

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования Национальный исследовательский Саратовский
государственный университет имени Н.Г. Чернышевского

Факультет нано- и биомедицинских технологий

Кафедра физики полупроводников

**И.В. Хайрушев, Р.А. Щипцов, А.И. Михайлов, В.А. Кильдишева, И.С.
Великанов, Б.В. Сергеева, Н.В. Короневский**

**«ИЗМЕРЕНИЕ ОСЛАБЛЕНИЯ И КОЭФФИЦИЕНТА СТОЯЧЕЙ
ВОЛНЫ ПО НАПРЯЖЕНИЮ ЖИДКИХ ДИЭЛЕКТРИКОВ В СВЧ
ДИАПАЗОНЕ»**

Учебное пособие для студентов факультета нано- и биомедицинских
технологий, обучающихся по направлению «Электроника и
наноэлектроника»

Лабораторная работа

Саратов 2020

И.В. Хайрушев, Р.А. Щипцов, А.И. Михайлов, В.А. Кильдишева, И.С. Великанов, Б.В. Сергеева, Н.В. Короневский «ИЗМЕРЕНИЕ ОСЛАБЛЕНИЯ И КОЭФФИЦИЕНТА СТОЯЧЕЙ ВОЛНЫ ПО НАПРЯЖЕНИЮ ЖИДКИХ ДИЭЛЕКТРИКОВ В СВЧ ДИАПАЗОНЕ»:

Учеб. пособие для студентов факультета
нано- и биомедицинских технологий, обучающихся по направлению
«Электроника и наноэлектроника» – Саратов, 2020. –24 с.: ил.
Электронное издание.

Представлены лабораторная работа, демонстрирующая возможность измерений в СВЧ-диапазоне. Для выполнения лабораторной работы студентам предлагается краткое теоретическое описание, алгоритмы расчета искомых физических величин и техническое описание процедуры работы с измерительным оборудованием.

Для студентов университета, обучающихся по направлению 11.04.04 «Электроника и наноэлектроника», магистерская программа «Полупроводниковая электроника и молекулярные нанотехнологии», а также научных сотрудников, аспирантов, инженеров, интересующихся современными аспектами практических измерений в СВЧ-диапазоне.

Рекомендует к печати:
Кафедра физики полупроводников
Саратовского государственного университета

© И.В. Хайрушев, Р.А. Щипцов, А.И. Михайлов и др.

Целью работы является изучение измерителя КСВН панорамного Р2-61, принципов калибровки прибора в режиме КСВН и ослабления, исследование частотных зависимостей КСВН и ослабления различных водных растворов.

Оборудование: измеритель КСВН панорамный Р2-61.

Измеритель КСВН панорамный Р2-61



Измеритель КСВН панорамный Р2-61 предназначен для измерения и воспроизведения на экране электронно-лучевой трубки (ЭЛТ) частотных характеристик коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН, в формулах – K_{cmU}) и ослабления элементов волноводных каналов.

Измеритель может применяться в лабораторных и цеховых условиях, а также в ремонтных мастерских и поверочных органах.

Рабочие условия эксплуатации измерителя:

- окружающая температура от 278 до 313 К (от 5 до 40°C);
- относительная влажность 95% при температуре 303 К (30°C);
- пониженное атмосферное давление 62 кПа;
- напряжение сети 220 ± 22 В частотой $50 \pm 0,5$ Гц;

Предельные условия в нерабочем состоянии измерителя:

- минимальная температура 223 К (– 50°C);
- максимальная температура 333 К (+ 60°C).

Технические данные:

- Диапазон рабочих частот измерителя: от 8,24 до 12,05 ГГц.
- Сечение волноводного тракта 23×10 мм.
- Пределы измерения КСВН и ослабления соответствуют, а допустимые погрешности измерения КСВН (δK_{cmU}) и ослабления (ΔA) пассивных четырехполосников с $K_{cmU} \leq 1,2$ не превышает значений, приведенных в *Таблице 1*.

Примечание. Неравномерность уровня калибровки при измерениях и при определении погрешности измерения КСВН и ослабления должна быть не более $\pm 0,3$ дБ.

Таблица 1

Диапазон измерения	КСВН			1,05÷5,00
	ослабления, дБ			0÷35
Пределы допустимой погрешности измерения	δK_{cmU} , %	на фиксированной частоте	$K_{cmU} \leq 2,0$	$\pm 4K_{cmU}$
			$K_{cmU} 2,0 \div 5,0$	$\frac{\pm 4K_{cmU}}{100 - (\pm 4K_{cmU}) \frac{K_{cmU}}{K_{cmU} + 1}} 100$
		в диапазоне частот	$K_{cmU} \leq 2,0$	$\pm 5K_{cmU}$
			$K_{cmU} 2,0 \div 5,0$	$\frac{\pm 5K_{cmU}}{100 - (\pm 5K_{cmU}) \frac{K_{cmU}}{K_{cmU} + 1}} 100$
	ΔA , дБ	на фиксированной частоте	$\pm (0,05A_X + 0,3)$	
		в диапазоне частот	$\pm (0,05A_X + 0,3)$	

Теоретическая часть

Элементы теории поля

В диапазоне СВЧ строгое описание физических явлений и структуры электромагнитного поля в измерительных трактах и измеряемых устройствах сводится к уравнениям Максвелла или вытекающим из них волновым уравнениям при заданных координатах, параметрах границ рассматриваемой области (граничных условиях) и параметрах среды, заполняющей эту область.

Уравнения Максвелла

Максвелл сформулировал два основных уравнения электродинамики путем обобщения экспериментальных законов полного тока и индукции. Он предположил, что изменяющееся во времени электрическое поле \vec{E} , например, поле между обкладками конденсатора, способно, подобно току проводимости, создавать магнитное поле \vec{H} . Для качественной оценки этого эффекта Максвеллом введено понятие плотности тока смещения \vec{J}_{cm} , которая определяется из следующего уравнения:

$$\vec{J}_{cm} = \partial \vec{D} / \partial t = \varepsilon_0 \partial \vec{E} / \partial t + \partial \vec{P} / \partial t = \varepsilon_a \partial \vec{E} / \partial t, \quad (1)$$

где \vec{D} – индукция электрического поля; \vec{P} – поляризуемость среды.

Плотность тока смещения \vec{J}_{cm} в (1) состоит из двух составляющих: первая ($\varepsilon_0 \partial \vec{E} / \partial t$) соответствует только изменению электрического поля \vec{E} (ток смещения в вакууме); вторая ($\partial \vec{P} / \partial t$) обуславливается движением связанных

в атомах зарядов в результате их поляризации переменным током (поляризационный ток).

Таким образом, рассматривая среду, в которой может распространяться электромагнитная энергия, Максвелл пришел к выводу, что плотность полного тока, создаваемого переменным электрическим полем, в этой среде должна включать в себя как плотность тока проводимости \mathcal{J}_{np} , так и плотность тока смещения $\mathcal{J}_{см}$: $\mathcal{J} = \mathcal{J}_{np} + \mathcal{J}_{см}$.

Обобщая закон полного тока и используя сделанный вывод, Максвелл сформулировал свое первое уравнение, которое для гармонических колебаний имеет следующий вид:

$$\text{rot} \mathcal{H} = \mathcal{J}_{np} + \mathcal{J}_{см} = \sigma \mathcal{E} + i\omega \varepsilon_a \mathcal{E} = i\omega \varepsilon_{ка} \mathcal{E} \quad (2)$$

или в декартовой системе координат:

$$\begin{aligned} \partial H_z / \partial y + \gamma_1 H_y &= i\omega \varepsilon_{ка} E_x \\ -\gamma_1 H_x - \partial H_z / \partial x &= i\omega \varepsilon_{ка} E_y, \\ \partial H_y / \partial x - \partial H_x / \partial y &= i\omega \varepsilon_{ка} E_z \end{aligned} \quad (3)$$

где $\varepsilon_{ка} = \varepsilon_a - i\sigma/\omega$ – комплексная диэлектрическая проницаемость среды; ε_a – абсолютная диэлектрическая проницаемость; σ – объемная удельная проводимость среды; γ_1 – коэффициент распространения.

Первое уравнение Максвелла утверждает: если в некоторой точке пространства существует переменное электрическое поле, создающее токи проводимости и смещения, то в окрестности этой точки возникает переменное вихревое магнитное поле, создаваемое этими токами. Электрическое и создаваемое им магнитное поля образуют правовинтовую систему (Рис. 1).

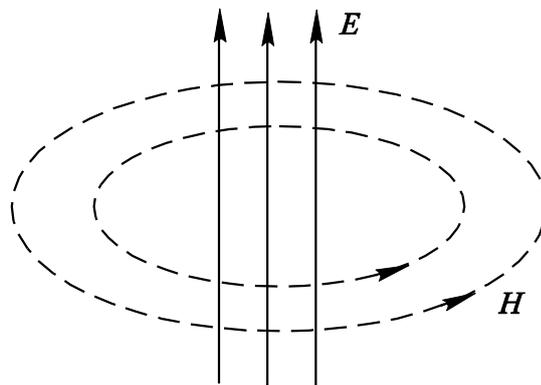


Рис. 1

Обобщая закон индукции, Максвелл предположил, что всякое изменение магнитного поля во времени вызывает (независимо от параметров среды) появление электрического поля, и сформулировал второе уравнение, которое для гармонических колебаний записывается в следующем виде:

$$\text{rot} \mathcal{E} = -\partial \mathcal{B} / \partial t = -i\omega \mu_a \mathcal{H}, \quad (4)$$

или в декартовой системе координат:

$$\begin{aligned}
\partial E_z / \partial y + \gamma_1 E_y &= -i\omega \mu_a H_x \\
-\gamma_1 E_x - \partial E_z / \partial x &= -i\omega \mu_a H_y, \\
\partial E_y / \partial x - \partial E_x / \partial y &= -i\omega \mu_a H_z
\end{aligned}
\tag{5}$$

где \vec{B} – индукция магнитного поля; μ_0 – абсолютная магнитная проницаемость; \vec{H} – напряженность магнитного поля.

Второе уравнение Максвелла утверждает: если в некоторой точке пространства существует переменное магнитное поле, то в окрестности этой точки возникает переменное вихревое электрическое поле. Магнитное и создаваемое им электрическое поля образуют левовинтовую систему (Рис. 2).

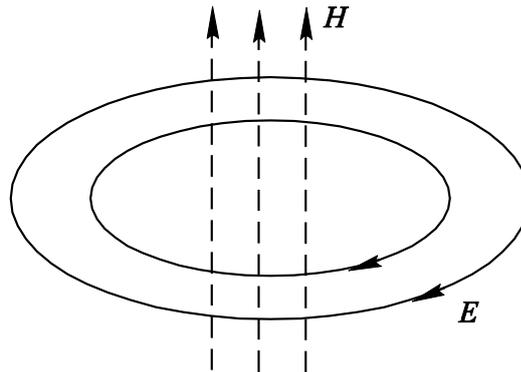


Рис. 2

Следует отметить, что гармоническое электрическое поле может быть вихревым и потенциальным или представлять собой суперпозицию потенциального и вихревого полей, в то время как магнитное поле может быть только вихревым.

Уравнения Максвелла позволяют сделать вывод о тесной связи электрической и магнитной составляющих в переменном электромагнитном поле. Эта взаимосвязь выражается в том, что созданное сторонними источниками меняющееся во времени электромагнитное поле может существовать вне этого источника за счет собственной энергии путем преобразования энергии электрического поля в энергию магнитного поля и обратно.

Описание и определение характеристик электромагнитного поля непосредственно с помощью уравнений Максвелла затруднительно, поэтому уравнения (2) и (4) преобразуются к виду:

$$\nabla^2 \vec{H} + k^2 \vec{H} = 0 \tag{6}$$

$$\nabla^2 \vec{E} + k^2 \vec{E} = 0, \tag{7}$$

где k – волновое число.

Уравнения (6) и (7) известны как однородные волновые уравнения, описывающие распространение волн в пространстве и доказывающие волновой характер распространения электрических и магнитных полей.

Материальные уравнения

Они характеризуют влияние среды на протекающие в ней электромаг-

нитные процессы:

$$\begin{aligned} \vec{D} &= \varepsilon_a \vec{E} = \varepsilon_0 \varepsilon \vec{E} \\ \vec{H} &= \vec{B} / \mu_a = \vec{B} / (\mu_0 \mu), \\ \vec{J}_{np} &= \sigma \vec{E} \end{aligned}$$

где $\varepsilon_0 = 8,86 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная (диэлектрическая проницаемость вакуума); $\varepsilon = \varepsilon_a / \varepsilon_0$ – относительная диэлектрическая проницаемость; $\mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-6}$ Гн/м – магнитная постоянная (магнитная проницаемость вакуума); $\mu = \mu_a / \mu_0$ – относительная магнитная проницаемость.

Граничные условия

Они определяют связь между значениями векторов электромагнитного поля у поверхности раздела двух различных сред. В случае гармонических колебаний можно ограничиться соотношениями, определяющими связь между комплексными амплитудами тангенциальных составляющих векторов напряженности электрического \vec{E}_τ и магнитного \vec{H}_τ полей. Граничные условия у поверхности раздела двух диэлектриков

$$\vec{E}_{1\tau} = \vec{E}_{2\tau}, \quad \vec{H}_{1\tau} = \vec{H}_{2\tau}, \quad (8)$$

а на границе диэлектрик – проводник (поле в проводнике пренебрежимо мало)

$$\vec{E}_{0\tau} = 0; \quad \vec{H}_{1\tau} = \vec{J}_s, \quad (9)$$

где \vec{J}_s – поверхностная плотность тока.

Тангенциальные составляющие векторов напряженности электрического и магнитного полей на границе раздела двух диэлектрических сред непрерывны. На поверхности идеального проводника тангенциальная составляющая вектора напряженности электрического поля $\vec{E}_{1\tau}$ равна нулю, а тангенциальная составляющая вектора напряженности магнитного поля $\vec{H}_{1\tau}$ по величине равна плотности поверхностного тока и направлена перпендикулярно направлению \vec{J}_s .

Основные характеристики электромагнитных волн в измерительных трактах и устройствах

Рассмотрим основные характеристики направляемых электромагнитных волн, возбуждаемых в линиях передачи, составляющих основу измерительных трактов и многих конструкций СВЧ устройств.

Структура электромагнитного поля – графическое представление формы, направления и распределения силовых линий электрической и магнитной составляющих поля в каком-либо СВЧ устройстве для некоторого момента времени ($t = \text{const}$). Знание структуры электромагнитного поля позволяет наиболее полно понять физические процессы, протекающие в СВЧ устройствах, а также достоверно и точно определять их основные характеристики. Особенностью направляемых волн является то, что в направлении распространения (вдоль оси z) составляющие полей меняются по закону

$$E_z(x, y, z) = E_z(x, y)e^{-\gamma_1 z}; H_z(x, y, z) = H_z(x, y)e^{-\gamma_1 z}. \quad (10)$$

Уравнения (10) описывают бегущую волну, т.е. электромагнитную волну, распространяющуюся в линии передачи в одном направлении (в сторону положительных значений оси z). Бегущую волну, распространяющуюся от генератора к нагрузке, называют падающей, в отличие от отраженной, распространяющейся в обратном направлении.

Определение структуры электромагнитных волн обычно начинается с решения волновых уравнений (6) и (7) для составляющих поля, направленных вдоль оси распространения. В декартовой системе координат это решение имеет вид:

$$E_z(x, y, z) = [E_1 \sin(\gamma_{2x}x) + E_2 \cos(\gamma_{2x}x)][E_3 \sin(\gamma_{2y}y) + E_4 \cos(\gamma_{2y}y)]e^{-\gamma_1 z} \quad (11)$$

$$H_z(x, y, z) = [H_1 \sin(\gamma_{2x}x) + H_2 \cos(\gamma_{2x}x)][H_3 \sin(\gamma_{2y}y) + H_4 \cos(\gamma_{2y}y)]e^{-\gamma_1 z}. \quad (12)$$

Используя уравнения Максвелла, записанные в декартовой системе координат (3) и (5) через E_z и H_z можно определить и поперечные составляющие поля:

$$E_x = (-i/\gamma_2^2)(\omega\mu_a\partial H_z/\partial y + \gamma_1\partial E_z/\partial x) \quad (13)$$

$$E_y = (i/\gamma_2^2)(\omega\mu_a\partial H_z/\partial x - \gamma_1\partial E_z/\partial y) \quad (14)$$

$$H_x = (i/\gamma_2^2)(\omega\varepsilon_a\partial E_z/\partial y - \gamma_1\partial H_z/\partial x) \quad (15)$$

$$H_y = (-i/\gamma_2^2)(\omega\varepsilon_a\partial E_z/\partial x + \gamma_1\partial H_z/\partial y), \quad (16)$$

$$\text{где } \gamma_2 = \sqrt{\gamma_1^2 + k^2} = \sqrt{\gamma_{2x}^2 + \gamma_{2y}^2} \quad (17)$$

– поперечный коэффициент распространения;

$$k = \omega\sqrt{\mu_a\varepsilon_{ka}} \quad (18)$$

– волновое число; γ_{2x} и γ_{2y} – поперечные волновые числа; $E_1, E_2, E_3, E_4, H_1, H_2, H_3, H_4$ – постоянные электромагнитного поля, определяемые с помощью граничных и начальных условий.

Из решения волновых уравнений (11) – (16) следует, что в плоскости поперечного сечения линии передачи составляющие электромагнитного поля изменяются по синусоидальным и косинусоидальным законам.

Постоянные γ_{2x} и γ_{2y} определяют изменение (вариации) поля в плоскости поперечного сечения. Каждой соответствует своя структура поля направляемых волн, свой тип волны. Многообразие типов волн в линиях передачи (большое количество значений $\gamma_2 = \sqrt{\gamma_{2x}^2 + \gamma_{2y}^2}$) можно свести к четырем основным типам: поперечные электромагнитные T -волны, электрические E -волны, магнитные H -волны, гибридные (смешанные) EH - и HE -волны.

T -волна – электромагнитная волна, векторы напряженности электрического и магнитного полей которой лежат в плоскости, перпендикулярной направлению распространения ($E_z = H_z = 0$).

E -волна – электромагнитная волна, вектор напряженности электриче-

ского поля которой имеет поперечную и продольную составляющие, а вектор напряженности магнитного поля лежит в плоскости, перпендикулярной направлению распространения ($H_z = 0$).

H-волна – электромагнитная волна, вектор напряженности магнитного поля которой имеет поперечную и продольную составляющие, а вектор напряженности электрического поля лежит в плоскости, перпендикулярной направлению распространения ($E_z = 0$).

HE- и *EH-волны* – электромагнитные волны, которые имеют отличные от нуля поперечные и продольные составляющие электрического и магнитного полей.

Коэффициент распространения $\gamma_1 = \alpha + i\beta$ – комплексная величина, определяющая изменение амплитуды и фазы волны при ее распространении вдоль направляющей системы. Поскольку для *T-волн* $E_z = H_z = 0$, то согласно (13) – (16): $\gamma_2 E_x = \gamma_2 E_y = \gamma_2 H_x = \gamma_2 H_y = 0$.

Так как в направляющей системе волны существуют и все поперечные составляющие не могут быть равными нулю, то это означает, что $\gamma_2 = 0$. Таким образом, согласно (17) коэффициент распространения *T-волн* равен волновому числу

$$\gamma_1 = i\omega\sqrt{\varepsilon_{ka}\mu_a}. \quad (19)$$

В случае *E-* и *H-волн* составляющие E_z и H_z не равны нулю. При этом условии γ_2 также не равно нулю и согласно (17) коэффициент распространения этих волн

$$\gamma_1 = \sqrt{\gamma_2^2 - k^2}. \quad (20)$$

Коэффициент затухания α – величина, определяющая уменьшение амплитуды электромагнитной волны при прохождении одного метра пути. Коэффициент затухания измеряется в децибелах на метр (дБ/м) и равен действительной части коэффициента распространения, умноженной на 8,68.

Для большинства диэлектриков, используемых в СВЧ устройствах, характерны малые потери, т.е. малый $tg\delta = \frac{\sigma}{\omega\varepsilon_a}$. Поэтому согласно (19)

$\gamma_1 = i\omega\sqrt{\varepsilon_{ka}\mu_a} = \pi\sqrt{\varepsilon}tg\delta/\lambda_0 + i\omega\sqrt{\varepsilon_a\mu_a}$. Следовательно, коэффициент затухания *T-волны* α_ε в линиях передачи, заполненных диэлектриком,

$$\alpha_\varepsilon = 27,3\sqrt{\varepsilon}tg\delta/\lambda_0 \text{ [дБ/м]}, \quad (21)$$

где индекс ε при α означает, что имеются в виду только потери в диэлектрике.

Коэффициент фазы β – величина, определяющая изменение фазы волны при прохождении одного метра пути. Коэффициент фазы равен мнимой части коэффициента распространения. Для *T-волн*

$$\beta = \omega\sqrt{\varepsilon_a\mu_a} \text{ [рад/м]}. \quad (22)$$

Фазовая скорость v_ϕ – скорость перемещения фронта гармонической волны:

$$v_\phi = \omega / \beta. \quad (23)$$

Групповая скорость v_{gp} – скорость перемещения огибающей сложного сигнала:

$$v_{gp} = \frac{d\omega}{d\beta} = v_\phi - \lambda \left(\frac{dv_\phi}{d\lambda} \right). \quad (24)$$

Длина волны λ – расстояние, пройденное волной за период колебаний

$$\lambda = 2\pi / \beta = v_\phi / f. \quad (25)$$

Критическая длина волны $\lambda_{кр}$ – максимальная длины волны возбуждающих электромагнитных колебаний, способных распространяться в заданной конструкции линии передачи при определенной структуре электромагнитного поля. При рассмотрении $\lambda_{кр}$ в первом приближении можно полагать, что в реальных линиях передачи $\sigma = 0$. Это означает, что для T -волн γ_1 является мнимым числом, и волны этого типа распространяются при любой частоте колебаний. В случае E - и H -волн значение γ_1 зависит от величины γ_2 : $\gamma_2 > k$; γ_1 – вещественное число, и волны в направлении распространения (оси z) сильно затухают; $\gamma_2 < k$; γ_1 – мнимое число, и распространение волн происходит без затухания; $\gamma_2 = k$ γ_1 равно нулю, и в этом случае имеем критический режим.

Таким образом, H - и E -волны в заданной линии передачи при определенной структуре поля могут распространяться лишь на тех частотах, для которых выполняется условие:

$$\gamma_2 \leq \omega \sqrt{\epsilon_a \mu_a} = 2\pi f_{кр} \sqrt{\epsilon_a \mu_a},$$

где $f_{кр}$ – минимальная частота электромагнитных колебаний, способных распространяться в линии передачи с воздушным заполнением. Этой частоте соответствует критическая длина волны

$$\lambda_{кр} = 2\pi / \gamma_2 = 3 \cdot 10^8 / f_{кр}. \quad (26)$$

В той же линии, заполненной диэлектриком с $\epsilon > 1$ и $\mu > 1$, минимальная частота распространяющихся электромагнитных колебаний равна $f'_{кр} = f_{кр} / \sqrt{\mu\epsilon}$ и соответственно $\lambda'_{кр} = \lambda_{кр} \sqrt{\mu\epsilon}$.

Используя понятие критической длины волны $\lambda_{кр}$, можно показать для E - и H -волн:

$$\gamma_1 = \sqrt{\gamma_2^2 - k^2} = \sqrt{(2\pi / \lambda_{кр})^2 - (2\pi / \lambda_0)^2} = ik \sqrt{1 - (\lambda_0 / \lambda'_{кр})^2}, \quad (27)$$

где λ_0 – длина волны электромагнитных колебаний в свободном пространстве.

Из (27) следует, что соотношения для вычисления характеристик E - и H -волн могут быть получены из соответствующих формул для T -волн ум-

ножением их на $\sqrt{1 - (\lambda_0 / \lambda'_{кр})}$.

Формулы для расчета основных характеристик электромагнитных волн в измерительных трактах

Характеристика	<i>T</i> -волна	<i>E</i> - и <i>H</i> -волны
Коэффициент затухания за счет диэлектрических потерь α_ε	$\alpha_\varepsilon = 27,3\sqrt{\varepsilon}tg\delta / \lambda_0$	$\frac{27,3\varepsilon\sqrt{\mu}tg\delta}{\lambda_0\sqrt{\mu\varepsilon - (\lambda_0/\lambda_{кр})^2}}$
Фазовая скорость v_ϕ	$1/\sqrt{\varepsilon_a\mu_a} = 3 \cdot 10^8 / \sqrt{\varepsilon\mu}$	$3 \cdot 10^8 / \sqrt{\varepsilon\mu - (\lambda_0/\lambda_{кр})^2}$
Длина волны λ	$\lambda = 2\pi/\omega\sqrt{\varepsilon_a\mu_a} = \lambda_0/\sqrt{\varepsilon\mu}$	$\lambda_0/\sqrt{\varepsilon\mu - (\lambda_0/\lambda_{кр})^2}$
Групповая скорость $v_{гр}$	$1/\sqrt{\varepsilon_a\mu_a} = 3 \cdot 10^8 / \sqrt{\varepsilon\mu}$	$3 \cdot 10^8 \sqrt{\varepsilon\mu - (\lambda_0/\lambda_{кр})^2} / \varepsilon\mu$
Характеристическое сопротивление $Z_{T,E,H}$	$Z_T = \sqrt{\mu_a/\varepsilon_a} = 377\sqrt{\mu/\varepsilon}$	$Z_H = Z_T / \sqrt{1 - (\lambda_0/\lambda'_{кр})^2}$ $Z_E = Z_T / \sqrt{1 - (\lambda_0/\lambda'_{кр})^2}$

Характеристическое сопротивление – сопротивление поперечных составляющих электрического и магнитного полей бегущей волны.

Используя уравнения Максвелла (3) и (5), можно получить выражения для расчета характеристического сопротивления, которые приведены в таблице.

Относительно свойств, наиболее часто встречающихся в линиях передачи *T*-, *E*- и *H*-волн, необходимо сделать следующие важные замечания:

- в *T*-, *E*- и *H*-волнах поперечные составляющие электромагнитного поля взаимно перпендикулярны и их отношение в любой точке речевого сечения есть величина постоянная, соответственно равная Z_T , Z_H и Z_E ;
- *T*-волны не дисперсионные, а *E*- и *H*-волны обладают дисперсией.

Структура полей *T*-волн в поперечном сечении не зависит от частоты и электромагнитных колебаний и совпадает со структурой поля, создаваемой неподвижными зарядами и постоянными токами.

В свою очередь, это позволяет сделать вывод о том, что в системах, в которых возбуждаются *T*-волны, возможна передача энергии на любой частоте, начиная от постоянного тока. Очевидно, конструкции таких систем должны состоять как минимум из двух проводников.

Характеристическое сопротивление *T*-волн (Z_T) не зависит от частоты, а *E*- и *H*-волн (Z_E и Z_H) обладает частотной зависимостью.

Дисперсионные *E*- и *H*-волны распространяются только на частотах выше критической.

На критической частоте фазовая скорость дисперсионных *E*- и *H*-волн

равна бесконечности, а групповая скорость – нулю.

При значительном увеличении частоты по сравнению с критической фазовая и групповая скорости H - и E -волн приближаются к скорости света в соответствующей среде.

Перечисленные характеристики электромагнитных волн являются предметом экспериментальных исследований и измерений при изучении физических явлений в СВЧ устройствах (измерительные тракты, их узлы и узлы электронных приборов).

Методы теории цепей с распределенными параметрами

Методы теории цепей с распределенными параметрами в ряде практических случаев позволяют значительно упростить задачи теоретических и экспериментальных исследований устройств и приборов СВЧ по сравнению с методами теории электромагнитного поля. Направляющая система представляется как однородная длинная линия. Подобная замена в достаточной мере справедлива для устройств с T -волнами. Однако в ряде практических расчетов, ограниченных рассмотрением только внешних характеристик, теория цепей с распределенными параметрами эффективно применяется и для устройств с E - и H -волнами. Кроме того, в большинстве случаев не обязательно учитывать все детали явлений внутри СВЧ устройств или в их элементах, а достаточно знать лишь ответную реакцию СВЧ устройства на воздействующие сигналы. В однородной длинной линии энергия от генератора к нагрузке передается в виде волн тока и напряжения (электромагнитных волн), распространение которых описывается соотношениями, аналогичными (10):

$$U = U_0 e^{-\gamma_1 z}; I = I_0 e^{-\gamma_1 z}, \quad (28)$$

где U_0 и I_0 – напряжение и ток в начале длинной линии.

Как и в случае электромагнитных волн, коэффициент распространения γ определяет характеристики волн тока и напряжения: α , β , v_ϕ и λ .

Линии передачи, обычно используемые в измерительных трактах, имеют малые потери, и поэтому в нижеприводимых расчетах можно полагать $\gamma_1 = i\beta$ ($\alpha = 0$).

В общем случае, когда в измерительном тракте существуют волны, распространяющиеся от генератора к нагрузке (падающие волны) и от нагрузки к генератору (отраженные волны), передачу энергии от генератора к нагрузке можно описать следующими соотношениями:

$$U = U_{0пад} e^{-i\beta z} + U_{0отп} e^{i\beta z} \text{ или } U = U_{mпад} \cos(\omega t - \beta z) + U_{mотп} \cos(\omega t + \beta z),$$

$$I = I_{0пад} e^{-i\beta z} - I_{0отп} e^{i\beta z} \text{ или } I = I_{mпад} \cos(\omega t - \beta z) - I_{mотп} \cos(\omega t + \beta z),$$

где $U_{mпад}$, $U_{mотп}$, $I_{mпад}$, $I_{mотп}$ – амплитуды падающих и отраженных волн напряжения и тока соответственно.

При коротком замыкании, полном размыкании или нагрузке конца линии на реактивное (не поглощающее энергию) сопротивление амплитуды падающих и отраженных волн равны:

$$U_{\text{наод}} = U_{\text{омп}} = U_m, \quad I_{\text{наод}} = I_{\text{омп}} = I_m.$$

В результате интерференции этих волн образуется стоячая волна напряжения и тока, описываемая уравнениями:

$$U = U_m [\cos(\omega t - \beta z) + \cos(\omega t + \beta z)] = 2U_m \cos(\omega t) \cos(\beta z) \quad (29)$$

$$I = I_m [\sin(\omega t - \beta z) + \sin(\omega t + \beta z)] = 2I_m \sin(\omega t) \sin(\beta z). \quad (30)$$

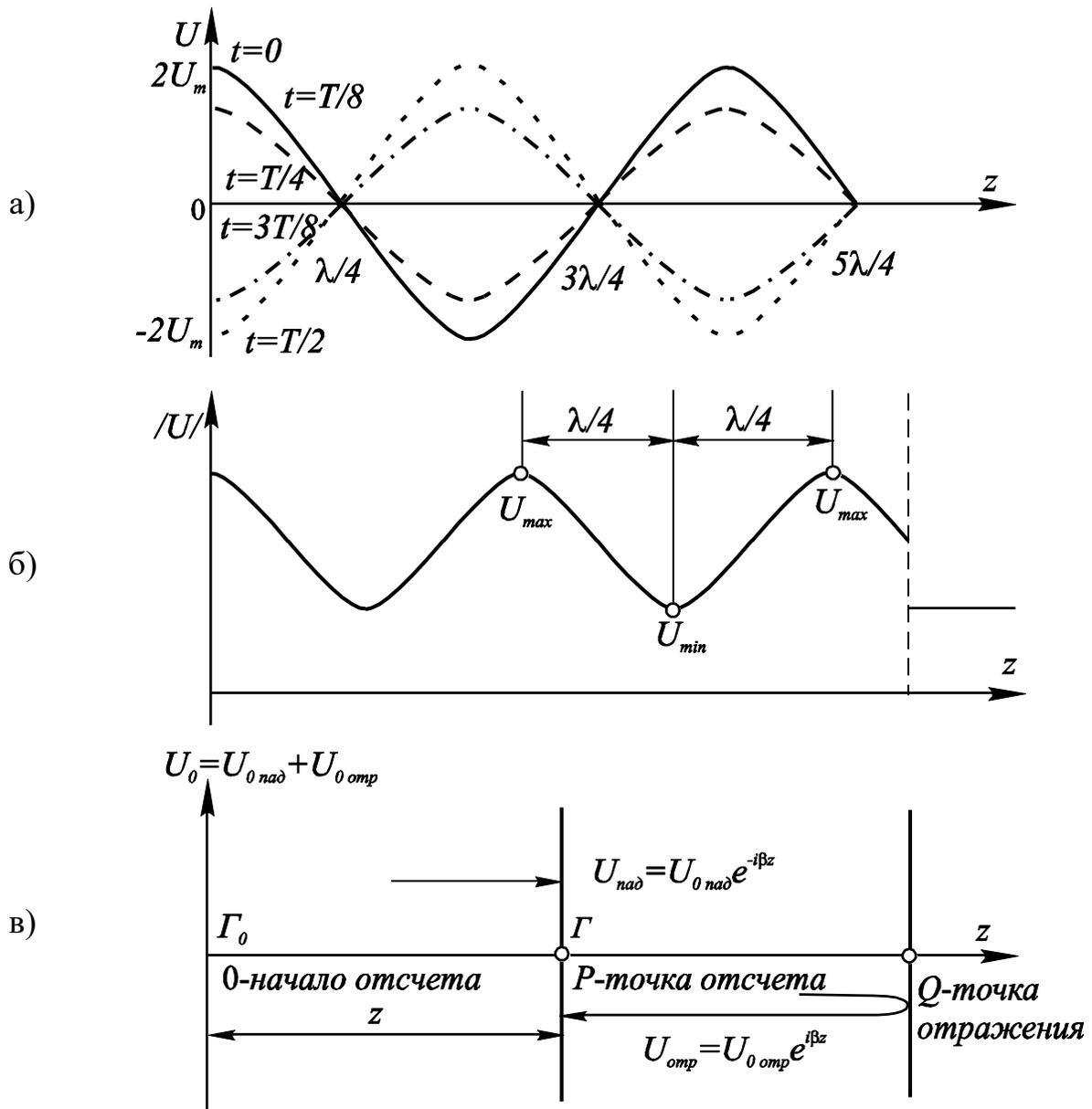


Рис. 3

На рис. 3а показано распределение напряжения в электрически длинной линии при стоячей волне. Из рис. 3а можно сделать следующие выводы о свойствах стоячей волны напряжения: амплитуда напряжения $2U_m \cos(\beta z)$ вдоль линии меняется по гармоническому закону; в точках $\beta z = (2n - 1) \frac{\pi}{2}$ амплитуда напряжения равна нулю. Эти точки называются узлами. В точках $\beta z = \pi n$ амплитуда напряжения максимальна и равна $2U_m$. Эти точки приня-

то называть пучностями. Расстояние между соседними пучностями и соседними узлами равно половине длины волны передаваемых колебаний. Аналогичные выводы можно сделать и относительно стоячей волны тока.

Если в линии имеются неоднородности, отражающие часть энергии (Рис. 3б, точка Q), то отраженные волны по амплитуде не будут равны падающим. В образующихся в этом случае смешанных волнах не будет точек с нулевым значением напряжения или тока, но будут наблюдаться их минимумы (Рис. 3б).

Такие волны принято оценивать с помощью коэффициента отражения по напряжению (напряженности электрического поля), представляющего собой отношение комплексных амплитуд напряжения (напряженностей электрического поля) отраженной и падающей волн в заданном сечении линии передачи:

$$\Gamma_k = \Gamma e^{i\varphi} = \frac{U_{omp}}{U_{nad}} = \frac{U_{0omp} e^{i\beta z}}{U_{0nad} e^{-i\beta z}} = \Gamma_{0k} e^{i2\beta z} = \Gamma_0 e^{i(\varphi_0 + 2\beta z)}, \quad (31)$$

где $\Gamma_{0k} = U_{0omp} / U_{0nad} = e^{i2\beta z} = \Gamma_0 e^{i\varphi_0}$ – коэффициент отражения в начале линии (Рис. 3в).

Из (31) следует, что модуль коэффициента отражения в линии без потерь не зависит от места измерения $\Gamma = \Gamma_0$, а фаза коэффициента отражения

$$\varphi = \varphi_0 + 2\beta z \quad (32)$$

зависит от координаты z и имеет разное значение для разных точек линии.

Пользуясь тем, что в линии без потерь модуль коэффициента отражения зависит от места измерения, экспериментально его определяют путем измерения коэффициента стоячей волны по напряжению (*КСВН*):

$$K_{cmU} = \frac{U_{\max}}{U_{\min}} = \frac{U_{nad} + U_{omp}}{U_{nad} - U_{omp}} = \frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma}, \quad (33)$$

где $U_{\max} = U_{nad} + U_{omp}$; $U_{\min} = U_{nad} - U_{omp}$ – амплитуды напряжения стоячей волны в пучности и узле.

Модуль коэффициента отражения Γ связан с *КСВН* соотношением

$$\Gamma = \frac{K_{cmU} - 1}{K_{cmU} + 1}. \quad (34)$$

Коэффициент отражения нагрузки, выраженный через волновое сопротивление линии $Z_в$ и сопротивление нагрузки $Z_н$, равен

$$\Gamma_н = (Z_н - Z_в) / (Z_н + Z_в) \quad (35)$$

Рассматривая (35), можно выделить три характерных случая:

- $Z_н = Z_в$; $\Gamma_н = 0$. В линии без потерь, нагруженной на сопротивление, равное волновому, отраженные волны отсутствуют;
- $Z_н = 0$; $\Gamma_н = -1$. При коротком замыкании линии отраженная волна напряжения по амплитуде равна падающей и находится в противофазе с ней, а коэффициент отражения равен минус единице;

- $Z_n = \infty; \Gamma_n = 1$. При разомкнутой линии отраженная волна напряжения равна падающей и синфазна с ней, а коэффициент отражения равен плюс единице.

Для расчета коэффициента пропускания полагается использовать следующую формулу:

$$T = 10^{\left(\frac{L}{20}\right)}, \quad (36)$$

где L – ослабление рассчитывается по формуле:

$$L = 10 \lg \left(\frac{P_{вх}}{P_{вых}} \right). \quad (37)$$

Входное сопротивление линии без потерь

Для определения входного сопротивления без потерь $Z_{вх}$ воспользуемся соотношением

$$Z_{вх} = \frac{U_0}{I_0} = \frac{U(l) \cos(\beta l) + i Z_г I(l) \sin(\beta l)}{I(l) \cos(\beta l) + i [U(l)/Z_г] \sin(\beta l)}. \quad (36)$$

Полагая $Z_n = U(l)/I(l)$, получаем

$$Z_{вх} = \frac{U_0}{I_0} = Z_n \frac{1 + i Z_г I(l) \operatorname{tg}(\beta l)}{1 + i (U(l)/Z_г) \operatorname{tg}(\beta l)}. \quad (37)$$

Анализируя соотношение (37), можно сделать следующие выводы:

1. Входное сопротивление короткозамкнутой ($Z_n = 0$) и разомкнутой ($Z_n = \infty$) линии

$$Z_{вх.кз} = i Z_г \operatorname{tg}(\beta l); \quad Z_{вх.хх} = i Z_г \operatorname{ctg}(\beta l) \quad (38)$$

является чисто реактивным и в зависимости от длины линии может быть индуктивным или емкостным.

2. Короткозамкнутая и разомкнутая линии длиной $l = n\lambda_г/2$ ведут себя как последовательный и параллельный резонансные контуры соответственно.

3. Разомкнутая и короткозамкнутая линии длиной $l = (2n + 1)\lambda_г/4$ ведут себя как последовательный и параллельный резонансные контуры соответственно.

4. Входное сопротивление линии, нагруженной на комплексное или чисто активное сопротивление ($Z_n \neq Z_г$), в общем случае является также комплексной величиной, реактивная и активная составляющие которой меняются в зависимости от длины линии и частоты, а в точках максимума и минимума стоячей волны напряжение чисто активное. При этом в точке максимума больше, чем в точке минимума.

5. Входное сопротивление линии при $Z_n = Z_г$ равно Z_n .

Описанные свойства входного сопротивления длинной линии позволяют широко использовать отрезки линии передачи для создания реактивных элементов, комплексных сопротивлений и резонансных устройств в СВЧ схемах.

Методика измерения КСВН и ослабления

1. Исходное положение органов управления

Индикатора:

- тумблер «СЕТЬ» – «ВЫКЛ»;
- переключатель «ПРЕДЕЛЫ» – «ПАД»;
- ручки «КАЛИБР», «ПАД», «МЕТКА» – крайне левое положение;
- ручка «ОТСЧЕТ» – любое положение;
- кнопка « \sim » – нажата;
- кнопки «КОРРЕК.», «ЛОГ», «-10 dB», « \sim » – отжаты;

Генератора:

- тумблер «СЕТЬ» – нижнее положение;
- переключатель «АМ» – «ВНУТР»;
- переключатель «ВР.ПЕРЕСТРОЙКА S» – «0,08»;
- переключатель «РЕЖИМ ПЕРЕСТРОЙКИ» – F1-F2;
- переключатель «ВНЕШН.» – «АМ»;
- ручка «F1, F0» – крайне левое положение;
- ручка «F2, ΔF » – крайне правое положение;
- ручки «M1, M2, АМПЛИТУДА M1 и M2» – среднее;
- ручка «УРОВЕНЬ» – крайне правое;
- тумблер «СВЧ» – нижнее (выключено).

2. Калибровка КСВН

Соедините части волновода так, как показано на рис. 4.

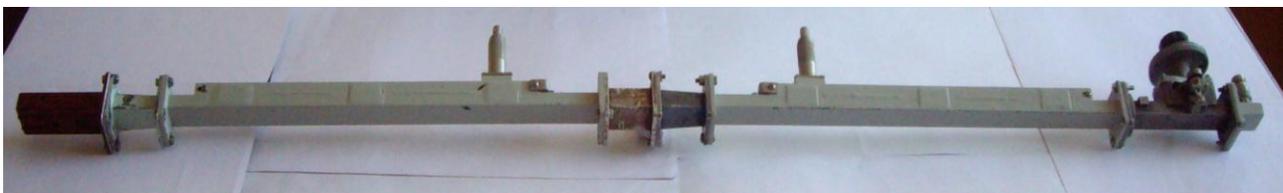


Рис. 4

Убедитесь, что блоки и узлы СВЧ соединены согласно структурной схеме калибровки прибора в режиме КСВН (Рис. 5).

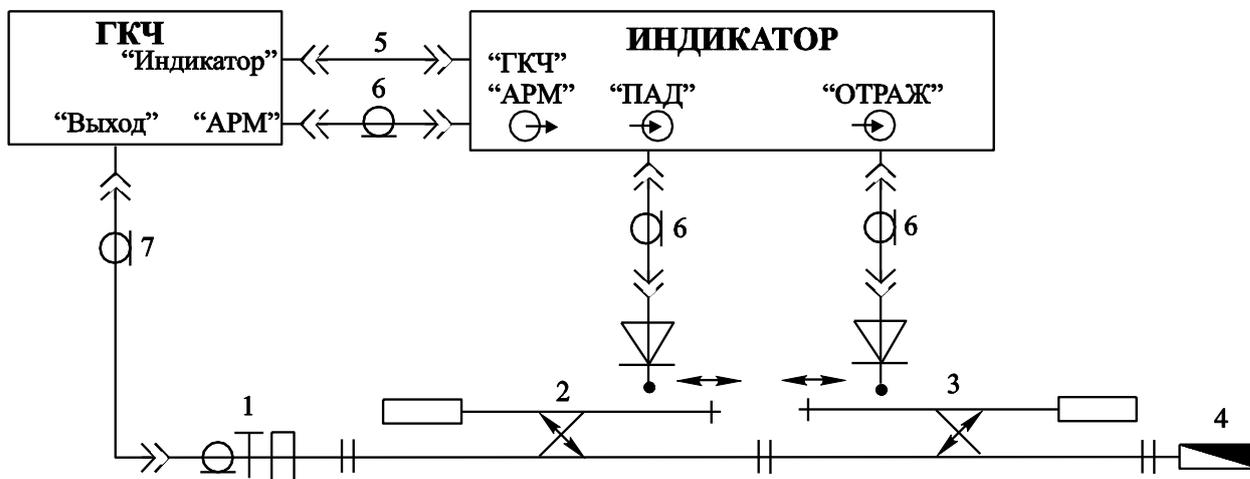


Рис. 5

Цифровые обозначения на всех рисунках одинаковые. Цифры соответствуют элементам электрической схемы:

- 1 – переход коаксиально-волноводный
- 2 – детектор направленный «Падающая»
- 3 – детектор направленный «Отраженная»
- 4 – нагрузка согласованная «НС»
- 5 – кабель
- 6 – кабель соединительный К-9
- 7 – кабель соединительный ВЧ

– включите индикатор КСВН и ОСЛАБЛЕНИЯ Я2Р-67, генератор качающей частоты 61, блок СВЧ, дайте им прогреться в течение **15 минут**. Проверьте, чтобы в волноводе не находилось никаких предметов;

– нажмите кнопку «F1, F0» и ручкой «F1, F0» установите на экране нижнюю частоту полосы качения;

– нажмите «F2, ΔF» и ручкой «F2, ΔF» установите на экране верхнюю частоту полосы качания;

– на индикаторе «КСВН» переключатель «ПРЕДЕЛЫ» установите в положение «ПАД»;

– вставьте между согласованной нагрузкой (4 на рис. 5) и волноводом короткозамыкающий поршень;

– включите блок СВЧ;

– на индикаторе КСВН и ОСЛАБЛЕНИЯ Я2Р-27 регулятором «ОТСЧЕТ» установите значение 2,5 mV;

– совместите ручками «УРОВЕНЬ» в генераторе и «ПАД» в индикаторе линию падающей мощности, наблюдаемой на экране, с линией электронного визира. Пример изображен на рис. 6.

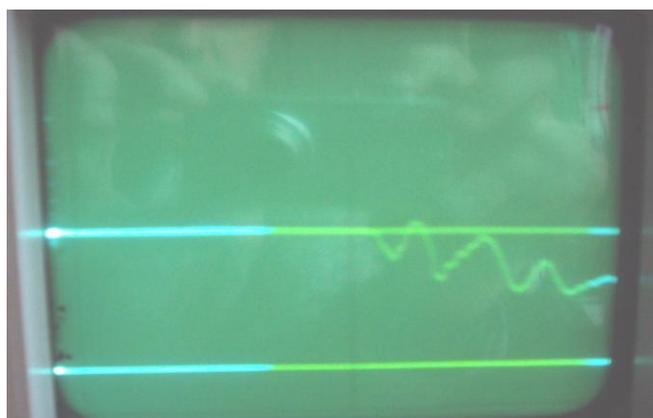


Рис. 6

- переключатель «ПРЕДЕЛЫ» установите в положение «0»;
- регулятором «ОТСЧЕТ» выставите значение КСВН «∞»;
- регулятором «КАЛИБР» совместить уровень отраженной мощности с линией отсчета;
- выключите блок СВЧ;

- уберите короткозамыкающий поршень из волновода;
- включите блок СВЧ;
- переключатель «ПРЕДЕЛЫ» установите в положение «15», «20», «25», «30» таким образом, чтобы спектр полностью был виден на экране. Значение КСВН не должно превышать 1,25. В этом случае мы видим на экране КСВН согласованной нагрузки в выбранном диапазоне;

- выключите блок СВЧ;

Индикатор КСВН и ОСЛАБЛЕНИЯ Я2Р-67 откалиброван в режиме измерения КСВН и готов к работе.

3. Калибровка ослабления

Соедините части волновода так, как показано на рис. 7.



Рис. 7

Убедитесь, что блоки и узлы СВЧ соединены согласно электрической структурной схеме калибровки прибора в режиме ослабления (Рис. 8).

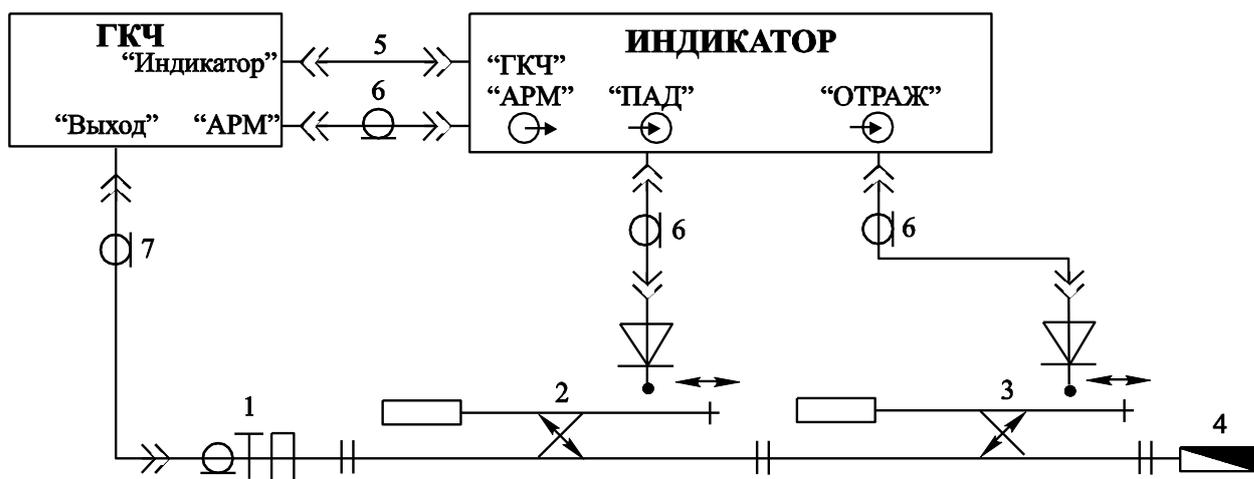


Рис. 8

Включите индикатор КСВН и ОСЛАБЛЕНИЯ Я2Р-67, генератор качающей частоты 61, блок СВЧ.

- на индикаторе КСВН переключатель «ПРЕДЕЛЫ» установите в положение «ПАД»;

- на индикаторе КСВН и ОСЛАБЛЕНИЯ Я2Р-27 ручкой «ОТСЧЕТ» установите значение 2,5 по шкале mV;

- совместите ручками «УРОВЕНЬ» в генераторе и «ПАД» в индикаторе линию падающей мощности, наблюдаемой на экране, с линией электронного визира;

- на индикаторе КСВН и ОСЛАБЛЕНИЯ Я2Р-67 переключатель «ПРЕДЕЛЫ» установите в положение «0»;

– регулятором «КАЛИБР» совместить уровень прошедшей мощности с линией отсчета;

– выключите блок СВЧ;

Пример изображения приведен на рис. 9.

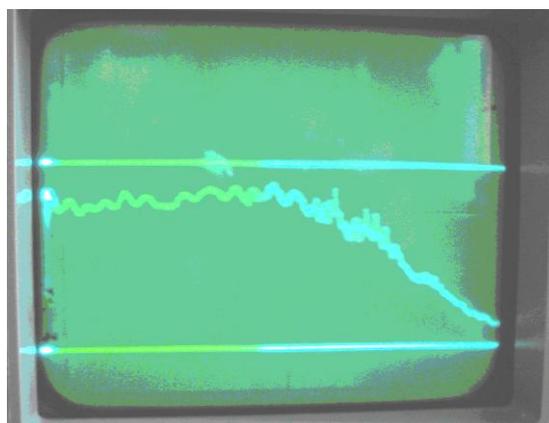


Рис. 9

Индикатор КСВН и ОСЛАБЛЕНИЯ Я2Р-67 откалиброван в режиме измерения ослабления и готов к работе.

4. Методика проведения измерений КСВН и ослабления в разных режимах

Измерения можно проводить в следующих режимах измерения КСВН и ослабления:

1) панорамного измерения в полосе рабочих частот от минимальной до максимальной в режиме автоматической перестройки частоты с периодами 0,08, 1, 10, 40 секунд. Этот режим рекомендуется при настройке и регулировке СВЧ узлов. Периоды 1, 10, 40 секунд рекомендуются при измерении малых КСВН и больших ослаблений (переключатель «ПРЕДЕЛЫ» в положении «25» и «30»). Перед измерением подготовьте к работе и откалибруйте прибор в требуемом диапазоне частот.

Для измерений КСВН проделайте операции:

– соберите электрическую структурную схему измерения КСВН в соответствии с рис. 10;

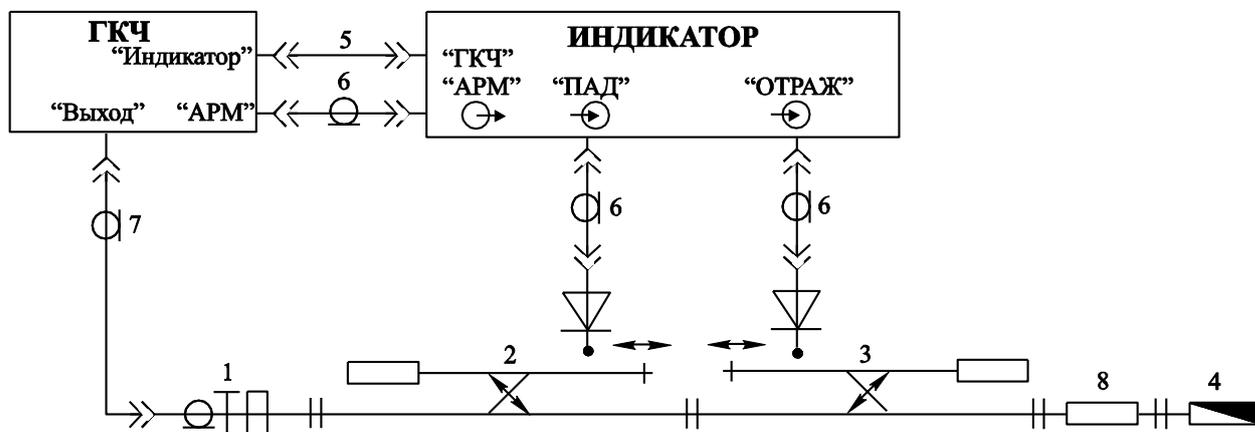


Рис. 10

– установите переключателем «РЕЖИМ ПЕРЕСТРОЙКИ» необходимый период перестройки 0,08, 1, 10, 40 секунд. Разовый запуск с периодом 40 с. осуществляется кнопкой «ПУСК»;

– переключатель «ПРЕДЕЛЫ» поставьте в положение, при котором характеристика КСВН располагается вблизи середины экрана индикатора;

– совместите ручкой «ОТСЧЕТ» линию электронного визира на экране индикатора с рабочей точкой на характеристике КСВН и по шкале КСВН отсчитайте измеренное значение;

– для определения частоты, соответствующей интересующей точки наблюдаемой характеристики КСВН, нажмите кнопку «M1», ручкой «M1» совместите частотную метку с этой точкой и по экрану генератора отсчитайте значение частоты.

Для измерений ослабления после калибровки прибора соберите электрическую структурную схему измерения ослабления (Рис. 11).

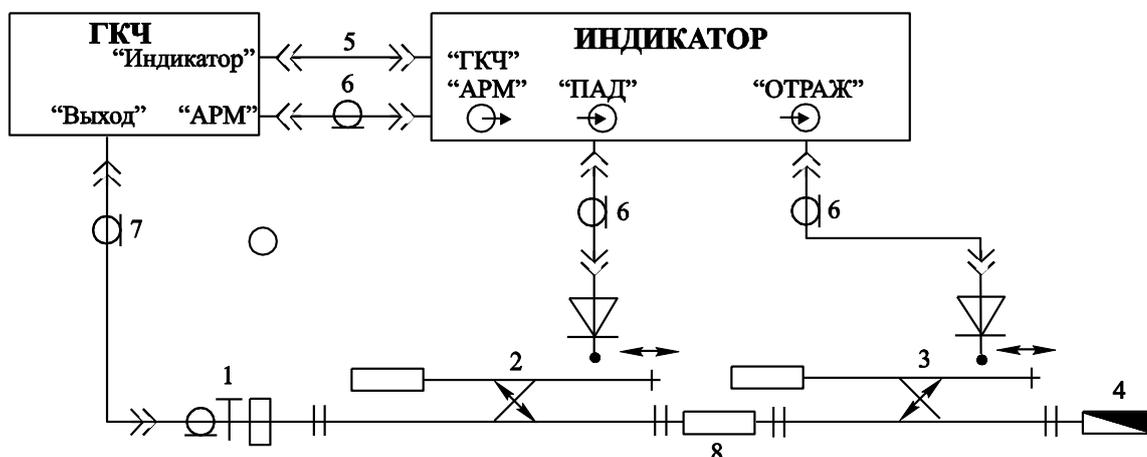


Рис. 11

Операции измерения аналогичны измерению КСВН. Измеряемое значение ослабления определяется как алгебраическая сумма (с учетом знака) величины ослабления, соответствующего положению переключателя «ПРЕДЕЛЫ», со знаком минус и величины, отсчитанной по шкале dB.

2) панорамного измерения в узкой (минимальной) полосе частот с периодами 0,08; 1; 10; 40 секунд. Этот режим рекомендуется при настройке или регулировке узкополосных СВЧ устройств. После подготовки прибора к измерениям установите требуемую полосу частот:

– нажмите кнопку « ΔF » переключателя «РЕЖИМ ПЕРЕСТРОЙКИ»;

– нажмите кнопку «F2, ΔF » переключателя «ОТСЧЕТ»;

– вращением ручки «F2, ΔF » установите на экране генератора ширину полосы перестройки;

– нажмите кнопку «F1, F0» переключателя «ОТСЧЕТ» и вращением ручки «F1, F0» установите центральную частоту требуемой полосы качания;

– откалибруйте прибор согласно п. 2;

– соберите схему измерения согласно рис. 10 (для измерения КСВН) или рис. 11 (для измерения ослабления).

Операции измерения приведены ниже (в п. 5, 6 данного описания).

При работе в узкой полосе, при необходимости более точной установки частоты, следует пользоваться внешним частотомером. Для этого:

– переключатель «АМ» поставьте в положение «НГ», переключатель «ВР. ПЕРЕСТРОЙКИ S» – в положение «РУЧ.», переключатель «РУЧ.» – в крайнее левое положение;

– соедините выход генератора с входом внешнего частотомера, измерьте начальную частоту полосы качания и, при необходимости, ручками «F2,ΔF» и «F1,F0» установите требуемую частоту;

– переключатель «РУЧ.» поставьте в крайне правое положение и аналогично измерьте конечную частоту полосы качания;

– выход генератора соедините с входом измерительного СВЧ тракта, переключатель «ВР. ПЕРЕСТРОЙКИ S» поставьте в положение, соответствующее требуемому периоду перестройки частоты, переключатель «АМ» – в положение «ВНУТР.» и произведите измерение в установленной полосе частот.

3) измерение в режиме ручного качания частоты. В этом режиме перестройка частоты производится ручкой «РУЧ.», а измерение аналогично измерению в панорамном режиме.

– перед измерением КСВН или ослабления переключатель «ВР. ПЕРЕСТРОЙКА S» поставьте в положение «РУЧ.», вращением ручки «РУЧ.» установите требуемую частоту в пределах установленной полосы частот и произведите измерение как описано в п. 5, 6 данного описания.

5. Измерение КСВН

Измерения КСВН рекомендуется проводить в ручном режиме согласно п. 4 настоящего описания на заданных частотах в диапазоне от 7,8 ГГц до 10,2 ГГц с определенным шагом (например, с шагом 0,05 ГГц).

– на индикаторе КСВН и ОСЛАБЛЕНИЯ Я2Р-27 переключатель «ПРЕДЕЛЫ» установите в положение «0», «5», «10», «15», «20», «25», «30» таким образом, чтобы измеряемая точка находилась на середине экрана (по высоте). Пример изображения приведен на рис. 12.

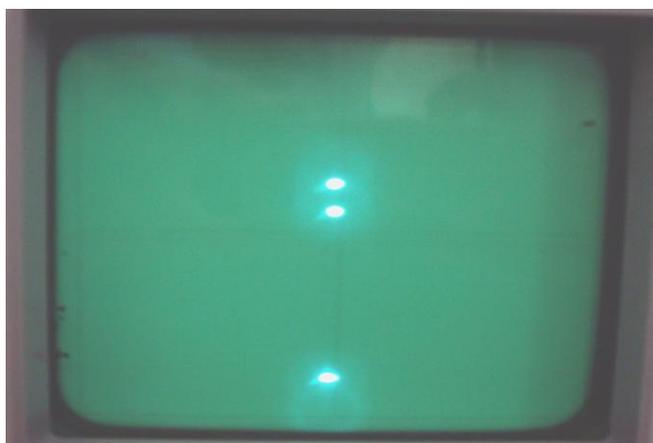


Рис. 12

– переключателем «ОТСЧЕТ» необходимо добиться совпадения верхней точки с рабочей точкой, искомое значение КСВН будет отображаться на соответствующей шкале (нижней).

6. Измерение ослабления

Измерения ослабления рекомендуется проводить в ручном режиме согласно п. 4 настоящего описания на заданных частотах в диапазоне от 7,8 ГГц до 10,2 ГГц с определенным шагом (например, с шагом 0,05 ГГц).

– регулятор «ПРЕДЕЛЫ» установите в положение «0», «5», «10», «15», «20», «25», «30» dВ таким образом, чтобы измеряемая точка находилась на середине экрана (по высоте);

– переключателем «ОТСЧЕТ» необходимо добиться совпадения верхней точки с рабочей точкой.

искомое значение ослабления в dВ (оно всегда отрицательное!!!) можно получить следующим образом: положение регулятора «ПРЕДЕЛЫ» взятое со знаком минус сложить с показаниями соответствующей шкалы (верхней) индикатора КСВН и ОСЛАБЛЕНИЯ Я2Р-27.

Пример изображения совпадает с приведенным на рис. 12.

Порядок выполнения работы и методика эксперимента

1. Изучить схему измерительной установки и правила работы с измерительными приборами, входящими в ее состав. Получить дополнительную информацию о правилах работы на установке, режимах питания и прочем у дежурного инженера лаборатории.
2. Получить у дежурного инженера лаборатории набор кювет и исследуемую жидкость.
3. Провести калибровку прибора в режиме КСВН.
4. Измерить КСВН пустой и заполненной кюветы в ручном режиме.
5. Провести калибровку прибора в режиме измерения ослабления.
6. Измерить ослабление, вносимое пустой и заполненной кюветой в ручном режиме.
7. Проанализировать полученные результаты и оформить отчет по работе в соответствии с правилами, принятыми в практикуме.

Контрольные вопросы:

1. Схема измерительной установки.
2. Для чего нужна калибровка. Методика ее проведения.
3. Методика проведения измерений КСВН и ослабления в разных режимах.
4. Анализ полученных экспериментальных результатов.

Список литературы

1. Шишмарев В.Ю. Электрорадиоизмерения: Учебник. – М.: Академия, 2004. – 336 с.
2. Гуржий А.Н., Поворознюк Н.И. Электрические и радиотехнические измерения: Учеб. пособие. – М.: Академия, 2004. – 272 с.
3. Раннев Г.Г., Тарасенко А.П. Методы и средства измерений – М.: Академия, 2008. – 336 с.
4. Никитин В.А., Бойко С.В. Методы и средства измерений, испытаний и контроля: Учеб. пособие. – Оренбург: ГОУ ОГУ, 2004. – 462 с.
5. Об обеспечении единства измерений: Закон Российской Федерации. – Государственные стандарты. – 1993 – № 11-12. – С. 56-70.
6. Харт Х. Введение в измерительную технику: Пер. с нем. – М.: Мир, 1999. – 391 с.
7. ГОСТ Р 8.563-96 ГСИ. Методики выполнения измерений. – М.: Изд-во стандартов, 1996 – 19 с.
8. Спектор С.А. Электрические измерения физических величин. – Л.: Энергоатомиздат, 1987 – 131 с.
9. Алиев Т.М., Тер-Хачатуров А.А. Измерительная техника. – М.: Высш. шк., 1991 – 384 с.
10. Куликовский К.Л., Купер В.Я. Методы и средства измерений. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 448 с.
11. Алукер Ш.М. Электрические измерения. Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: КолосС, 1972. – 352 с.
12. Кравцов А.В. Метрология и электрические измерения. – М.: КолосС, 2000. – 216 с.
13. Малиновский В.Н. Электрические измерения: Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 286 с.
14. Мухина Е.А. Физико-химические методы анализа: Учебник для техникумов. – М.: Химия, 1995. – 416 с.
15. Долинский Е.Ф. Обработка результатов измерений. – М.: Изд-во стандартов, 1973. – 112 с.

Учебное издание

**Хайрушев Игорь Валентинович,
Щипцов Роман Александрович,
Михайлов Александр Иванович,
Кильдишева Вероника Андреевна,
Великанов Илья Сергеевич,
Сергеева Бэла Владимировна,
Короневский Никита Владимирович**

**ИЗМЕРЕНИЕ ОСЛАБЛЕНИЯ И КОЭФФИЦИЕНТА СТОЯЧЕЙ
ВОЛНЫ ПО НАПРЯЖЕНИЮ ЖИДКИХ ДИЭЛЕКТРИКОВ В СВЧ
ДИАПАЗОНЕ**

Учебное пособие
для студентов факультета нано- и биомедицинских технологий,
обучающихся по магистерской программе «Электроника и наноэлектроника»
для студентов факультета нано- и биомедицинских технологий

Форма издания: Электронная