theta_{\max}$ отличается от 90° , то углы нужно соответственно пересчитать.

в) Снять калибровочную кривую измерительной установки в максимуме ДН СВ: зависимость показаний микровольтметра от ослабления сигнала δ в децибелах $\alpha(90^\circ, \delta)$. Ослабление нужно изменять в пределах от 0 до 20 дБ (3, 6, 10, 13, 16, 20 дБ) путем включения между выходом генератора и вспомогательной антенной фиксированных аттенуаторов (Д2–30, Д2–31, Д2–32) или их комбинаций.

г) Провести измерения ДН симметричного вибратора (см. рис. 4.6). Для этого из положения, соответствующего максимуму ДН $\theta_{\max}$, нужно исследуемую антенну поворачивать вокруг оси однокоординатного опорно-поворотного устройства на 180° вправо, затем — на 180° влево. При медленном изменении уровня сигнала отсчеты нужно выполнять с шагом 10° , а вблизи «нулей» диаграммы направленности — 5° . Положение «нулей» следует фиксировать с возможно большей точностью.

д) Выставить длину плеч симметричного вибратора, равную l_2 , и повторить действия по п. в, г.

е) Выставить длину плеч симметричного вибратора, равную l_3 , и повторить действия по п. в, г.

4.5.3. Обработка результатов измерений

а) Построить калибровочную кривую по данным, полученным при выполнении п. 4.5.2,в: зависимость показаний селективного микровольтметра $\alpha(90^\circ, \delta)$ от ослабления δ . Пример написания программы для построения калибровочной кривой приведен в приложении В.

б) Воспользовавшись построенной зависимостью $\alpha(90^\circ, \delta)$, пересчитать уровни отсчетов $\alpha(\theta)$ в децибелы: каждому значению α на основании графика $\alpha(90^\circ, \delta)$ ставится в соответствие соответствующее ослабление δ . Полученная зависимость представляет собой нормированную диаграмму направленности антенны $f^{\text{норм}}(\theta)$, представленную в децибелах. Результаты пересчета оформить в виде таблицы (табл. 4.2).

Таблица 4.2 — Пример заполнения таблицы с результатами измерений

Отсчет, град	100	90	...
Угол ДН θ , град	90	80	...
α	78	74	...
e , дБ	0	–0,4	...

в) В полярной системе координат построить диаграммы направленности для трех значений длин плеч симметричного вибратора.

г) В полярной системе координат для СВ с длиной плеч l_1 построить теоретическую и экспериментальную диаграммы направленности, при этом необходимо представить их в децибелах, воспользовавшись выражением (4.5). Выполнить аналогичные построения для СВ с длиной плеч l_2 и l_3 .

д) Определить значения ширины главного лепестка по уровню -3 дБ для экспериментально измеренных и рассчитанных ДН и построить их зависимости от относительной длины плеча l/λ .

4.6. Контрольные вопросы

4.6.1 Вопросы для допуска к лабораторной работе

- а) Дать определение диаграммы направленности антенны по полю.
- б) Дать определение коэффициента направленного действия.
- в) Дать определение сопротивления излучения симметричного вибратора.
- г) Построить диаграмму направленности полуволнового симметричного вибратора в E - и H -плоскостях. Пояснить, как определяется ширина главного лепестка ДН антенны.
- д) Пояснить порядок экспериментального исследования диаграммы направленности симметричного вибратора.
- е) Дать определение действующей длине симметричного вибратора.
- ж) Какие требования предъявляются к полигону для измерения ДН антенны?

4.6.2. Вопросы для подготовки к защите лабораторной работы

- а) Как изменится диаграмма направленности симметричного вибратора, если длину его плеч увеличивать от $0,1\lambda$ до $0,5\lambda$?
- б) Как изменится диаграмма направленности симметричного вибратора, если длину его плеч увеличивать от $0,5\lambda$ до λ ?
- в) Как связаны между собой диаграммы направленности, выраженные по полю и по мощности?
- г) При каких длинах плеч симметричного вибратора на них будут отсутствовать противофазные участки тока?
- д) Как изменятся характеристики поля излучения симметричного вибратора, если на его плечах появятся противофазные участки тока?
- е) Как изменяется КНД симметричного вибратора с увеличением длины его плеч?
- ж) При каких длинах плеч симметричный вибратор будет обладать чисто активным входным сопротивлением?

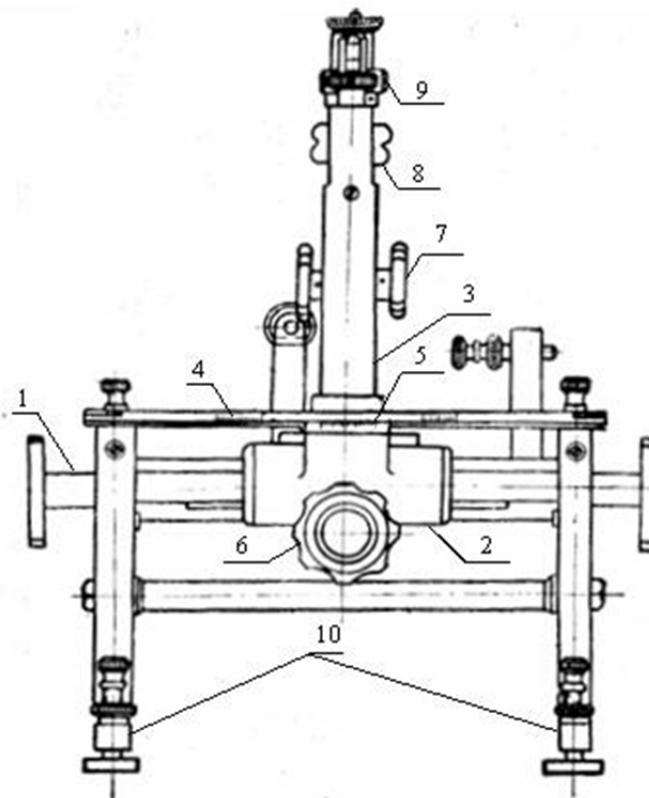
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Методические указания по оформлению текстовых работ для студентов дневной и заочной форм обучения направления 6.050901 — «Радиотехника» / СевНТУ; сост. В.Г. Слезкин. — Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2010. — 20 с.
2. 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.
3. Коротковолновые антенны / Г.З. Айзенберг [и др.]; под ред. Айзенберга Г.З. — М.: Радио и связь, 1985. — 536 с.
4. Бова Н.Т. Антенны и устройства СВЧ / Н.Т. Бова, Г.Б. Резников. — К.: Вища школа, 1982. — 278 с.
5. Вамберский М.В. Конструирование ферритовых развязывающих приборов СВЧ / М. В. Вамберский, В.П. Абрамов, В.И. Казанцев. — М.: Радио и связь, 1982. — 136 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

ОПИСАНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ВОЛНОВОДНОЙ ЛИНИИ Р1-4

Измерительная линия (рис. А.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. А.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 электродвижущая 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.

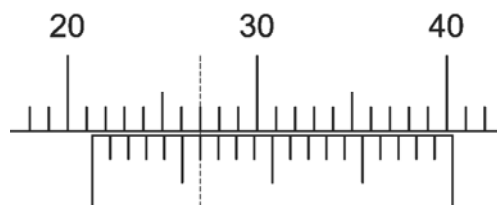


Рис. А.2 — Шкала для измерения положения зонда

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. А.2, отсчет равен 21,30 мм (через совпадающие штрихи проведена штриховая линия).

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

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 (1.10), запишем

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

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 (1.16), определяем КСВ в линии передачи

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

По формулам (1.15) определяем нормированную амплитуду напряжения в пучностях и узлах напряжения:

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

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

Для определения аргумента коэффициента отражения нагрузки построим векторную диаграмму, разложив на комплексной плоскости числитель и знаменатель дроби (Б.1), т. е. числа $j230 - 443$ и $j230 + 443$ (рис. Б.1). За положительное направление отсчета угла Ψ принимается направление против часовой стрелки относительно положительного направления вещественной оси.

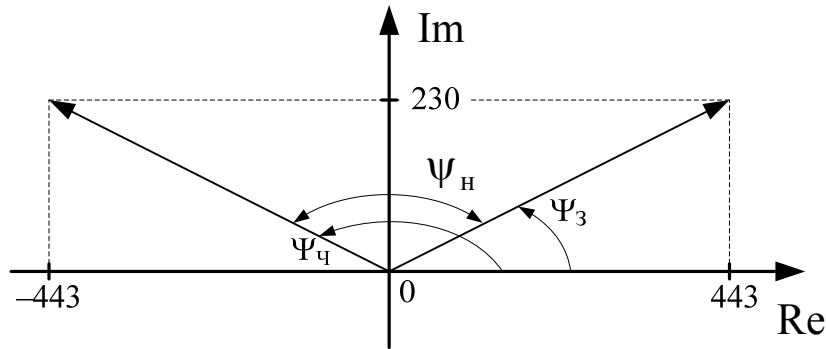


Рис. Б.1 — Представление комплексных чисел на числовой плоскости

Фаза коэффициента отражения нагрузки определяется как разность аргументов числителя $\Psi_{\text{ч}}$ и знаменателя $\Psi_{\text{з}}$.

Для случая, показанного на рис. Б.1, будем иметь

$$\Psi_{\text{ч}} = \pi - \arctg\left(\frac{230}{443}\right) = 2,663 \text{ рад};$$

$$\Psi_{\text{з}} = \arctg\left(\frac{230}{443}\right) = 0,479 \text{ рад}.$$

Следовательно, фаза коэффициента отражения в нагрузке равна

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

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 (1.13), находим

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

Поскольку узлы напряжения смещены относительно пучностей на $\lambda/4$ (1.14), то первый минимум напряжения будет расположен в сечении линии с координатой

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

Пользуясь формулой (1.8), 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 (1.8) в нормированном виде (рис. Б.2):

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

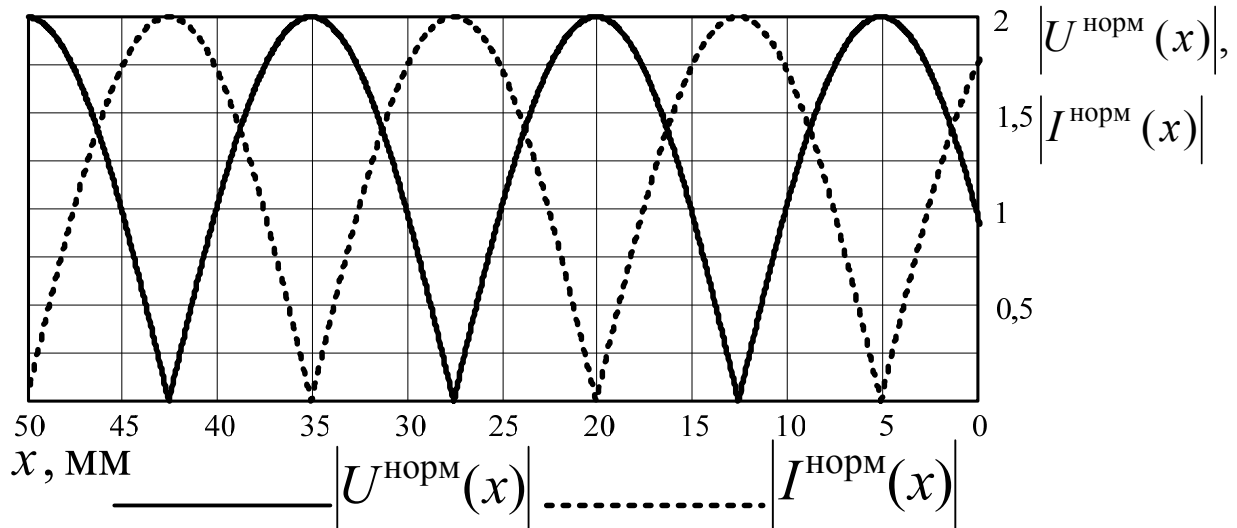


Рис. Б.2 — Распределение нормированных амплитуд тока и напряжения вдоль линии передачи

ПРИЛОЖЕНИЕ В

ПРИМЕР ПРОГРАММЫ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ КАЛИБРОВОЧНОЙ КРИВОЙ

После снятия калибровочной кривой детектора (см. таблицу 1.3) необходимо построить ее в виде непрерывной функции. Ниже приведен пример составления программы в среде *MathCad*.

В.1. Подготовка файла данных

Ввести исходные данные в векторы положений x и отсчетов α , например:

$$x := \begin{pmatrix} 3 \\ 2.71 \\ 2.59 \\ 2.5 \\ 2.45 \\ 2.33 \\ 2.26 \\ 2.2 \\ 2.12 \\ 2.06 \\ 2 \end{pmatrix} \quad \alpha := \begin{pmatrix} 0 \\ 10 \\ 20 \\ 30 \\ 40 \\ 50 \\ 60 \\ 70 \\ 80 \\ 90 \\ 100 \end{pmatrix}$$

Ввести положение первого минимума $x_{\min 1}$ и второго минимума $x_{\min 2}$ в сантиметрах:

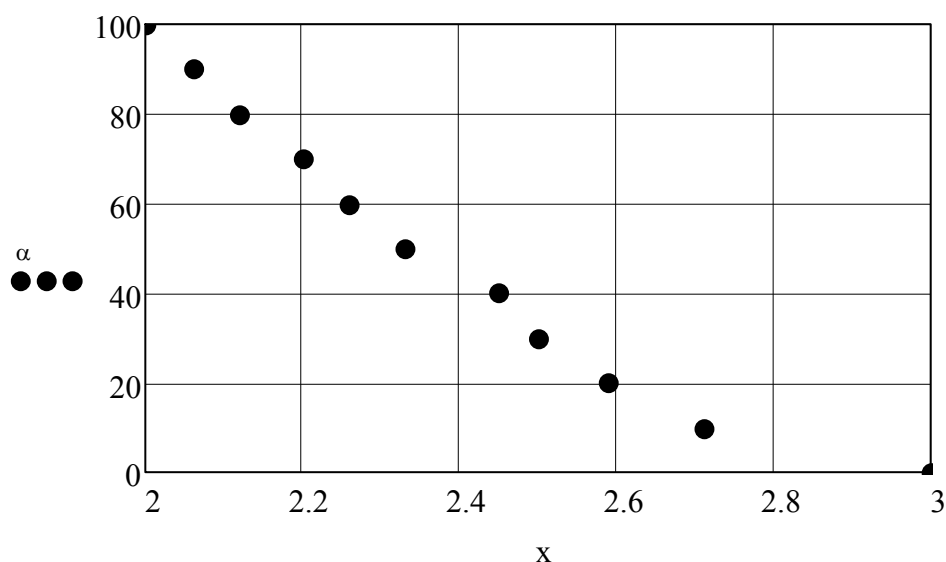
$$x_{\min 1} := 3; \quad x_{\min 2} := 1.$$

Рассчитать длину волны в волноводе:

$$\Lambda := 2|x_{\min 1} - x_{\min 2}|;$$

$$\Lambda := 4 \text{ см.}$$

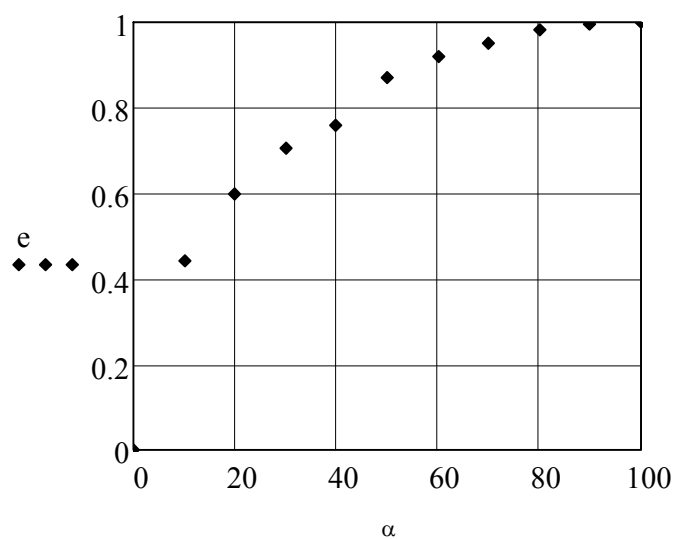
Построить зависимость $\alpha(x)$ в «точечном» виде.



Рассчитать нормированные значения напряженности электрического поля e_i и построить дискретную калибровочную зависимость

$$i := 0..last(\alpha)$$

$$e_i := \sin\left(2 \cdot \pi \cdot \frac{x_{min1} - x_i}{\Lambda}\right)$$



Рекомендуется для удобства использования сохранить результаты расчетов в файл с именем, например, «Lab_1.txt»:

$$S_{\langle 0 \rangle} := \alpha \quad S_{\langle 1 \rangle} := e$$

$$WRITEPRN("Lab_1.txt") := S$$

В.2. Работа с калибровочной кривой

Считать содержимое файла данных «Lab_1.txt» в матрицу N

```
N := READPRN("Lab_1.txt").
```

Сформировать непрерывную калибровочную функцию «Kalibr(α_{ish})» путем интерполяции дискретных данных:

```
X := N<0>      Y := N<1>
```

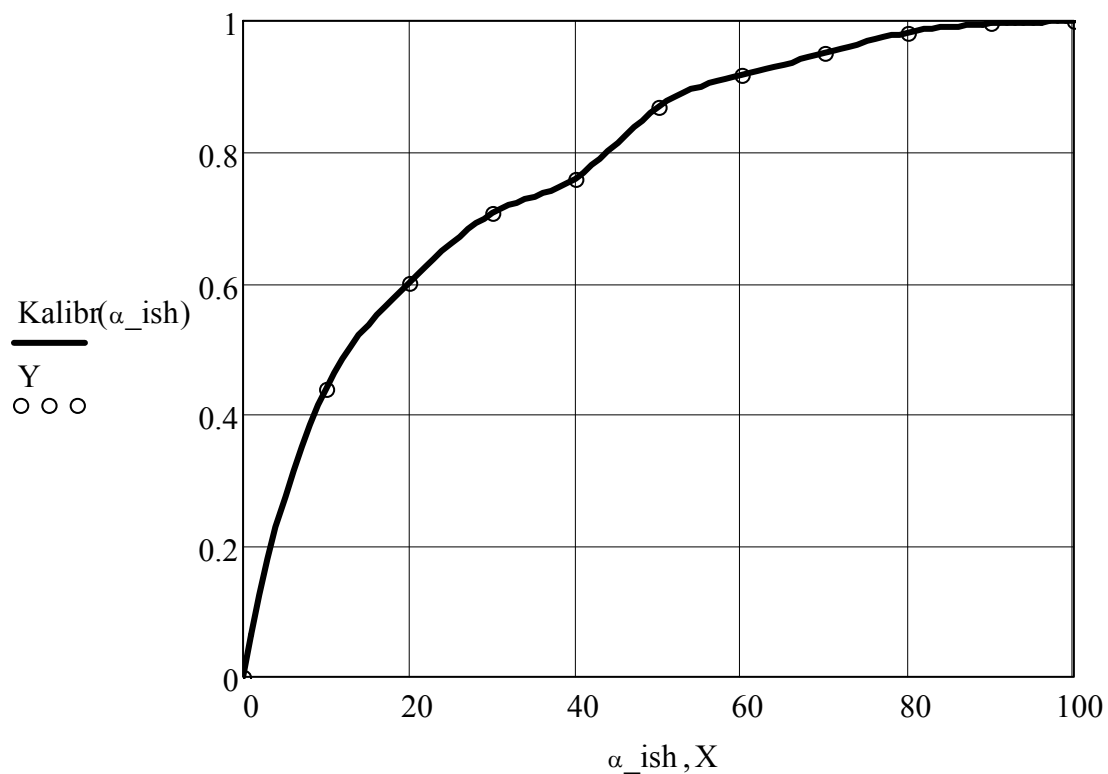
```
SPL := cspline(X, Y)
```

```
Kalibr( $\alpha_{ish}$ ) := interp(SPL, X, Y,  $\alpha_{ish}$ )
```

Задать пределы изменения α_{ish} в соответствии с данными таблицы 1.3

```
 $\alpha_{ish} := \min(\alpha) .. \max(\alpha).$ 
```

Построить калибровочную кривую



С помощью функции $\text{Kalibr}(\alpha_{\text{ish}})$, описывающей аппроксимированную калибровочную кривую, можно определять значения $e'_{\max}$ и $e'_{\min}$ по известным отсчетам, например:

$$\alpha'_{\max} = 85 ; \alpha'_{\min} = 42 ;$$

$$e'_{\max} := \text{Kalibr}(85) ; e'_{\max} = 0.991 ;$$

$$e'_{\min} := \text{Kalibr}(42) ; e'_{\min} = 0.779 .$$

Приложение Г

ОПИСАНИЕ ПАНОРАМНОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ Р2-61

Г.1. Назначение и характеристики прибора

Прибор предназначен для измерения частотных характеристик коэффициента стоячей волны (КСВ) и ослабления элементов волноводных трактов.

В состав измерительного комплекса Р2-61 входят следующие приборы:

- генератор качающейся частоты (ГКЧ);
- индикатор КСВ и ослабления Я2Р-67;
- измерительная линия, в состав которой входят два направленных ответвителя с детекторными секциями, набора согласованных нагрузок.

Технические данные измерительного комплекса Р2-61:

а) Диапазон рабочих частот измерителя: (8,24...12,05) ГГц;

б) Диапазон измерений K_{CTU} — (1,05...5,00).

в) Диапазон измерений ослабления: (0...35) дБ.

г) Режим перестройки генератора качающейся частоты (ГКЧ):

- ручная перестройка частоты;
- ручное качание частоты;
- автоматическое качание частоты с длительностью периодов 0,08 с; 1 с;

10 с.

д) Полоса качания частоты:

- максимальная, что соответствует полному диапазону частот;
- минимальная, что составляет не более 120 МГц.

Г.2. Принцип действия прибора

Работа измерителя основана на принципе рефлектометра. С помощью направленных ответвителей отдельно выделяются два сигнала. Первый направленный ответвитель позволяет выделить сигнал, пропорциональный мощности волны, падающей от генератора. Второй направленный ответвитель в зависимости от его расположения позволяет выделить сигнал, пропорциональный волне, отраженной от измеряемого объекта, или волне, прошедшей через измеряемый объект. В первом случае рефлектометр позволяет провести измерения K_{CB} , во втором — переходное ослабление волн. Токи, пропорциональные мощностям измеряемых волн, снимаются с детекторных головок, встроенных во вторичных трактах направленных ответвителей. Шкалы индикатора рассчитаны на квадратичность детектирования и проградуированы непосредственно в значениях K_{CB} и ослабления.

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

ПРИМЕР РАСЧЕТА МАТРИЦЫ РАССЕЯНИЯ МНОГОПОЛЮСНИКОВ

Исходные данные.

Исследуемое устройство: волноводный H -плоскостной тройник.

Коэффициенты отражения в нагруженных плечах:

$$\Gamma_{H1} = 0,1e^{-j0,22}, \quad \Gamma_{H2} = 0,1e^{-j0,22}.$$

В качестве примера анализа матрицы рассеяния волноводного многополюсника определим коэффициент стоячей волны (КСВ) на входе волноводного H -тройника — плечо 3 (см. рис. В.1) и развязку между плечами 1—3 (или 2—3), если в плечи 1 и 2 включены излучатели (например рупорные), входное сопротивление которых отличается от волнового сопротивления линии передачи.

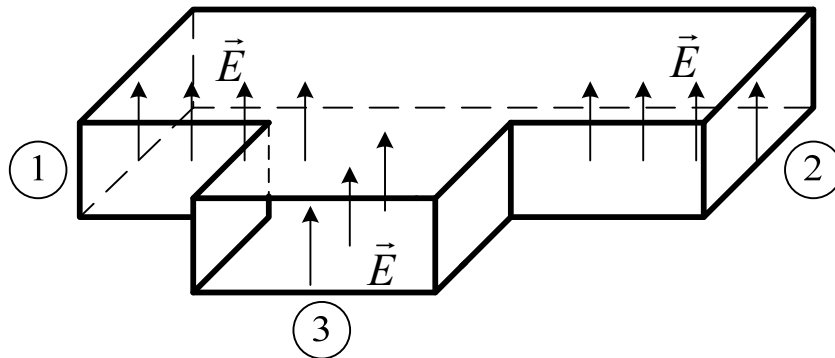


Рис. В.1 — Схема волноводного H -тройника

Матрица рассеяния волноводного H -тройника, внутренне согласованного со стороны плеча 3, куда подается сигнал, и нагруженного в плечах 1 и 2 на согласованные нагрузки, имеет вид:

$$S = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

С учетом (В.1) запишем соотношения между падающими и отраженными волнами:

$$\begin{cases} \dot{U}_{\text{отр1}} = \frac{1}{\sqrt{2}}(\dot{U}_{\text{пад2}} + \dot{U}_{\text{пад3}}); \\ \dot{U}_{\text{отр2}} = \frac{1}{\sqrt{2}}(\dot{U}_{\text{пад1}} + \dot{U}_{\text{пад3}}); \\ \dot{U}_{\text{отр3}} = \frac{1}{\sqrt{2}}(\dot{U}_{\text{пад1}} + \dot{U}_{\text{пад2}}). \end{cases} \quad (\text{В.1})$$

При подаче сигнала со стороны плеча 3 ($\dot{U}_{\text{пад3}} \neq 0$) в плечах 1 и 2 появляются отраженные сигналы с равными амплитудами и фазами

$$\dot{U}_{\text{отр1}} = \dot{U}_{\text{отр2}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \dot{U}_{\text{пад3}}.$$

Эти сигналы приходят к нагрузкам плеч 1 и 2, и в случае их рассогласования с трактом образуются падающие волны, которые распространяются со стороны нагрузок к плечам 1 и 2. Учитывая принятые обозначения для падающей и отраженной волн (см. рис. 3.2), отраженные от нагрузок волны можно представить в виде напряжений

$$\begin{aligned}\dot{U}_{\text{пад1}} &= \dot{U}_{\text{отр1}} \dot{\Gamma}_{\text{H1}} = \dot{\Gamma}_{\text{H1}} \frac{1}{\sqrt{2}} \dot{U}_{\text{пад3}}, \\ \dot{U}_{\text{пад2}} &= \dot{U}_{\text{отр2}} \dot{\Gamma}_{\text{H2}} = \dot{\Gamma}_{\text{H2}} \frac{1}{\sqrt{2}} \dot{U}_{\text{пад3}},\end{aligned}\quad (\text{B.2})$$

где $\dot{\Gamma}_{\text{H1}}$ и $\dot{\Gamma}_{\text{H2}}$ — комплексные коэффициенты отражения от нагрузок в плечах тройника.

Подставив (B.2) в (B.1), получим выражения для волн напряжений, выходящих из плеч нагруженного тройника:

$$\begin{cases} \dot{U}_{\text{отр1}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \dot{U}_{\text{пад3}} \left(\frac{\dot{\Gamma}_{\text{H2}}}{\sqrt{2}} + 1 \right); \\ \dot{U}_{\text{отр2}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \dot{U}_{\text{пад3}} \left(\frac{\dot{\Gamma}_{\text{H1}}}{\sqrt{2}} + 1 \right); \\ \dot{U}_{\text{отр3}} = \frac{\dot{U}_{\text{пад3}}}{2} (\dot{\Gamma}_{\text{H1}} + \dot{\Gamma}_{\text{H2}}). \end{cases} \quad (\text{B.3})$$

Проанализируем режим работы данной цепи.

Из (B.3) определим значение коэффициента отражения на входе плеча 3

$$S_{33} = \frac{\dot{U}_{\text{отр3}}}{\dot{U}_{\text{пад3}}} = \frac{1}{2} (\dot{\Gamma}_{\text{H1}} + \dot{\Gamma}_{\text{H2}}), \quad (\text{B.4})$$

а также коэффициенты передачи из плеча 3 в плечи 1 и 2 тройника:

$$\begin{cases} S_{13} = \frac{\dot{U}_{\text{отр1}}}{\dot{U}_{\text{пад3}}} = \frac{\dot{\Gamma}_{\text{H2}}}{2} + \frac{1}{\sqrt{2}}, \\ S_{23} = \frac{\dot{U}_{\text{отр2}}}{\dot{U}_{\text{пад3}}} = \frac{\dot{\Gamma}_{\text{H1}}}{2} + \frac{1}{\sqrt{2}}. \end{cases} \quad (\text{B.5})$$

КСВ на входе 3 тройника найдем по формуле

$$K_{\text{CTU}} = \frac{1 + |S_{33}|}{1 - |S_{33}|}. \quad (\text{B.6})$$

Коэффициенты передачи из плеча 2 в плечо 1 с учетом несогласованных

нагрузок определяется следующим образом. Полагаем, что сигнал подается в плечо 2, то есть $\dot{U}_{\text{пад}2} \neq 0$.

По аналогии с выводом формул (В.5) получим формулу для коэффициента передачи S_{12}

$$S_{12} = \frac{\dot{U}_{\text{отр}1}}{\dot{U}_{\text{пад}2}} = \frac{\dot{\Gamma}_{\text{Н}3}}{2} + \frac{1}{\sqrt{2}}. \quad (\text{В.7})$$

Развязку между плечами рассчитаем с помощью выражений:

$$A_{13} = -10 \lg \frac{1}{|S_{13}|^2}, \quad A_{23} = -10 \lg \frac{1}{|S_{23}|^2}.$$

На основании полученных формул проведем расчеты и составим матрицу характеристик волноводного H -тройника в данной цепи.

Представим значения коэффициентов отражения в нагрузках в виде

$$\Gamma_{\text{Н}1} = 0,098 - j0,022; \quad \Gamma_{\text{Н}2} = 0,098 - j0,022.$$

Тогда согласно (В.4)

$$S_{33} = 0,098 - j0,022 = 0,1e^{-j0,22}.$$

Из (В.5) определим коэффициенты передачи S_{13} и S_{23}

$$S_{13} = 0,049 - j0,011 + 0,707 = 0,756e^{-j0,015};$$

$$S_{23} = 0,049 - j0,011 + 0,707 = 0,756e^{-j0,015}.$$

Из (В.7) определим коэффициент передачи S_{12}

$$S_{12} = 0,049 - j0,011 + 0,707 = 0,756e^{-j0,015}.$$

Результирующая матрица рассеяния шестиполюсника в цепи с заданными нагрузками имеет вид

$$S = \begin{bmatrix} 0,1e^{-j0,22} & 0,756e^{-j0,015} & 0,756e^{-j0,015} \\ 0,756e^{-j0,015} & 0,1e^{-j0,22} & 0,756e^{-j0,015} \\ 0,756e^{-j0,015} & 0,756e^{-j0,015} & 0,1e^{-j0,22} \end{bmatrix}.$$

Рассчитаем значения КСВ на входе 3

$$K_{\text{СТУ}} = \frac{1 + 0,1}{1 - 0,1} = 1,22,$$

а также переходные ослабления:

$$A_{13} = -10 \lg \frac{1}{0,756^2} = -2,43 \text{ дБ}; \quad A_{23} = -10 \lg \frac{1}{0,756^2} = -2,43 \text{ дБ}.$$

При расчетах параметров нагруженного волноводного E -тройника необходимо учитывать, что его матрица рассеяния для случая полного согласования на входах многополюсника имеет вид

$$S = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 0 & -1 & 1 \\ -1 & 0 & -1 \\ 1 & -1 & 0 \end{bmatrix}.$$

При расчетах параметров нагруженного **направленного ответвителя** (см. рис. В.2) необходимо учитывать, что его матрица рассеяния для случая полного согласования на входах многополюсника имеет вид

$$S = \begin{bmatrix} 0 & \pm i\sqrt{1-d^2} & 0 & d \\ \pm i\sqrt{1-d^2} & 0 & d & 0 \\ 0 & d & 0 & \pm i\sqrt{1-d^2} \\ d & 0 & \pm i\sqrt{1-d^2} & 0 \end{bmatrix},$$

где $S_{14} = S_{41} = S_{23} = S_{32} = d$.

Возможны два варианта включения направленного ответвителя:

— сонаправленный (рис. В.2, а), когда подаваемая на вход 1 мощность распределяется поровну между входами 2 и 4; на вход 3 подключается согласованная нагрузка (СН);

— противонаправленный (рис. В.2, б), когда подаваемая на вход 1 мощность распределяется поровну между входами 2 и 3; на вход 4 подключается согласованная нагрузка (СН).

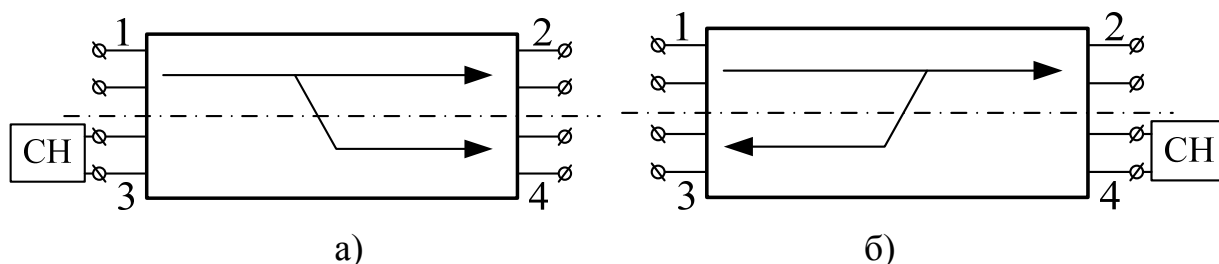


Рис. В.2 — Схемы сонаправленного (а) и противонаправленного (б) ответвителей

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

ПРИНЦИПЫ ДЕЙСТВИЯ ФЕРРИТОВЫХ УСТРОЙСТВ СВЧ

В технике СВЧ широкое применение находят устройства, в которых используются ферриты, помещенные в постоянное подмагничивающее поле: резонансный ферритовый вентиль, ферритовый вентиль на смещении поля, ферритовый Y -циркулятор, ферритовый циркулятор на основе эффекта Фарадея и др.

Феррит обладает одновременно магнитными свойствами ферромагнетика и электрическими диэлектрика (диэлектрическая проницаемость $\epsilon_r = 5 \dots 20$, тангенс угла потерь $\operatorname{tg} \delta = 10^{-4} \dots 10^{-3}$, удельная проводимость $\sigma = (10^{-4} \dots 10^{-6})$ сим/м). При отсутствии постоянного магнитного поля начальная магнитная проницаемость μ_r практически равна единице. У ферритов, подмагниченных постоянным магнитным полем, относительная магнитная проницаемость является кососимметричным тензором второго ранга, то есть описывается девятью скалярными величинами:

$$\underline{\underline{\mu}} = \begin{bmatrix} \mu & -j\nu & 0 \\ j\nu & \mu & 0 \\ 0 & 0 & \mu_z \end{bmatrix},$$

где μ , ν и μ_z — скалярные величины, определяющие значение относительной магнитной проницаемости феррита.

Величины μ , ν и μ_z являются комплексными: $\mu = \mu' - j\mu''$, $\nu = \nu' - j\nu''$, $\mu_z = \mu_z' - j\mu_z''$. Действительные составляющие компонент тензора магнитной проницаемости определяют фазовую скорость распространения электромагнитной волны, а мнимые — магнитное поле в феррите. Выражения для компонент $\underline{\underline{\mu}}$ приведены в [6].

Реакция намагниченного феррита на электромагнитное поле СВЧ существенно зависит от соотношения между направлением распространения электромагнитной волны в феррите и направления подмагничивающего поля. При поперечном подмагничивании направление вектора H подмагничивающего поля перпендикулярно направлению распространения волны, а при продольном подмагничивании эти направления совпадают. И в том и в другом случаях магнитная проницаемость феррита может быть выражена через эффективные скалярные относительные магнитные проницаемости: μ_z и $\mu_{\perp} = (\mu^2 - \nu^2)/\mu$ — при поперечном подмагничивании и $\mu_+ = \mu - \nu$ и $\mu_- = \mu + \nu$ — при продольном подмагничивании.

В безграничной ферритовой среде при поперечном подмагничивании электромагнитный процесс может быть описан двумя линейно поляризованными волнами:

— обыкновенной, для которой вектор напряженности СВЧ магнитного поля поляризован в направлении, совпадающем с направлением

подмагничивающего поля и эффективная магнитная проницаемость феррита равна μ_z ;

— необыкновенной, у которой вектор напряженности СВЧ магнитного поля поляризован в плоскости перпендикулярной к направлению подмагничивающего поля и эффективная магнитная проницаемость — μ .

Эти волны имеют разные скорости распространения. Между ними возникает фазовый сдвиг, что приводит к изменению поляризации электромагнитного поля на пути распространения волны от линейной до круговой и наоборот. Это явление называется двойным лучепреломлением или эффектом Коттона-Мутона. В развязывающих приборах (вентильях, Y-циркуляторах) используется только необыкновенная волна.

При продольном подмагничивании электромагнитный процесс в феррите может быть описан двумя волнами с круговой поляризацией разного направления: «+» (правополяризованной) и «-» (левополяризованной), для которых феррит имеет эффективные магнитные проницаемости μ_+ и μ_- , соответственно. У правополяризованной волны вектор магнитного поля вращается по часовой стрелке для наблюдателя, смотрящего по направлению подмагничивающего поля, а у левополяризованной волны оно имеет противоположное направление. Скорости распространения этих волн разные, поэтому между ними возникает фазовый сдвиг. Направление вращения плоскости поляризации определяется только направлением подмагничивающего поля и не зависит от направления распространения электромагнитной волны. Это невзаимное явление называется эффектом Фарадея.

В [6] показано, что величина вещественной части эффективной магнитной проницаемости $\mu_{\perp}$ определяется из формулы

$$\mu'_{\perp} = \frac{2\mu'_+ \mu'_-}{\mu'_+ + \mu'_-}.$$

Таким образом, необыкновенная волна может быть представлена суперпозицией двух волн с круговой поляризацией вектора СВЧ магнитного поля. В данном случае направление распространения волны лежит в плоскости, перпендикулярной направлению подмагничивающего поля.

В большинстве СВЧ ферритовых устройств используются прямоугольные волноводы с волной типа H_{10} . В целом эта волна линейно поляризованная. Однако существуют две продольные плоскости, параллельные узкой стенке, где магнитное поле имеет чисто круговую поляризацию. Направления вращения векторов СВЧ магнитного поля в этих плоскостях взаимно противоположны и меняются на обратные при изменении направления распространения СВЧ энергии в волноводе. В произвольных продольных сечениях волновода СВЧ магнитное поле имеет эллиптическую поляризацию.

Так, при конструировании волноводных резонансных вентилей ферритовые вкладыши, имеющие обычно форму пластин, размещаются вдоль волновода так, чтобы ось симметрии их поперечного сечения лежала в одной из

плоскостей с круговой поляризацией СВЧ магнитного поля. В длинноволновой части сантиметрового и в дециметровом диапазонах длин волн применяют волноводные резонансные вентили с ферритовыми вкладышами, расположенными в плоскости H . Для них требуется высокое значение внешнего подмагничивающего поля. Это позволяет избежать взаимных потерь в области «слабых полей» в режиме, когда намагниченность феррита не достигает насыщения.

В сантиметровом диапазоне длин волн применяют волноводные вентили со смещением поля (рис. Е.1).

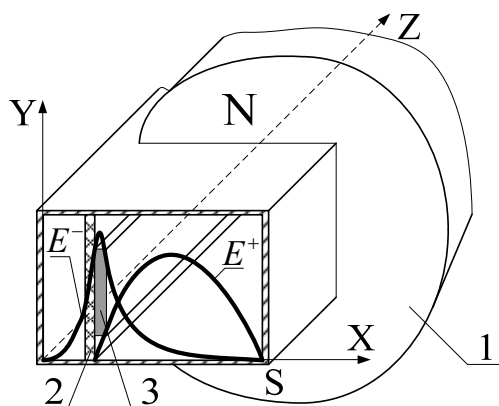


Рис. Е.1 — К пояснению принципа действия вентили на смещении поля

Они содержат: постоянный магнит 1, создающий поперечное подмагничивающее поле; ферритовый вкладыш 2; резистивная пленка 3.

Если ферритовый вкладыш намагничен поперечным постоянным магнитным полем так, что вещественная часть величины эффективной магнитной проницаемости $\mu'_\perp$ становится отрицательной, одна из распространяющихся волн («обратная», обозначенная на рис. Е.1 как E^-) приобретает характер поверхностной волны. Такая волна распространяется вдоль поверхности вкладыша и имеет максимальную амплитуду напряженности электрического поля на границе раздела феррит — незаполненный волновод. По мере удаления от этой границы амплитуда поля уменьшается экспоненциально. Волна противоположного направления («прямая», обозначенная на рис. Е.1 как E^+) не является поверхностной, изменение амплитуды напряженности поля в поперечном сечении имеет гармонический характер и она по структуре отличается от основного типа волны H_{10} и имеет вид, как показано на рис. Е.1.

Если нанести на правую (по рис. Е.1) поверхность ферритового вкладыша тонкую резистивную пленку, то «обратная» волна будет поглощаться значительно сильнее, чем «прямая», которая имеет в месте размещения поглощающей пленки малую (близкую к нулю) амплитуду поля.

С изменением напряженности постоянного магнитного поля будут изменяться свойства ферритовой пластинки, что сказывается на характеристиках вентили. В табл. Е.1 приведены значения основных

параметров вентилей: прямого $L_{\text{пр}}$ и обратного $L_{\text{обр}}$ затуханий и собственного $K_{\text{СВ}}$, а также для сравнения указаны величины напряженности постоянного подмагничивающего поля H_0 .

Таблица Е.1 — Основные параметры ферритовых вентилей

Тип вентилей	$L_{\text{пр}}$, дБ	$L_{\text{обр}}$, дБ	$K_{\text{СТУ}}$	H_0 , А/м
Резонансный	0,1...1,0	25	1,05	$198,9 \cdot 10^3 \dots$ $222,8 \cdot 10^3$
На смещении поля	0,5...1,0	20...25	1,1...1,2	$23,87 \cdot 10^3 \dots 39,8 \cdot 10^3$
На эффекте Фарадея	0,5...1,0	20	1,25	$796 \dots 1,194 \cdot 10^3$

Трехплечие циркуляторы. Кроме вентилей, в технике СВЧ применяются циркуляторы (рис. Е.2), которые позволяют обеспечить развязку каналов и согласование СВЧ устройств. Циркулятор представляет собой торцевое соединение трех или четырех полосковых линий или волноводов в H -плоскости под углом 120° или 90° . В центре соединения устанавливается ферритовый диск, находящийся в постоянном поле магнита. Наиболее простым в конструктивном исполнении является циркулятор, в котором феррит окружен диэлектрической втулкой (рис. Е.2, а). Конструкция циркулятора для работы при повышенной импульсной мощности отличается тем, что в нем используются два ферритовых диска, размещенных на одной оси с небольшим зазором между дисками (см. рис. Е.2, б). Для обеспечения согласования на входах циркулятора в широком диапазоне частот применяются диэлектрические штыри, размещаемые относительно ферритового диска как показано на рис. Е.2, в.

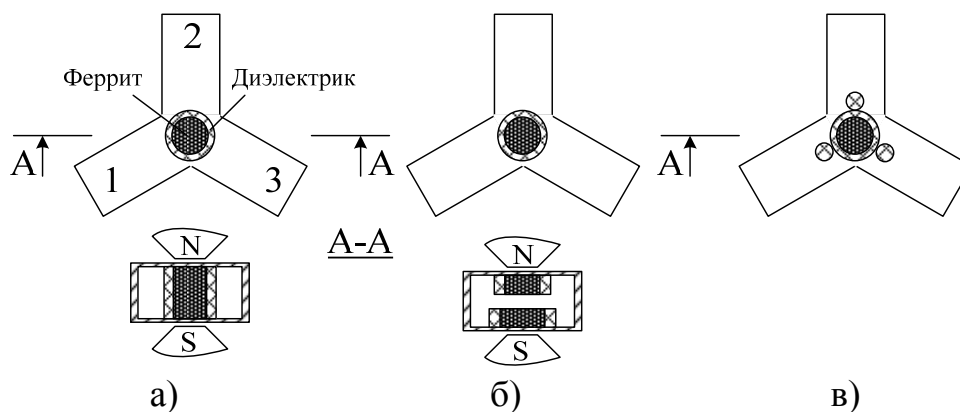


Рис. Е.2 — Варианты конструкции трехплечих Y-циркуляторов

Действие циркулятора можно объяснить следующим образом. Волна типа H_{10} , поступающая в плечо 1, дифрагирует на ферритовом цилиндрическом

вкладыше и возбуждает равные по амплитуде поверхностные волны, огибающие феррит в противоположных направлениях. Взаимодействие этих поверхностных волн с намагниченным ферритом характеризуется различными значениями магнитной проницаемости. При этом фазовые скорости поверхностных волн оказываются различными. Подбирая диаметр ферритового цилиндра и величину намагничивающего поля H_0 , можно при сложении поверхностных волн получить пучность напряженности электрического поля в центре плеча 2, а узел напряженности электрического поля в центре плеча 3. При этом энергия из плеча 1 поступит в плечо 2 и не поступит в плечо 3. Если энергия подается со стороны плеча 2, то она передается в плечо 3 и не поступает в плечо 1. При подаче энергии в плечо 3 она передается в плечо 1 и не поступает в плечо 2. В реальных конструкциях циркуляторов имеет место просачивание мощности из плеча 1 в плечо 3 и т.д. Поэтому для характеристики циркуляторов применяются такие параметры, как развязка между плечами $L_{обр}$ и прямые потери $L_{пр}$.

Y-циркуляторы чувствительны к колебаниям окружающей температуры, величине магнитного поля, размерам ферритов и т.д. Для устранения этого феррит помещают в диэлектрическую втулку, которая может являться своеобразным элементом настройки циркулятора, так как подбором ее диаметра можно регулировать ширину рабочей полосы.

Для примера характеристики некоторых циркуляторов представлены в табл. Е.2.

Таблица Е.2 — Характеристики некоторых Y-циркуляторов

Тип	Размер поперечного сечения волновода, мм	Относительная полоса рабочих частот, %	Параметры			
			$L_{обр}$, дБ	$L_{пр}$, дБ	$K_{СТУ}$	P_{max} , Вт
ЗЦВ-103В	23х5	12	≥ 20	$\leq 0,5$	$\leq 1,2$	10
ЗЦВ-108	23х10	9	≥ 20	$\leq 0,5$	$\leq 1,2$	10

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

Министерство образования и науки, молодежи и спорта Украины
Севастопольский национальный технический университет

Факультет радиоэлектроники
Кафедра радиотехники и телекоммуникаций

ОТЧЕТ ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ
«ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ВОЛНОВОДНОГО ТРАКТА»
по дисциплине «Устройства СВЧ и антенны»

Выполнил студент _____
фамилия и инициалы

Группа _____

Отчет защищён с оценкой _____

Преподаватель _____

Севастополь
20__ г.

Заказ № 196 от 03.07.2012 г. Тираж 25 экз.

Изд-во СевНТУ.