

# Твердотельные СВЧ-переключатели. Часть 2

В. Кочемасов, к. т. н.<sup>1</sup>, А. Кирпиченков, к. т. н.<sup>2</sup>.

УДК 621.389 | ВАК 05.27.00

В первой части статьи, опубликованной в предыдущем номере журнала, рассматривались общие сведения о твердотельных СВЧ-переключателях и технологиях, используемых при их создании. Сейчас речь пойдет о модульных переключателях. Их начали выпускать сразу же после изобретения кремниевых рpn-диодов и в дальнейшем постоянно совершенствовали. Анализ номенклатуры модульных устройств показывает, что большая их часть реализуется на кремниевых рpn-диодах. При создании модульных переключателей, как правило, используется стандартный набор схемотехнических решений. Однако конструктивно изделия могут существенно отличаться из-за разного количества переключаемых каналов и диапазона рабочих частот. Рассмотрим различные типы модульных переключателей.

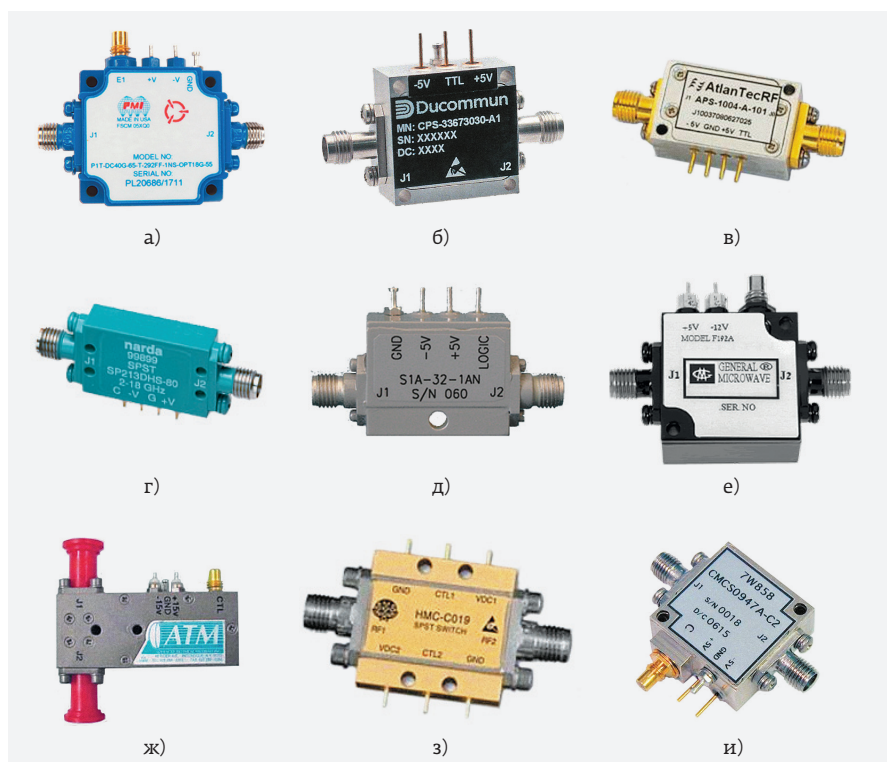
## МОДУЛЬНЫЕ SPST-ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛИ

Номенклатура SPST-переключателей на рpn-диодах, предлагаемых десятками компаний, чрезвычайно широка (табл. 2, рис. 6). Модульные изделия выпускают с коаксиальными соединителями или в исполнении drop-in (в виде ПЧ-вставки). Они доступны для широкого диапазона частот и различаются конструктивно, а также достижимыми значениями вносимых потерь, развязок, времени переключения и входной мощности.

SPST-переключатели могут быть как отражательными (рис. 7а), так и поглощающими (рис. 7б). Модель СМС0337 производства компании СМС (см. рис. 7а), предназначенная для работы в широкой полосе частот 2–18 ГГц, обеспечивает время переключения 2 нс – и развязку 60 дБ, которая может быть увеличена при использовании большего числа параллельно включенных диодов. Фильтры высоких частот на входе и выходе переключателя эффективно подавляют видеопросачивание.

Герметичная модель поглощающего переключателя

с интегрированным драйвером НМ192 компании Kratos, выполненная по микрополосковой технологии в исполнении drop-in с последовательно-параллельным включением рpn-диодов (рис. 7б), имеет в диапазоне



**Рис. 6.** Конструкции модульных SPST-переключателей: а – PIT-DC40G-65-T-292FF-1NS (PMI); б – CPS-33673030-A1 (Ducommun Technologies); в – APS-1004-A-101 (AtlantecRF); г – SP213DHS-80 (Narda Microwave); д – S1A-32-1AN (Mercury Systems); е – F192A (Kratos); ж – S1517D (ATM); з – HMC-C019 (Analog Devices); и – СМС0947А-С2 (СМС)

<sup>1</sup> ООО «Радиокомп», генеральный директор, vkochemasov@radiocomp.ru.

<sup>2</sup> А. Кирпиченков, к. т. н., АО «Институт Микроволновых Интегральных Систем» («Микро-ВИС»), главный конструктор.

частот 0,2–18,0 ГГц развязку 80 дБ и время переключения 10 нс.

Амплитудное и фазовое согласование с точностью  $\pm 0,25$  дБ и  $\pm 8^\circ$  в диапазоне частот 6–10 ГГц обеспечивает модель CMCS0292 компании СМС, реализованная в герметичном drop-in корпусе, совместимом с микрополосковыми или полосковыми линиями передачи. Типичное время переключения в этом устройстве составляет 0,3 нс.

Около 90 моделей SPST-переключателей отражательного и поглощающего типов выпускает компания Cobham Signal & Control Solutions. Эти изделия доступны для диапазона частот 0,01–18,00 ГГц. Все они оснащены драйвером, обеспечивающим работу переключателей от источников питания +5 и –12...–18 В. В каждом из устройств на входе и выходе предусмотрена развязка по постоянному току.

SPST-переключатели могут быть также реализованы с использованием балансных схем (рис. 8). Одно из таких

устройств (модель ISD9112, компания ST Olektron) в диапазоне частот 0,5–400 МГц обеспечивает вносимые потери 2 дБ, развязку более 45 дБ и время переключения 200 нс.

Четыре модели SPST-переключателей производит компания Teledyne Microwave Solutions, в том числе два отражательного (SJ1010, SRS3019) и столько же поглощающего (S2CP20101, S2CP20201) типа. Изделия выпускаются в различном конструктивном исполнении (корпуса TO-8B, SMT0-8B, SMA и 10-pin Gullwing).

12 моделей отражательного типа и столько же поглощающего (диапазоны частот 0,2–2,0; 0,5–2,0; 2–8; 4–12; 2–18; 1–18 ГГц) предлагает компания Miteq. Время переключения в них не превышает 2 нс. Изделия выпускаются как с SMA-соединителями, так и в исполнении drop-in.

В широком температурном диапазоне –55...95 °С могут работать SPST-переключатели на pin-диодах производства компании Mercury Systems. Отражательные

**Таблица 2.** Характеристики модульных SPST-переключателей

Компания	Модель	Диапазон частот, ГГц	IL, дБ	Iso, дБ	T <sub>п</sub> , нс	КСВН	P <sub>доп.</sub> , Вт
R&K	SW030-0S	0,005–1,0	<6,0	>35	50	1,4	0,02
СМС	CMCS0292	6,0–10,0	<1,5	>40	0,3	<2,0	1,0
СМС	CMCS0337	2,0–18,0	<2,2	>50	2	<1,9	2,0
Narda Microwave-east	SM213DHS	2,0–18,0	<2,1	>45	25	<1,8	0,5
Narda Microwave-east	SM213D	2,0–18,0	<2,0	>55	10	<1,7	3,0
Magnum Microwave	AHS1802-1xx	2,0–18,0	≤2,4	>60	<25	<1,8	–
Elbit Systems	MW121T28-H-H	2,0–18,0	<1,3	>60	15	<1,8	0,1
AtlantecRF	APS1006-R	2,0–18,0	2,2	55	50	2,2	0,2–1,0
Cernex	C1TA02183260Y	2,0–18,0	3,2	>60	<50	<2,2	0,5
Kratos	9114	1,0–18,0	<2,5	>60	<20	<2,0	1,0
MCE	SWM-1100	0,5–18,0	<2,75	>50	<100	2,1	<0,1
Cobham Signal & Control Solutions	S1U6	0,5–18,0	<3,0	>65	100	<1,9	0,5
ATM Microwave	S1517D	0,5–18,0	2,5	37–80	<20	<1,8	–
Miteq	SW1-001200RN1NFS138B	0,1–20,0	<5,0	>80	35	<2,0	–
MCLI	D1-18	18,0–26,5	<3,7	60	–	<2,5	0,1
Kratos	F9016	0,1–40,0	2,3–5,0	60–30	<250	2,0–2,5	<0,2
AMC	SWCH1K-DC40-SK	0–40,0	5,5	65	5	2,0	0,05
Cernex	C1TA18502540S	18,0–50,0	2,5	>40	<100	<1,5	0,25
Pasternack	PE71S2023	0,05–67,0	<8,5	>20	<150	–	<0,5

и поглощающие устройства выпускаются в пяти частотных диапазонах (0,5–2; 2–6; 6–18; 2–18; 0,5–18,0 ГГц). При необходимости их поставляют в исполнениях, устойчивых к воздействию вибраций, ударов и ускорений.

Широкую линейку отражательных и поглощающих переключателей стандартного типа производит компания Serpex. Самые широкополосные из них, предназначенные для работы в диапазоне частот 33–50 ГГц, обеспечивают вносимые потери от 2,2 дБ, развязку до 40 дБ и время переключения 100 нс.

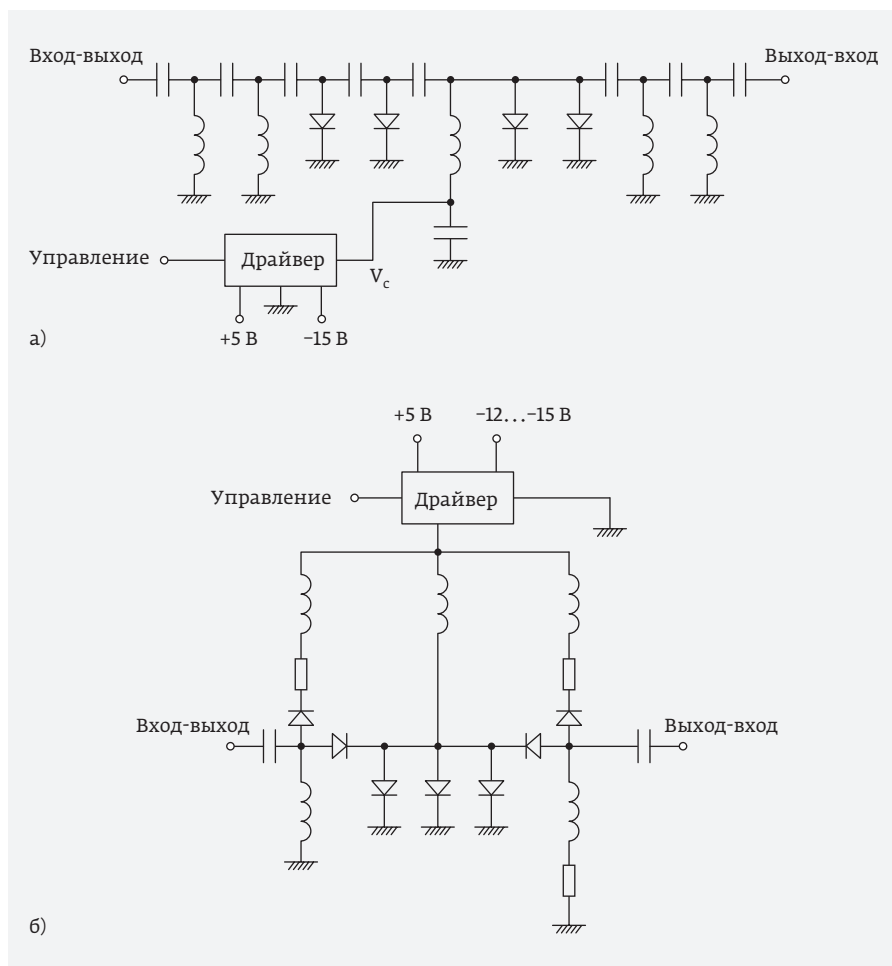
Герметичные отражательные и поглощающие SPST-переключатели для коммерческого, медицинского, военного и космического применения в диапазонах частот 0,5–4,0; 0,5–8,0; 0,5–12,0; 0,5–18,0; 0,5–20,0 ГГц производит компания АКОН. Вносимые потери и время переключения во всех моделях не превышают 1,1–2,4 дБ и 50 нс соответственно. Развязка на всех частотах превосходит 60 дБ.

Коаксиальные SPST-переключатели на pin-диодах серии QSC компании Quinstar Technology обеспечивают

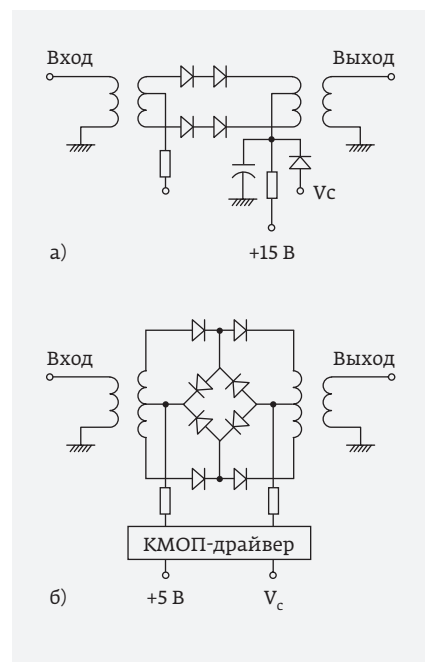
быстрое переключение, высокую развязку и малые вносимые потери в диапазонах частот 18,0–26,5; 26,5–40,0; 18,0–40,0 ГГц, идеально подходят для обеспечения импульсной модуляции и защиты приемников. Доступны как отражательные, так и поглощающие типы этих устройств. Компактный корпус включает в себя драйвер, обеспечивающий время переключения 5 нс.

Исключительно широкополосные (0,05–67,00 ГГц) модели SPST-переключателей отражательного (PE7IS2023) и поглощающего (PE7IS2024) типов выпускаются компанией Pasternack. В этом диапазоне частот устройства имеют время переключения 150 нс и входную мощность до 0,5 Вт. В поглощающих переключателях выходной порт в положении «включено» замыкается на 50-Ом нагрузку. Вносимые потери увеличиваются от 1 дБ на низких частотах до 8–9 дБ на частоте 67 ГГц (рис. 9а, б), развязка по диапазону частот меняется от 20 до 48 дБ в изделии PE7IS2023 и от 25 до 48 дБ – в PE7IS2024 (рис. 9в, г).

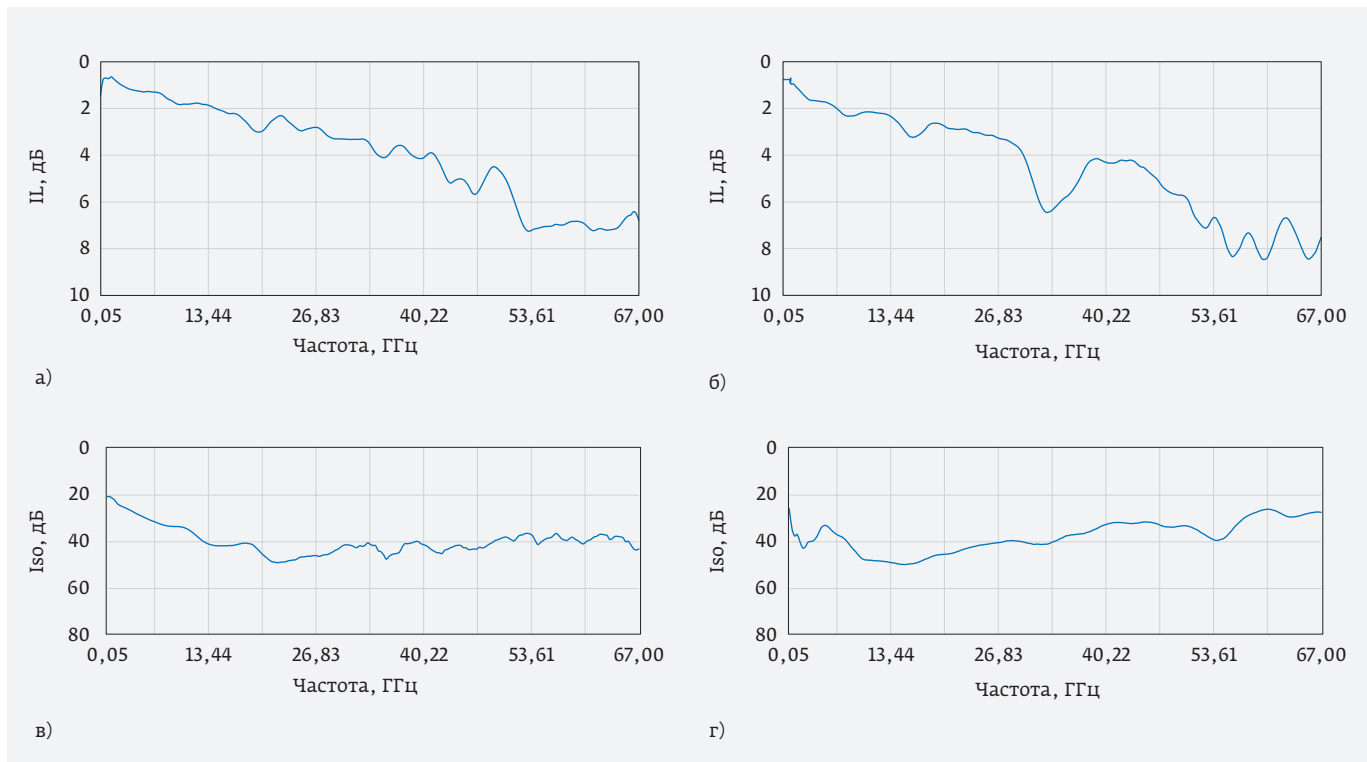
Две модели pin-диодных SPST-переключателей (CPS-33672030-01, CPS-33673030-A1), выполненных по AlGaAs МИС технологии в модульном исполнении с коаксиальными соединителями 1,85 мм, работающих в диапазоне частот 0,05–67 ГГц, предлагает компания Discommun Technologies. Характеристики этих устройств полностью



**Рис. 7.** Принципиальные схемы SPST-переключателей: а – отражательного (модель CMCS0337, компания СМС); б – поглощающего (модель NM192, компания Kratos)



**Рис. 8.** Балансные схемы SPST-переключателей: а – модель ISD-9112 (ST Olektron); б – модель SW030-0S (R&K)



**Рис. 9.** Зависимости вносимых потерь (а, б) и развязки (в, г) в отражательном PE71S2023 (а, в) и поглощающем PE71S2024 (б, г) переключателях компании Pasternack

совпадают с характеристиками изделий, выпускаемых компанией Pasternack.

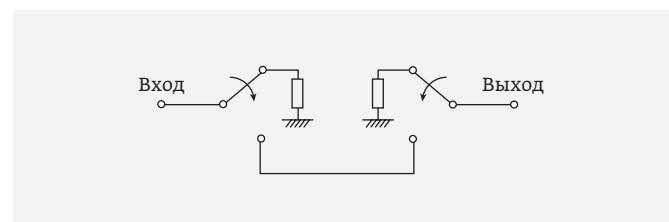
Во многих случаях SPST-переключатели используются в качестве импульсных модуляторов. Специально разработанный компанией PMI импульсный модулятор MPM-1002 в диапазоне частот 8–18 ГГц формирует радиоимпульсы с подавлением сигнала входной частоты на 61 дБ. Полученные в результате тестовых испытаний времена нарастания, спада и переключения составляют 10,2; 18,5 и 33,4 нс соответственно.

Три серии SPST-переключателей отражательного типа (SFS, DJS и HFS) выпускает компания Sierra Microwave Technology. Устройства SFS-серии представлены шестью моделями в диапазонах частот 0,5–4,0; 0,5–8,0; 0,5–12,0; 0,5–18,0; 0,5–20,0; 0,5–26,5 ГГц. Вносимые потери по мере увеличения частоты меняются от 1,1 до 3,0 дБ, минимальная развязка составляет 60 дБ, а время переключения 25 нс. Миниатюрная серия DJS в тех же частотных диапазонах, что и SFS-серия, обеспечивает сходные характеристики и может быть реализована как с коаксиальными соединителями, так и в исполнении drop-in. Высокочастотная HFS-серия SPST-переключателей представлена одной моделью HFS1840-OX1 отражательного типа (вносимые потери составляют менее 4,5 дБ, развязка – более 50 дБ и скорость переключения 2 мс). Модель выполнена с соединителями К-типа.

Две герметизированные модели поглощающих SPST-переключателей (рис. 10), выполненных по технологиям GaAs MESFET и GaAs PHEMT, представляет компания Analog Devices. Первое устройство (HMC-C019), предназначенное для работы в диапазоне частот 0–20 ГГц, обеспечивает вносимые потери менее 7 дБ, развязку 100 дБ на частоте 4 ГГц и 65 дБ на частоте 20 ГГц. Второе устройство (HMC-C583) для диапазона частот 0,1–40 ГГц обеспечивает типовые значения вносимых потерь и развязки 7 и 50 дБ соответственно.

### МОДУЛЬНЫЕ SPDT-ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛИ

Изделия этого типа – одни из наиболее востребованных и весьма разнообразны конструктивно (рис. 11).



**Рис. 10.** Схематичное изображение структуры переключателей HMC-C019 и HMC-C583 (компания Analog Devices)

SPDT-переключатели в модульном исполнении доступны в широком диапазоне частот и удовлетворяют различным требованиям (табл. 3). Благодаря практически неограниченному сроку службы эти pin-диодные устройства нашли применение в лабораторном и тестовом оборудовании, а также в фазированных антенных решетках, автомобильных и медицинских применениях и др.

Большая часть компаний выпускает переключатели как отражательного, так и поглощающего типов. При этом используются все три конфигурации: последовательная, параллельная и последовательно-параллельная.

В рамках принципиальной схемы поглощающего SPDT-переключателя (рис. 12) возможны различные модификации. Так, увеличивая число параллельно включенных pin-диодов, можно добиться более высокой развязки, а путем включения фильтров высокой частоты по одному, двум или трем портам – снизить видеопросачивание. При

исключении из схемы резистора R и диода D, выделенных красным цветом (см. рис. 12), и замыкании между собой точек 1 и 2 переключатель становится отражательным.

Характеристики переключателей во многом зависят от идентичности используемых pin-диодов, на что обращается внимание в особо ответственных изделиях.

Чрезвычайно широкую линейку из почти 100 SPDT-переключателей отражательного и поглощающего типа выпускает компания Cobham Signal & Control Solutions. Во все переключатели этой компании встроены драйверы, обеспечивающие питание +5 и –12...–18 В. Развязка по постоянному току достигается путем включения DC-блоков на входах всех трех портов. Высокая культура тестирования позволяет выпускать эти устройства в промышленном, военном и космическом исполнении.

Герметичные переключатели для диапазона частот 0,5–18,0 ГГц, которые производит компания Elbit Systems,

**Таблица 3.** Характеристики модульных SPDT-переключателей

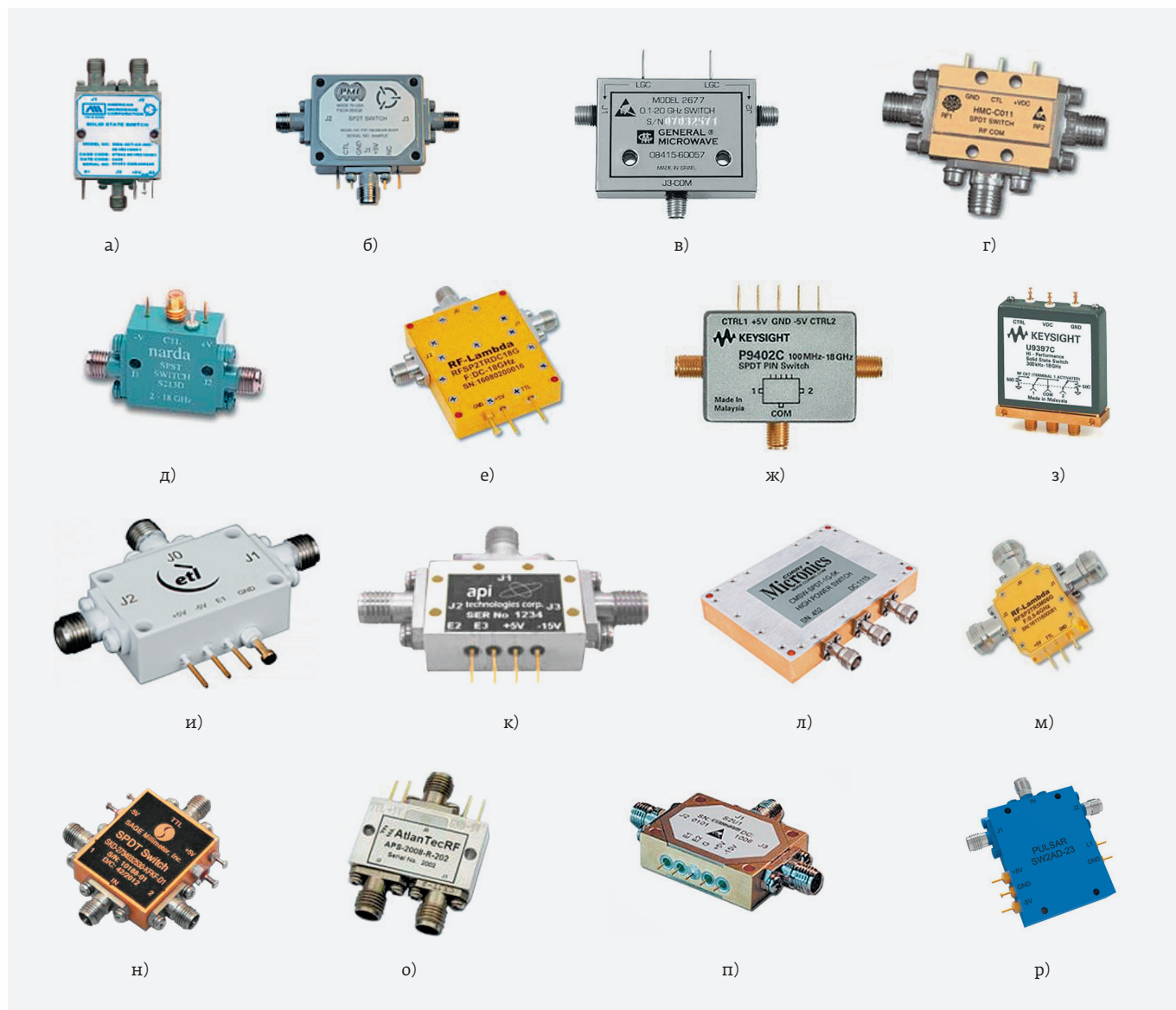
Компания	Модель	Диапазон частот, ГГц	IL, дБ	Iso, дБ	T <sub>п,нс</sub>	КСВН	P <sub>доп.</sub> , Вт
RLC Electronics	SSD-12418	12,4–18,0	<3,5	>60	50	2,1	0,25
Miteq	SW2-120180AI2HS	12,0–18,0	<2,8	>50	<35	<2,1	–
AtlantecRF	APS-2006-R	2,0–18,0	2,4	60	60	2,2	0,2
Narda Microwave – East	S2S7R	2,0–18,0	<2,9	>60	<100	<2,0	0,5
Cernex	C2TA02183260Y	2,0–18,0	3,2	>60	<50	<2,2	0,5
Miteq	SW2-010180RN1NF	1,0–18,0	<3,0	>70	20	<2,1	–
MCE/KDI	SWM-1200	0,5–18,0	<2,75	>50	<100	<2,1	0,1
Sage Millimeter	SKD-0521833360-SFSF-A1	0,5–18,0	3,6	60	100	2,0	0,5
API Technologies	MASWML0012	0,5–18,0	<2,6	>55	<30	–	<0,1
ATM Microwave	S2317D	0,5–18,0	2,5	60	< 250	< 2,0	–
Keysight	P9402C	0,1–18,0	4,0	80	380	–	0,2
CMC	SN20-314	0,1–20,0	<4,0	>75	500	<2,3	1,0
Cernex	C2TR33503530S	33,0–50,0	3,5	>30	<100	<1,5	0,25
Sage Millimeter	SKD-1835033530-2F2F-R1	18,0–50,0	3,5	30	100	1,5	0,25
PMI	P2T-100M50G-100-T	0,1–50,0	5,0–9,0	70–100	<50	2,2–3,0	<0,1
Keysight	85331B	0,045–50,0	15,5	75	1000	–	0,5
Pasternack	PE71S2026	0,1–67,0	<10,5	>40	<100	–	<0,5
RF-Lambda	RFSP2TA3080G	30,0–80,0	3,0	>40	–	1,5	<0,2
Cernex	C2TR75853025S	75,0–85,0	3,0	>25	<100	<1,5	0,25
Sage Millimeter	SKD-9031043525-1010-R1	90,0–100,0	3,5	25	100	1,5	0,25



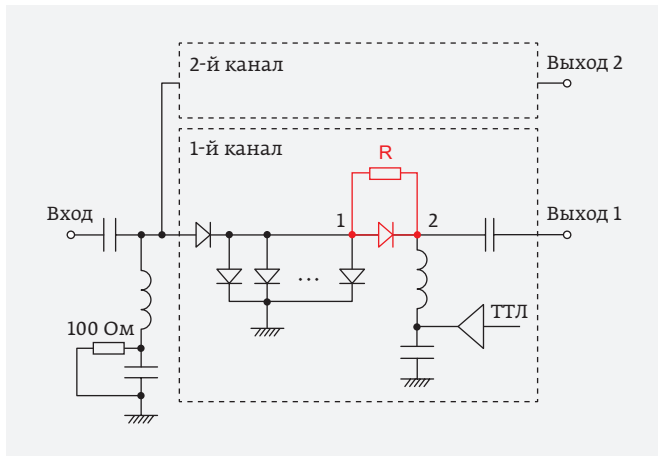
отличаются малыми вносимыми потерями, высоким значением развязки и низким уровнем видеопросачивания. Стандартные изделия оснащены драйвером. Опционально переключатели могут работать от внешних драйверов. Примерно в таком же диапазоне (2–18 ГГц) поставляются устройства компании LNX. Уровень видеопросачивания в них не превышает –60 дБм. По мере увеличения верхней границы рабочего диапазона характеристики переключателя обычно ухудшаются.

Переключатели отражательного и поглощающего типов компании API Technologies (модели MASWML0010

и MASWML0012), выпускаемые в диапазоне частот 0,5–18,0 ГГц, отличаются миниатюрностью, низкими вносимыми потерями (3,3 дБ), хорошей (не менее 55 дБ) развязкой и малым (30 нс) временем переключения, которое обеспечивают TTL-совместимые драйверы. При снятии соединителей эти устройства могут быть подключены к микрополосковым линиям передачи. Многие производители выпускают переключатели в исполнении drop-in в стандартной конфигурации. Примером таких изделий являются модели SW2-120180AN2HS и SW2120180AI2H3 компании Miteq.

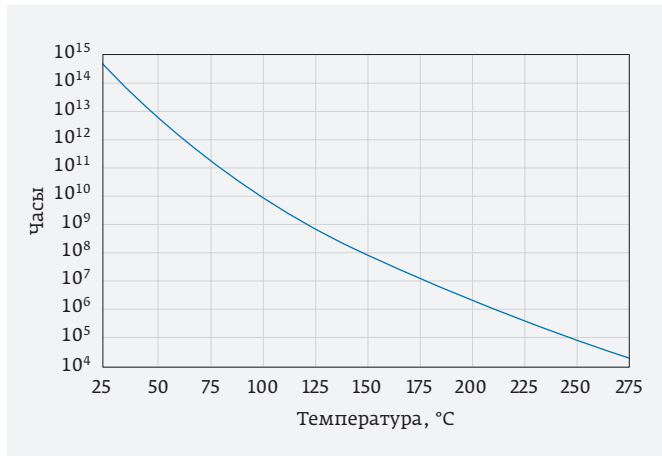


**Рис. 11.** Конструкции SPDT переключателей на pin-диодах: а – MSN-2DT-05-IND (AMC), б – P2T-100M50G-100-T (PMI), в – 2677 (Kratos), г – HMC-C011 (Analog Devices), д – S123BD (Narda Microwave); е – RFSP2TRDC18G (RF-Lambda); ж – P9402C (Keysight); з – U9397C (Keysight); и – SW-SPDT-KX-1600 (ETL); к – MASWML0012 (API Technologies); л – CMSW-SPDT-1G-5K (Corry Micronics); м – RFSP2TR5M06G (RF-Lambda); н – серия SKD (Sage Millimeter); о – APS-2008-R-202 (AtlantecRF); п – S2U1 (Cobham Signal & Control Solutions); р – SW2AD-23 (Pulsar Microwave)



**Рис. 12** Принципиальная схема pin-диодного поглощающего SPDT-переключателя (серия SN20-31x, компания СМС)

Одна из продуктивно работающих на рынке СВЧ-переключателей компаний – Serpex – выпускает изделия отражательного и поглощающего типов в диапазоне частот от 0,001 до 100 ГГц. Общее число производимых моделей превышает 50, в том числе в диапазонах 50–60, 55–62, 55–65, 70–86, 75–85 и 90–100 ГГц. Переключатели, рассчитанные на работу до 100 ГГц, производит также компания Sage Millimeter, причем до 18 ГГц изделия могут быть как отражательными, так и поглощающими. Свыше 18 ГГц – в диапазонах 18,0–26,5; 26,5–40,0; 18,0–40,0; 33,0–50,0; 18,0–50,0; 45,0–55,0; 55,0–65,0;

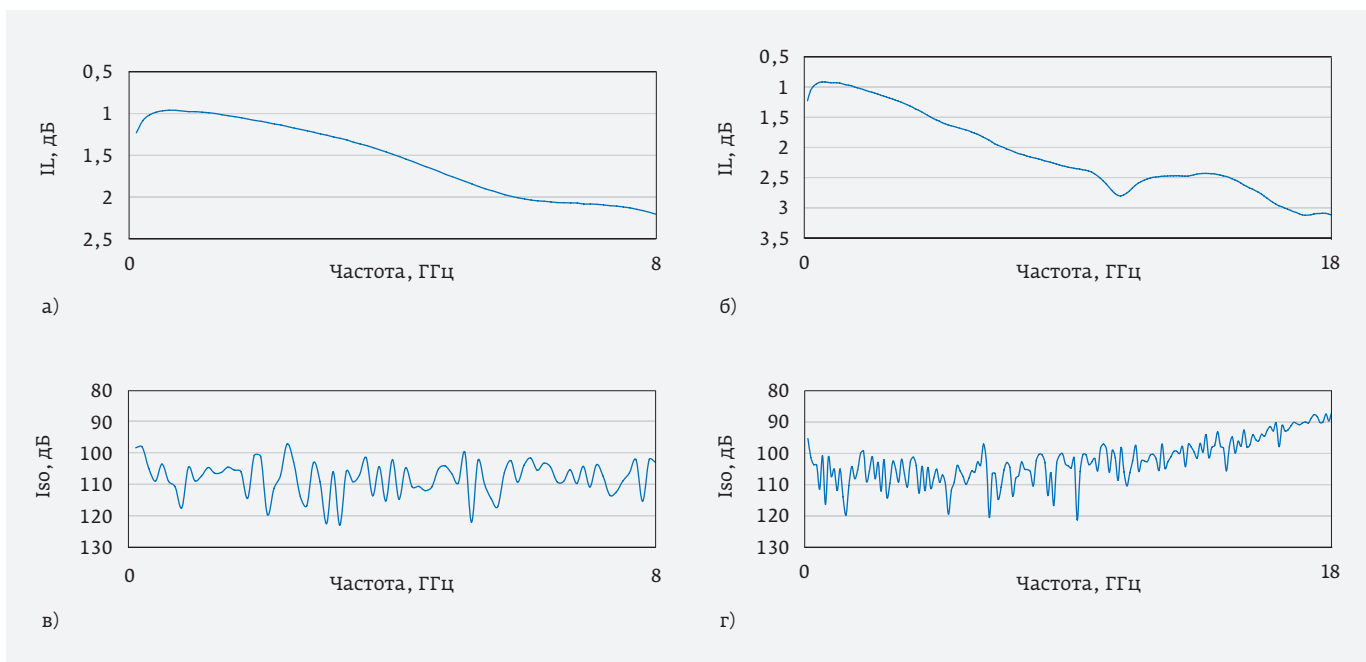


**Рис. 13.** Средняя наработка на отказ в зависимости от температуры окружающей среды

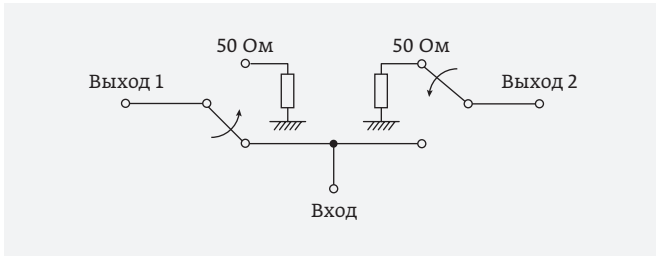
75,0–85,0 и 90,0–100,0 ГГц поставляются только изделия отражательного типа.

Широкополосные переключатели в диапазонах частот 0,05–40,0 ГГц и 0,1–50,0 ГГц предлагает компания PMI (модели P2T-50M40G-95-T-515-292FF, P2T-100M50G-100-T). Особенностью этих изделий является очень высокий уровень развязки, достигающий 100 дБ.

Широкую номенклатуру pin-диодных переключателей производит компания RF-Lambda. Модель RFSP2TA3080G переключателя отражательного типа для диапазона частот 30–80 ГГц обеспечивает низкие вносимые



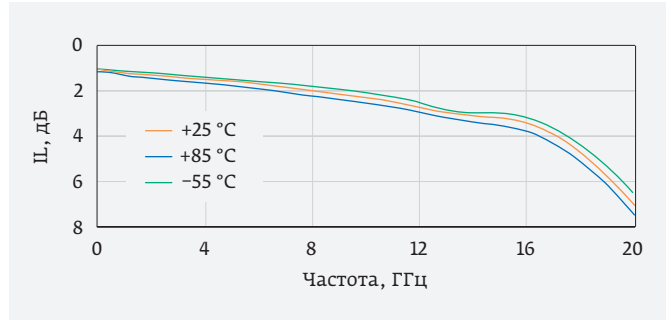
**Рис. 14.** Зависимости вносимых потерь (а, б) и развязки (в, г) от частоты для переключателей P9402A (а, в) и P9402C (б, г) (компания Keysight)



**Рис. 15.** Упрощенная схема поглощающих переключателей НМС-С011 и НМС-С058 (компания Analog Devices)

потери (3 дБ), достаточно высокую (более 45 дБ) развязку и малый КСВН=1,5. Температурный коэффициент, влияющий на уровень вносимых потерь, не превышает 0,003 дБ/°С. Представляет также интерес график зависимости среднего времени наработки на отказ от температуры (рис. 13).

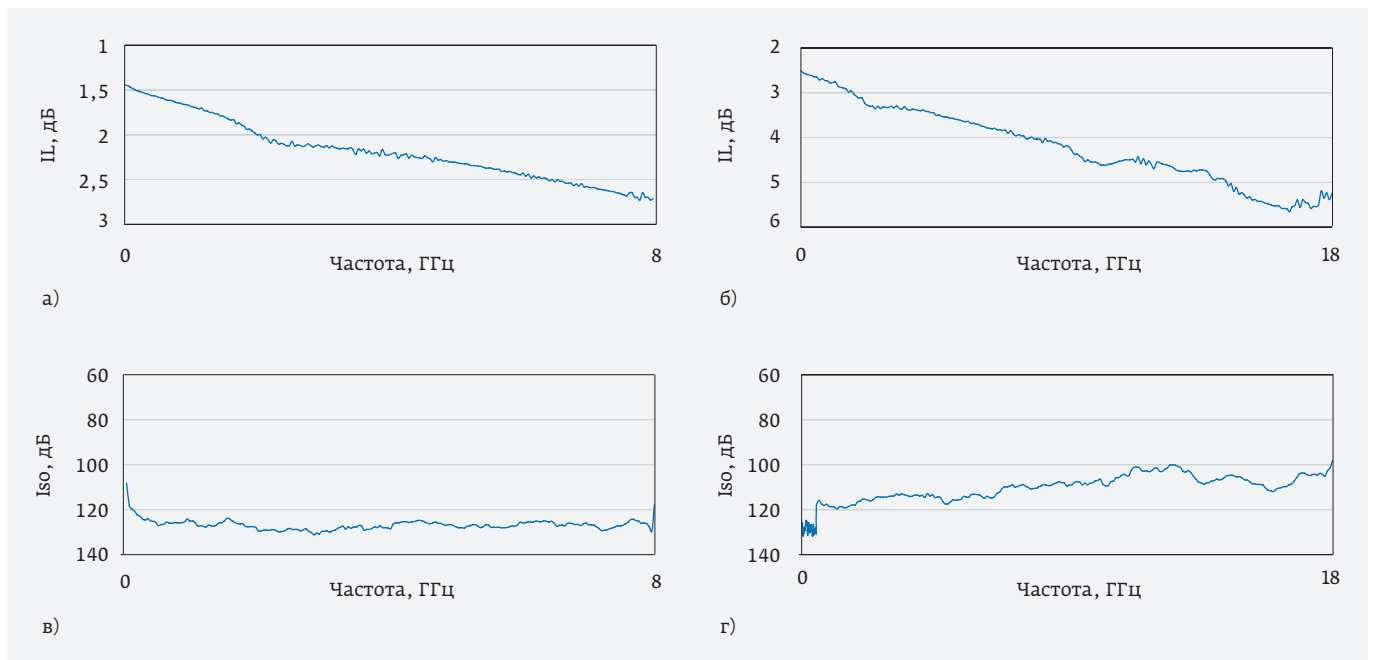
Исключительно широкополосные pin-диодные переключатели разработаны компаниями Pasternack (0,1–67,0 ГГц) и Ducommun Technologies (0,05–67,00 ГГц). В качестве высокочастотных в обоих случаях используются соединители 1,85 мм. Управление переключателями осуществляется через SMA-соединители. Каждая компания выпускает по два SPDT-переключателя отражательного и поглощающего типов, соответственно модели PE7IS2025 и PE7IS2026 производства Pasternack и модели CPD-33673030-01 и CPD-33674060 компании Ducommun Technologies.



**Рис. 16.** Зависимости вносимых потерь от частоты в поглощающем переключателе НМС-С058 (Analog Devices) при различных значениях температуры окружающей среды

В некоторых SPDT-переключателях предусмотрено согласование амплитудных и фазовых характеристик (между входным и выходными портами). Так, в модели F9321T компании Kratos точность поддержания амплитудных и фазовых характеристик одинаковыми составляет 1 дБ и 12° соответственно. Одной из мер, способствующих идентичности этих характеристик, является симметричное относительно входного соединителя расположение выходных соединителей на одной из боковых граней.

Два pin-диодных переключателя P9402A и P9402C разработаны компанией Keysight для применения в диапазонах частот 0,1–8,0 и 0,1–18,0 ГГц. Особенность этих изделий заключается в возможности их эксплуатации



**Рис. 17.** Зависимости вносимых потерь (а, б) и развязки (в, г) от частоты для SPDT-переключателей U9397A (а, в) и U9397C (б, г), выпускаемых компанией Keysight



---

в широком диапазоне температур (–55...95 °С), в условиях повышенной влажности, при наличии ударных и вибрационных нагрузок, на высоте до 15300 м, а также при сильных электростатических воздействиях. Эти рpn-диодные поглощающие переключатели обеспечивают низкие значения вносимых потерь и высокие значения развязки (рис. 14) во всем диапазоне рабочих частот. Оба изделия оснащены рpn-диодным интегральным SPDT-переключателем, дополненным дискретными шунтирующими рpn-диодами в каждом из двух каналов. Введение дополнительных шунтирующих рpn-диодов обеспечивает увеличение развязки между портами. В отличие от других SPDT-переключателей эти две модели предусматривают три возможных состояния: подключение первого или второго каналов, блокирование прохождения входного сигнала на первый и второй выходы. Достигнутый уровень развязки (рис. 14) ставит эти переключатели в один ряд с электромеханическими изделиями.

В модульных решениях могут также использоваться переключатели, выполненные по другим технологиям. Так, в двух поглощающих переключателях НМС-С011 и НМС-С058 (рис. 15) применяется технология GaAs MESFET, обеспечивающая работу в диапазонах 0–20

и 0–18 ГГц соответственно. Во втором из этих переключателей уровень вносимых потерь меняется по диапазону от 1,2 до 7,0 дБ, а развязка находится в пределах 85–47 дБ. Следует отметить малую зависимость данных показателей от температуры (рис. 16). Оба переключателя выполнены в герметичном исполнении.

При тестировании мобильных телефонов и базовых станций, в системах встроенного контроля, а также в MIMO-применениях могут быть использованы переключатели компании RANATEC, изготовленные по технологии печатных плат. Выпускаемая компанией модель RI 2421 оснащена тремя SPDT-переключателями, работающими в диапазоне частот 0–6 ГГц при вносимых потерях 1,0–1,3 дБ и развязке 55–40 дБ. Время переключения в этой модели не превосходит 10 нс. Подключение к внешним устройствам осуществляется через SMA-соединители.

Чрезвычайно высокий уровень характеристик (рис. 17) обеспечивают выполненные по FET-технологии переключатели U9397A и U9397C компании Keysight. Следует отметить достигнутый в переключателе U9397A уровень развязки 120 дБ во всем диапазоне рабочих частот.

*Продолжение следует.*

