

Василий Горбачев
 Виктор Кочемасов, к. т. н.
 Сергей Хорев

Аттенюаторы.

Часть 3

В заключительной, третьей части обзора подробно рассмотрены все типы волноводных аттенюаторов. Первые две части статьи опубликованы в журналах «СВЧ электроника» № 1 и 2 за 2023 год. Цикл статей исчерпывающе охватывает все виды аттенюаторов, используемых в инженерной деятельности.

Волноводные аттенюаторы

Цель большинства статей в технической литературе — объяснить или по крайней мере пояснить достаточно сложные физические основы и технологические тонкости тех или иных электронных компонентов и конструкций. Рассматривая в этом смысле волноводные ослабители, невольно обращаешь внимание на необычную конструктивную простоту этих «отрезков трубы с фланцами». Понятно, что простота эта кажущаяся и, тем не менее, в отраслевой истории есть примеры, когда волноводный ослабитель был изготовлен в буквальном смысле из того, что нашлось под ногами. В 2012 году поглощающий элемент цилиндрического волноводного аттенюатора был сделан из свежей морковки (рис. 37).

На представленном рисунке показан процесс токарной обработки морковки и конечный результат в виде поглотителя. Можно

представить себе, что цилиндрический волновод аттенюатора был выточен на том же токарном станке. Как утверждал неизвестный создатель в своем сообщении [1], достигнутое ослабление составило 40 дБ, КСВ не измерялся и качество сигнала его устроило. В авторском материале не указано, для решения каких задач был сделан поглотитель и какова его практическая ценность, но можно уверенно отметить, что в истории техники вряд ли кто-то, кроме создателя этого аттенюатора, экспериментально подтвердил выполнение уравнений Максвелла в такой среде распространения, как морковь.

Наиболее широко распространенный способ достижения заданного ослабления волноводного аттенюатора — это поглощение электромагнитного излучения внутри волновода. Конструкция фиксированных поглотителей много десятилетий неизменна, и если не при-

нимать во внимание материал поглотителя, понятна из рис. 37.

Поглощающие волноводные аттенюаторы с плавнопеременным ослаблением используют подвижные узлы трех типов. Два первых типа представлены на рис. 38 и требуют наличия отверстия в узкой (рис. 38 а) либо щели в широкой (рис. 38 б) стенках волновода.

Более подробное описание этих типов можно увидеть, например, в [2].

Третья конструкция подвижного узла не имеет технологических прорезей в волноводе и называется Rotary Vane. Ее достоинством считается повышенная точность установки ослабления и равномерность этого параметра в полосе. Впервые конструкция была описана в монографии Уилбура Ларсона (Wilbur Larson) в 1975 году [3]. Мы приведем несколько упрощенную версию данного описания по материалам фирмы Agilent Technologies, и сделаем это лишь потому, что доступные в сети копии упомянутой монографии имеют «музейное» качество, затрудняющее использование изображений из нее. Нас будет интересовать собственно поворотный узел поглотителя и принцип действия переменного ослабления. Конструкция поглощающего элемента представлена на рис. 39.

Прибор (рис. 39) состоит из трех секций, крайние из которых представляют собой переходы сечения волновода типа «прямоугольник – круг» и «круг – прямоугольник». В этих секциях неподвижно установлены резистивные поглощающие пластины. Ориентация пластин: нормально к E-вектору. Средняя

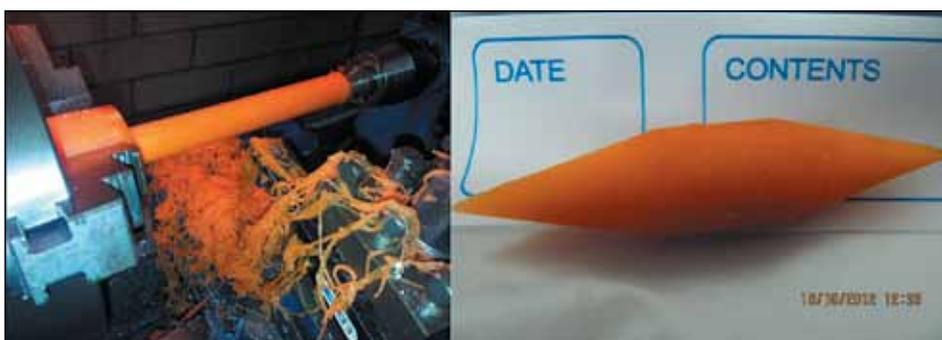


Рис. 37. Поглощающий элемент аттенюатора

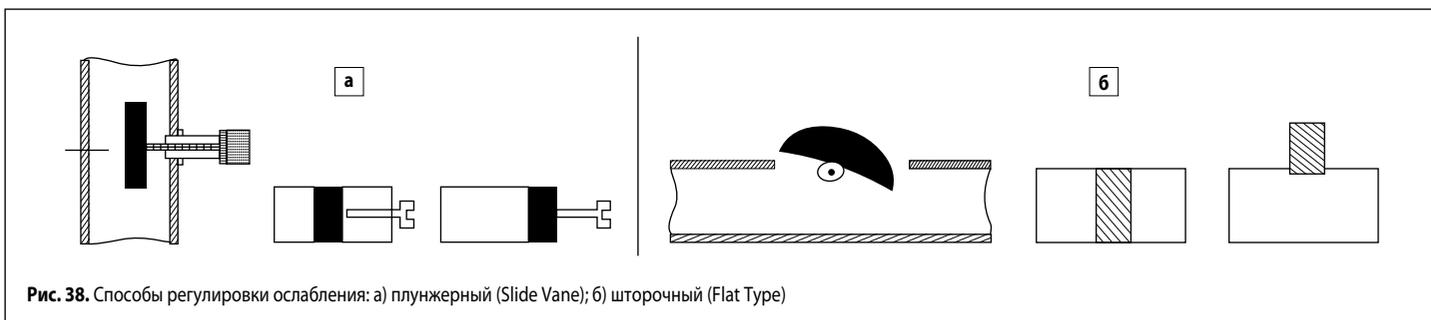
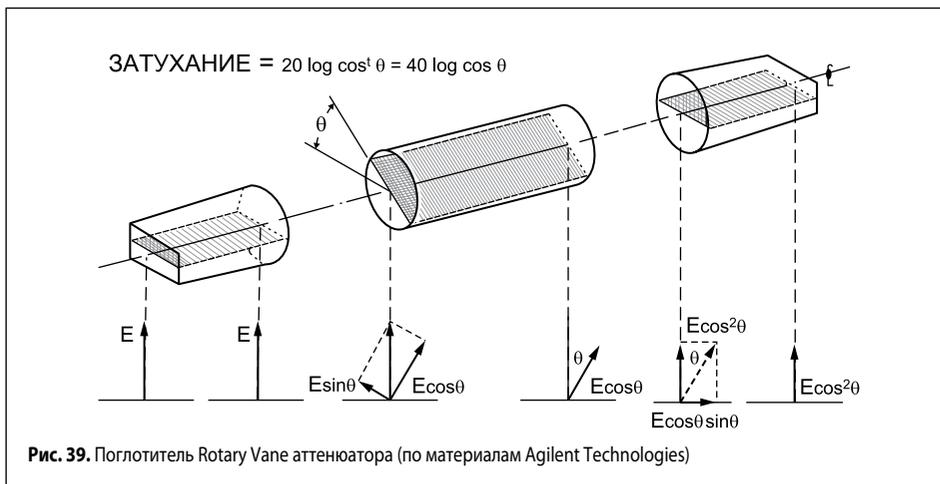


Рис. 38. Способы регулировки ослабления: а) плунжерный (Slide Vane); б) шторочный (Flat Type)



цилиндрическая секция нагружена резистивной пластиной, угол которой может изменяться при вращении средней секции (в российской отраслевой терминологии такие аттенюаторы называют поляризационными). Если во всех трех секциях пластины находятся в одной плоскости, СВЧ-мощность проходит без ослабления со входного на выходное сечение устройства. Вращение средней секции создает угол Θ , отличный от нуля, при этом электрическая составляющая поля разложится на две компоненты. Компонента, пропорциональная синусу угла, будет поглощена в резистивной пластине, а косинусоидальная часть без поглощения поступит на выходное сечение средней секции. Это первая ступень ослабления. Поскольку вектор $E \cos \theta$ не перпендикулярен плоскости поглощающей пластины третьей выходной секции, в ней вторично произойдет разложение входного вектора на составляющие и поглощение синусои-

дальной компоненты. Таким образом, полное ослабление тракта составит $40 \text{ Log } \cos \Theta$. При этом ослабление пропорционально только углу поворота пластины в средней секции и не зависит от частоты. Понятно, что наличие двух одинаковых концевых секций придает аттенюатору свойство двунаправленности.

Ручные плавнопеременные системы позиционирования поглощающих элементов в переменных аттенюаторах разделяются на два типа: калиброванные и некалиброванные. В свою очередь калиброванные аттенюаторы также разделены на два подтипа. Первые из них имеют шкалы либо иные устройства визуализации, позволяющие считать установленное ослабление сразу в относительных единицах, и чаще всего называются Direct Reading Attenuator (DRA). В отечественной терминологии — «прямоотсчетный». Отметим, что DRA в подавляющем большинстве случаев являются приборами поляризационного типа

(Rotary Vane) и могут оснащаться моторизованным приводом, в том числе с управлением по цифровому интерфейсу. Второй подтип чаще всего в качестве системы позиционирования имеет ручной микрометрический механизм и называется Level Setting Attenuator (LSA). Встречаются также термины Micrometer Type и Micrometer Driven. Вместо микрометра может использоваться подобный многооборотный точный механизм с градуированным диском и маховичком. Такие изделия называются Dial Type Level Set Attenuator. В случае, когда LSA-ослабитель снабжен градуировочной таблицей, он практически превращается в DRA. И DRA-, и LSA-изделия имеют точные системы позиционирования благодаря чему аттенюаторы становятся прецизионными.

Некалиброванные аттенюаторы имеют более простые и, соответственно, дешевые системы позиционирования в виде винтов с фиксаторами. На примере линейки плавнопеременных ослабителей Flann Microwave на рис. 40 показаны перечисленные типы систем позиционирования.

Все многообразие систем позиционирования плавнопеременных аттенюаторов не исчерпывается тремя приведенными типами. Вот несколько примеров. Американская компания Custom Microwave Inc. производит серию LSA-ослабителей (так они именуются в документации фирмы) LA, в которой настройка ослабления происходит перемещением майларовой пластины, причем для этого необходимо раскрутить винты крепления пластины, передвинуть ее вручную и снова зафиксировать (рис. 41).

Как утверждается в даташит, серия выпускается для случаев когда «постоянная переменность» не требуется. Доступные формфакторы WR3–WR42. Частотный диапазон 18–325 ГГц с наихудшим KCB 1,2.

Существуют и другие модели перестраиваемых аттенюаторов, имеющие непрецизионную систему позиционирования снабженную шкалой, например изделия от фирмы Hengda Microwave (рис. 42).

На рис. 42 видно, что ослабители имеют поглощающую систему шторочного типа Flat Type.

Некоторые производители плавнопеременных аттенюаторов с ручным управлением представлены в таблице 7. Так же как и в главе по аттенюаторам с коаксиальными соединителями, эта таблица является продолжением материала, представленного в [4].



Таблица 7. Плавнопереключаемые переменные аттенуаторы с ручным управлением

Компания	Серия/ модель	Частота, ГГц	Ослабление, дБ	КСВН, не хуже	Мощность, Вт	Примечание
Custom Microwave	VAXR(S)	18-325	0-30	1,2	-	микрометр
CernexWave	CDA	5,85-220	0-50	1,3	0,1-5	DRA
Elmika	DA-xE	18-170	0-60	1,2	0,1	Литва, DRA
A - Info	xxWVA30-xxWVA20	7,05-110	0-30 0-20	1,25	0,3-4	Китай, LSA, микрометр
Pasternack	PE-W12AT5001	60-90	0-50	1,2	0,2	DRA
OML Inc.	12MA30	60-90	0-30	1,5	0,3	микрометр
Beijing XiBao Electronic Tech.	XB-VA-19	40-60	> 35	1,2	-	Китай, LSA, микрометр,
Waveline Inc.	x22	2,6-50	0-60	1,15	0,5-15	DRA
Waveguide Solutions	VA22	26,5-40	0-40	1,25	0,2	микрометр
Advanced Technical Materials (ATM)	28-620A-6-6	26,5-40	0-30	1,15	1	диск с фиксатором
Penn Engineering	3730	26,5-40	0-25	1,2	-	с градуировочной таблицей
НПП «Элмика»	АП-32	25,95-37,5	0-60	1,15	0,1	Россия, прямоотсчетный (DRA)
Mega Industries	WR90	8,2-12,4	>35	1,5	-	Есть моторизованная модель

Как и всякая сложившаяся отрасль, микроволновое приборостроение включает в себя производство комплектующих для волноводных аттенуаторов. Среди немалой номенклатуры таких изделий нас будут интересовать поглощающие элементы именно потому, что это комплектующие для аттенуаторов в отличие, например, от фланцев, заглушек, секций вакуумирования и прочего. Для выпуска этих изделий используются те же технологии, что и для изготовления чип-резисторов. Выполняется напыление металлической (резистивной) пленки на керамическую подложку. Так, фирма EMC Technology (в настоящее время входит в Smiths Interconnect) в качестве подложки использует четыре материала: Fiberglass, Mylar, Kapton и Mica (слюда). Собственно отличие от резисторов заключается в больших размерах металлизированной пластины. Поверх резистивной пленки производится осаждение защитного слоя, предотвращающего окисление. На рис. 43 представлен внешний вид и отношение размеров поглощающих элементов.

В таблице 8 представлены общие технические данные и абсолютные размеры поглощающих пластин серии 73-01xx от EMC Technology.

Таблица 8. Поглощающие пластины серии 73-01xx от EMC Technology

Параметры	Fiberglass	Mylar	Kapton	Mica
Удельное сопротивление, Ом·м	25-1000			
Максимальная температура поверхности, °C	+130	+150		
Номинальная мощность	100% при +125 °C 0% при +150 °C			
Рабочая температура, °C	-55...+150			
Диэлектрическая константа	4,8 (1 МГц)	3,3 (60 МГц)	3,9 (1 Гц)	6 (1 Гц)
Длина/ширина (L×W), мм	304,8×127			127×50,8
Толщина, Т, мм	0,25 0,64 0,81 1,57	0,01 0,03 0,05 0,13	0,05 0,13	0,08 0,13

Компания RF Labs, так же как и EMC, входящая в Smiths Group, выпускает свою линейку поглотителей для волноводных аттенуаторов. Ее серия 73-00xx имеет восемь типоразмеров пластин с размерами WR62-WR229 на основе подложек из стекол PYREX (боросиликатное стекло) и LIME (материал на основе оксидов или гидроксидов кальция). Монтаж в волновод происходит через два монтажных отверстия. Ослабления 0-40 дБ.

Непоглощающие волноводные аттенуаторы

В отличие от непоглощающих коаксиальных аттенуаторов непоглощающие волноводные ослабители значительно более востребованы, прежде всего, в приложениях средней и большой мощности. Это связано с тем, что создание поглощающих ослабителей большой мощности упирается в конструктивные и технологические трудности производства поглощающих пластин высокой мощности и теплоотвода. Конструктивно непоглощающие аттенуаторы обычно реализуются в виде двух схем, представленных на рис. 44.

В настоящее время сложившаяся отраслевая практика такова, что подавляющее большинство непоглощающих волноводных ослабителей

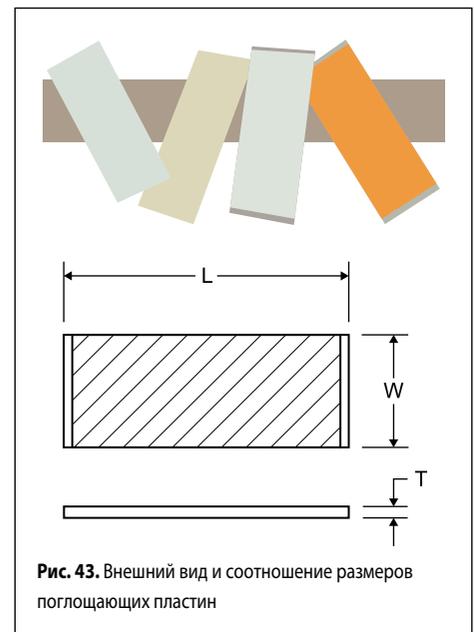


Рис. 43. Внешний вид и соотношение размеров поглощающих пластин

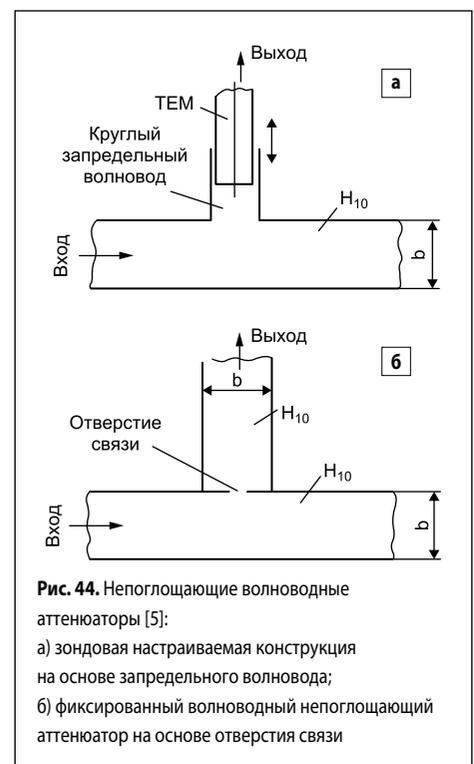


Рис. 44. Непоглощающие волноводные аттенуаторы [5]:
а) зондовая настраиваемая конструкция на основе запердельного волновода;
б) фиксированный волноводный непоглощающий аттенуатор на основе отверстия связи

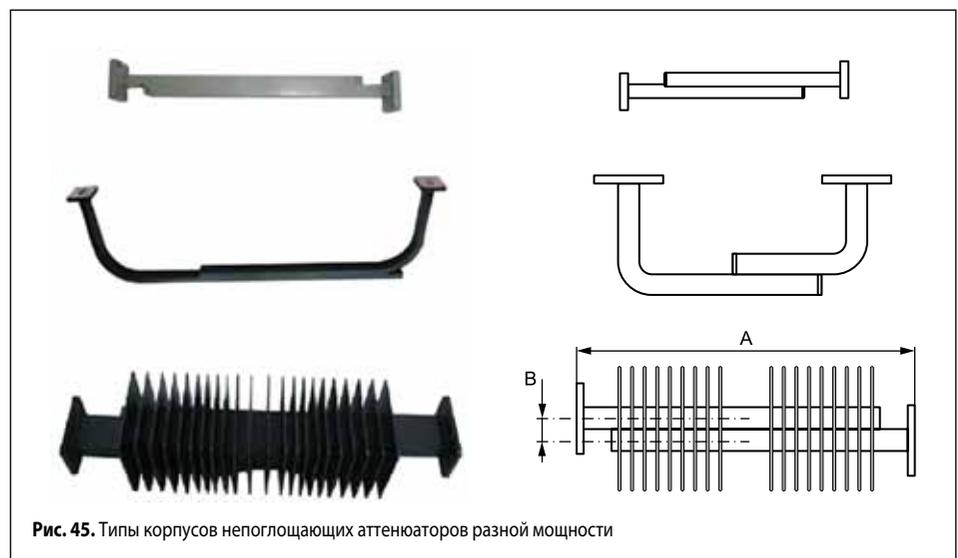


Рис. 45. Типы корпусов непоглощающих аттенуаторов разной мощности

Таблица 9. Непоглощающие фиксированные аттенюаторы

Фирма	Модель	Рабочая частота, ГГц	Ослабление, дБ	КСВ (макс.)	Мощность, Вт	Примечание
Vector Telecom Pty	VT220CFAX	17,6-26,7	3-60	1,2	-	U-образная модель (рис. 45)
	VT260CFUAX	21,7-33			-	
	VT900WHPCFA	73,8-110		1,25	10-600	модель с радиатором (рис. 45)
Flann Microwave	28580 [6] (серия 580)	92,3-140	3, 6, 10, 20, 30, 40	1,15	-	
Hengda Microwave	HD-120WHPFA	9,84-15	10, 20, 30	1,15	50	Китай
Lieder Development	WR284	2,6-3,95 (S Band)	3-60	1,1	10-1200	
RF-Lambda	RFWAT22W050	33-50	30	1,25	50	
A-INFO	159WPFA625-30	4,9-7,05	30	1,15	625	Китай
Advanced Technical Materials (ATM)	28-630HPA	26,5-40	10, 20, 30, 40, 50	1,15	75	
Dolph Microwave	DH-1800DRWCFA	18-40	10-60	1,15	-	Китай

лей производятся по второй схеме (отверстие связи), то есть по сути представляют собой направленные ответвители. Наличие отверстия связи создает специфику конструкции, при которой в технических характеристиках ослабителя появляется еще один параметр, характерный только для аттенюаторов этого типа. На рис. 45 представлен внешний вид непоглощающих волноводных аттенюаторов разной мощности, по материалам продуктовой линейки фирмы Vector Telecom Pty Ltd.

Упомянутый параметр — это смещение В (рис. 45) между центрами фланцев входного и выходного портов аттенюатора. Также

в документации некоторых производителей он называется Offset (O).

Уже отмеченная выше востребованность непоглощающих волноводных ослабителей видна и в производственных программах компаний микроволнового сектора электронной индустрии. Так, австралийская Vector Telecom Pty выпускает 60 моделей подобных изделий. Фирма Flann Microwave — 15, а китайская фирма A-Info имеет в каталоге около сотни моделей. В таблице 9 представлено несколько моделей этих и других компаний.

Оценивая значительный объем информации по теме аттенюаторов, появившейся

в сети за истекшие с момента последней публикации ООО «Радиокомп» в 2017 году, можно отметить значительное продвижение фирм из Китайской Народной Республики на этот рынок. Здесь следует говорить как о количественном (существенное увеличение ассортимента), так и о качественном (повышение рабочей частоты изделий, развитии. Столь же уверенно можно констатировать и сохраняющийся недостаток информации об отечественных серийных и перспективных аттенюаторах.

Литература

1. www.microwaves101.com/encyclopedias/carrottenuator
2. Кочемасов В., Белов Л. Фиксированные аттенюаторы: производители и характеристики. Часть 2 // Электроника НТБ. 2017. № 7.
3. Larson W. The Rotary — Vane Attenuator as an Interlaboratory Standard. US Government Printing Office, 1975.
4. Кочемасов В., Белов Л. Аттенюаторы с ручным управлением: производители и характеристики // Электроника НТБ. 2017. № 3.
5. Лебедев И. В. Техника и приборы СВЧ. Т. 1. Техника сверхвысоких частот. Под ред. Н. Д. Девяткова. М.: Высшая школа, 1970.
6. Microwave Products. Flann Microwave, 2007. www.intermera.ru/files/docs/FMI_Catalogue.pdf