

ФИКСИРОВАННЫЕ АТТЕНЮАТОРЫ – ПРОИЗВОДИТЕЛИ И ХАРАКТЕРИСТИКИ

ЧАСТЬ 1

В.Кочемасов, к.т.н.¹, Л.Белов, к.т.н.²

УДК 621.389
ВАК 05.27.00

Аттенюаторы – важный элемент микроволновых цепей. В журнале "ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес" уже рассказывалось об аттенюаторах СВЧ-диапазона с различными способами управления [1, 2]. В данной статье рассматриваются устройства с фиксированным значением ослабления.

Аттенюаторы с фиксированным ослаблением, или фиксированные аттенюаторы, выпускаются десятками мировых производителей и различаются номинальным уровнем ослабления, отклонениями от номинального значения, верхней рабочей частотой, уровнем максимальной входной мощности, стойкостью к неблагоприятным факторам внешней среды.

Конструктивно фиксированные аттенюаторы можно разделить на планарные, фланцевые (flange) и бесфланцевые (flangeless), а также коаксиальные и волноводные.

ФИКСИРОВАННЫЕ АТТЕНЮАТОРЫ ДЛЯ ПЛАНАРНОГО РАЗМЕЩЕНИЯ

Аттенюаторы этого типа выполняются обычно по тонкопленочной или толстопленочной технологиям. В качестве материала подложки используются кварц, алюминий, нитрид и оксид алюминия, оксид бериллия и другие материалы.

Хотя схематехнических вариантов реализации аттенюаторных ячеек не очень много, конструктивные решения отличаются большим разнообразием. Лишь несколько из многих вариантов таких решений для реализаций аттенюаторов по Т-схеме (рис.1а) представлены на рис.2.

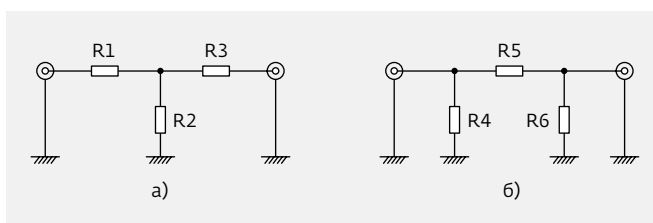
Среди этих изделий есть как полностью пригодные для поверхностного монтажа (рис.2а), так и те, в которых часть терминалов (обычно входной и выходной) подключаются к микрополосковым или копланарным линиям передачи на поверхности подложки или печат-

ной платы посредством проводников либо ленточных выводов (рис.2б, в).

Наряду со стандартным чип-исполнением применяют аттенюаторы flip-chip (рис.3а) и таблеточного типа (pill) (рис.3б). Flip-chip-аттенюаторы конструируются таким образом, что поверхность, на которой сформирована топология схемы, оказывается внизу. Такое решение позволяет избежать использования дополнительных входных и выходных проволочных или ленточных соединений и экономит площадь, занимаемую аттенюатором на поверхности печатной платы, позволяя обеспечить более плотный монтаж.

Допустимая входная мощность $P_{\text{доп}}$ аттенюатора зависит от его рабочей температуры (рис.4). Снижение $P_{\text{доп}}$ от номинального $P_{\text{ном}}$ до нулевого значения происходит в интервале температур от $T_{\text{гр}}$ (температура, при которой начинается снижение) до $T_{\text{макс}}$ (при которой $P_{\text{ном}}=0$). Для большинства аттенюаторов $T_{\text{гр}}=70, 85, 100, 175\text{ }^{\circ}\text{C}$, а $T_{\text{макс}}=150, 175, 200\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Общее представление о характеристиках маломощных аттенюаторов (до 2 Вт включительно) дает табл.1. Диапазоны рабочих частот этой группы аттенюаторов достигают нескольких десятков гигагерц, а рабочие температуры находятся в интервале $-55...150\text{ }^{\circ}\text{C}$.



¹ ООО "Радиокомп", генеральный директор,
vkochemasov@radiocomp.ru.

² МЭИ, профессор, belovla@gmail.com.

Рис.1. Схемы резистивных аттенюаторов;
а – Т-конфигурация; б – П-конфигурация

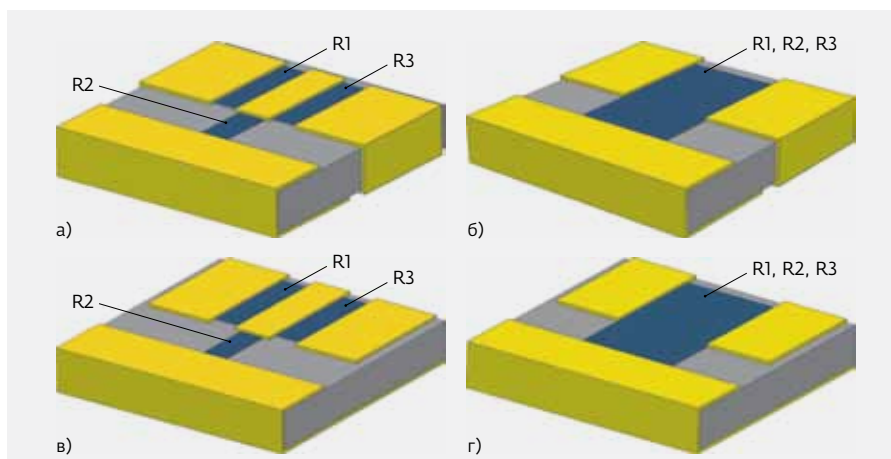


Рис.2. Варианты конструктивного исполнения аттенуаторов Т-типа в чип-исполнении от компании Mini-Systems: а, б – под поверхностный монтаж (модели MSAT-3, MSAT-7); в, г – с использованием проволочных или ленточных выводов (модели MSAT-2, MSAT-6)

Фирма State of the Art, Inc. производит несколько семейств чип-аттенуаторов по тонкопленочной технологии. Например, аттенуаторы серии O303 размерами $0,99 \times 0,94 \times 0,38$ мм, функционирующие на частотах до 20 ГГц, отличаются высокой стабильностью во времени (вариации ослабления не более 0,1% за 10^4 ч) в интервале внешних воздействий по MIL-PRF-55342. Наряду с обычными аттенуаторами компания производит также изделия под названием Filternator (фильтр-аттенуатор), в которых, помимо ослабления, обеспечивается фильтрация высокочастотных составляющих с частотами более 5,5–8,5 ГГц. Стандартные значения ослаблений в этих изделиях равны 1, 3, 6 и 10 дБ. Наибольший частотный диапазон рабочих частот (0–105 ГГц) обеспечивают чип-аттенуаторы компании Gigoptix.

В бескорпусных аттенуаторах компании Skyworks Solutions, Inc. за счет применения силиконовой основы увеличена верхняя граница рабочего диапазона температур до 175°C . Использование же оксида бериллия для пленочного

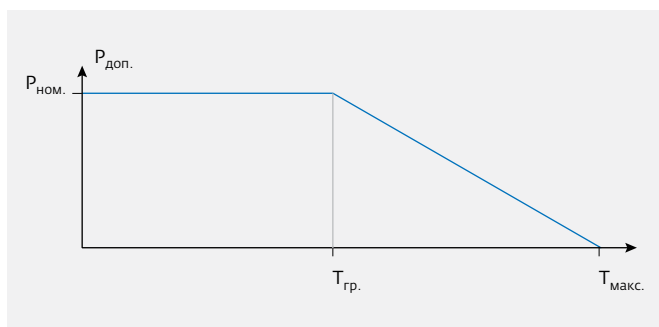


Рис.4. Допустимая входная мощность в зависимости от температуры подложки



Рис.3. Варианты конструктивного исполнения фиксированных аттенуаторов малой мощности: а – flip-chip (серия TS03, EMC Technology RF Labs); б – pill (серия PSA, Weinschel)

резистивного слоя поднимает до 2 Вт значение допустимой входной мощности. Аттенуаторы серии ATN3580 этой компании работают на частотах до 40 ГГц при допустимой входной мощности 1 Вт. Сходные характеристики имеют также чип-аттенуаторы компании Micrometrics.

Очень широкий диапазон ослабления от 1 до 70 дБ на частотах до 40 ГГц реализуется корпорацией International Manufacturing Services, Inc. в чип-аттенуаторах IAX-серии.

Несколько серий аттенуаторов для поверхностного монтажа (surface mounted package, SMP) производит корпорация Mini-Circuits. Так, аттенуаторы серии RCAT в керамическом SMP-корпусе размерами $2,2 \times 2,2 \times 1,1$ мм обеспечивают ослабление до 30 дБ, рабочую частоту до 20 ГГц и допустимую входную мощность до 2 Вт. Аттенуаторы серии YAT в MCLP-корпусе размерами $2,0 \times 2,0 \times 1,0$ мм вследствие использования

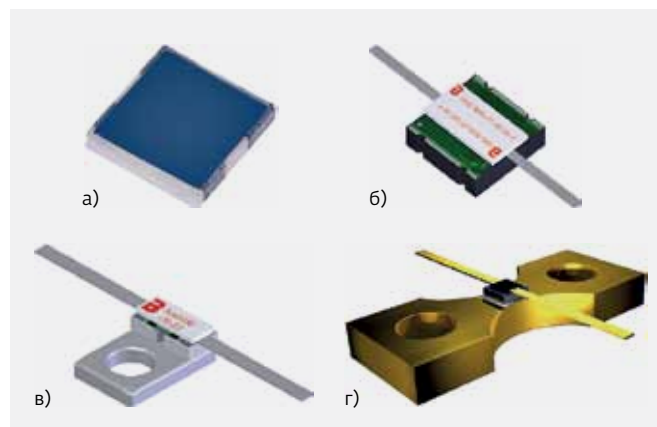


Рис.5. Конструкции мощных аттенуаторов: а – чип для поверхностного монтажа (Anaren); б – чип с ленточными выводами (Barry Industries); в – полуфланцевая конструкция (Barry Industries); г – фланцевая конструкция (EMC Technology RF Labs)

Таблица 1. Характеристики маломощных фиксированных аттенюаторов для планарного размещения (входная мощность $P_{вх.} < 2$ Вт)

Компания	Серия	Рабочая частота, ГГц	Стандартные ослабления*, дБ	КСВН (макс.)	$P_{вх.}$, Вт	Размеры, мм	Конструктивное исполнение
Aeroflex	PSAAF	0-8,0	1, 2, ..., 6, 10, 20	1,5:1	0,10	1,90×1,52×0,25	Flip-chip
Thin Film Technology Corp.	PAT3042	0-10,0	1, 2, ..., 10, 16, 20	1,3:1	0,25	4,20×3,02×0,81	Чип
IMS Resistors	IMA2314	0-12,4	1, 2, ..., 40	1,5:1	2,00	3,68×3,10×0,71	Чип
Aeroflex	PSA	0-12,4	1, 2, ..., 6, 10, 20	1,5:1	1,50	∅ 6,40×3,56	Pill, drop-in
Mini-Circuits	RCAT	0-20,0	1, 2, ..., 10, 12, 15, 20, 30	1,20:1	2,00	2,30×2,30×1,10	Чип
State of the Art, Inc.	S0303	0-20,0	1, 2, ..., 20	1,09:1	0,25	0,99×0,94×0,38	Копланарный, flip-chip
Massachusetts Bay Technologies	MAP 1000 0	0-26,0	1,2, ..., 5, 8, 10, 15, 20, 25, 30	1,30:1	-	-	Чип, pill
Ion Beam Milling	01311	0-26,0	1, 2, ..., 20	1,40:1	1,00	2,54×2,03×0,25	Чип
EMC Technology RF Labs	KFA	16,0-36,0	1, 2, ..., 10	1,35:1	0,20	3,05×1,65×0,28	Чип
Skyworks Solutions, Inc.	ATN3580	0-40,0	1, 2, ..., 10, 12, 15, 20, 30, 40	-	1,00	0,74×0,69×0,14	Чип
Aeroflex	MAT	0-40,0	1, 2, ..., 30	1,30:1	2,00	0,76×0,76×0,25	Чип
Gigoptix	EWA65xxzz	0-105,0	0, 2, 3, 6, 10	-	0,10	0,50×0,50×0,10	Чип

* В этой и других таблицах в диапазонах, обозначенных многоточиями, значения стандартных ослаблений с шагом 1 дБ (кроме случая, отдельно указанного в табл.3).

GaAs-подложки характеризуются малым тепловым сопротивлением корпуса.

Большинство компаний, выпускающих аттенюаторы, для нанесения топологического рисунка используют фотолитографические методы, для которых характерно явление подтравы, влияющее на разрешающую способность процесса. Альтернативой фотолитографии является метод сухого ионного травления, называемый также методом фрезерования ионным пучком. Этот метод используется компанией Ion Beam Milling, в том числе и для производства аттенюаторов. Выпускаемые компанией Ion Beam Milling микрополосковые СВЧ-аттенюаторы в космическом исполнении с габаритами 2,50×2,00×0,15 мм обеспечивают ослабление сигнала от 1 до 20 дБ с шагом 1 дБ в диапазоне частот 0-26,5 ГГц. Неравномерность ослабления не превышает 0,3 дБ на частотах до 18 ГГц. Эти изделия сертифицируются в соответствии со стандартами MIL-STD-883 и MIL-PRF-38534 и проходят в процессе изготовления

более 10 видов испытаний. Количество тестируемых образцов и порядок их отбора при каждом испытании определяются упомянутыми стандартами. Для разработчиков СВЧ-изделий компания Ion Beam Milling выпускает также инженерные наборы аттенюаторов, содержащие 45 образцов с ослаблением от 1 до 20 дБ на кварцевой подложке толщиной 0,025 мм.

При проектировании мощных пассивных и активных устройств (ответвители, делители / сумматоры мощности, усилители и др.) необходимы аттенюаторы повышенной мощности (табл.2). Как правило, в таких аттенюаторах используются подложки из оксида бериллия, а конструктивно они реализуются в виде чипов, фланцевых и бесфланцевых изделий (рис.5).

Фирма Varry Industries развивает тонкопленочную технологию изготовления аттенюаторов, "завернутых" (warp around) в слой металлизации. Ее SMP-аттенюаторы типоразмерами от 0405 до 1612, выполненные на подложках из Al, BeO или AlN в Т-образной конфигурации, отличаются

Таблица 2. Характеристики мощных фиксированных аттенюаторов для планарного размещения ($P_{вх.} > 2$ Вт)

Компания	Модель, серия	Рабочая частота, ГГц	Стандартные ослабления, дБ	КСВН (макс.)	$P_{вх.}$, Вт	Размеры, мм	Конструктивное исполнение
Barry Industries	ABC2010	0-6,0	1, 2, ..., 30	1,30:1	5	5,08×2,54×0,63	Чип
EMC Technology RF Labs	HPCA54	0-2,5	1, 2, ..., 10, 20	1,35:1	20	6,22×6,22×1,04	Чип
EMC Technology RF Labs	CA0505D	0-26,5	1, 2, ..., 10, 15, 20, 30	1,50:1	20	1,40×1,40×0,38	Чип
TT Electronics	RFA68DD	0-1,0	10, 20, 30	-	30	8,65×6,70×1,05	Чип
L3 Narda-MITEQ	HF75	0-2,3	1, 2, ..., 10, 15, 20, 30	1,25:1	75	14,61×5,72×3,05	Полуфланцевый
IMS Resistors	VGX-3725	0-6,0	1, 2, ..., 30	1,60:1	90	9,52×6,33×0,89	Чип
Aeroflex	PPA-100	0-0,5	1, 2, ..., 20	1,50:1	100	31,75×12,70×5,33	Чип
Anaren	RFP-100-XXAF	0-2,5	1, 2, ..., 6, 9, 10, 20, 30	-	100	8,89×5,72×1,77	Бесфланцевый
Res-Net Microwave	RPCA150N-30L1	0-3,0	30	1,20:1	150	9,53×6,35×1,02	Чип
Diconex	45-0016Y	0-2,2	30	1,20:1	200	9,50×9,50×1,00	Чип
Res-Net Microwave	RPA-250	0-1,0	1, 2, ..., 30	1,15:1	250	25,40×19,05×6,35	Фланцевый
Barry Industries	AA0800-250-15x	0-3,0	8	-	250	24,77×9,53×3,56	Фланцевый

широкой шкалой возможных значений ослабления и максимальными значениями верхней рабочей частоты от 2 до 18 ГГц. Заказные конфигурации flip-chip серии AS выпускаются с типоразмерами от 0706 до 2525 и значениями ослабления от 0 до 32 дБ. Аттенюаторы серии H с ленточными выводами отличаются увеличенной допустимой мощностью входного сигнала от 10 до 250 Вт при верхней рабочей частоте от 2 до 4 ГГц.

Диапазон рабочих частот мощных аттенюаторов обычно не превышает единиц гигагерц, а значения входной мощности – нескольких сотен ватт. Исключением является продукция фирмы EMC Technology RF Labs, которая продвигает технологию изготовления аттенюаторов на основе алмазной теплоотводящей подложки (серия CVD Diamond), позволяющую повысить рассеиваемую мощность и увеличить верхнюю рабочую частоту. Тонкопленочные чип-аттенюаторы серии CA0505D, выполненные по этой технологии, работоспособны на частотах до 26,5 ГГц, обеспечивают номинальные значения ослаблений от 1 до 30 дБ, рассеивают непрерывную входную мощность до 20 Вт при темпера-

туре окружающей среды от -55 до 150 °C и имеют исключительно малые размеры 1,40×1,40×0,38 мм. Аттенюаторы этой серии эффективно работают и при высоких мощностях входного сигнала. Так, они могут выдерживать пиковую мощность до 200 Вт в течение 1 мкс при скважности импульсов более 100. По возможности рассеивания непрерывной мощности с одного квадратного миллиметра (10 Вт/мм²) EMC Technology RF Labs – несомненный лидер среди всех производителей мощных СВЧ-аттенюаторов. Кроме того, вследствие высоких допустимых значений входной мощности, широкой полосы рабочих частот и исключительно малых размеров эти аттенюаторы идеально подходят для военных и космических применений. Высокая надежность этих устройств подтверждена испытаниями в соответствии со стандартом MIL-PRF-55342. Важно и то, что они удовлетворяют жестким требованиям НАСА по газовой выделению.

Поскольку планарные аттенюаторы отличаются большим конструктивным разнообразием, включая расположение выводов, часто возникают объективные трудности с измерением их параметров. Для решения этой

проблемы компания Electro-Photonics LLC разработала отладочную плату, позволяющую измерять характеристики чип-аттенюаторов на частотах до 14 ГГц. Аналогичный продукт предлагается и компанией Excelics.

Пассивную интермодуляцию и S-параметры (S_{11} , S_{12} , S_{21} , S_{22}) корпусированных аттенюаторов позволяют измерять приборы компании Custom Systems Integration, Inc.

АТТЕНЮАТОРЫ С КООКСИАЛЬНЫМИ СОЕДИНИТЕЛЯМИ

Многочисленные модели фиксированных аттенюаторов выполняются с коаксиальными соединителями. Это позволяет улучшить согласование входного и выходного импедансов в широкой полосе частот; снизить погрешность калибровки; использовать сменные наборы калиброванных ослабителей при проведении измерений. Специфическим параметром фиксированных аттенюаторов этого типа является длина компонента – расстояние между входным и выходным соединителями, которая существенным образом определяет значение КСВН и его вариации в интервале рабочих частот и рабочих температур.

Поскольку при выполнении измерений возникает необходимость многократных соединений / рассоединений аттенюаторов, к ним предъявляются повышенные требования по долговечности. Как и в обычных соединителях, критерием долговечности коаксиальных аттенюаторов служит максимально возможное число соединений / рассоединений.

Отличительная особенность коаксиальных аттенюаторов – возможность их мелкосерийного производства в соответствии с требованиями заказчиков.

В зависимости от диапазона рабочих частот, уровня входной мощности и других факторов в аттенюаторах могут использоваться различные виды соединителей, в том числе в рамках одной конструкции. При этом во входном и выходном соединителях возможны три сочетания соединений: гнездо / вилка, гнездо / гнездо и вилка / вилка.

Доступные значения ослаблений в большинстве выпускаемых аттенюаторов следуют с шагом 1 дБ, от 1 до 10 дБ включительно, а далее с шагом 10 дБ до значений 40, 50, 60 дБ. Однако в мощных аттенюаторах, например в модели 100-SA-MFN-120, выпускаемой компанией Bird Technologies, максимальное ослабление может достигать 120 дБ.

Зависимость допустимой входной мощности от температуры в коаксиальных аттенюаторах такая же, как и в аттенюаторах для

планарного монтажа (см. рис.4). Однако значение $T_{гр.}$ обычно равно 25–35 °С, а $T_{макс.}$ не превосходит 150 °С.

Коаксиальные фиксированные аттенюаторы отличаются конструкцией и схемой аттенюаторной ячейки. Чаще всего эти устройства реализуются в виде трубчатых корпусов из бронзы или нержавеющей стали. Аттенюаторы могут быть выполнены по Т- и П-образной схеме с применением дисковых и цилиндрических резисторов [3]. При использовании Т-образной схемы сборка из двух цилиндрических и одного дискового резисторов помещается в разрыв центрального проводника (рис.6а). Согласование участков коаксиальной линии в местах включения цилиндрических резисторов с соседними участками линии достигается путем уменьшения внешнего диаметра линии, причем при ослаблениях менее 10 дБ диаметр снижается незначительно. Подобные аттенюаторы применяются на частотах до нескольких гигагерц. На более высоких частотах используются пластинчатые резисторы [3], включаемые в разрыв центрального проводника (рис.6б).

Верхние значения рабочих частот коаксиальных аттенюаторов обычно не превосходят 40 ГГц и лишь в отдельных случаях достигают больших значений: 60 ГГц (Picosecond Labs), 67 ГГц (Keysight, RF-Lambda).

Характеристики коаксиальных фиксированных аттенюаторов малой мощности наиболее известных мировых производителей представлены в табл.3. Конструктивно такие аттенюаторы могут быть как трубчатыми (рис.7а), так и в виде прямоугольных модулей (рис.7б). Иногда фиксированные аттенюаторы выполняются, например компанией AKON, по микрополосковой технологии в виде РЧ-вставок с ленточными выводами (исполнение drop-in), которые при необходимости легко дополняются внешними коаксиальными соединителями (рис.7в).

Есть также устройства, выполненные на отрезках кабеля (кабельных сборках), длина которых рассчиты-

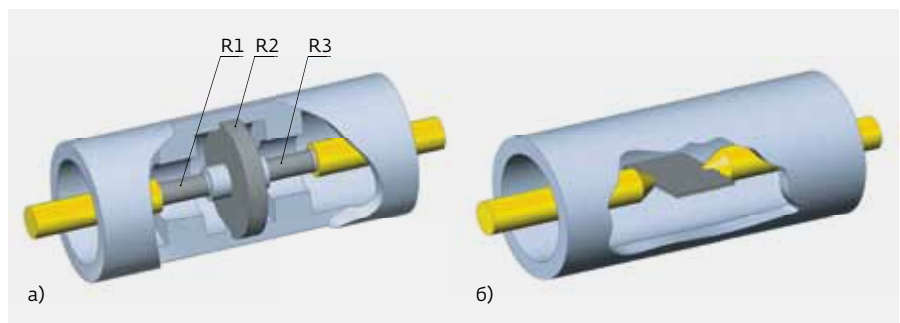


Рис.6. Конструктивное выполнение коаксиальных аттенюаторов: а – с цилиндрическими R1, R3 и дисковым R2 резисторами; б – с пластинчатым резистором

Таблица 3. Характеристики аттенуаторов с коаксиальными соединителями малой мощности ($P_{вх.} < 2$ Вт)

Компания	Серия	Рабочая частота, ГГц	Стандартные ослабления, дБ	КСВН (макс.)	$P_{вх.}$, Вт	Соединитель
Meca Electronics, Inc.	615-xx-1	0–2,0	40, 41, ..., 90	1,25:1	2	N
Response Microwave	RMATxx3000SMA	0–3,0	0,5; 1; 1,5; 2; 3; 6; 10; 12; 20; 30; 40	1,25:1	1	SMA
JFW Industries	50HN	0–6,0	1, 3, 6, 10, 20, 30	1,25:1	2	N
AKON	A51-MH0	0,5–18,0	2, 3, ..., 10	1,50:1	–	SMA, 2,92 мм
AtlanTecRF	AB18	0–18,0	1, 2, ..., 10, 12, 15, 20, 30, 40, 50, 60	1,35:1	2	SMA
RF Depot, Inc.	3699	0–18,0	0,5; 1; 2; ...; 15; 20; 30; 40; 50; 60	1,35:1	2	SMA
XMA Corporation	2082	0–18,0	0,5; 1,0; 1,5; ...; 10,5; 11; 12; ...; 20; 30*	1,35:1	2	SMA
Fairview Microwave	SA26B	0–26,5	1, 2, ..., 8, 10, 12, 15, 20, 30	1,50:1	2	SMA
Arra, Inc.	9454	0–26,5	3, 6, 10, 20	1,40:1	2	3,5 мм
Weinschel	WA54	0–40,0	3, 6, 10, 20, 30	1,45:1	2	2,92 мм
Narda Microwave	4768	0–40,0	3, 6, 10, 20	1,40:1	2	SMA, 2,92 мм
Midwest Microwave Solutions	ATT-640	0–40,0	3, 6, 10, 20	1,40:1	1	2,92 мм
Aeroflex	50EH	0–50,0	3, 6, 10, 20, 30	1,75:1	0,5	2,4 мм
Keysight	8490G	0–67,0	3, 6, 10, 20, 30, 40	1,45:1	1	1,95 мм
RF-Lambda	RFS1G67V	0–67,0	6, 10	2,00:1	1	1,85 мм

* Значения стандартных ослаблений между 1,5 и 10,5 с шагом 0,5 дБ.

вается исходя из требуемого ослабления (рис.7г). Особенности таких аттенуаторов – исключительно низкий уровень пассивных интермодуляционных искажений (ПИМ) и зависимость номинального ослабления от рабочей частоты. Например, в модели AT402 компании R & D Microwaves номинальное ослабление составляет 9, 14 и 22 дБ на частотах 400, 850 и 1930 МГц соответственно. Уровень ПИМ при подаче на вход двух 20-Вт сигналов в этом изделии ниже –160 дБн.

Среди коаксиальных аттенуаторов малой и средней мощности, безусловно, наиболее распространены трубчатые конструкции (in-line исполнение). К факторам, которые принимают во внимание пользователи таких аттенуаторов, относятся их геометрические размеры и, пре-

жде всего, длина. Внешний вид миниатюрных коаксиальных аттенуаторов представлен на рис.8.

Несмотря на малые размеры, все эти аттенуаторы функционируют в широком диапазоне частот. Так, аттенуаторы серии RFS1G67Vxx длиной 24,2 мм компании RF-Lambda (рис.8а) предназначены для работы на частоте

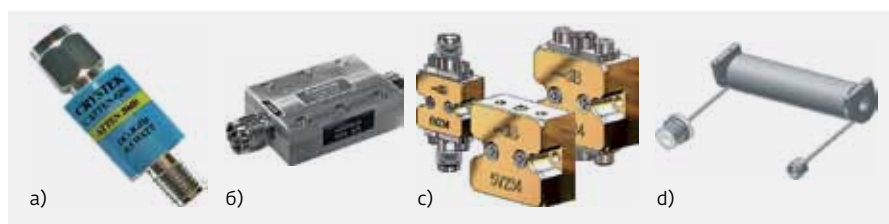


Рис.7. Варианты конструктивного исполнения коаксиальных фиксированных аттенуаторов: а – трубчатый корпус (Crustek); б – прямоугольный корпус (Weinschel); в – drop-in исполнение, дополняемое при необходимости коаксиальными соединителями (AKON); г – на кабельных сборках (R & D Microwave)



Рис.8. Миниатюрные фиксированные аттенюаторы в коаксиальном исполнении: а - RFS1G67V10, $L_{\text{мин.}} = 24,2$ мм (RF-Lambda), б - ASM26-серия, $L_{\text{мин.}} = 15,5$ мм (AtlanTecRF), в - 42W-серия, $L_{\text{мин.}} = 21,8$ мм (EMC Technology RF Labs), г - модель 6MP, $L_{\text{мин.}} = 15,5$ мм (Inmet). $L_{\text{мин.}}$ - минимальная длина аттенюатора

тах до 67 ГГц, а аттенюаторы серии ASM26-хх длиной 15,5 мм (рис.8б) компании AtlanTecRF – на частотах до 26,5 ГГц. Отметим также и то, что длина аттенюаторов зависит от величины вносимого затухания. Например, аттенюаторы серии 42W компании EMC Technology RF Labs (рис.8в) с ослаблением от 0 до 12 дБ имеют длину 21,8 мм, а при ослаблениях 13 дБ и более длина увеличивается до 25,9 мм. Эта особенность характерна и для изделий других производителей.

К числу основных характеристик фиксированных аттенюаторов относятся точность поддержания номинального ослабления и требования к величине КСВН в рабочих диапазонах частот и температур. Зависимости $A(f)$ и КСВН(f) для 10-Вт, 10-дБ аттенюатора компании Weinschel представлены на рис.9.

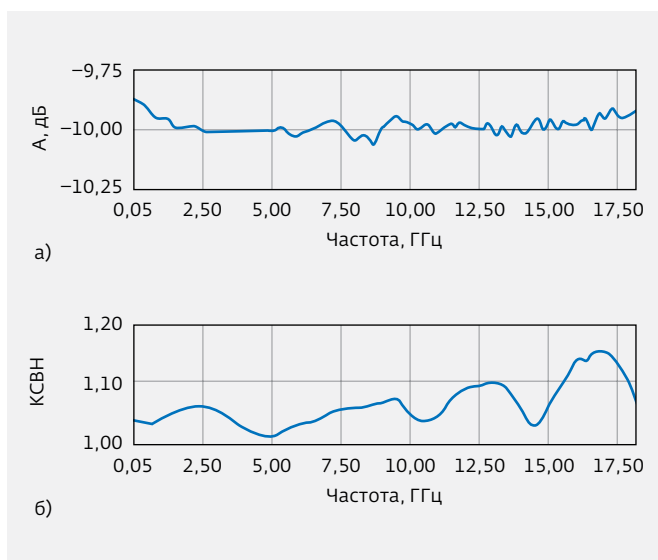


Рис.9. Зависимости ослабления А (а) и КСВН (б) от рабочей частоты для 10-дБ коаксиального аттенюатора компании Weinschel (модель 23-10-23)



Рис.10. Фланцевые модели коаксиальных аттенюаторов различных производителей: а - 551-199-100 (Broadwave Technologies); б - HFS-835 (Ingun), в - RFS2G18F (RF-Lambda)

В ряде случаев коаксиальные фиксированные аттенюаторы используются в составе различных устройств или приборов для постоянного или эпизодического контроля тех или иных параметров. При этом они выполняются в виде фланцевых конструкций, закрепляемых внутри прибора или на одной из его панелей. Несколько вариантов реализации таких аттенюаторов изображено на рис.10.



Рис.11. Конструкции коаксиальных фиксированных аттенюаторов большой мощности ($P_{\text{вх.}} > 2$ Вт): а - модель 75А, 5 Вт (Weinschel); б - модель 23, 10 Вт (Weinschel); в - RFS50CXD, 50 Вт (RF-Lambda); г - серия 770, 100 Вт (Narda Microwave-East); д - модель 66, 150 Вт (Weinschel); е - модель 58, 250 Вт (Weinschel); ж - серия 300-WA, 300 Вт (Bird Technologies); з - серия RFS800G, 800 Вт (RF-Lambda); и - RFS2000G3, 2000 Вт (RF-Lambda)

Таблица 4. Характеристики мощных фиксированных аттенюаторов с коаксиальными соединителями ($P_{вх.} > 2$ Вт)

Компания	Модель, серия	Рабочая частота, ГГц	Стандартные ослабления, дБ	КСВН (макс.)	$P_{вх.}$, Вт	Соединитель
Charter Engineering	CS-526	0–26,5	3, 6, 10, 20, 30, 40	1,45 : 1	5	SMA
Aeroflex	23	0–18,0	1, 2, 3, 6, 10, 20, 30, 40, 50, 60	1,35 : 1	10	N
RF-Lambda	RFS106G40A	0–40,0	10, 20, 30	1,40 : 1	10	2,92 мм
Keysight	8498A	0–18,0	30	1,30 : 1	25	N
AtlanTecRF	AN18W50	0–18,0	3, 6, 10, 20, 30, 40	1,45 : 1	50	N
Arra	4450	0–4,0	3, 6, 10, 20, 30	1,25 : 1	50	N, SMA
JFW Industries	50FHAO-xxx-100	0–3,0	1, 2, ..., 50	1,40 : 1	100	N, 7/16 DIN
Narda Microwave	770	0–18,0	10, 20, 30, 40, 50, 60	1,40 : 1	100	N
RF-Lambda	RFS200G18B	0–18,0	10, 20, 30, 40	1,50 : 1	200	N
Link Microtek	AMCOJ-HP	7,5–18,0	10, 20, 30	1,30 : 1	300	N
EPX Microwave	ECA800	0–4,0	40, 50, 60	1,50 : 1	800	SMA, N, 7/16 DIN, TNC, BNC
Bird Technologies	1500-WA	0–2,4	3, 6, 10, 20, 30	1,25 : 1	1 500	N, 7/16 DIN
MCLI	PCA-2000-NF	0–0,5	30, 40, 50, 60	1,25 : 1	2 000	N
Diconex	16-6xxx	0–1,0	30, 40	1,10 : 1	2 500	EIA 7/8", 7/16 DIN
RF-Lambda	RFS10KG1	0–1,0	20, 30, 40, 50	1,40 : 1	10 000	L27, L29, L36, L52, EIA 5/8"

Общее представление о характеристиках мощных фиксированных аттенюаторов можно получить из табл.4. Все эти изделия снабжены радиаторами различной конструкции (рис.11) и в отдельных случаях требуют принудительного воздушного или жидкостного охлаждения. Нижняя граница рабочих температур как маломощных, так и мощных коаксиальных аттенюаторов находится в пределах $-40...-65$ °С, а максимальные рабочие температуры – не выше $100-125$ °С.

Как уже отмечалось, несмотря на то, что фиксированные аттенюаторы являются пассивными устройствами, при прохождении через них мощных модулированных широкополосных сигналов они могут стать источником пассивных интермодуляционных искажений. По этой причине многие компании, специализирующиеся на производстве мощных аттенюаторов, принимают меры по минимизации этих вредных искажений. Так, модель FZ-30FN компании Microlab в полосе частот $0,7-2,7$ ГГц при допустимой непрерыв-

ной мощности 100 Вт обеспечивает ослабление 30 дБ при уровне ПИМ = -150 дБн (тестовый сигнал 2×50 Вт). Лучший результат (ПИМ = -161 дБн) в более широком диапазоне частот ($0,4-13,0$ ГГц) при том же ослаблении и тех же испытательных сигналах обеспечивает аттенюатор кабельного типа DAS-A24 компании R & D Microwaves.

Количество моделей аттенуаторов с коаксиальными соединителями у каждого из основных производителей чрезвычайно велико, что обусловлено разнообразием сочетаний типов и модификаций соединителей на каждом из портов, уровней наибольшей средней и импульсной мощности, верхних значений рабочей частоты, условий окружающей среды. Поэтому приведем типовые конструктивные решения и характеристики аттенуаторов лишь некоторых производителей.

Коаксиальные аттенуаторы серии 42W фирмы EMC Technology RF Labs с тонкопленочной резистивной вставкой, рассчитанные на номинальную мощность 2 Вт и частоту до 18 ГГц, обеспечивают ослабление до 30 дБ и соответствуют нормативам MIL-DTL-3933 для военных и космических приложений.

Прецизионные фиксированные аттенуаторы компании Mini-Circuits, предназначенные для сигналов мощностью до 20 Вт и частотой до 18 ГГц, снабжены соединителями SMA или N и обеспечивают в зависимости от серии ослабление до 30 или 40 дБ в интервале рабочих температур $-55...100$ °С. Серия аттенуаторов BW-S30W20+ с увеличенной до 59 мм длиной обеспечивает КСВН не ниже 1,15:1 и допустимую мощность 20 Вт при 25 °С, которая линейно снижается до 4 Вт при 100 °С.

Корпорация Inmet предлагает чрезвычайно широкий набор разнообразных аттенуаторных изделий с ослаблением до 60 дБ и мощностью от 0,5 до 350 Вт со стандартной или укороченной длиной. Например, серия 50EH-XX, предназначенная для частот до 50 ГГц, обеспечивает стандартные значения ослабления 3, 6, 10, 20 и 30 дБ с погрешностью от 0,5 до 2 дБ, КСВН от 1,35:1 до 1,75:1. Допустимая мощность таких аттенуаторов меняется от 500 мВт при температуре 25 °С до 100 мВт при температуре 125 °С.

Компания XMA Corporation производит более 235 серий фиксированных аттенуаторов для частот до 65 ГГц при номинальной мощности от 2 до 300 Вт с соединителями SMA; SSMA; N; 2,4 мм и др. Например, серия 8582 рассчитана на частоту до 50 ГГц и ослабление до 30 дБ. Допустимая мощность снижается от 1 Вт при температуре 25 °С до 100 мВт при температуре 125 °С. Эти аттенуаторы выполнены с использованием соединителей типа 2,4 мм в соответствии с военным стандартом MIL-PRF-39012.

Фиксированные аттенуаторы фирмы MicroLab с коаксиальными соединителями способны рассеивать до 500 Вт мощности входного сигнала на частоте до 4 ГГц и до 20 Вт на частотах до 40 ГГц. Аттенуаторы с коаксиальными соединителями этой фирмы выполняются с волновым сопротивлением 50 или 75 Ом и обеспечивают ослабление от 1 до 40 дБ в диапазоне частот от постоянного тока до 3 или 18 ГГц. Интервал рабочих

температур этих аттенуаторов $-65...125$ °С. В линейке продукции представлены модели малой (менее 2 Вт) и высокой мощности (до 1 кВт средней мощности) с конвекционным отводом тепла.

Корпорация Bird Technologies в основном специализируется на производстве коаксиальных аттенуаторов высокой мощности. Аттенуаторы серии 8329-300 со встроенной системой масляного охлаждения работают при входных мощностях 2 и 4 кВт в диапазоне частот до 500 МГц, обеспечивают ослабление 30 дБ. Изделия этой фирмы, рассчитанные на входные мощности до 100–150 Вт, позиционируются как взаимные или двунаправленные (bi-directional), так как могут быть включены в линию любым из двух соединителей на своих портах. Более мощные модели реализуются в однонаправленном (uni-directional) варианте. Обусловлено это тем, что аттенуаторы высокой мощности имеют особые конструкции, призванные обеспечить, кроме необходимых параметров радиочастотной цепи, рассеивание значительной тепловой мощности. Применительно к импульсным входным сигналам задача дополнительно усложняется динамическими процессами теплопередачи.

Мощные аттенуаторы различаются большим разнообразием вследствие использования разных видов охлаждения (конвекционное, воздушное с применением вентиляторов и жидкостное) и различных конструкций радиаторов (см. рис.11). По-видимому, самую большую входную мощность (10 кВт в непрерывном режиме) обеспечивают аттенуаторы RFS10KG1 компании RF-Lambda (см. табл.4).

Многие компании наряду с коаксиальными аттенуаторами производят адаптоаттенуаторы, которые одновременно являются адаптерами и аттенуаторами, то есть обеспечивают как сопряжение коаксиальных линий с разными типами соединителей, так и заданное значение ослабления. Количество моделей адаптоаттенуаторов в связи с многообразием сочетаний типов соединителей, рабочих частот, номинальной мощности, ослабления, конструкционного материала, покрытия, допустимых условий окружающей среды весьма велико.

Продолжение следует.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Кочемасов В., Белов Л.** Аттенуаторы с ручным управлением – производители и характеристики // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2017. № 3. С. 94–102.
2. **Кочемасов В., Белов Л.** Аттенуаторы с электронным управлением – производители и характеристики // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2017. № 4. С. 82–95.
3. Радиоизмерительная аппаратура СВЧ и КВЧ. Узловая и элементная базы. Коллективная монография / Под ред. А.М.Кудрявцева. – М.: Радиотехника, 2006. 208 с.



ИСПЫТАНИЯ НА ЭМС

квалификационные
предквалификационные

**АККРЕДИТОВАННАЯ ИСПЫТАТЕЛЬНАЯ ЛАБОРАТОРИЯ
АО «ТЕСТПРИБОР» ПРЕДЛАГАЕТ ПРОВЕДЕНИЕ ИСПЫТАНИЙ:**

- На устойчивость к изменениям в системе электропитания.
- Измерение уровня электромагнитных помех (помехоэмиссии).
- На восприимчивость к кондуктивным помехам.
- На устойчивость к воздействию электростатических разрядов.
- На устойчивость к воздействию магнитных полей.
- На устойчивость к воздействию электромагнитных полей.
- На измерение коэффициента экранирования различных материалов, используемых для защиты от электромагнитных излучений в диапазоне частот до 18 ГГц.
- Выездные испытания.

ТЕСТПРИБОР

По результатам прохождения испытаний выдается протокол, который является основанием для получения сертификата соответствия. По требованию Заказчика испытания проводятся под контролем ВП МО РФ.