

*В. И. ВЛАСОВ, А. А. КОНТАРЬ, канд. техн. наук,
А. И. ТЕРЕЩЕНКО, д-р техн. наук*

ПЕРЕМЕННЫЙ ВОЛНОВОДНЫЙ АТТЕНУАТОР НА ОСНОВЕ ГИБКОГО ВОЛНОВОДА

В технике СВЧ для уменьшения мощности радиосигнала, распространяющегося по волноводному тракту, широко используются аттенуаторы (ослабители). Аттенуатор представляет собой четырехполюсник, на выходе которого мощность сигнала по сравнению с мощностью на входе уменьшена вследствие поглощения части мощности на поглощающих элементах или отражения от реактивных элементов.

Известно несколько типов механически перестраиваемых волноводных аттенуаторов. Наиболее простую конструкцию имеют аттенуаторы поглощающего типа, действие которых основано на затухании электромагнитных волн в поглощающих материалах. Из-за трудности отвода тепла от поглощающего элемента, расположенного внутри волновода, такие аттенуаторы применяются только в трактах низкого уровня мощности. Начальное затухание аттенуаторов данного типа в сантиметровом диапазоне волн составляет $0,2 \div 0,5$ дБ, максимальное затухание — около 30 дБ [1]. Усовершенствованные конструкции обеспечивают минимальный фазовый сдвиг [2; 3] и высокую точность установления заданного значения затухания [4].

Основным типом аттенуаторов, используемых для создания эталонных мер ослабления в диапазоне частот от 3 до 200 ГГц, являются поляризационные аттенуаторы, действие которых основано на зависимости поглощения электромагнитных волн от плоскости их поляризации. К достоинствам таких аттенуаторов нужно отнести расчетный закон изменения ослабления, высокую стабильность (временную, температурную и др.) и частотную независимость ослабления, независимость электрической длины аттенуатора от вводимого ослабления, значительный частотный диапазон, равный 0,85 рабочей полосы стандартного прямоугольного волновода. Недостатками поляризационных аттенуаторов являются нелинейность шкалы ослабления, сравнительно высокий коэффициент стоячей волны, большие габаритные размеры, низкий допустимый уровень мощности, высокая стоимость [5].

В волноводных трактах высокого уровня мощности применяются аттенуаторы на делителях мощности [1; 5], в которых уменьшение мощности происходит вследствие полного поглощения ее части, отделенной от основного потока с помощью делителя мощности, представляющего собой пассивный четырехполюсник. Характеристика ослабления данных аттенуаторов может быть рассчитана с хорошей точностью; начальное ослабление невелико — от долей децибела до нескольких децибел. Уровень рабочей мощности определяется только электрической прочностью элементов конструкции (направленных ответвителей) и возможностями присоединенных к ним поглощающих нагруз-

зок. Недостатки подобных аттенуаторов — сложность конструкции, значительные размеры, высокая стоимость.

Еще одним типом переменных волноводных аттенуаторов являются предельные [5], действие которых основано на затухании электромагнитных волн внутри волновода при длине волны больше критической. У предельных аттенуаторов ослабление меняется по линейному закону в большом (до 100—140 дБ) динамическом диапазоне, однако у них сравнительно высокий КСВ, высокое начальное ослабление, сложная конструкция.

Существенный недостаток известных конструкций механически перестраиваемых аттенуаторов — наличие в волноводе отверстий, через которые осуществляется связь механизма управления с перемещаемым регулирующим элементом. Чтобы воспрепятствовать электромагнитному излучению из этих отверстий, в конструкцию аттенуатора приходится вводить дополнительные поглощающие элементы и экраны.

В процессе работы над созданием эластичных волноводов из композиционных материалов авторы пришли к выводу, что возможность упругой деформации таких волноводов позволяет разработать на их основе механически перестраиваемые волноводные аттенуаторы. В данном случае регулировка ослабления может осуществляться путем сжатия эластичного волновода и изменения формы и размеров его поперечного сечения, что принципиально невозможно для жестких металлических волноводов.

При предварительных экспериментах использовался гибкий прямоугольный волновод из композиционного материала с электропроводящим покрытием внутренней поверхности. Он мог упруго деформироваться в поперечном сечении, имея высокую прочность на сжатие.

С физической точки зрения в основу работы аттенуатора положена зависимость мощности, проходящей по волноводу, от формы и размеров его поперечного сечения при неизменном периметре и конечной проводимости стенок. Такая зависимость в неявном виде для прямоугольного волновода, работающего на волне типа H_{10} , определяется выражением [6]:

$$\Delta_{\text{пог}} = \frac{8,69 \sqrt{\frac{\omega \mu_0}{2\sigma}} \left[1 + \frac{2b}{a} \left(\frac{\lambda_0}{2a} \right)^2 \right]}{129\pi b \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{2a} \right)^2}},$$

где $\Delta_{\text{пог}}$ — погонное затухание (дБ/м); ω — круговая частота; μ_0 — магнитная проницаемость; σ — проводимость материала стенок; λ_0 — длина волны в свободном пространстве; a — ширина; b — высота волновода.

Деформация (сжатие) прямоугольного волновода может осуществляться усилием, направленным перпендикулярно к широким стенкам либо перпендикулярно к узким. В первом случае, когда уменьшается размер b , погонное затухание, как это следует из приведенной выше формулы, растет и при $b \rightarrow 0$ стремится к бесконечности. Во втором

случае при уменьшении размера a , если $a < \frac{\lambda_0}{2}$, волновод находится в режиме отсечки и затухание (при достаточной длине деформированного участка) также стремится к бесконечности. В данном случае реализуется предельный аттенуатор.

Экспериментальные исследования переменного аттенуатора на отрезке гибкого волновода длиной 0,2 м показали, что при уменьшении размера b коэффициент стоячей волны КСВ достигает 2—2,5, а при уменьшении размера a превышает 18—20, что всегда наблюдается у несогласованного предельного аттенуатора [5]. Максимальное ослабление в обоих случаях было не менее 20 дБ.

Для уменьшения отражения сжатие волновода осуществлялось так, что деформация поперечного сечения волновода была наибольшей в середине отрезка волновода и уменьшалась к его концам.

Уменьшить КСВ можно одним из трех способов: увеличением длины волновода, введением в волновод развязывающего поглотителя и повышением поглощающей способности внутренней поверхности волновода. Первый способ приводит к нежелательному увеличению габаритных размеров аттенуатора. Кроме того, выполнение длинного отрезка эластичного волновода связано с технологическими трудностями и повышением расхода дорогостоящего серебра, входящего в состав электропроводящего покрытия. Второй и третий способ в исследуемой конструкции было решено совместить путем применения гибкого волновода с уменьшенной проводимостью внутренней поверхности.

Испытывались волноводы из композиционного материала, в котором наполнителем служил коллоидный графит [7], а связующим — каучук КЛСЕ. Сжатие производилось усилием, перпендикулярным к широким стенкам волновода. Другой вариант давал значения КСВ, превышающие 10 ÷ 15, и в дальнейшем не использовался. Меняя процентное содержание графита (от 20 % и выше), можно было уменьшать КСВ до 1,2 ÷ 1,1, снизив при этом начальное затухание волновода (в недеформированном состоянии) до 4 ÷ 6 дБ/м. Однако получение электромагнитной энергии через стенки волновода при малом содержании графита и потеря эластичности при высоком (разрушение после 10 ÷ 15 деформаций) привели к необходимости использовать композиционный материал иного типа. Он отличался от описанного тем, что коллоидный графит был заменен сначала углеродом, а затем — углерентой.

Таким образом, был выполнен макет аттенуатора, состоящего из эластичного отрезка волновода с соединительными металлическими фланцами и механизма, деформирующего волновод с целью управления его затуханием.

Для согласования аттенуатора с волноводным трактом большое значение имеет форма кривой, по которой происходит деформация отрезка эластичного волновода в продольном его сечении. Реализовать заданную форму этой кривой можно только при определенной длине этого отрезка. Если учесть, что погонное затухание волновода сечением 23×10 мм, выполненного из углеренты и силиконового каучука КЛСЕ (или УФ), составляет 12 ÷ 15 дБ/м, при длине отрезка 0,2 м начальное ослабление не превышает 3 дБ. Оно падает с уменьшением

длины отрезка, но здесь возникают трудности с согласованием. Поэтому мы остановились на отрезке длиной 0,15—0,2 м.

Отрезок волновода сжимался пластинами, одновременно перемещаемыми во встречном направлении с помощью механизма, показанного на рис. 1. Для регулировки ослабления вращался винт 5, который образует с ползунами 2 и 4 две винтовые пары с правой и левой резьбой. На ползунах укреплены пластины 1, сжимающие волновод 3.

Как видно из рис. 1, пластины на среднем участке (длины l) параллельны друг другу, а затем отогнуты от оси волновода под некоторым углом α . При обработке конструкции менялись d и α .

В найденном опытным путем наилучшем варианте $d = 40$ мм, $\alpha = 15^\circ$, длина пластин $l = 100$ мм, радиус изгиба $R = 50$ мм. Особое внимание должно быть уделено параллельности пластин на среднем участке.

Фланцы волновода изготавливались из латуни и соединялись с волноводом при помощи хвостовика — отрезка волновода, имеющего скос для плавного перехода к волноводу. При изготовлении волновода фланцы с хвостовиками надевались на оправку из алюминия или стали, имеющую поперечное сечение, соответствующее окну волновода. Затем производилась намотка углеренты под углом 45° к продольной оси волновода. Благодаря этому обеспечивалась возможность упругой деформации волновода как в продольном, так и в поперечном направлении, что предотвращало большие механические напряжения и разрушение аттенюатора при жестком закреплении его концов.

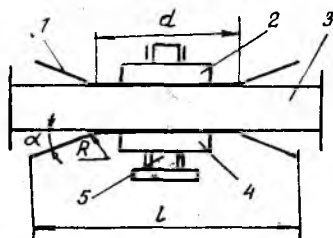


Рис. 1

Толщина стенок волновода, определенная опытным путем, составляла 2 мм. При этом обеспечивалась высокая механическая прочность как в процессе изготовления, так и эксплуатации, и отсутствие электромагнитного излучения через стенки. Наматывалось 10 слоев углеренты толщиной 0,15 мм. При намотке углеренты производилась ее пропитка связующим, затем осуществлялась полимеризация последнего (для ускорения процесса — при температуре 150—200 °С), после чего оправка извлекалась.

Предварительные испытания описанной выше конструкции аттенюатора на волноводе прямоугольного сечения показали, что он имеет недостаток — значительное начальное ослабление, обусловленное, в частности, недостаточным электрическим контактом между эластичным волноводом и хвостовиками фланцев.

Для уменьшения начального ослабления было испробовано плавное увеличение поперечного сечения от фланцев к середине отрезка волновода. Лучшие результаты дало увеличение размера b (высоты волновода). Недостатки такой конструкции — сложность изготовления оправки, которая должна быть составной, и невозможность использования углеренты шириной более 25 мм.

Наконец, была разработана конструкция аттенюатора на основе круглого волновода, работающего при диаметре 30 мм на волне H_{11} . Сопряжение круглого волновода с трактом стандартного прямоугольного сечения 23×10 мм осуществлялось посредством плавных металлических переходов. Сжатие производилось в направлении вектора E .

Данная конструкция имела увеличенные в сравнении с предыдущими габаритные размеры и массу, но меньший коэффициент стоячей волны и существенно меньшее начальное ослабление (в связи с увеличением площади поперечного сечения волновода и лучшим контактом волновода с хвостовиками фланцев). Кроме того, она была более технологичной.

Для устранения ворсистости из-за отслоения отдельных нитей углероды первый ее слой наматывался на тонкий (0,05 мм) стеклоткани, пропитанной связующим. Отрицательного влияния на параметры аттенюатора это не оказывало [8].

Измерения параметров аттенюатора — начального ослабления, диапазона изменения ослабления, диапазона частот, коэффициента стоячей волны — производились на панорамном измерителе КСВ Р2-61. Схема измерений была модифицирована включением третьего

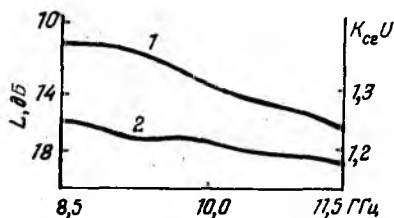


Рис. 2

направленного детектора, благодаря чему можно было измерять ослабление и КСВ, не разбирая волноводный тракт.

Электрические параметры разработанных аттенюаторов приведены в таблице.

Конструкции	Начальное ослабление, дБ	Диапазон изменения ослабления, дБ		КСВ не более
		На частоте 8,5 ГГц	На частоте 11,5 ГГц	
На прямоугольном волноводе	3,0	2,0 ÷ 20,0	3,0 ÷ 24,0	1,35
На круглом волноводе	1,8	1,0 ÷ 20,0	1,8 ÷ 24,0	1,30

Аттенюаторы имеют в заданном частотном диапазоне частотную зависимость ослабления и КСВ. Для круглого волновода при ослаблении порядка 10 дБ на частотах 8 ÷ 5 — 11,5 ГГц это иллюстрируется на рис. 2, где кривой 1 обозначено ослабление, 2 — КСВ.

Допустимый уровень мощности на входе аттенюатора определялся, исходя из допустимой температуры нагрева стенок эластичного волновода, которая, в свою очередь, зависела от термостойкости связующего. Поскольку максимальная рабочая температура применяющихся связующих была примерно 300—350 °С, аттенюатор на прямоугольном волноводе мог работать при мощностях до 50 Вт, на круглом — до 70 Вт.

Список литературы: 1. Андреев Д. П., Гак И. И., Цемблер И. И. Механически перестраиваемые приборы СВЧ и разделительные фильтры. М., 1973. 232 с. 2. А. с. 1107197 СССР, МКИ⁴ Н 01 Р 1/22. Волноводный аттенюатор / В. Б. Беляев // Открытия. Изобретения. 1984. № 29. С. 166. 3. А. с. 1092617 СССР, МКИ⁴ Н 01 Р 1/22. Переменный аттенюатор / Ю. А. Седов // Открытия. Изобретения. 1984, № 18. С. 155. 4. А. с. 1050016 СССР, МКИ⁴ Н 01 Р 1/22. Переменный волноводный аттенюатор / Н. А. Беколов // Открытия. Изобретения. 1983. № 39. С. 217. 5. Калашиников В. С., Шегурей А. Ф. Расчет и конструирование аттенюаторов СВЧ. М., 1930. 88. с. 6. Баскаков С. И. Основы электродинамики. М., 1973. 248 с. 7. Бушминский И. П. Изготовление элементов конструкций СВЧ. М., 1974. 304 с. 8. А. с. 1406671 СССР, МКИ⁴ Н 01 Р 1/22. Переменный волноводный аттенюатор / В. И. Власов, А. А. Контарь, А. И. Терещенко // Открытия. Изобретения, 1988. № 24. С. 215.

Поступила в редколлегию 29.12.88

УДК 621.372

В. Ю. ТИХОВСКИЙ, Г. Г. КАНАРИК, канд. техн. наук, М. П. КУХТИН

ЧАСТОТНЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ДОБРОТНОСТИ ОБЪЕМНЫХ СВЧ-РЕЗОНАТОРОВ

Среди методов измерения добротности СВЧ-резонаторов широкое распространение получили методы [1], основанные на измерении частотной зависимости коэффициента стоячей волны по напряжению $K_{стV}$. Они обладают достаточно высокой точностью, однако требуют больших затрат времени на проведение измерений с целью построения полной частотной зависимости $K_{стV}$ и определения полосы пропускания на половинном уровне мощности. Кроме того, применение их неэффективно в случае температурной нестабильности резонаторов.

В работе предлагается модификация частотного метода измерения добротности $Q_{нен}$, учитывающая активные R_1 и реактивные X_1 потери в устройстве связи, позволяющая сократить число измерений, автоматизировать процесс обработки результатов. Определение добротности сводится к измерению коэффициентов стоячей волны на резонансной частоте и двух произвольных расстройках и к решению системы трех алгебраических трансцендентных уравнений относительно $Q_{нен}$, R_1 , X_1 .

Резонатор, связанный с передающей линией и включенный на отражение, представляется эквивалентной схемой (рисунок), L_1 представляет индуктивность элемента связи, а сопротивление R_1 характеризует его активные потери, при этом можно отвлечься от истинной причины потерь.

В произвольном сечении $a-a$ полное сопротивление передающей линии

$$\frac{Z_{aa}}{Z_0} = \frac{R_1 + iX_1}{Z_0} + \frac{\beta_1}{1 + i2Q_{нен}\delta_i}, \quad (1)$$