

РАДИОТЕХНИКА, СИСТЕМЫ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ, АНТЕННЫ И УСТРОЙСТВА СВЧ

УДК 621.372.8

А.Е. Иванов¹, А.Е. Львов², Г.И. Шишков²

ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ АТТЕНЮАТОРЫ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹,
Нижегородский научно-исследовательский приборостроительный институт «Кварц»²

Описаны принцип действия, конструкции и погрешности поляризационных аттенюаторов.

Ключевые слова: поляризационные аттенюаторы, резистивные пленки, ослабление, погрешности.

Введение

Поляризационные аттенюаторы относятся к классу плавнопеременных измерительных аттенюаторов, предназначенных для получения прямоотсчетного ослабления высокочастотных сигналов в волноводных трактах.

Измерительные поляризационные аттенюаторы отличаются высокими техническими характеристиками, основными из которых являются:

- основная погрешность по разностному ослаблению составляет от $\pm 0,01$ А до $\pm 0,05$ А дБ в зависимости от класса аттенюаторов, где А – значение ослабления аттенюатора в дБ;
- величина КСВН на входе (выходе) аттенюаторов составляет не более 1,1–1,4 в зависимости от класса аттенюатора (всего классов 5).

Отсчётные шкалы поляризационных аттенюаторов градуируются в абсолютных значениях ослабления. Погрешности градуировки оговариваются в технической документации на аттенюаторы. Установка величины ослабления поляризационных аттенюаторов разных конструкций может осуществляться в ручном либо автоматическом (программируемом) режимах.

Поляризационные аттенюаторы в основном используются в качестве самостоятельных приборов как образцовые меры ослабления. Допустимая мощность на входе аттенюаторов в режиме непрерывной генерации обычно не превышает 1 Вт.

Принцип действия поляризационных аттенюаторов

Принцип действия поляризационных аттенюаторов основан на поглощении в резистивных пленках аттенюаторов тангенциальных составляющих электрической компоненты линейно-поляризованных волн, которыми можно представить основную волну H_{11} круглого волновода.

Рассмотрим круглый волновод, состоящий из состыкованных вдоль продольной оси трех секций (рис. 1). В диаметральной плоскости каждой секции размещены тонкие резистивные плёнки прямоугольной формы.

Первоначально секции расположены таким образом, что находящиеся в них пленки размещены в одной плоскости. Средняя секция (ротор) может поворачиваться вокруг про-

дольной оси. Полагаем, что в рассматриваемом устройстве каждая из резистивных плёнок имеет бесконечно большую поглощающую способность и происходит полное затухание вектора \vec{E} волны, поляризованной в плоскости плёнки. Кроме того, будем считать, что при прохождении электромагнитной волны отсутствуют отражения от торцевых краёв плёнок.

Такое устройство назовём *идеальным* поляризационным аттенуатором.

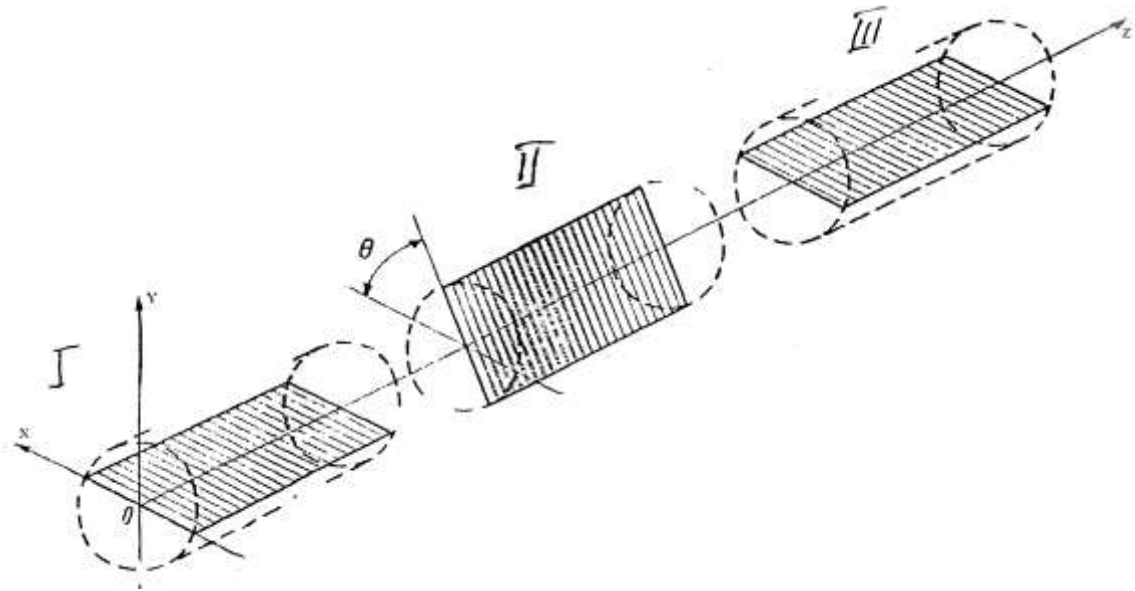


Рис. 1. Структура *идеального* поляризационного аттенуатора

Размещение в диаметральной плоскости круглого полого волновода тонкой резистивной плёнки, расположенной перпендикулярно вектору \vec{E} , существенно не изменяет структуру поля волны H_{11} .

Рассмотрим изменение величины нормальной составляющей напряжённости \vec{E} электрического поля волны H_{11} , проходящей через все три секции (рис. 2). Роль резистивных плёнок в данном случае сводится к поглощению тангенциальных составляющих вектора \vec{E} .

Если все плёнки находятся в одной плоскости, то нормальные составляющие векторов \vec{E} сохраняются при прохождении волной секций устройства.

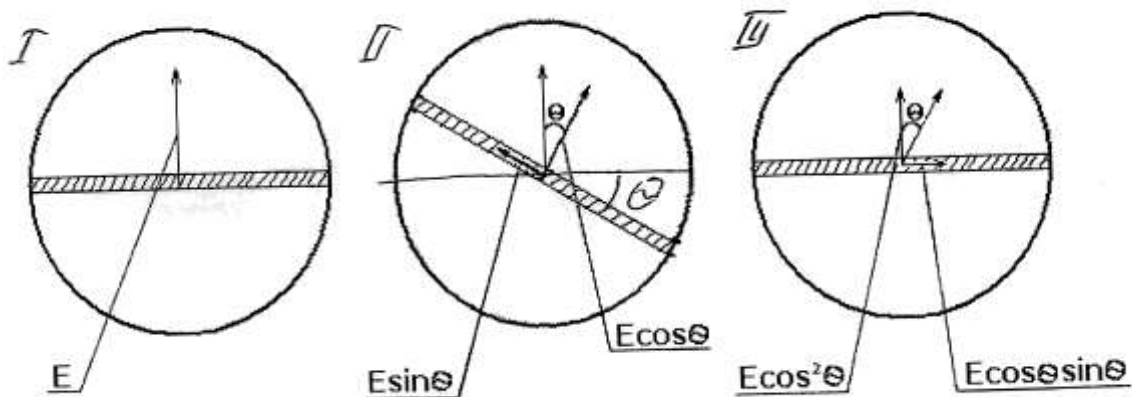


Рис. 2. Составляющие вектора \vec{E} в секциях *идеального* поляризационного аттенуатора

При повороте средней секции из начального положения на угол θ через неё пройдёт составляющая $E \cos \theta$ (в проекции на первичное *вертикальное* направление). При прохождении третьей секции на её выходе первичная составляющая поля \vec{E} будет иметь величину $E \cos^2 \theta$.

Волна на выходе рассматриваемого *идеального* поляризационного аттенюатора имеет ту же поляризацию, что и на входе в среднюю секцию, а её амплитуда пропорциональна квадрату косинуса угла поворота средней секции, т.е. $\cos^2 \theta$. Это соотношение аналогично закону Малюса при прохождении линейно-поляризованной световой волны через поляризатор.

Параметр $\cos^2 \theta$ представляет собой переменную величину ослабления аттенюатора, показывающую, что амплитуда волны, проходящей через аттенюатор, уменьшается в $\cos^2 \theta$ раз.

Ослабление, вносимое поляризационным аттенюатором в волноведущий тракт и выражаемое в дБ, записывается в виде

$$A = 20 \lg \cos^2 \theta + A_0$$

или

$$A = 40 \lg \cos \theta + A_0, \quad (1)$$

где A_0 – начальное ослабление.

Расчётная величина ослабления *идеального* поляризационного аттенюатора находится в пределах от нуля децибел при $\theta = 0^0$ до бесконечности при повороте средней секции на 90^0 .

Выбор основных конструктивных узлов и величины удельного поверхностного сопротивления резистивных плёнок

На входе (выходе) поляризационных аттенюаторов находятся волноводы прямоугольного сечения, размеры поперечных сечений которых определены соответствующим стандартом.

В рабочем диапазоне частот в прямоугольных волноводах основной волной является волна H_{10} . По структуре поля волна H_{10} похожа на волну H_{11} круглого волновода. Это обстоятельство учитывается при создании волноводных переходов между прямоугольными и круглыми волноводами, в которых указанные волны являются основными.

Расчет перехода от прямоугольного волновода к круглому первоначально сводится к определению радиуса круглого волновода при заданной ширине a прямоугольного полого волновода и необходимой длины l_1 плавного перехода для обеспечения минимального значения КСВН на входе (выходе) прямоугольного волновода.

Величину радиуса R круглого полого волновода находим из соотношения

$$\lambda_{\text{кр}}^{H_{10}} = \lambda_{\text{кр}}^{H_{11}}, \quad (2)$$

$$\text{где } \lambda_{\text{кр}}^{H_{10}} = 2a, \quad \lambda_{\text{кр}}^{H_{11}} = \frac{2\pi R}{\chi_{11}}.$$

Подставив в (2) численное значение $\chi_{11} = 1,841$, находим

$$R = 0,5865 a. \quad (3)$$

В верхней части используемого диапазона частот, который задается сечением прямоугольного волновода, в круглом волноводе средней секции аттенюатора возможно возбуждение паразитной волны H_{21} , поэтому в центральной части этого волновода создаётся фильтр в виде предельного круглого волновода для волны H_{21} [1].

При определении длины l_1 полого плавного перехода от прямоугольного волновода к

круглому исходим из того, что чем длиннее и, соответственно, плавнее переход, тем лучше согласование волноводов. Однако практика показала [2], что существуют определённые соотношения между рабочей длиной волны и длиной перехода. Так, для обеспечения величины $K_{СВН} \leq 1,1$ в узкой полосе (порядка 20-25%) рабочего диапазона частот прямоугольного волновода достаточно соотношения $l_1 \approx \lambda$.

Для обеспечения такого же согласования во всей рабочей полосе частот длина волноводного перехода должна быть не менее двух-трёх максимальных длин волн для данного прямоугольного волновода [3],

$$l_1 \cong (2-3)\lambda_{\max}. \quad (4)$$

Технология изготовления волноводных плавных переходов СВЧ- и КВЧ-диапазонов была отработана в 50–60-х годах прошлого столетия. Один из способов состоит в том, что по результатам расчётов изготавливается необходимого профиля и длины оправка из алюминия, затем методом гальванического наращивания меди создаётся волновод. В дальнейшем оправка вытравляется.

Для аттенуаторов в верхней части КВЧ-диапазона, где размеры волноводов малы (порядка нескольких мм и менее) применяется электроискровой способ удаления металла из заготовки.

Важными элементами конструкции поляризационных аттенуаторов, обеспечивающих неразрывность всего волноводного тракта, недопустимость излучения электромагнитной энергии в местах стыковки волноводов, возможность свободного вращения ротора аттенуатора, являются дроссельные соединения.

Дроссельным соединениям волноводов посвящено немало теоретических исследований, созданы различные конструкции, проведены многочисленные испытания в различных условиях эксплуатации [3, 4].

Основным достоинством дроссельно-фланцевого соединения волноводов является надёжный, нечувствительный к небольшим перекосам, шероховатостям поверхностей и неплотности прилегания электрический контакт.

Одним из основных параметров, определяющих электродинамические характеристики поляризационных аттенуаторов (вносимое ослабление электромагнитного сигнала и качество согласования), является величина удельного поверхностного сопротивления R_{Π} резистивных плёнок, расположенных на одной из поверхностей плоских диэлектрических пластин (подложек) небольшой толщины с малыми значениями относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь.

Пластины с плёнками расположены симметрично широким стенкам прямоугольных волноводов крайних секций и в диаметральной плоскости средней секции аттенуатора. Материалы диэлектрических пластин должны выдерживать вибрационные и ударные нагрузки, указанные в технических условиях для данного поляризационного аттенуатора.

В низкочастотной области СВЧ-диапазона волн (на частотах порядка 2-5 ГГц), в качестве материала подложек можно использовать диэлектрик гетинакс ($\epsilon \approx 5-6$, $\text{tg}\delta = 5 \cdot 10^{-2}$). На более высоких частотах в качестве подложек применяются различные стёкла ($\epsilon \approx 5-16$, $\text{tg}\delta = 1 \cdot 10^{-3}$), на крайне высоких частотах в основном применяется слюда ($\epsilon = 7$, $\text{tg}\delta \approx 1 \cdot 10^{-4}$).

Толщина применяемых подложек должна быть минимальной, например, в поляризационных аттенуаторах в диапазоне частот порядка 50-100 ГГц используются пластины слюды толщиной около 0,04 мм.

Выбор величины удельного поверхностного сопротивления резистивных плёнок для поляризационных аттенуаторов представляет собой сложную теоретическую задачу. Ориентировочно величину R_{Π} можно вычислить по формуле [5]:

$$\alpha = 8,68 \frac{240}{RR_{\Pi} \sqrt{1 - 0,086 \left(\frac{\lambda}{\lambda_{\text{кр}}} \right)^2}}, \quad (5)$$

где α - коэффициент затухания электромагнитной волны в круглом волноводе средней секции поляризационного аттенюатора, повернутой на угол $\theta = 90^\circ$; R - радиус круглого волновода; $\lambda_{\text{кр}}$ - критическая длина волны круглого волновода, λ - рабочая длина электромагнитной волны. При ориентировочных расчетах в качестве λ можно брать среднюю арифметическую длину $\lambda_{\text{ср}} = \frac{\lambda_{\text{max}} + \lambda_{\text{min}}}{2}$ волн стандартного прямоугольного волновода.

Неизвестное значение погонного ослабления α , измеряемое в дБ/ед. длины, определяется из отношения

$$\alpha = \frac{A}{l_2}, \quad (6)$$

где A - величина заданного максимального ослабления проектируемого поляризационного аттенюатора; l_2 - длина резистивной пленки средней секции аттенюатора, практически равная длине этой секции (ротора).

При выборе величины l_2 исходим из того, что резистивная пленка средней секции должна обеспечить полное поглощение тангенциальной компоненты вектора \vec{E} проходящей электромагнитной волны, что возможно лишь при большой длине пленки. Практически величину l_2 берут равной $l_2 \approx 3\lambda_{\text{max}}$, увеличив её на 10–20%. В этом случае длина l_2 резистивной пленки с учетом некоторого «запаса» по длине составит $l_2 \approx 1,2l_1$ или $l_2 \approx 3,6\lambda_{\text{max}}$.

Окончательно формула для ориентировочного расчета удельного поверхностного сопротивления резистивной пленки средней секции принимает вид

$$R_{\Pi} = \frac{12787\lambda_{\text{max}}}{\alpha A \sqrt{1 - 0,086 \left(\frac{\lambda_{\text{ср}}}{\lambda_{\text{кр}}} \right)^2}}, \quad (7)$$

где α - размер широкой стенки прямоугольного волновода на входе (выходе) аттенюатора.

Во всех трех секциях поляризационного аттенюатора используются пластины с одинаковыми по сопротивлению резистивными пленками.

Следует отметить, что для поляризационного аттенюатора с входным (выходным) сечением 40×20 мм для обеспечения максимального ослабления 50дБ потребуется резистивная пленка с удельным поверхностным сопротивлением порядка 400 Ом/□.

На практике при конструировании поляризационных аттенюаторов, взяв за основу расчетные данные, приходится экспериментально подбирать величину сопротивления пленки для обеспечения заданного максимального ослабления и наилучшего согласования. В поляризационных аттенюаторах, выпускавшихся серийно отечественной промышленностью, величина R_{Π} поглощающих пленок находится в пределах (100–500) Ом/□ [6].

Для получения тонких резистивных пленок методом тонкопленочных технологий используются резистивные материалы: тантал, нихром, хром, сплавы МЛТ, РС 5406 и др. В случае использования гетинакса в качестве подложек на пластину наносился слой проводящей углеродистой массы методом толстопленочной технологии.

Для улучшения согласования поляризационных аттенюаторов на концах резистивных пленок со входа (выхода) аттенюаторов, а также со стороны стыковок секций делаются скосы в виде клиньев, «ласточкиных хвостов» и т.п., которые обеспечивают плавное изменение

волновых сопротивлений на переходных участках волноводов. Наличие скосов приводит к некоторому удлинению поглощающих пластин, что необходимо учитывать при экспериментальных отработках разрабатываемых аттенюаторов.

На рис. 3 показан общий вид поляризационного аттенюатора ДЗ-19 с приданными ему коаксиально-волноводными переходами. Сечение прямоугольных волноводов составляет 40×20 мм, диапазон частот аттенюатора 4,8–6,85 ГГц. Аттенюатор выпускался промышленностью мелкими сериями.

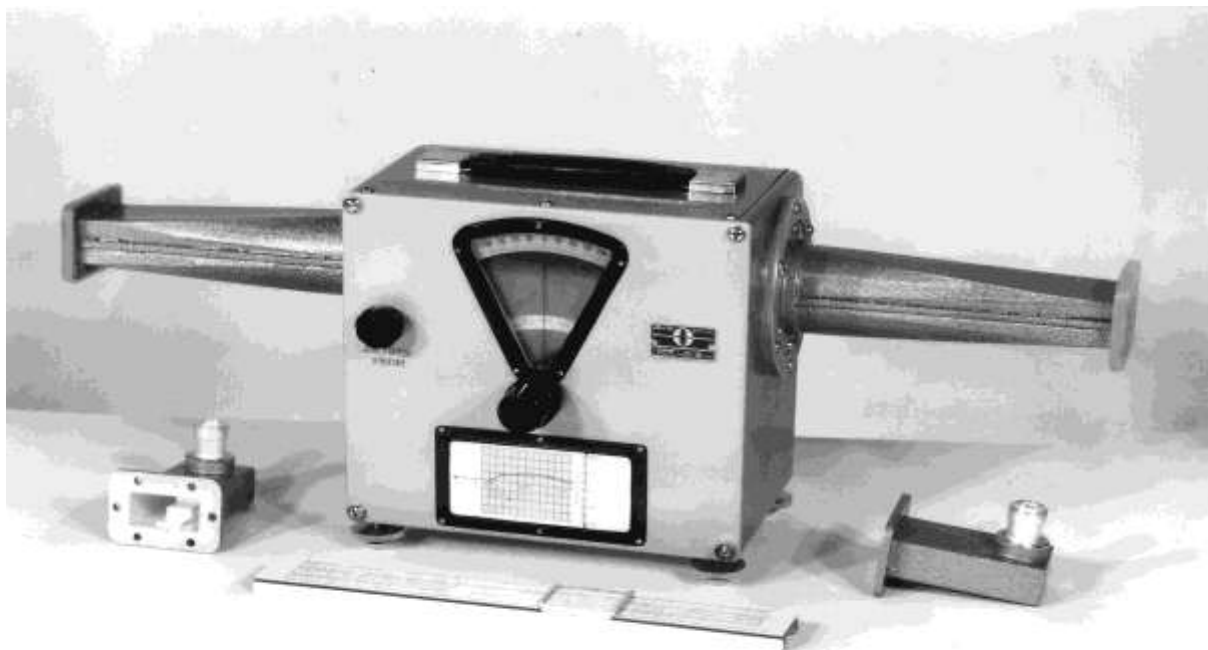


Рис. 3. Фото общего вида поляризационного аттенюатора типа ДЗ – 19

Корпус аттенюатора имеет каркасную конструкцию, с двух сторон которого закреплены волноводные переходы (статоры). Ротор посредством двух подшипников жёстко связан с корпусом аттенюатора и с помощью дроссельно- фланцевых соединений составляет со статорами единую волноведущую систему. Вращение ротора осуществляется ручкой управления, размещённой вне кожуха аттенюатора и находящейся на валу механизма вращения. В механизме вращения применена высокоточная червячная передача, снабжённая люфтовывирающим устройством. С этим механизмом связана многооборотная спиралеобразная шкала отсчёта, отградуированная в децибелах.

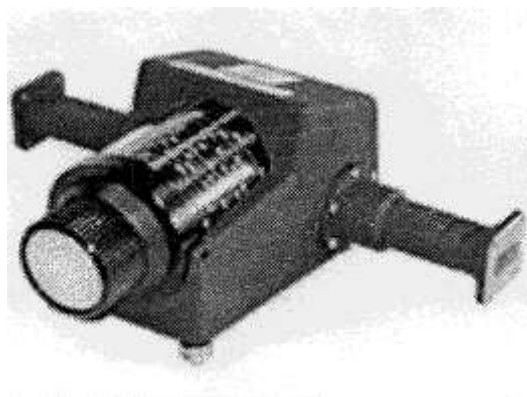


Рис. 4. Фото внешнего вида поляризационного аттенюатора КВЧ диапазона

Аналогичную конструкцию имели большинство выпускавшихся отечественной промышленностью поляризационных аттенюаторов СВЧ диапазона.

В верхней части СВЧ- и в КВЧ-диапазонах применяются компактные конструкции поляризационных аттенюаторов, в которых функции вращения ротора и отсчёта ослабления совмещены. На рис. 4 показана такая конструкция.

Погрешности поляризационных аттенюаторов. Технические характеристики

Теоретический закон зависимости ослабления поляризационного аттенюатора от угла поворота его средней секции (1) предполагает, что поглощающие пластины являются идеально плоскими и полностью поглощают тангенциальную составляющую вектора \vec{E} электромагнитной волны. При распространении в круглом волноводе волны H_{11} не возникает волн высших типов, точно известен угол между подвижной и неподвижными пластинами, отсутствуют распространение энергии по паразитным каналам, отражения волн в тракте, ошибки наблюдателя и т.д. [7].

Перечисленные требования выполняются с некоторым приближением, что приводит к возникновению погрешностей в оценке величины ослабления аттенюатора.

В [1] рассмотрены возможные величины ряда погрешностей.

Общая погрешность поляризационного аттенюатора по разностному ослаблению составляет

$$\Delta A = \Delta A_1 + \Delta A_2 + \sqrt{(\Delta A_3)^2 + (\Delta A_4)^2 + (\Delta A_5)^2}, \quad (8)$$

где величины погрешностей определяются следующим образом: ΔA_1 - эффектом неполного поглощения в резистивных пленках тангенциальной составляющей вектора \vec{E} ; ΔA_2 - неидеальной плоскостью поглощающих пластин; ΔA_3 - отражениями внутри аттенюатора; ΔA_4 - наличием небольших люфтов отсчетного механизма; ΔA_5 - ошибками наблюдателя при отсчете величины ослабления.

При работе аттенюатора во внешнем тракте необходимо учитывать дополнительную погрешность из-за рассогласования. Эта погрешность рассчитывается по формуле [8]:

$$\Delta A_p = \pm 8,7 \left[|G_q| \cdot |G_c| \cdot (K'^2 - K^2) + |G_q| \cdot |G'_1 - G_1| + |G_c| \cdot |G'_2 - G_2| \right], \quad (9)$$

где $|G_q|$, $|G_c|$ - значения модулей коэффициентов отражения элементов, стоящих на входе $|G_q|$ и выходе $|G_c|$ исследуемого аттенюатора соответственно;

$|G'_1|$, $|G'_2|$ и K' - значения модулей коэффициентов отражения входа и выхода и коэффициента передачи аттенюатора при первом отсчёте;

$|G_1|$, $|G_2|$ и K - значения модулей коэффициентов отражения и коэффициента передачи аттенюатора при втором отсчёте.

K - модуль коэффициента передачи аттенюатора, который связан с значением ослабления A в дБ соотношением

$$K = 10^{-A/20}. \quad (10)$$

Основными составляющими погрешности поляризационных аттенюаторов являются [1]: в начальном участке шкалы (0-15) дБ погрешность за счёт некоторого рассогласования аттенюатора со стороны входа и выхода, на участке (15-50) дБ за счёт механизма червячной передачи, при больших ослаблениях (более 50 дБ) - погрешностей механизма вращения,

установки шкалы отсчёта в диапазоне частот, неполного ослабления тангенциальной составляющей сигнала.

Экспериментально показано, что перечисленные погрешности могут быть существенно снижены, в результате чего погрешность поляризационного аттенюатора может составить величину порядка $\Delta A \leq (0,003 + 0,002A)$ дБ для ослаблений до 60 дБ и не более 0,3 дБ на участке (80-90) дБ.

В табл.1 приведены технические характеристики поляризационного аттенюатора типа ДЗ-19.

Таблица 1

Диапазон частот, ГГц	Начальное ослабление, дБ	Пределы измерения ослабления, дБ	Погрешность, дБ	КСВН	Сечение волновода, мм
4,8-6,85	0,5	0-50	$\pm (0,01 + 0,004A)$	1,15	40×20

Допустимая входная мощность аттенюатора 1 Вт, габаритные размеры 584×260×195 мм.

Для расширения измерительных возможностей поляризационных аттенюаторов к ним могут придаваться коаксиально-волноводные переходы, обладающие малыми потерями порядка (0,1-0,3) дБ и небольшим КСВН (не более 1,1–1,3).

На рис.3 показаны переходы от волноводов прямоугольного сечения 40×20 мм к коаксиальному тракту сечением 7,0 / 3,04 мм. Потери переходов в диапазоне частот этого волновода не превышают 0,1 дБ. Величина КСВН аттенюатора ДЗ -19 с присоединёнными переходами составляет не более 1,35.

В СССР была разработана и запущена в серийное производство широкая гамма измерительных поляризационных аттенюаторов в диапазоне частот от 2 ГГц (сечения волноводов 90,0×45,0 мм, 72,0×34,0 мм и т.д.) до нижней части КВЧ-диапазона.

Аттенюаторы типа ДЗ -32А – ДЗ-36А, предназначенные для работы в диапазоне частот от 6,85 до 37,5 ГГц (сечения волноводов 28,5×12,6 мм, 23,0×10,0 мм, 17,0×8,0 мм, 11,0×5,5 мм, 7,2×3,4 мм), имеют максимальное ослабление 95 дБ, величину КСВН не более 1,15–1,2 [9].

В табл. 2 приведены технические характеристики поляризационных аттенюаторов КВЧ диапазона [10].

Таблица 2

Тип аттенюатора	Диапазон частот, ГГц	Начальное ослабление, дБ	Пределы измерения ослабления, дБ	Погрешность, дБ	Сечение волновода, мм
ДЗ – 37	37,5-53,57	1,0	0 – 70	$\pm 2\%$ до 50 дБ, $\pm [0,9+0,05(A-50)]$ при $A > 50$ дБ	5,2 × 2,6
ДЗ–38	53,57-78,33	1,0	0 – 70	$\pm 2\%$ до 50 дБ, $\pm [0,9+0,05(A-50)]$ при $A > 50$ дБ	3,6 × 1,8

Величина КСВН аттенюаторов не более 1,15, допустимая входная мощность 0,1 Вт, габаритные размеры 149×100×78 мм.

Поляризаационные аттенюаторы нашли широкое применение в науке и технике как измерительные приборы, а часть из них была использована в качестве образцовой аппаратуры при определении ослаблений различных радиотехнических устройств и, особенно, при измерении потерь малых величин в волноведущих системах.

При обеспечении полного поглощения электромагнитной энергии тангенциальных компонент поля \vec{E} волн H_{11} и H_{10} в рабочем диапазоне частот, а также при хорошем согласовании со стороны входа (выхода) и на стыках секций поляризаационных аттенюаторов возможно получение параметров, которые позволяют использовать такие аттенюаторы в качестве эталонов ослабления [1].

Библиографический список

1. **Томашевский, А.К.** К вопросу использования поляризаационного аттенюатора в качестве эталона ослабления // Вопросы радиоэлектроники. Сер. РИТ. 1966. вып.1. С. 35–42.
2. Линии передачи сантиметровых волн: [пер. с англ.] / под ред. Г.А. Ремеза. – М.: Сов. радио, 1951. Т. 1. – 416 с.
3. **Чернушенко, А.М.** Конструирование экранов и СВЧ устройств: учебник для вузов / А.М. Чернушенко [и др.]. – М.: Радио и связь, 1990. – 352 с.
4. **Иванов, А.Е.** Расчёт дроссельных соединений вращающихся механизмов СВЧ-устройств / А.Е. Иванов, Г.И. Шишков, С.В. Чикурина // Методы и средства измерений физических величин: тез. докладов и сообщений XVIII ВНТК. – Н. Новгород, 2007. С. 25.
5. **Семёнов, Н.А.** Техническая электродинамика / Н.А. Семёнов. – М.: Связь, 1973. – 321 с.
6. **Бушминский, И.П.** Изготовление элементов конструкций СВЧ / И.П. Бушминский. – М.: Высшая школа, 1974. – 304 с.
7. **Томашевский, А.К.** Погрешности поляризаационного аттенюатора, возникающие за счёт отражений // Вопросы радиоэлектроники. Сер. РИТ. 1965. Вып.1. С. 48–52.
8. ГОСТ 19158-73 Аттенюаторы. Технические требования. – М.: Государственный комитет стандартов СМ СССР. – 1973.
9. **Шапиро, Х.А.** Поляризаационные аттенюаторы с оптической системой индикации / Х.А. Шапиро, В.С. Удовенчик // Вопросы радиоэлектроники. Сер. РИТ. 1971. Вып. 5. С. 40–46.
10. Техническое описание и инструкция по эксплуатации ГВ 2.243.147.ТО. – 1986.

*Дата поступления
в редакцию 11.10.2011*

A.E. Ivanov, A.E. Lvov, G.I. Shishkov

POLARIZATION ATTENUATORS

The principle of operation, the design and errors of polarization attenuators are described.

Key words: polarization attenuators, resistive films, attenuation, errors.