

ПРОГРАММИРУЕМЫЕ АТТЕНЮАТОРЫ – ПРОИЗВОДИТЕЛИ И ХАРАКТЕРИСТИКИ

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

УДК 621.389
ВАК 05.27.00

В журнале "ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес" рассказывалось об аттенюаторах СВЧ-диапазона с различными способами управления [1, 2], а также с фиксированным ослаблением [3, 4]. В данной статье речь пойдет о программируемых аттенюаторах.

Сфера применения программируемых аттенюаторов чрезвычайно широка: автоматическое тестирование различного оборудования, системы удаленного контроля, имитация потерь в трактах распространения СВЧ-сигналов при моделировании сложных радиотехнических комплексов, научная, промышленная и медицинская области и др.

Программируемые аттенюаторы представляют собой вполне самостоятельный класс аттенюаторов, характерным признаком которых является управление от ПЭВМ или контроллера по выбранному интерфейсу в соответствии со специально разработанным программным обеспечением. Программируемый аттенюатор может также иметь ручной орган управления. При этом необходимое ослабление устанавливается как с клавиатуры ПЭВМ, так и с ручного органа управления. Иногда программируемый аттенюатор снабжают индикатором, позволяющим видеть реально вносимое ослабление не только на экране ПЭВМ, но и на самом аттенюаторе.

Программируемые аттенюаторы подразделяются на электромеханические и электронные. К первым относятся моторизованные аттенюаторы, а также устройства, в которых переключение ячеек с фиксированными значениями ослабления достигается посредством высокочастотных реле. Основой электронных программируемых аттенюаторов служат аналоговые, цифро-аналоговые и цифровые ступенчатые аттенюаторы.

Моторизованные устройства базируются на коаксиальных и волноводных аттенюаторах с ручным управлением, дополненных электромеханическим приводом на основе двигателей постоянного тока или шаговых двигателей. При использовании двигателя постоянного

тока скорость перестройки определяется напряжением с выхода потенциометра, расположенного на корпусе аттенюатора. Напряжение на вход потенциометра подается по кабелю через соединитель, установленный на аттенюаторе. Включенные в состав аттенюаторов 3-позиционные микропереключатели обеспечивают увеличение (уменьшение) вносимого ослабления и остановку двигателя в крайних положениях. Моторизованные аттенюаторы могут быть как однооборотными, так и многооборотными. Многооборотность, минимальный мертвый ход и быстрая остановка двигателя при снятии управляющего напряжения – определяющие факторы для достижения высокой точности установки требуемого ослабления.

Альтернативой двигателям постоянного тока являются бесщеточные шаговые двигатели, которые обеспечивают исключительно быстрое и точное позиционирование аттенюатора. Шаговые двигатели могут быть использованы как с однооборотными, так и с многооборотными аттенюаторами. Широкие возможности программирования и точность установки ослабления в таких устройствах достигаются благодаря использованию микропроцессорной техники.

Наиболее известные производители моторизованных аттенюаторов – компании Flann Microwave, Quinstar, Millitech, ARRA Inc.

В моторизованных программируемых аттенюаторах наряду с дистанционным управлением по одному или нескольким стандартным интерфейсам (обычно RS-232, RS-485, IEEE-488, Ethernet) от ПЭВМ или специального контроллера всегда имеется возможность ручного управления ослаблением. В отдельных случаях (MWA-серия, Millitech) контроллер может одновременно обслуживать два устройства. Контроллеры реализуются на основе микропроцессоров, которые управляют включенным в состав аттенюатора двигателем для достижения необходимого ослабления. Время переключения с одного

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

² МЭИ, профессор, belovla@gmail.com.

Таблица 1. Характеристики программируемых волноводных аттенуаторов

Компания	Серия	Рабочая частота, ГГц	Общее ослабление, дБ	Шаг ослабления, дБ	Вносимые потери, дБ	КСВН	$P_{вх.}$, Вт	Интерфейс
Flann Microwave	624	8,2–112,0	0–50	0,10	0,25–1,5	1,15 : 1	4,0–0,07	RS-485
Sage Millimeter	STA-60-xx-PI	18,0–140,0	0–60	0,05–0,10	0,5–3,0	1,20 : 1–1,30 : 1	0,5–0,3	IEEE-488, RS-232
Millitech	MWA	18,0–170,0	0–60	0,10	0,5–2,0	1,15 : 1–1,50 : 1	0,5–0,3	IEEE-488, Ethernet
Quinstar	QPA	7,0–170,0	0–50	0,05–0,10	1,0–2,2	1,15 : 1–1,30 : 1	5,0–0,2	IEEE-488, RS-232
Cernex	CRV	5,85–170,0	0–60	0,05–0,10	0,7–2,5	1,15 : 1–1,30 : 1	10,0–0,2	IEEE-488
Millimeter Wave Products	511	7,0–220,0	0–60	0,05–0,10	0,5–3,0	1,15 : 1–1,30 : 1	5,0–0,2	IEEE-488
Flann Microwave	621	3,3–330,0	0–60	0,01–0,10	0,5–4,5	1,15 : 1–1,30 : 1	10,0–0,01	IEEE-488

ослабления на другое при использовании шаговых двигателей обычно составляет несколько секунд, а количество возможных значений ослабления достигает 125 000 (MWA-серия, Millitech). Диапазон устанавливаемых значений ослабления обычно не превышает 60 дБ, а шаг равен десятым или сотым долям децибела (табл.1). Каждый производитель таких программируемых аттенуаторов выпускает не менее десятка моделей. Наибольшая прецизионность и самая широкая номенклатура обеспечивается компанией Flann Microwave. Шаг установки ослабления в изделиях этой компании может быть равным 0,01 дБ, а диапазон рабочих частот меняется в пределах от 3,3 до 330 ГГц. Внешний вид двух моторизованных волноводных программируемых аттенуаторов представлен на рис.1.

В релейных программируемых аттенуаторах ступенчатое переключение ослабляющих ячеек (рис.2) обеспечивается с помощью высокочастотных реле или электро-механических переключателей. Применяемые реле (или электро-механические переключатели) различаются способом управления: fail-safe и latching. В первом переключение происходит по переднему фронту импульса управления, а по заднему фронту реле возвращается в исходное состояние. В реле с latching-управлением переключение из одного состояния в другое происходит по передним фронтам управляющих импульсов, подаваемых на два входа управления. Постоянное присутствие управляющего сигнала на входе fail-safe реле приводит к нежелательному нагреву и является их существенным недостатком. Выбор типа реле определяется областью его применения.



Рис.1. Программируемые моторизованные аттенуаторы в волноводном исполнении: а – QPA-серия (Quinstar); б – 624-серия (Flann Microwave)

Таблица 2. Характеристики релейных программируемых аттенюаторов

Компания	Модель	Рабочая частота, ГГц	Общее ослабление, дБ	Ослабление в отдельных ячейках, дБ	Вносимые потери, дБ	Время переключения, мс	$P_{вх.}$, дБм	КСВН (макс.)
Daico	100D0712	0–0,4	31,75	2; 0,5; 8; 0,25; 4; 16; 1	3,5	5	20	1,25 : 1
BroadWave Technologies	651-026-063	0–1,0	63	1, 2, 4, 8, 16, 32	2,0	10	30	1,30 : 1
Amplical	50MAP127-2G	0–2,0	127	1, 2, 4, 8, 16, 32, 64	4,75	6	30	1,30 : 1
Alan Industris	50TTL63-3	0–3,0	63	1, 2, 4, 8, 16, 32	4,9	6	33	1,50 : 1
API Technologies	3209-1E	0–3,0	64,5	0,1; 0,2; 0,4; 0,8; 1; 2; 4; 8; 16; 32	5,5	6	30	1,45 : 1
R&K	R&K-PT010-0S	0–5,5	15	1, 2, 4, 8	3,5	5	24	1,30 : 1
JFW Industries	50P-1516	0–6,0	70	10, 20, 20, 20	3,5	10	27	1,50 : 1
API Technologies	3408T-103	0–6,0	103	1, 2, 4, 8, 16, 24, 48	5,0	6	30	1,45 : 1
RLC Electronics	PA-125	0–20,0	70	10, 20, 40	1,6	15	33	1,80 : 1
Keysight	8497K	0–26,5	90	10, 20, 20, 40	2,8	20	30	1,80
Anritsu	4622K	0–40,0	110	10, 20, 40, 40	3,9	20	30	2,0 : 1

Значения ослаблений в отдельных ячейках могут отличаться одно от другого в два раза (например, 1, 2, 4, 8, 16, 32 дБ), в этом случае управление выполняется двоичным кодом. Однако значения ослаблений могут выбираться и иным образом, например, 1, 2, 3, 4, 8, 16, 24, 48 дБ. В зависимости от вида реле или электромеханических

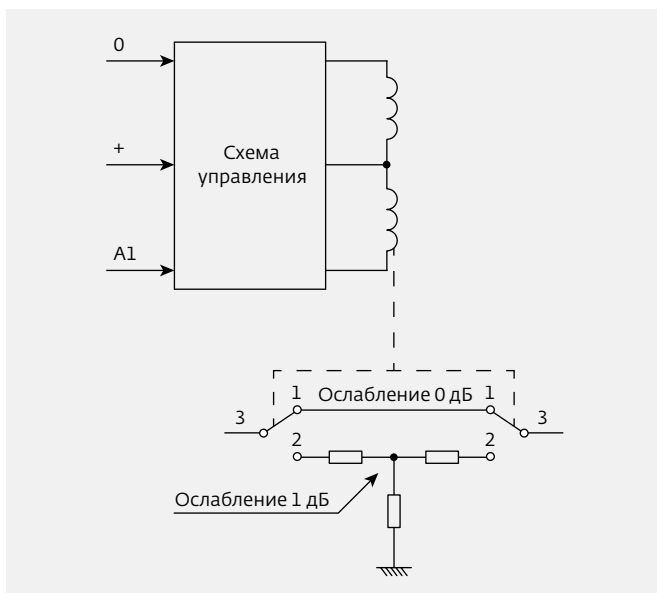


Рис.2. Упрощенная схема ослабляющей ячейки на релейных переключателях. A1 – ослабление в 1-й ячейке

переключателей диапазон входных частот простирается от нулевых значений до сотен мегагерц или десятков гигагерц. Время переключения таких аттенюаторов обычно составляет 5–30 мс, что значительно превышает время переключения в твердотельных устройствах. Но аттенюаторы с релейным управлением характеризуются существенно меньшим уровнем интермодуляционных искажений по сравнению с твердотельными аналогами. Минимизация интермодуляционных искажений (рис.3) достигается грамотным выбором покрытия контактов и применением специально разработанных соединителей. Внешний вид ряда моделей аттенюаторов этого вида и их характеристики представлены соответственно на рис.4 и в табл.2.

Наряду со стандартными программируемыми аттенюаторами (рис.4а, б) компания Keysight предоставляет наборы, включающие соединительный кабель и специальный конструктив для крепления на нем двух программируемых аттенюаторов (рис.4в), обеспечивающих шаг перестройки 1 дБ в максимально возможном диапазоне ослаблений. Например, при последовательном соединении двух программируемых аттенюаторов 8494В и 8496Н, рассчитанных на рабочий диапазон частот 0–18 ГГц, шаг 1 дБ обеспечивается в интервале от 1 до 81 дБ.

Одни из наиболее интересных моделей этого класса – разработанные компанией Rohde & Schwarz приборы R&S RSC, обеспечивающие ступенчатое изменение ослабления посредством релейных переключателей. Отдельные

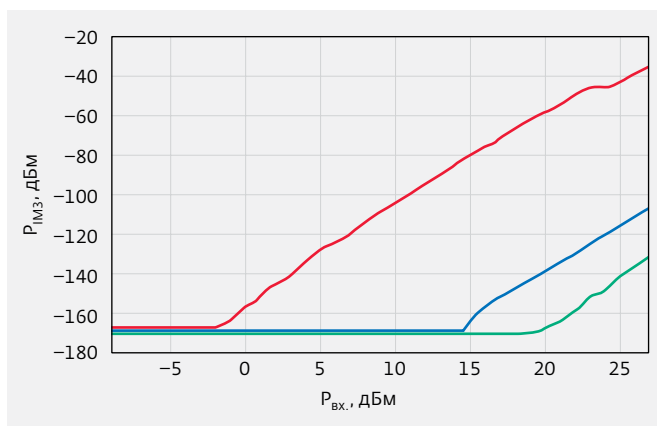


Рис.3. Уровень интермодуляционных искажений 3-го порядка в аттенюаторе в зависимости от входной мощности каждого из двухтоновых колебаний при различном исполнении соединителей: красный цвет – соединители с золочеными никелированными контактами; синий цвет – соединители с золотыми контактами без никелевого покрытия; зеленый цвет – соединители с оптимизированной технологией покрытия контактов (API Technologies)

модели этой разновидности приборов (см. рис.4г) могут работать на частотах до 67 ГГц, обеспечивая ослабление до 139,9 дБ с шагом 0,1 дБ. Приборы отличаются долговечностью (до 10 млн переключений) и высокой повторяемостью установки ослабления (до 0,02 дБ). Системы автоматизированного тестирования с этими приборами обеспечивают высокую точность установки ослаблений в связанных, авиационных, космических и военных применениях.

Несмотря на ряд преимуществ релейных программируемых аттенюаторов, при проведении большого объема автоматизированных измерений приоритетными становятся скорость переключения и долговечность. Предельно допустимое количество переключений в несколько миллионов в этом случае оказывается неприемлемым. Единственно возможным становится использование твердотельных программируемых аттенюаторов, прежде всего цифро-аналоговых и цифровых ступенчатых, а иногда и управляемых напряжением (табл.3).

Несомненное преимущество твердотельных программируемых аттенюаторов – высокая скорость их перестройки (иногда единицы и десятки наносекунд), а при использовании цифро-аналоговых структур – и большое число разрядов, а значит и меньший шаг перестройки (десятые и сотые доли дБ). Большое число разрядов в цифро-аналоговых

устройствах достигается при их тщательной калибровке. В программируемых аттенюаторах на основе цифро-аналоговых структур процедура калибровки выполняется с помощью прилагаемого программного обеспечения.

Твердотельные программируемые аттенюаторы отличаются широким разнообразием (рис.5). Наряду с модульными изделиями все чаще появляются программируемые устройства в приборном исполнении. К их числу относится и двухканальный программируемый аттенюатор PXI-5695 (диапазон частот: 0,05–8,0 ГГц), внешний вид которого показан на рис.5г. Один канал устройства обеспечивает фиксированное ослабление 27,5 дБ, а второй, представляющий собой цифровой ступенчатый аттенюатор, реализует ослабление от 0 до 31 дБ с шагом 0,5 дБ. При последовательном соединении двух устройств максимальное ослабление достигает 70 дБ с учетом вносимых потерь (под этим термином подразумевается затухание сигнала при установке нулевого ослабления в аттенюаторе), которые составляют 12–15 дБ в рабочем диапазоне частот цифрового аттенюатора.

В последние годы появились программируемые устройства, связанные с персональным компьютером по USB-интерфейсу, обеспечивающему поступление на аттенюатор не только управляющих сигналов, но и напряжения питания. Непременная принадлежность таких программируемых аттенюаторов – графический пользовательский интерфейс, совместимый со стандартной операционной системой Microsoft Windows, включая версии Windows 2000, Windows XP и Windows Vista. В связке с персональными компьютерами такие программируемые устройства позволяют проводить широкий круг измерений, в том числе автоматизированных. Многие аттенюаторы этого класса включают в себя флеш-память с размещенным в ней программным обеспечением и инструкциями по программированию аттенюатора.

Характеристики программируемых аттенюаторов с USB-интерфейсом представлены в табл.4, а варианты конструктивных решений – на рис.6. Отдельные аттенюаторы этого типа могут работать с другими интерфейсами, например, RS-232 (модель RUDAT-6000-60 компании



Рис.4. Программируемые релейные аттенюаторы: а – модель PT120 (R&K), б – модель 8360S (Telonic); в – последовательно соединенные модели 8494В и 8496В (Keysight), г – модель R&S RSC (Rohde & Schwarz)

Таблица 3. Характеристики твердотельных программируемых аттенюаторов

Компания	Модель	Рабочая частота, ГГц	Общее ослабление, дБ (число разрядов, бит)	Шаг ослабления (ослабление в отдельных ячейках), дБ	Вносимые потери, дБ	Время переключения, мкс	$P_{вх.}$ дБм	КСВН (макс.)	Тип аттенюатора
Daico	DA0897	0-1,0	63,5 (7)	0,5 (0,5; 1; 2; 4; 8; 16; 32)	7,1	0,06	17	1,2 : 1	ЦСА
JFW Industries	50AP-077	0,05-2,2	20	-	3,0	50,00	10	1,7 : 1	УНА
BroadWave Technologies	651-025-127	0,5-2,5	127 (7)	1 (1, 2, 4, 8, 16, 32, 64)	6,0	-	-	1,4 : 1	ЦСА
API Technologies	4248-103	0,01-2,5	103 (7)	1 (1, 2, 4, 8, 16, 24, 48)	13	5,00	36	1,4 : 1	ЦСА
Eubus	ATS0430-95	0,38-3,0	95,5 (8)	0,5 (0,5; 1; 2; 4; 8; 16; 32; 32)	6,0	-	23	1,6 : 1	ЦСА
JFW Industries	50P-1857	0,2-6,0	95 (7)	1 (1, 2, 4, 8, 16, 32, 32)	7,5	1,00	20	2,0 : 1	ЦСА
Kratos	3462C	2,0-8,0	60 (10)	0,06	3,2	1,0	17	1,8 : 1	ЦАА
Kratos	3495H-64	5,0-10,0	64 (11)	0,03	2,6	0,5	10	1,7 : 1	ЦАА
Tiger	TGDDT-F216-111	8,0-12,0	63 (6)	1	2,5	0,002	-	1,6 : 1	ЦАА
American Microwave Corporation	M-DVAN-60-12	6,0-12,0	60 (12)	0,03	2,8	0,5	20	2,0 : 1	ЦАА
GigaBaudics	PA13	0-13,0	63 (10)	0,0625	7,0	0,035	20	-	ЦСА/ ЦАА
Kratos	3486/H	4,5-13,5	60 (8)	0,25	2,8	0,06	8	2,2 : 1	ЦАА
Planar Monolithics Industries	PDVAT-0518-60-8-96	0,5-18,0	60 (8)	0,25	4,0	1,5	20	-	ЦАА
Planar Monolithics Industries	DTA-14G40G-32-CD-2	14,0-40,0	32 (10)	0,04	9,0	1,0	10	2,0 : 1	ЦАА

Примечание: УНА – управляемый напряжением аттенюатор; ЦАА – цифро-аналоговый аттенюатор; ЦСА – цифровой ступенчатый аттенюатор.

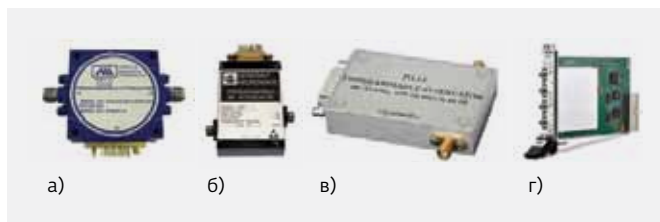


Рис.5. Твердотельные программируемые аттенюаторы: а – модель M-DVAN-6018-60DD-SC (American Microwave Corporation); б – модель 349 (Kratos); в – модель PA13 (GigaBaudics); г – модель PXI-5695 (National Instruments)

Mini-Circuits). При этом питание осуществляется от специального адаптера. В других аттенюаторах (например, модель Д6-6ЗРК компании ООО "Радиокомп") управление может выполняться одновременно с персонального компьютера через USB-интерфейс или вручную посредством сенсорной панели. Уровень внесенного ослабления отображается одновременно на экране прибора и дисплее ПЭВМ. При отключении от USB-интерфейса программируемый аттенюатор Д6-6ЗРК может работать автономно. Питание в таком режиме осуществляется от встроенного литиевого аккумулятора.

Несколько многоканальных моделей аттенюаторов, базирующихся на твердотельных или релейных

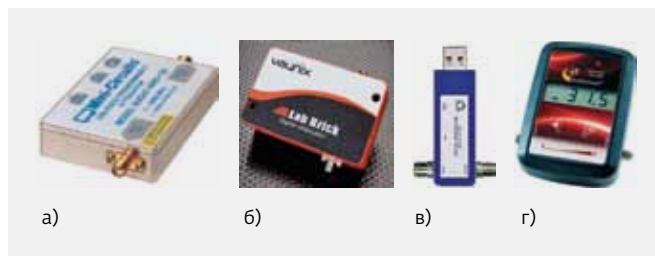


Рис.6. Программируемые аттенюаторы с USB-интерфейсом: а – RUDAT-4000-120 (Mini-Circuits); б – LDA-102 (Vaunix); в – ATN-30-100M40G-USB (Planar Monolithics Industries); г – Д6-6ЗРК (ООО "Радиокомп")

переключателях, разработано в последние годы компанией API Technologies (Aeroflex/Weinschel) (рис.7). Две из них (модели 8320 и 8321) управляются как непосредственно с передней панели прибора, так и по интерфейсам RS-232, Ethernet, USB 2.0, IEEE-488. Модель 8331 управляется только по стандартным интерфейсам RS-232, Ethernet, USB 2.0. Модель 8320 обеспечивает два канала ослабления. В моделях 8321 и 8331 число независимых каналов ослабления может достигать 12.

В качестве входных и выходных возможно применение соединителей типа N, SMA, 2,92 мм и F, которые могут располагаться только на передней (или задней) панели

Таблица 4. Характеристики программируемых аттенуаторов с управлением через USB-интерфейс

Компания	Модель	Рабочая частота, ГГц	Общее ослабление, дБ	Шаг ослабления, дБ	Вносимые потери, дБ	Время переключения, мкс	$P_{вх.}$, дБм	КСВН (макс.)
Telemakus	TEA4000-7	0,05–4,0	31,75	0,25	2,7	–	–	–
Mini-Circuits	RCDAT-4000-120	0,001–4,0	120	0,25	6,5–9,0	600	20	1,3:1
Mini-Circuits	RCDAT-6000-90	2,4–6,0	90	0,25	7,4	0,65	20	1,3:1
API Technologies	4205-95.5	0,2–6,0	95,5	0,50	8,0	1,0	23	2,0:1
ООО "Радиокомп"	D6-63PK	0,02–6,0	63	0,50	4,0	0,09	30	1,3:1
Vaunix	LDA-602	0,006–6,0	63	0,50	10,0	0,07	22	2,0:1
Mini-Circuits	RUDAT-6000-60	0,001–6,0	60	0,25	5,0	0,65	23	1,6:1
Mini-Circuits	RCDAT-6000-110	0,001–6,0	110	0,25	6,5–9,5	600	10	1,3:1
Telemakus	TEA8000-6	2,2–8,0	31,5	0,50	5,0	–	–	–
DS Instruments	DAT64H	0,1–12,0	63	0,50	8,0–14,0	–	22	–
Telemakus	TEA 13000-12	0,0001–13,0	30	0,50	3,0	–	–	–
API Technologies	DA 13-90	0–13,0	90	0,50	18,0	0,10	22	1,5:1
Vaunix	LDA-203	1,0–20,0	63	0,50	11,0–19,0	2,00	23	2,0:1
Planar Monolithics Industries	ATN-30-100M40G-USB	0,1–40,0	30	1,00	8,0	–	–	2,5:1

прибора либо на передней и задней панелях прибора (например, входные соединители на передней панели, а выходные – на задней панели прибора).

Частотный диапазон всех этих моделей простирается от 0 до 3; 6; 18; 26,5 и 40 ГГц и определяется при заказе. Максимальное ослабление в каждом канале не превышает 127 дБ.

Подобные программируемые аттенуаторы предназначены для тестовых и лабораторных испытаний, где их можно использовать в сочетании с переключателями,

делителями/сумматорами мощности, направленными ответвителями и фильтрами для создания сложных измерительных комплексов.

Таким образом, сегодня предлагаются самые разнообразные программируемые аттенуаторы. На основе информации, приведенной в статье, можно выбрать оптимальное устройство для решения конкретной задачи.

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. **Кочемасов В., Белов Л.** Фиксированные аттенуаторы – производители и характеристики. Часть 1 // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2017. № 6. С. 108–116.
4. **Кочемасов В., Белов Л.** Фиксированные аттенуаторы – производители и характеристики. Часть 2 // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2017. № 7. С. 90–94.



Рис.7. Программируемые аттенуаторы, выпускаемые компанией API Technologies: а – модель 8320, б – модель 8321