

РАДИОТЕХНИКА, СИСТЕМЫ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ, АНТЕННЫ И УСТРОЙСТВА СВЧ

УДК 621.372.8

Г.И. Шишков

ПРЕДЕЛЬНЫЕ АТТЕНЮАТОРЫ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Описаны принцип действия и конструкции предельных аттенюаторов.

Ключевые слова: предельные аттенюаторы, предельные волноводы, ослабление, погрешности

Введение

Предельные аттенюаторы относятся к классу плавнопеременных измерительных аттенюаторов, предназначенных для получения прямоотсчетного ослабления высокочастотных сигналов в коаксиальных трактах [1]. Основными их преимуществами является широкополосность и возможность строгого расчета значения погонного ослабления в линейной части рабочей характеристики.

Характерной особенностью аттенюаторов предельного типа является рассогласование как на входе, так и на выходе, поскольку их входное (выходное) сопротивление чисто реактивное [2]. В связи с этим к входу и выходу предельных аттенюаторов необходимо подключать согласованные фиксированные аттенюаторы с ослаблениями 5–10 дБ либо, что практически чаще всего делается, осуществлять согласование непосредственно в местах расположения возбуждающих и воспринимающих устройств. Суммарное начальное ослабление предельного аттенюатора в этом случае повышается и достигает 15–30 дБ.

На рис. 1 показана типичная рабочая характеристика согласованного предельного аттенюатора (A_0 обозначено начальное ослабление, за пределами которого характеристику аттенюатора можно считать линейной). Нелинейный участок характеристики определяется реакцией нагрузки на выходе аттенюатора при сильной связи между входом и выходом, а также наличием волн высших типов вблизи возбуждающего устройства аттенюатора, которые ослабляются быстрее, чем основной тип волны. Выше значения A_0 начинается расчетный линейный участок ослабления аттенюатора. Градуировка у таких аттенюаторов абсолютная, не требующая сравнения с эталонами. Максимальная величина ослабления определяется экранировкой узлов аттенюатора и подсоединительных разъемов внешних коаксиальных линий.

Предельные измерительные аттенюаторы в СВЧ диапазонах применяются в качестве самостоятельных приборов, встроенных устройств для вывода и точного отчета сигнала в генераторах, анализаторах спектра и т.д., а на низких частотах, например, на частоте около 5 МГц используются как эталонные меры ослабления [3].

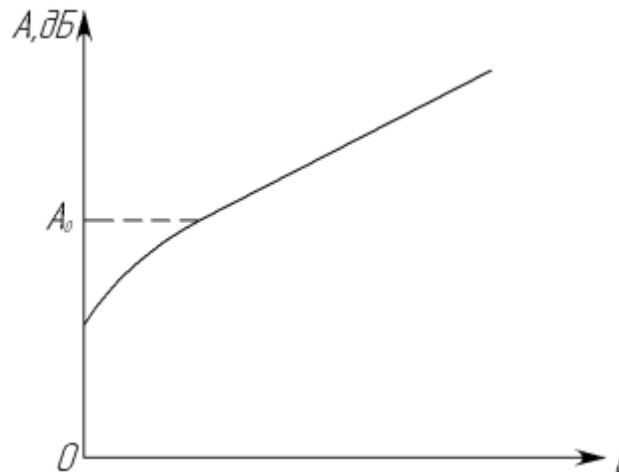


Рис. 1. Типичная рабочая характеристика предельного аттенюатора:
 l – величина перемещения воспринимающего устройства с согласующим элементом

Принцип действия предельных аттенюаторов

Предельные аттенюаторы, использующие свойства предельных (запредельных) волноводов, выполняются на волноводах круглого сечения, в которых основной волной является E_{01} (аттенюаторы емкостного типа) или H_{11} (аттенюаторы индуктивного типа). Выбор круглого сечения волноводов определяется конструктивными и технологическими соображениями.

Условием распространения волн по стандартным волноводам является соотношение

$$\lambda < \lambda_{кр}, \quad (1)$$

т.е. длина распространяющейся волны должна быть меньше критической длины волны низшего типа. Если, например, рабочая длина волны H_{11} в круглом волноводе больше ее критической длины, то наступает режим отсечки и распространения волн не происходит.

Электрические и магнитные поля в предельном волноводе изменяются по экспоненциальному закону и пульсируют во времени без сдвига фазы вдоль продольной оси Z волновода. В предельном волноводе поля изменяются по закону

$$\vec{E} = \vec{E}_m e^{-\alpha z} e^{i\omega t}, \quad \vec{H} = \vec{H}_m e^{-\alpha z} e^{i\omega t}. \quad (2)$$

Постоянная (коэффициент) затухания равна

$$\alpha = \frac{2\pi}{\lambda_{кр}} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_{кр}}{\lambda}\right)^2}. \quad (3)$$

Если для данного сечения предельного волновода обеспечить условие $\lambda \gg \lambda_{кр}$, то затухание в волноводе определяется только величиной $\lambda_{кр}$

$$\alpha \cong \frac{2\pi}{\lambda_{кр}} \quad (4)$$

и почти не зависит от частоты.

Это свойство предельных волноводов используется в плавнопеременных и фиксированных коаксиальных аттенюаторах предельного типа.

В [4] исследовано явление переноса электромагнитной энергии (мощности) в предельных волноводах. Известно, что затухающие волны переносят лишь реактивную мощность, причем величина этой мощности зависит от Z экспоненциально, так что по мере затухания волны происходит и уменьшение переносимой ею реактивной мощности.

Если в предельном волноводе на конечном расстоянии от излучающего устройства (например, петли связи 1 на рис. 2) разместить приемное устройство (петлю связи 2), то даже при отсутствии распространяющихся волн в месте нахождения приемного устройства возбуждается слабое электромагнитное поле, обусловленное затухающими волнами. Приемное устройство извлекает из этого поля небольшую активную мощность.

В отрезке предельного волновода между двумя устройствами (возбуждающим и воспринимающим) существуют две затухающие волны (рис. 2): «прямая» затухающая волна *A* и «обратная» *B*. Такое поле способно переносить некоторую активную мощность, что доказано аналитически в [4].

Обозначим через *l* расстояние между излучающим и воспринимающим устройствами предельного волновода (рис. 2), в котором возбуждается преимущественно волна H_{11} . Пренебрегая другими типами волн, быстро затухающими вблизи возбуждающего устройства, сигнал, принимаемый выходным устройством, в соответствии с (2), определится соотношением [2]

$$H_{\text{ВЫХ}} = H_{\text{ВХ}} e^{-\alpha l} \quad (5)$$

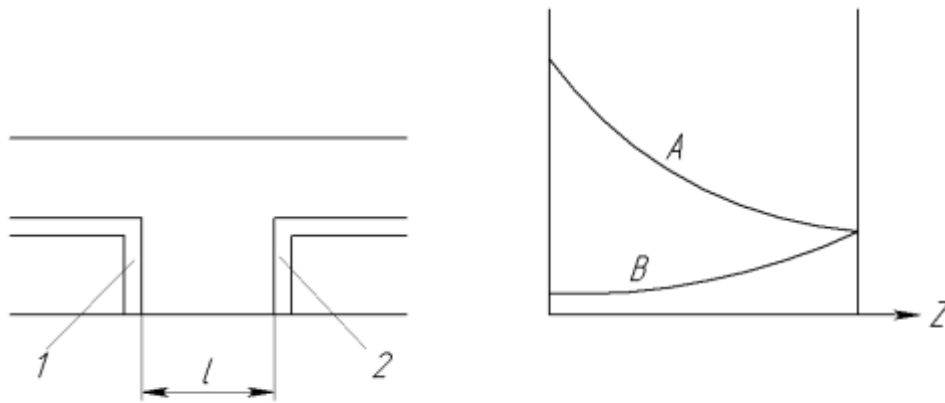


Рис. 2. Передача мощности по волноводу при отсутствии распространяющихся волн

Ослабление *A* сигнала описывается соотношением:

$$A = \lg \frac{H_{\text{ВХ}}}{H_{\text{ВЫХ}}} = 20 \lg \alpha l = 8,686 \alpha l \text{ (дБ)}. \quad (6)$$

Величина ослабления является линейной функцией перемещения *l*. При этом необходимо подчеркнуть, что получаемое ослабление не связано с каким-либо поглощением энергии в предельном волноводе. Вся остальная энергия волны, поступающая на вход рассогласованного предельного аттенюатора, отражается в сторону источника волны (генератора).

Если выполняется условие $\lambda \gg \lambda_{\text{кр}}$, то погонное ослабление на линейном участке характеристики ослабления аттенюатора при возбуждении волны типа H_{11} рассчитывается в соответствии с выражениями (6), (4) по формуле

$$A_{\text{пог}} \cong \frac{16,0}{R} \text{ (дБ/ед.длины)}, \quad (7)$$

а в случае волны типа E_{01} , возбуждаемой центральным проводником подводящей коаксиальной линии, рассчитывается по формуле

$$A_{\text{пог}} \cong \frac{20,9}{R} \text{ (дБ/ед. длины)}, \quad (8)$$

где *R* – радиус предельного волновода.

Однако для создания современных высокочастотных плавнопеременных измерительных предельных аттенюаторов необходимы дополнительные исследования.

Особое значение для разработчиков СВЧ предельных аттенюаторов представляет работа [5], в которой предложен метод строгого расчета предельных аттенюаторов емкостного типа, справедливый для возбуждающего и воспринимающего электродов любых размеров, позволяющий рассчитывать характеристики ослабления во всем диапазоне рабочих частот, при любом расстоянии между электродами с учетом волн, отраженных от границ раздела между волноводной и коаксиальной частями аттенюатора.

При разработке и производстве предельных аттенюаторов емкостного типа важным является учет влияния эксцентricности (смещения) возбуждающего и воспринимающего электродов относительно продольной оси предельного волновода на характеристику ослабления аттенюатора. В [6] определена зависимость отношения амплитуд симметричных E -волн различных типов от смещения оси возбуждающего электрода относительно оси предельного волновода при различных относительных размерах возбуждающего электрода. При тонких возбуждающих электродах ($R_1/R_2 \leq 0,15$, где R_1 и R_2 радиусы электрода и волновода соответственно) наличие эксцентricности не приводит к существенному изменению уровня волн высших типов, что свидетельствует о не критичности расположения таких электродов относительно оси предельного волновода. Более того, можно выбрать такую толщину возбуждающего электрода, что некоторое смещение его оси относительно оси волновода может привести к уменьшению амплитуд волн высших типов. Это обстоятельство необходимо учитывать при стремлении линеаризовать начальный участок характеристики ослабления.

При разработке плавнопеременных измерительных предельных аттенюаторов, предназначенных для работы в широком диапазоне частот, необходимо учитывать частотную зависимость ослабления аттенюаторов.

Погонное затухание или постоянная затухания идеального предельного волновода определяется его геометрическими размерами и типом волны, возбужденной в нем (3).

Величина погонного ослабления аттенюатора, определяемая коэффициентом затухания электромагнитной волны в предельном волноводе (3) с учетом (6) и выражаемая в децибелах, определяется по формуле

$$A_{\text{пог}} = 8,686 \frac{2\pi}{\lambda_{\text{кр}}} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_{\text{кр}}}{\lambda}\right)^2} \quad (\text{дБ/мм}), \quad (9)$$

где λ – длина рабочей волны; $\lambda_{\text{кр}}$ – критическая длина волны, мм.

Для аттенюатора индуктивного типа погонное ослабление равно

$$A_{\text{пог}} = \frac{15,99}{R} \sqrt{1 - \left(\frac{2\pi R}{1,841\lambda}\right)^2} \quad (\text{дБ/мм}), \quad (10)$$

для аттенюатора емкостного типа:

$$A_{\text{пог}} = \frac{20,89}{R} \sqrt{1 - \left(\frac{2\pi R}{2,405\lambda}\right)^2} \quad (\text{дБ/мм}), \quad (11)$$

где R и λ выражены в миллиметрах.

С изменением частоты (длины рабочей волны) погонное ослабление предельного аттенюатора изменяется. Применительно ко всему прибору – предельному аттенюатору это означает, что, будучи отградуированным на «средней» частоте рабочего диапазона, он на других частотах будет иметь другую величину погонного ослабления. Такое отклонение классифицируется как частотная погрешность.

Положив, что величина $\frac{\lambda_{\text{кр}}}{\lambda} < 1$ и разложив выражение (9) в степенной ряд, получим,

что максимальная частотная зависимость в диапазоне частот составляет

$$\Delta A_{\text{пог}} = 8,686 \frac{\pi}{\lambda_{\text{кр}}} \left[\left(\frac{\lambda_{\text{кр}}}{\lambda_2} \right)^2 - \left(\frac{\lambda_{\text{кр}}}{\lambda_1} \right)^2 \right] \text{ (дБ/мм)}, \quad (12)$$

где λ_1 и λ_2 – крайние длины волн рабочего диапазона аттенюатора.

На величину погонного ослабления влияет «скин-эффект» в связи с конечной проводимостью стенок предельного волновода, который «увеличивает» диаметр волновода.

Материалом, из которого чаще всего изготавливаются волноводы и основные детали предельных аттенюаторов, является латунь. Все токонесущие поверхности деталей покрываются тонким слоем уплотненного серебра, реже – золота. На частотах более 3 ГГц (диапазон СВЧ) толщина «скин – слоя» указанных металлов составляет менее $1,4 \cdot 10^{-3}$ мм. При диаметрах предельных волноводов порядка 10 мм и менее «увеличение» диаметра волноводов незначительное. На практике таким изменением пренебрегают.

Волноводы предельных аттенюаторов изготавливаются по первому или второму классу точности.

Для волноводов диаметром 8 мм и длиной порядка 50 мм отклонение по диаметру составляет не более $\pm 0,012$ мм. Для волны E_{01} величина погонного ослабления в предельном волноводе диаметром 8 мм без учета частотной погрешности составляет 5,225 дБ/мм. Отклонение величины погонного ослабления равно $\pm 0,007$ дБ/мм. При этом относительная погрешность погонного ослабления составляет $\pm 0,13\%$. Для линейного участка ослабления величиной 100 дБ это отклонение составляет около 0,13 дБ.

Конструкции предельных аттенюаторов. Технические характеристики

Основу переменных предельных аттенюаторов составляет отрезок предельного волновода 1 (рис. 3) круглого поперечного сечения, возбуждающая петля 2 (для аттенюаторов индуктивного типа) или возбуждающий диск (для аттенюаторов емкостного типа), а также приемная петля 3 (или диск) на подвижном плунжере 4, имеющем гальванический контакт с волноводом.

Изменение ослабления в таких аттенюаторах осуществляется путем поступательного перемещения плунжера, расположенного соосно предельному волноводу.

К выходу подвижного плунжера часто присоединяют гибкий радиочастотный коаксиальный кабель, который выводится на переднюю панель прибора (например, генератора сигналов) и закрепляется на ней с помощью СВЧ разъёма.

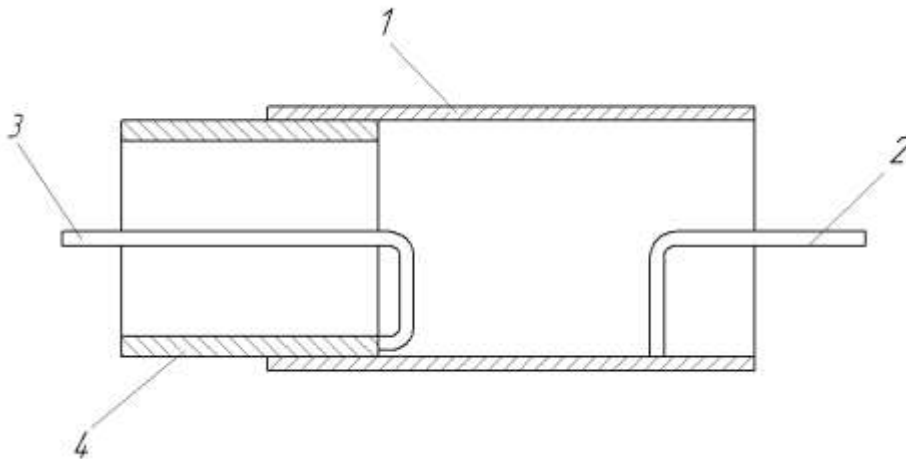


Рис. 3. Конструкция предельного аттенюатора с плунжером, расположенным соосно предельному волноводу

Существует конструкция малогабаритного аттенюатора предельного типа [7], в которой внутрь предельного волновода соосно и перпендикулярно оси волновода введена металлическая диафрагма с переменным по диаметру отверстием связи (рис. 4). Диаметр отверстия может меняться по величине от размера диаметра волновода до нуля.

Применение такого аттенюатора, например, в генераторах СВЧ сигналов, позволяет значительно снизить габариты прибора, улучшить экранировку и избавиться от ненадежного гибкого кабеля, соединяющего выход аттенюатора с неподвижным внешним разъёмом. Кроме того, такой аттенюатор может применяться в тех случаях, когда необходима большая разрешающая способность по ослаблению при малых значениях ослабления.

Аттенюатор, представленный на рис. 4, рассогласован.

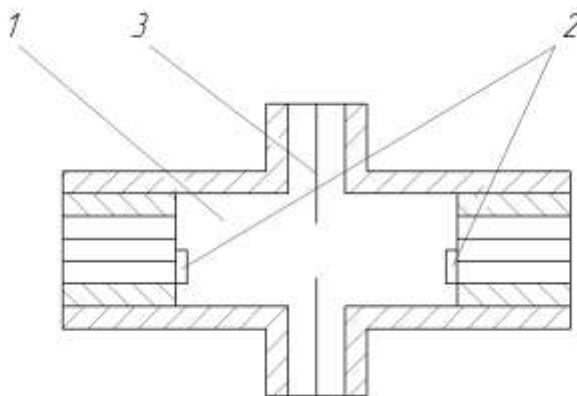


Рис. 4. Схематический чертеж малогабаритного переменного предельного аттенюатора:

1 – отрезок круглого предельного волновода; 2 – элементы связи (в данной конструкции петли связи), имеющие выход на высокочастотные коаксиальные разъёмы; 3 – диафрагма

Для согласования резистор 1 размещают между центральным проводником 2 и корпусом 3 волновода (рис. 5). В этом случае резистор выполняет функции петли связи и согласующего элемента. В качестве резисторов применяются малогабаритные цилиндрические тонко-пленочные безколпачковые резисторы типа С6-2 с сопротивлением по постоянному току 50 ± 1 Ом, длиной от 2 до 9 мм, диаметром от 2 до 3 мм, рассеиваемой мощностью от 0,125 до 0,5 Вт [8].

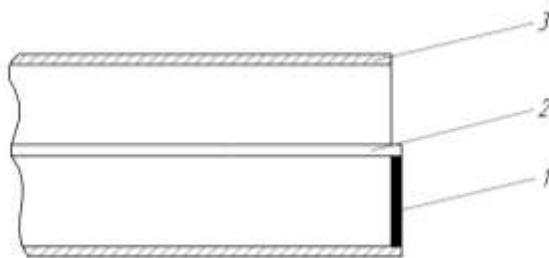


Рис. 5. Резистор в качестве петли связи и согласующего элемента

Мощность на входе предельного аттенюатора ограничивается рассеиваемой мощностью согласующего резистора. Обычно она не превышает 0,5 Вт. Для повышения мощности входного сигнала, поступающего на аттенюатор, применима тройниковая конструкция, схема которой показана на рис. 6.

В таких аттенюаторах величина мощности входного сигнала определяется мощностью нагрузки, которая подключается к аттенюатору как самостоятельный прибор. Кроме того, в этом случае легко решается вопрос согласования аттенюатора по входу. Величина КСВН на входе аттенюатора будет определяться в основном КСВН внешней нагрузки. Одна-

ко предельные аттенюаторы такой конструкции обладают существенным недостатком: предельный волновод в них возбуждается слабо, поскольку центральный проводник (возбуждающий элемент) основной коаксиальной линии расположен далеко от входного отверстия (окна связи) волновода. В связи с этим аттенюатор имеет большое начальное ослабление и значительный нелинейный участок характеристики ослабления (линейный участок обычно начинается с 25–35 дБ).

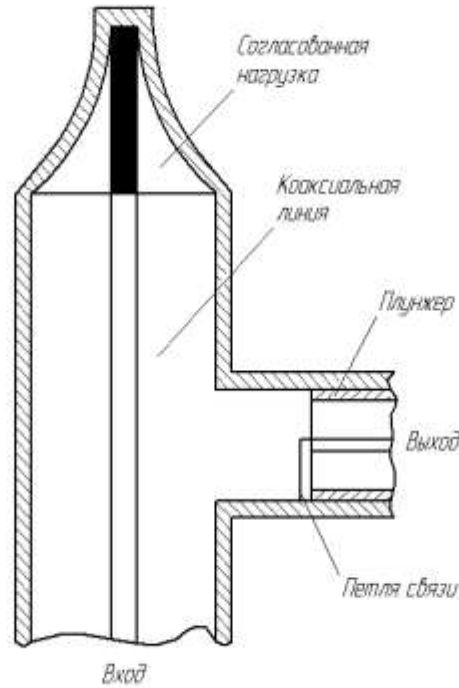


Рис. 6. Принципиальная схема предельного аттенюатора тройниковой конструкции

Принципиальное решение увеличения связи между возбуждающим и воспринимающим элементами связи и тем самым уменьшения начального ослабления предельного аттенюатора индуктивного типа (аналогично и емкостного типа) тройниковой конструкции изложено в [9] и показано на рис. 7.

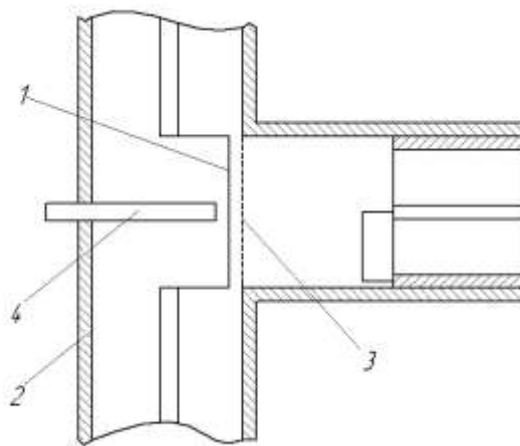


Рис. 7. Коаксиальный предельный аттенюатор тройниковой конструкции с прямоугольной петлей связи

Особенностью предложенного коаксиального аттенюатора является то, что часть цен-

трального проводника 1 отрезка коаксиальной линии 2 изогнута вблизи ответвления волновода в виде прямоугольной петли, направленной в сторону этого ответвления. Эта часть проводника должна иметь толщину, позволяющую волновому сопротивлению полученной эксцентрической линии оставаться близкой к волновому сопротивлению коаксиальной линии.

Предельный аттенюатор предложенной конструкции обладает малым начальным ослаблением. Для фильтрации высших типов волн во входном отверстии предельного волновода устанавливается экран Фарадея 3 на близком расстоянии от проводника 1 . Для лучшего согласования аттенюатора со стороны основной коаксиальной линии в ней устанавливается емкостной штырь 4 . Размещение тонкого участка петли 1 и экрана Фарадея 3 возможно непосредственно внутри предельного волновода.

Указанные предложения особо эффективны при разработке предельных аттенюаторов низкочастотного диапазона (от единиц МГц до 1000 МГц), поскольку предельный волновод имеет большие размеры (диаметр волновода 30 мм и более), что дает возможность вносить различные конструктивные усовершенствования в экран Фарадея и петлю связи.

Вопросам расчета согласования входного устройства, линеаризации характеристики ослабления предельных аттенюаторов индуктивного типа тройниковой конструкции в низкочастотном диапазоне посвящен ряд работ [10, 11, 12].

В измерительной технике СВЧ диапазона широкое применение нашли малогабаритные встроенные предельные аттенюаторы индуктивного типа (например, в генераторах стандартных сигналов), а также отсчетные плавно-переменные предельные аттенюаторы емкостного типа как самостоятельные приборы.

Выбор типа рабочей волны для предельных аттенюаторов в диапазоне частот более 3 ГГц определяется тем, что при небольших сечениях предельных волноводов (их радиус порядка 4 мм и менее) конструкция возбуждающего и воспринимающего устройств связи для волны E_{01} обеспечивает хорошее согласование аттенюатора в широком диапазоне частот и оказывается надежнее в жестких условиях эксплуатации, чем устройства связи для волны H_{11} . Кроме того, габаритные размеры предельного аттенюатора на волне E_{01} несколько меньше, чем аттенюатора на волне H_{11} .

Важным аргументом при выборе рабочей волны E_{01} является тот факт [6], что в предельном аттенюаторе емкостного типа нелинейность характеристики определяется в основном волнами E высших типов. На больших ослаблениях при паразитном возбуждении волны H_{11} точность емкостного аттенюатора сохраняется.

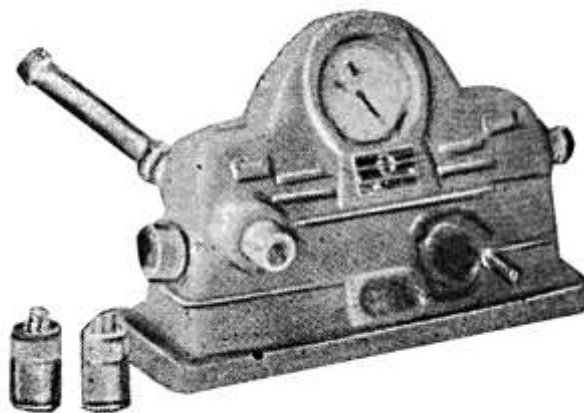


Рис. 8. Фото внешнего вида аттенюатора Д4–6

К числу часто используемых для измерения ослабления на СВЧ относится коаксиальный предельный аттенюатор типа Д4–6 с емкостной связью. Он предназначен для плавного

изменения ослабления поступающего сигнала в сантиметровом диапазоне длин волн, а также для использования в качестве образцовой меры при измерениях разностного ослабления различных радиотехнических устройств. В техническом отчете по ОКР «Облик», выполненной в 1958 году в ЦНИИ-11 (г. Горький), разработчиком и автором данной статьи дано подробное описание конструкции и технические характеристики аттенюатора Д4–6, который многие годы выпускался промышленностью.

Внешний вид аттенюатора показан на рис. 8.

Аттенюатор предназначен для работы в диапазоне частот 3–10 ГГц. Его конструктивная и электрическая схемы приведены на рис. 9. Это аттенюатор тройниковой конструкции. Для повышения эффективности возбуждения поля на центральном проводнике входной коаксиальной линии, волновое сопротивление которой равно 50 Ом, в месте ее сочленения с круглым предельным волноводом, расположен элемент связи в виде небольшого диска. Диаметр предельного волновода, равный 8 мм, меньше критического для самой короткой волны рабочего диапазона.

Для согласования со стороны входа аттенюатора ко второму концу коаксиальной линии подключена согласованная нагрузка типа СН-4 с волновым сопротивлением 50 Ом, выполненная с использованием объемного поглотителя.

Часть энергии, проходящей через коаксиальную линию в нагрузочное сопротивление, ответвляется в предельный волновод с ослаблением. Величина ослабления сигнала определяется положением воспринимающего элемента связи. Далее сигнал поступает во внешнюю нагрузку R_H , присоединяемую к выходу аттенюатора (на конструктивной схеме R_H не показана). Входом и выходом аттенюатора является коаксиальная линия сечением 10/4,34 мм.

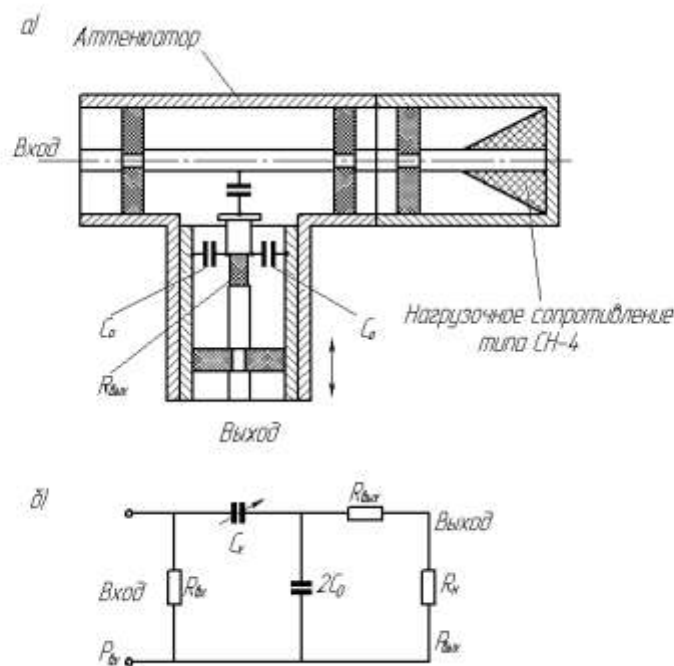


Рис. 9. Конструктивная (а) и эквивалентная электрическая (б) схемы предельного аттенюатора Д4–6

В качестве согласующего сопротивления $R_{\text{вх}}$ используется тонкопленочный цилиндрический резистор типа УНУ – 0,1 сопротивлением 50 Ом, один конец которого впаян в воспринимающий элемент связи в виде диска, а другой входит в гнездо центрального проводника плунжера, образуя с его корпусом пятидесятиомную коаксиальную линию.

Для уменьшения зависимости затухания от частоты, а также получения замкнутой цепи по высокой частоте со стороны выхода воспринимающий элемент связи – диск шунтиро-

ван на корпус плунжера емкостью C_0 общей величиной 4,5 пФ, образованной прокладкой из фторопласта и центрирующим керамическим кольцом.

Эквивалентная электрическая схема аттенюатора представляет собой емкостной делитель напряжения, коэффициент деления которого определяется соотношением емкостей C_0 и C_x . Величина емкости C_0 выбрана так, чтобы емкостное сопротивление было мало по сравнению с суммарным сопротивлением $R = R_{\text{вых}} + R_H$. Величина емкости C_x определяется расстоянием между возбуждающим и воспринимающим элементами и их геометрическими размерами.

Для обеспечения электрического контакта плунжера с поверхностью предельного волновода на внешней поверхности плунжера размещены контактные пружины в виде колец, а для уменьшения «пролезания» электромагнитной энергии на выход аттенюатора на поверхности плунжера размещены цилиндрические втулки из объемного СВЧ поглотителя, основу которого составляет смесь порошка карбонильного железа с диэлектриком. В качестве диэлектрика используются полиэтилен, полистирол, полипропилен.

Между подвижным плунжером и неподвижным выходным СВЧ разъемом аттенюатора находится телескопическая система, которая на рис. 9 не показана.

Отсчетно-приводная система аттенюатора включает приводной механизм, шкалу отсчета ослабления в децибелах и индикатор малых перемещений часового типа для точного отсчета линейного перемещения плунжера. Индикатор крепится на корпусе предельного волновода.

Приводной механизм состоит из червячной пары и реечного зацепления. Зацепление осуществляется через прорезь, профрезерованную в корпусе предельного волновода вне рабочей его части.

Для устранения люфта при передаче вращательного движения от ручки управления на поступательное движение плунжера и вращательное движение шкалы отсчета зубчатые колеса червячной пары снабжены люфтовыбирающим устройством.

Аттенюатор вместе с отсчетно-приводным механизмом помещен в литой разъемный силуминовый корпус, служащий одновременно основанием прибора. Отсчет величины ослабления производится по шкале непосредственного отсчета в децибелах и по шкале индикатора линейных перемещений с помощью градуировочных графиков, а отсчет разностного ослабления – по шкале индикатора с применением градуировочных графиков.

Шкала непосредственного отсчета отградуирована для «средней» частоты (7 ГГц) рабочего диапазона частот. К этой шкале прилагается график частотных поправок для крайних частот рабочего диапазона (3 и 10 ГГц). Градуировочные графики ослабления аттенюатора приводятся для трех указанных частот рабочего диапазона на весь диапазон ослаблений до 100 дБ.

В состав документации аттенюатора входит график погонного ослабления на линейном участке, которым пользуются при подсчете разностной величины ослабления на линейном участке от 40 до 100 дБ.

Величина изменения ослабления аттенюатора составляет 20 – 120 дБ при сохранении линейности характеристики в пределах не менее 60 дБ. Значение КСВН входа на линейном участке ослаблений не превышает 1,4; выхода – 1,5. Максимальная погрешность определения разностного ослабления по шкале индикатора с применением градуировочных графиков на линейном участке характеристики составляет не более $\pm (0,1 + 0,005A)$ дБ, где A – величина разностного ослабления (дБ), при условии, что значение КСВН внешней нагрузки не более 1,4. Погрешность определения ослабления на нелинейном участке характеристики с применением градуировочных графиков не превышает $\pm 1,2$ дБ при условии, что КСВН выхода генератора и входа нагрузки не более 1,4. Погрешность определения ослабления по шкале, проградуированной непосредственно в децибелах с использованием частотных поправок не превышает ± 2 дБ при КСВН выхода генератора и входа нагрузки не более 1,8. Наибольшая допустимая мощность сигнала на входе аттенюатора не более 1 Вт.

Расчетная величина частотной зависимости ослабления на линейном участке в 60 дБ составляет около 3,5 дБ.

При работе с измерительным аттенуатором в реальном тракте необходимо учитывать погрешность измерения ослабления из-за рассогласования, которую определяют по формуле [1]

$$\Delta A_p = \pm 8,68 \left[| \Gamma_r | | \Gamma_c | (K^2 + 1) + | \Gamma_r | | \Gamma_1 | + | \Gamma_c | | \Gamma_2 | \right], \quad (13)$$

где $| \Gamma_r |$, $| \Gamma_c |$ – значения модулей коэффициентов отражения элементов, стоящих на входе $| \Gamma_r |$ и выходе $| \Gamma_c |$ аттенуатора соответственно; $| \Gamma_1 |$, $| \Gamma_2 |$ – значения модулей коэффициентов отражения входа и выхода аттенуатора; K – модуль коэффициента передачи аттенуатора, который связан с значением ослабления A соотношением

$$K = 10^{-\frac{A}{20}}. \quad (14)$$

Библиографический список

1. ГОСТ 19158-73 Аттенуаторы. Технические требования. – М.: Изд-во стандартов. 1973.
2. Лебедев, И.В. Техника и приборы СВЧ / И.В. Лебедев. – М.: Высш. шк., 1970. Т. 1. – 440 с.
3. Раевская, О.И. Методика расчета характеристик ослабления предельных аттенуаторов высшей точности / О.И. Раевская // Техника средств связи. Сер. РИТ. 1979. Вып. 7. С. 32–38.
4. Вайнштейн, Л.А. Электромагнитные волны / Л.А. Вайнштейн. – М.: Сов. радио, 1957. – 582 с.
5. Раевская, О.И. Метод расчета предельного аттенуатора емкостного типа / О.И. Раевская // Техника средств связи. Сер. РИТ. 1977. Вып. 5. С. 47–52.
6. Калмык, В.А. Влияние эксцентricности возбуждающего электрода на характеристики ослабления предельного аттенуатора / В.А. Калмык, О.И. Раевская // Изв. вузов СССР. Радиоэлектроника. 1974. Т. 17. № 10. С. 58–62.
7. А.С. 224624 СССР. Аттенуатор предельного типа / Г.И. Шишков, С.Г. Афанасов // Б. И., 1968. № 26.
8. ОСТ В 11 0013 – 85. Резисторы постоянные. Общие технические требования.
9. А.С. 213937 СССР. Коаксиальный аттенуатор/Г.И. Шишков, В.Н. Исаев// Б.И., 1968. № 11.
10. Горячев, Ю.А. К расчету согласования входного устройства аттенуатора индуктивного типа / Ю.А. Горячев, В.А. Калмык, Л.Г. Симкина // Вопросы радиоэлектроники. Сер. РИТ. 1975. Вып. 2. С. 61–67.
11. Горячев, Ю.А. Линеаризация начального участка характеристики ослабления предельного аттенуатора / Ю.А. Горячев, В.А. Калмык, С.Б. Раевский // Техника средств связи. Сер. РИТ. 1976. Вып. 2. С. 78–82.
12. Раевская, О.И. Методика расчета аттенуатора индуктивного типа с улучшенными характеристиками / О.И. Раевская, В.А. Калмык // Техника средств связи. Сер. РИТ. 1977. Вып. 1. С. 92–96.

Дата поступления
в редакцию 12.07.2011

G.I. Shishkov

CUTOFF ATTENUATORS

The principle of operation and the design of cutoff attenuators are described.

Key words: cutoff attenuators, cutoff waveguides, attenuation, errors.