

Твердотельные СВЧ-переключатели

Часть 3

В. Кочемасов, к. т. н.¹, А. Кирпиченков, к. т. н.²

УДК 621.389 | ВАК 05.27.00

В первых двух частях статьи, опубликованных в предыдущих номерах журнала, рассматривались общие сведения о твердотельных СВЧ-переключателях и технологиях, используемых при их создании, а также модульные SPST- и SPDT-переключатели. В данной части речь пойдет о модульных многопозиционных и DPDT-переключателях, об устройствах, программируемых по USB-интерфейсу, и волноводных переключателях на pin-диодах.

МОДУЛЬНЫЕ МНОГОПОЗИЦИОННЫЕ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛИ

Многопозиционные переключатели, имеющие один вход и много выходов, широко используются в радиолокационных и связных системах, в переключаемых фильтрах, в различного рода сборках, включающих в себя усилители, ограничители, аттенюаторы, фазовращатели, а также при проведении испытаний. Типичным примером подобных испытаний может служить измерение с помощью анализатора цепей характеристик больших партий ПАВ-фильтров (рис. 18). Целесообразность применения для этого твердотельных многопозиционных переключателей объясняется большой скоростью их переключения. При этом малые вносимые потери и большая развязка между портами многопозиционных переключателей обеспечивают широкий динамический диапазон, а значит и высокую точность измерений.

По сути, многопозиционные переключатели представляют собой набор объединенных по входу SPST-переключателей (рис. 19). При модульном исполнении входной порт с выходными соединяется чаще всего посредством размещения SPST-переключателей в канавки, полученные фрезерованием металлического корпуса (рис. 20). В собранном виде многопозиционные переключатели отличаются конструктивным разнообразием. Все соединители, как правило, устанавливаются на торцевых поверхностях корпусов прямоугольного (рис. 21) или квазидискового (рис. 22) сечения. В случае прямоугольных конструкций соединители могут располагаться на одной, двух, трех или четырех торцевых гранях, а иногда – при большом числе входных соединителей – на торцевой грани в два ряда (рис. 23). Когда количество выходных соединителей становится очень

большим, они устанавливаются в матричном порядке, например $16 \times 8 = 128$, на крышке переключателя, выполненного в виде настольного прибора (рис. 24). При дисковой конструкции увеличить число выходных соединителей можно, нарастив количество дисков. Например, в переключателе RFSP160TA0020G-S, сформированном на пяти дисках, 160 выходов: 5×32 (рис. 25).

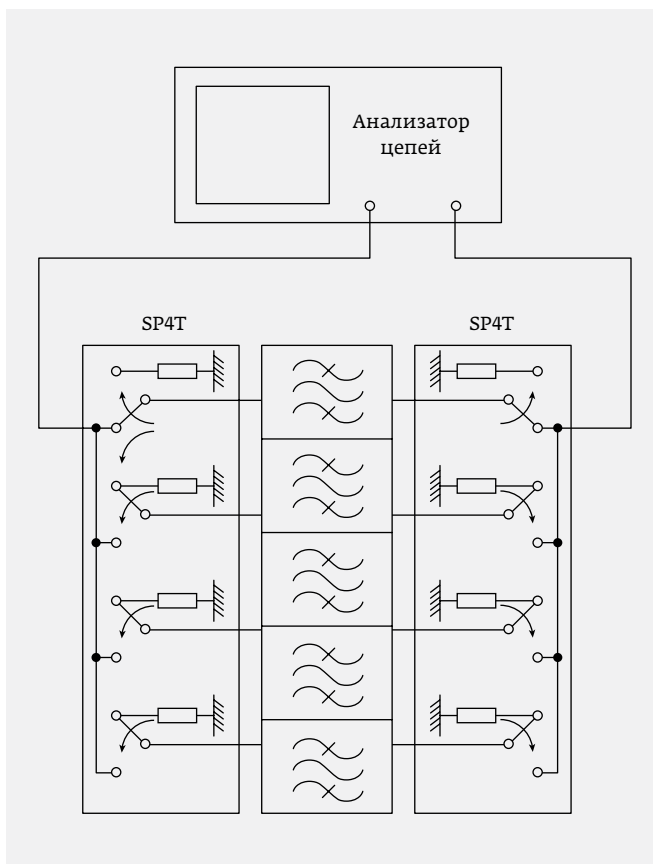


Рис. 18. Структурная схема для измерения S-параметров ПАВ-фильтров с помощью анализатора цепей и двух 4-позиционных переключателей

¹ ООО «Радиокomp», генеральный директор,
vkochemasov@radiocomp.ru.

² АО «Институт Микроволновых Интегральных Систем»
 («Микро-ВИО»), главный конструктор.

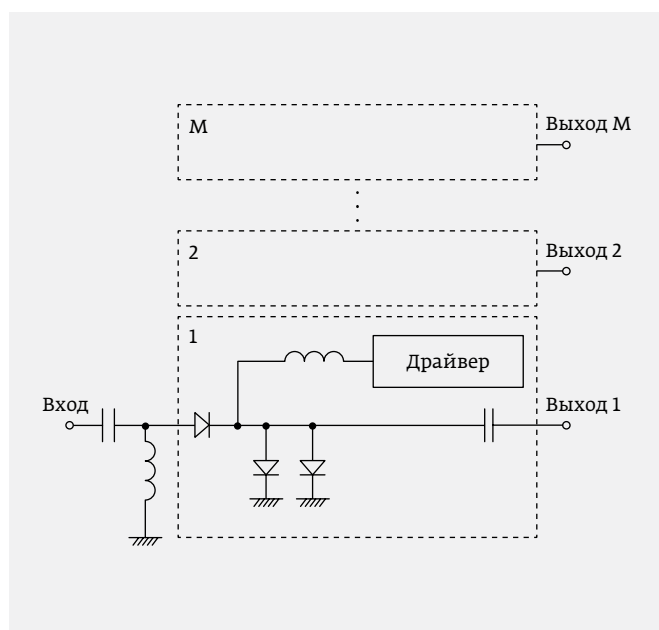


Рис. 19. Упрощенная схема отражательного SPMT-переключателя последовательно-параллельной конфигурации

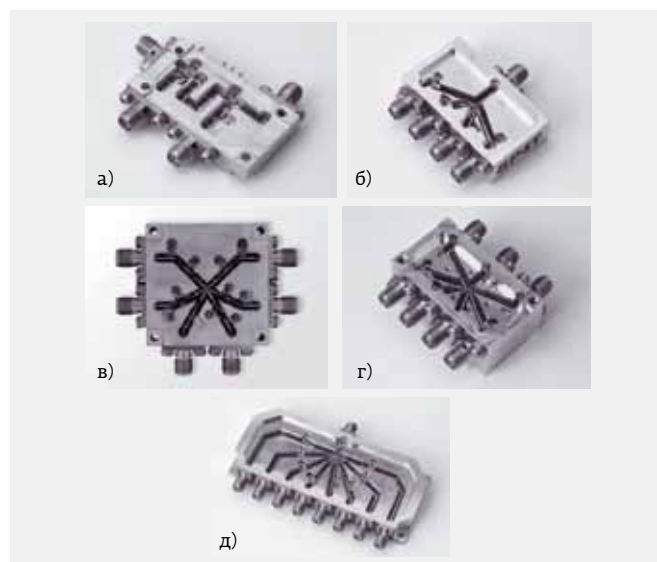


Рис. 20. Внутреннее устройство многопозиционных переключателей, выпускаемых компаниями Elbit Systems: а – SP3Т (серия MW123Т); б – SP4Т (серия MW124Т); в – SP5Т (серия MW125Т); г – SP6Т (серия MW126Т); д – SP8Т (серия MW128Т)



Рис. 21. Конструкции многопозиционных переключателей в прямоугольных корпусах: а, б – SP3Т (S3L-69-2, C. T. Microwave; E9130H, Kratos); в, г, д – SP4Т (CST-POE-SW04-1082, ETL; P4T-2G18-60-T-512-SFF, PMI; E9140H, Kratos); е, ж, з – SP5Т (MSN-5DT-05-STD, AMC; SS153DHTS, Narda Microwave; SW5-040120A14HM, Miteq); и, к, л – SP6Т (SW-SP6T-C1-1604, ETL; SK6-0232432520-KFKF-R1, Sage Millimeter; SW6-020180RN3HF, Miteq); м, н – SP7Т (SW-SP7T-C1-1605, ETL; SW7-005020AN3NM, Miteq); о, п, р, с – SP8Т (CST-POE-SW08-1083, ETL; F9180, Kratos; SW070-0S, R&K; CP8-29225040-01, Ducommun Technologies)



Рис. 22. Конструкции многопозиционных переключателей в квазидисковых корпусах: а – SP3T (SWN-1140-3D, AMC); б – SP4T (HMC-C071, Analog Devices); в – SP5T (A35-MX195, AKON); г – SP6T (S6U1, Cobham Signal & Control Solutions); д – SP7T (9170-500, Kratos); е – SP8T (R8N-39-2BU, G. T. Microwave)

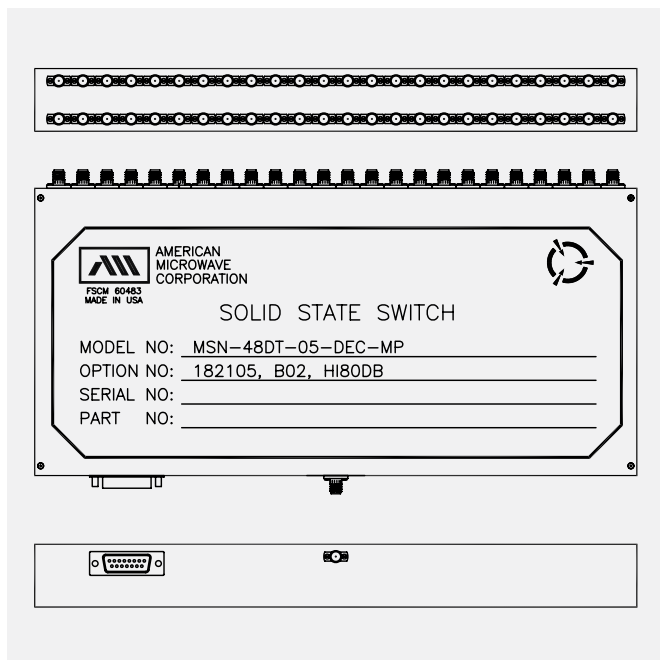


Рис. 23. Конструкция 48-позиционного (модель MSN-48DT-05-DEC-MP, AMC) переключателя с двухрядным расположением соединителей на торцевой грани

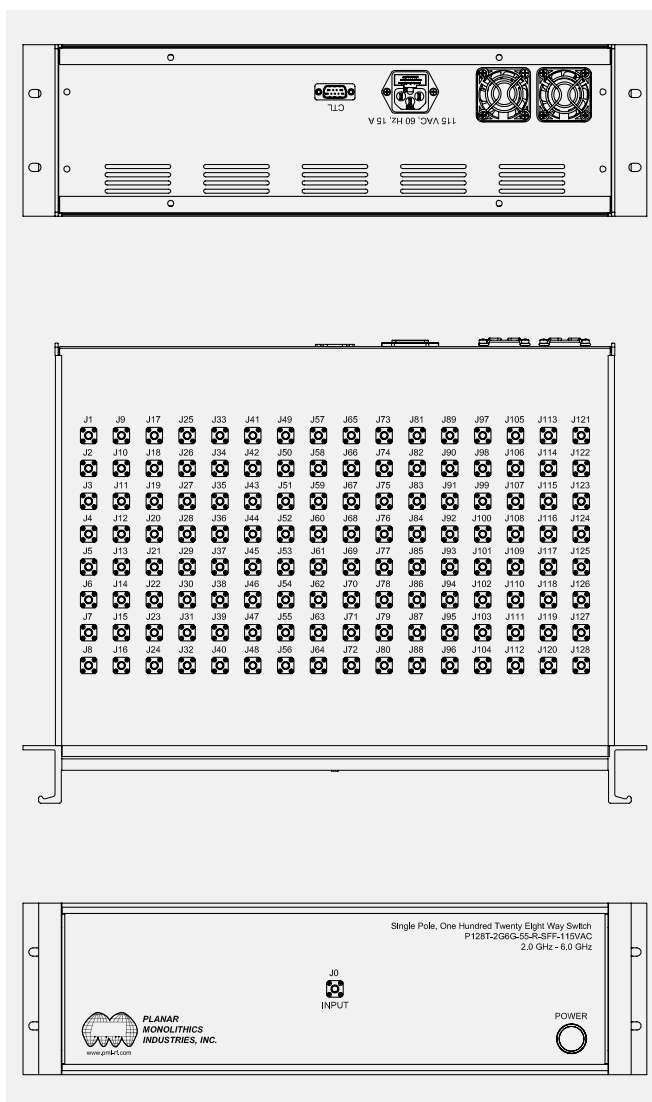


Рис. 24. Конструкция 128-позиционного (модель P128T-2G6G-55-R-SFF-115VAC, PMI) переключателя в приборном исполнении с расположением выходных соединителей на верхней крышке прибора

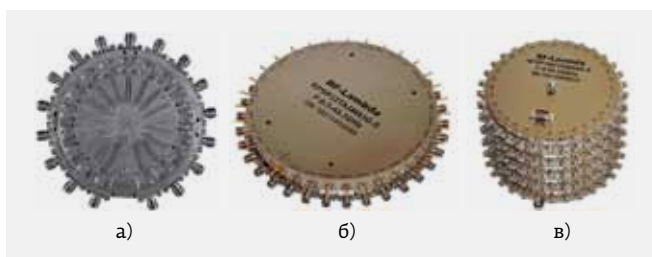


Рис. 25. Конструкции многопозиционных дисковых переключателей: а – SP10T (KA-2060-LK, Kratos); б – SP32T (RFSP32TA5M43G-S, RF-Lambda); в – SP160T (RFSP160TA0020G-S, RF-Lambda)

Наряду с прямоугольными и дисковыми корпусами в переключателях могут применяться и иные конструктивные решения (рис. 26).

Отличный от изделий всех других производителей конструктив – на печатных платах – разработала компания Ranatec. СВЧ-компоненты переключателей экранируются металлическим экраном, а высокочастотные и низкочастотные соединители размещаются с двух сторон печатной платы. Модели RI 2441, RI 2481, RI 2583 (рис. 27) работают в диапазоне от 0 до 6 ГГц, а модель RI 2582 – от 0,1 до 4,8 ГГц. Для первых трех характерны вносимые потери 2,2–4,3 дБ, развязка 55–30 дБ и высокая линейность ($IIP3=64$ дБм). Вносимые потери переключателя RI 2582 (типа DP8T) находятся в пределах 3,8–6,0 дБ, развязка больше 70 дБ, а $IIP3=40$ дБм. Другое изделие этой компании RI 2421 представляет собойстроенный SPDT-переключатель (SPDTx3), предназначенный для тестирования большого объема компонентов. В полосе 0–6 ГГц переключатель демонстрирует хорошую линейность ($IIP3=63$ дБм) и высокое быстродействие (менее 10 мкс).

Количество фирм и выпускаемых ими многопозиционных модульных переключателей чрезвычайно велико (табл. 4). Например, общее количество переключателей только трех конфигураций SP3T, SP4T и SP5T производства компании Cobham Signal & Control Solutions достигает 270. Все переключатели оснащены TTL-совместимым встроенным драйвером, обеспечивающим напряжения питания +5 В и –12...–18 В. В каждый из портов встроены развязки по постоянному току. При необходимости переключатели могут поставляться в герметичном исполнении, в том числе с результатами всех испытаний, необходимых для военной и космической техники.

Столь же широкое разнообразие характерно для изделий компании Cernex. Ее продуктовая линейка насчитывает 200 моделей отражательных и поглощающих переключателей типа SP3T, SP4T, SP5T, SP6T, SP7T, SP8T, SP10T, предназначенных для работы на частотах вплоть до 100 ГГц.

Таблица 4. Характеристики многопозиционных модульных переключателей на pin-диодах

Компания	Модель	Тип переключателя	Диапазон частот, ГГц	IL, дБ	Iso, дБ	T _{п, нс}	КСВН	P _{доп, Вт}
MCE/KDI	VB-73-HASD-2	SP3T	2,0–18,0	<3,6	>80	20	<2,5	0,1
ATM Microwave	S3317D	SP3T	0,5–18,0	3,0	55	<250	<2,0	<0,1
Cernex	C3TR70857040TQ	SP3T	70,0–85,0	7,0	40	<50	<2,1	0,2
AtlantecRF	APS-4010-R	SP4T	2,0–18,0	2,9	80	50	2,2	0,2
ATM Microwave	S4317D	SP4T	0,5–18,0	3,0	55	<250	<2,0	<0,1
Sage Millimeter	SK4-7538036530-1212-R1	SP4T	75,0–80,0	6,5	30	100	2,0	0,25
Elbit Systems	MW125T28-H-H	SP5T	2,0–18,0	<3,5	>60	15	<2,0	0,1
CMC	SN70-313	SP7T	0,1–20,0	<5,5	>60	500	<2,7	1,0
MCE/KDI	TB-854-HASD-2	SP8T	2,0–4,0	<2,1	>80	20	<1,95	0,1
Miteq	SW8-010180RN1NF	SP8T	1,0–18,0	<3,9	>60	200	<2,0	–
PMI	P20T-4G8G-80-T-SFF	SP20T	4,0–8,0	<4,0	>80	100	<2,0	0,1
PMI	P22T-0R5G18G-60-T-SFF	SP22T	7,0–8,0	<8,0	>60	<100	<1,8	–
PMI	P24T-0R5G18G-60-T-SFF	SP24T	0,5–8,0	<8,5	>60	<100	<2,0	–
PMI	P32T-0R5G18G-60-T-SFF	SP32T	0,5–18,0	<9,5	>60	85	<2,0	0,1
RF-Lambda	RFSP32TA5M43G	SP32T	0,5–43,5	28,0	60	<70	<2,0	0,5
AMC	MSN-48DT-05-DEC-MP	SP48T	18,0–21,5	<11,5	>80	<250	<2,2	0,10
AMC	MSN-65DT-051-DEC-MP	SP65T	0,1–4,0	<15,0	>40	<150	<2,5	0,10
PMI	P128T-2G6G-55-R-SFF-115VAC	SP128T	2,0–6,0	10,0	>55	<500	–	0,100
RF-Lambda	RFSP160TA0020G-S	SP160T	0,05–20,0	28,0	60	<70	<2,0	0,5

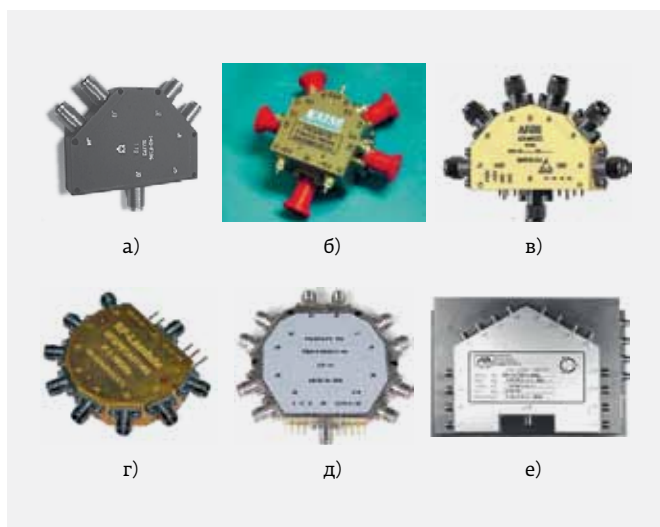


Рис. 26. Конструкции многопозиционных переключателей, отличные от приведенных на рис. 21, 22 и 25:
а – SP4T (140-F106, RH Laboratories); б – SP4T (S4317D, ATM),
в – SP6T (A35-MH134, AKON); г – SP8T (RFSP8TA0118G, RF-Lambda); д – SP10T (PSW10-0119-31-11, Paciwave);
е – SP16T (SWN-16TDA-HM-ARG, AMC)

В большей части устройств используется последовательная или параллельно-последовательная конфигурации. Соответственно, переключатели могут быть как отражательными, так и поглощающими. Многие фирмы (Kratos, PMI, Miteq, Millenium Microwave Corp.) производят переключатели, обеспечивающие амплитудное

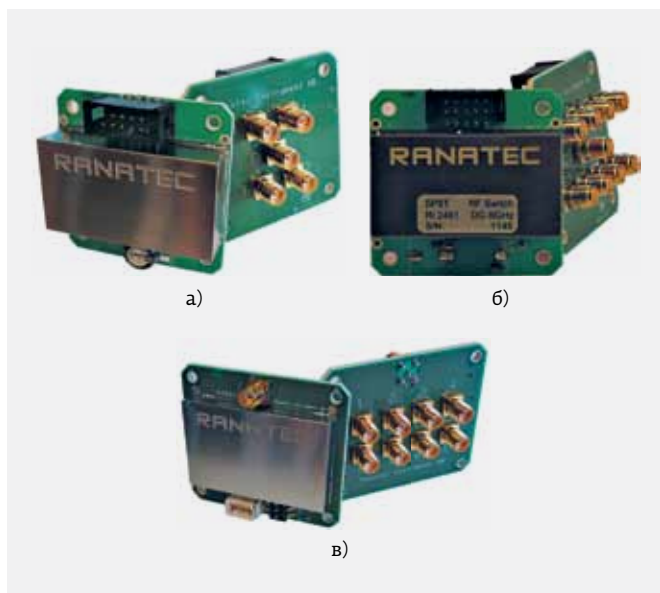


Рис. 27. Конструкции многопозиционных переключателей, выпускаемых компаниями Ranatec:
а – SP4T (RI 2441); б – SP8T (RI 2481); в – SP8T (RI 2583)

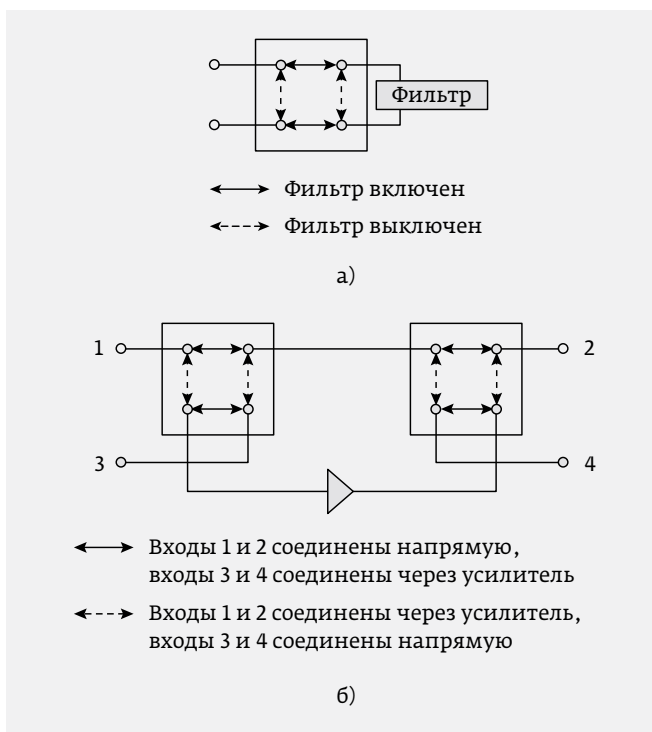


Рис. 28. Варианты использования DPDT-переключателей: а – измерение параметров фильтров; б – измерение параметров усилителей

и фазовое согласования. Например, у SP4T- и SP6T-переключателей компании Kratos (модели F9341T и F9361T) согласование по амплитуде с точностью 1 дБ, а по фазе 12° в диапазоне частот от 2 до 21 ГГц. 16-позиционная модель типа PA1618 этой же компании обеспечивает в диапазоне частот от 1 до 18 ГГц амплитудное согласование с точностью 1,5 дБ и по фазе 30° между любыми двумя выходами. Похожие результаты демонстрирует переключатель P7T-2G18G-60-T-1W компании PMI: по амплитуде согласование не хуже $\pm 0,5$ дБ, а по фазе между одинаковыми выходами в разных образцах – не выше $\pm 15^\circ$.

В широком диапазоне частот 0,05–67,0 ГГц работают переключатели типа SP3T, ..., SP8T компании Discomm Technologies и Pasternack. Изделия этих фирм доступны как в отражательном, так и в поглощающем вариантах. Время переключения в них не превышает 100 нс, входная мощность находится в пределах 1,0–0,5 Вт.

Переключатели SP3T, SP4T, SP5T, SP6T, SP7T SW-серии компании Miteq интересны тем, что могут выпускаться как с соединителями, так и без них – в исполнении drop-in. Эту же возможность предлагают компании Kratos, AMC, MCE/KDI, Narda Microwave-East, PMI, LNX, CMC.

Линейку отражательных и поглощающих переключателей для систем спутниковой связи производит компания ETL. Наряду со стандартными pin-диодными устройствами, рассчитанными на диапазоны частот 3–5 и 0,5–18 ГГц,

компания предлагает так называемые smart-переключатели, снабженные светодиодной индикацией, позволяющей визуально контролировать путь прохождения поступающего на вход сигнала до одного из выходов в реальном времени. Эти изделия (CST-POE-SW04-1082 и CST-POE-SW08-1083) рассчитаны на диапазон частот 850–2150 МГц и характеризуются вносимыми потерями менее 6 дБ и развязкой 65–70 дБ. Уровень паразитных составляющих в рабочей полосе частот не превышает –95 дБм, а за пределами рабочей полосы – менее –80 дБм.

МОДУЛЬНЫЕ DPDT-ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛИ

Переключатели DPDT (2P2T), называемые также трансферными (transfer), находят применение в системах связи, радиоэлектронной борьбы и тестовых испытаниях. С их помощью решается задача прохождения сигнала от источника к измерительным средствам напрямую либо через испытываемые пассивные (рис. 28а) или активные (рис. 28б) изделия. Их использование позволяет проводить многократные сравнительные измерения, например

определять уровень паразитных и гармонических составляющих с помощью генератора сигналов и анализатора спектра и S-параметров с помощью анализатора цепей в рамках стенда (рис. 29) без переключения кабельных соединений. DPDT-переключатели изготавливаются в модульном и интегральном исполнениях. Модульные переключатели чаще всего реализуются на pin-диодах и в целом обеспечивают большую развязку между портами по сравнению с интегральными изделиями. Достигнутые в некоторых модульных устройствах значения развязки в 100 дБ и более подтверждают их конкурентоспособность с электромеханическими аналогами. Основные производители модульных DPDT-переключателей – компании Kratos, PMI, AMC, G. T. Microwave, Cobham Signal & Control Solutions, Pasternack, Elbit Systems, Narda, Keysight и др. (табл. 5, рис. 30).

В линейке продукции компании Kratos DPDT-переключатели представлены одной моделью F940H, реализованной на микрополосковых линиях передачи с использованием pin-диодов (рис. 31). Устройство выполняет свои функции в весьма широкой полосе частот от 0,5 до 18,0 ГГц,

Таблица 5. Характеристики модульных DPDT-переключателей на pin-диодах

Компания	Модель	Диапазон частот	IL, дБ	Iso, дБ	КСВН	P _{доп.} , Вт	T _{п.} , °C
Cobham Signal & Control Solutions	XFU1	0,5–1,0	<1,1	>80	<1,5	0,5	<100
PMI	PXS-2G4G-75-T-SFF	2,0–4,0	<1,2	>75	<1,6	<100	<100
Keysight	P9400A	0,1–8,0	<3,0	>80	–	0,2	<200
PMI	PXS-400M10G-60-SFF	0,4–10,0	<3,3	>55	<2,0	1,0	<30
Cobham Signal & Control Solutions	XFK2	12,0–18,0	<3,0	>65	<2,0	<0,5	<100
Pasternack	PE71S6291	12,0–18,0	<3,0	>65	<2,1	0,5	100
AMC	SWN-TRA-618	6,0–18,0	<3,0	>65	–	0,1	100
Narda Microwave-East	XSS323CDHS	2,0–18,0	<1,8–2,6	>70–55	<1,8–2,6	0,2	50
Elbit Systems	MW12TR05	2,0–18,0	<1,8	50	<1,8	0,2	35
Cobham Signal & Control Solutions	XFL7	1,0–18,0	<3,1	>65	<2,0	<0,5	<100
Pasternack	PE7134	1,0–18,0	<3,1	>65	<2,0	<0,5	<100
Kratos	F940H	0,5–18,0	<2,0–3,5	>60–50	<1,75–2,00	0,5	–
Keysight	P9400C	0,1–18,0	<3,5–4,2	>80	–	0,2	<200
PMI	PXS-500M-18G-60-SFF	0,5–18,0	<3,0	>60	<1,9	<0,1	<100



Рис. 29. Стенд для измерения S-параметров, паразитных и гармонических составляющих испытуемых устройств ИУ1 и ИУ2

обеспечивая при этом малые вносимые потери, достаточно высокую развязку и малое время переключения (табл. 5) в диапазоне температур от -65 до 110 °C в условиях повышенной влажности, наличия вибрации и ударов.

Тестируют переключатели в соответствии с методами, прописанными в стандарте США MIL-STD-202F. Встроенный драйвер обеспечивает необходимые управляющие напряжения и постоянные напряжения смещения $+5$ В и -12 В.

Более 40 моделей DPDT-переключателей применительно к задачам радиоэлектронной борьбы, связи и тестирования выпускает компания Cobham Signal & Control Solutions. Рабочий диапазон этих устройств очень широк: от изделий с частотой $0,01$ – $0,1$ ГГц до переключателей, предназначенных для диапазона частот $0,5$ – $18,0$ ГГц. Все переключатели снабжены TTL-совместимыми драйверами, обеспечивающими напряжения смещения $+5$ В и -12 В. По всем портам DPDT-переключателей предусмотрена развязка по постоянному току. В зависимости от назначения, устройства удовлетворяют различным требованиям, в частности аэрокосмическим.

Большое количество моделей поглощающих DPDT-переключателей, рассчитанных на диапазоны частот $0,01$ – $1,00$; 1 – 2 ; 2 – 4 ; 4 – 8 ; 8 – 12 ; 12 – 18 и 1 – 18 ГГц, производит компания Pasternack. Все изделия отличаются низкими вносимыми потерями ($1,0$ – $3,1$ дБ), большой развязкой (80 – 65 дБ) и временем переключения менее 100 нс.

14 моделей DPDT-переключателей отражательного и поглощающего типов в диапазонах частот $0,01$ – $1,00$; $0,4$ – $0,5$; $0,4$ – $1,0$; $0,5$ – $18,0$; $0,7$ – $2,3$; $1,0$ – $2,0$; 1 – 18 ; 2 – 4 ; 4 – 8 ; 7 – 8 ; 8 – 12 ; 9 – 10 ; 12 – 18 ГГц предлагает компания PMI. В этих изделиях вносимые потери варьируются от 1 до 5 дБ, развязка меняется от 55 до 80 дБ, а время переключения не превышает 15 – 100 нс.



Рис. 30. Конструкции модульных DPDT-переключателей: а, б – модель SWN-2181-TRA (AMC) с верхней крышкой и без нее; в – модель XFU1 (Cobham Signal & Control Solutions); г – модель F940H (Kratos); д, е – модели P9400A и U9400A (Keysight)

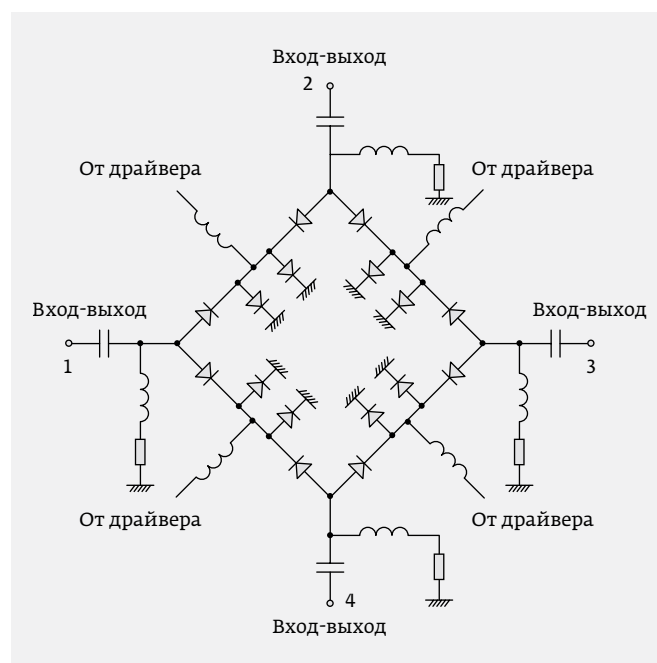


Рис. 31. Принципиальная схема pin-диодного DPDT-переключателя (модель F940H, компания Kratos)

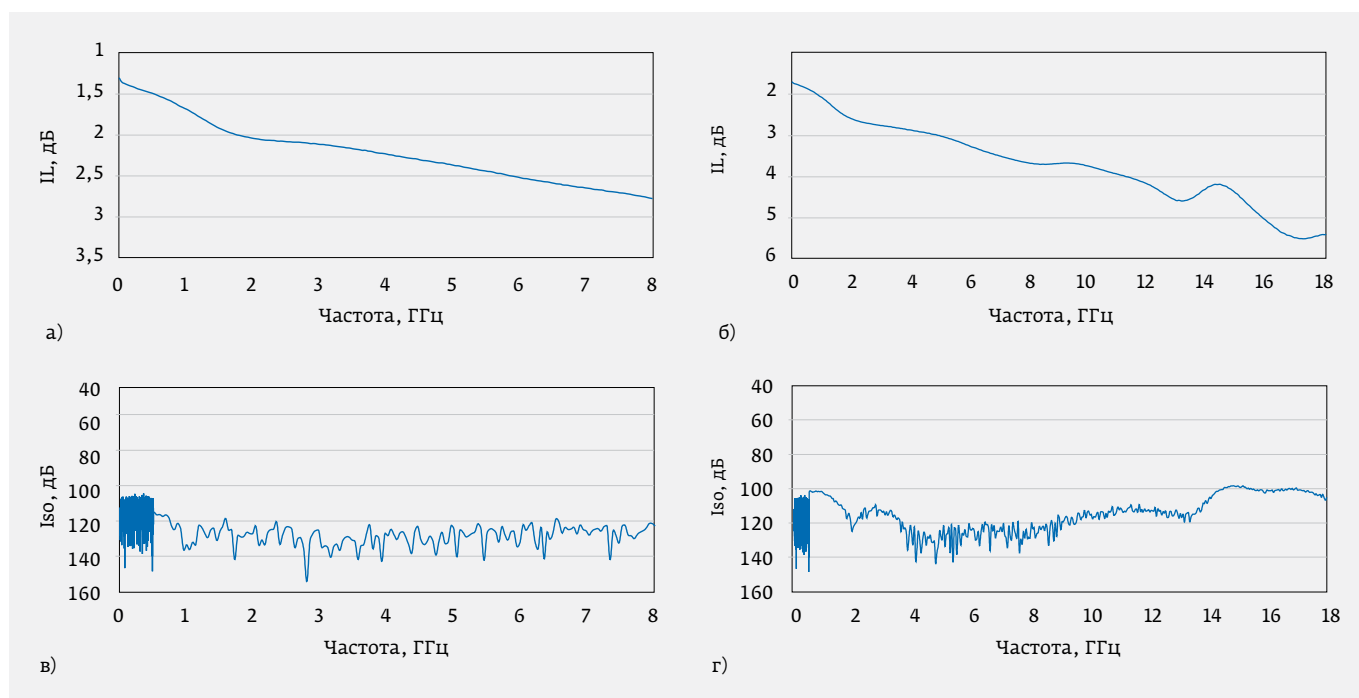


Рис. 32. Зависимости вносимых потерь IL (а, б) и развязки Iso (в, г) в DPDT-переключателях U9400A (а, в) и U9400C (б, г), выпускаемых компанией Keysight

Еще более широкую номенклатуру DPDT-переключателей выпускает компания AMC, изделия которой классифицируются на широкополосные, узкополосные большой мощности, с низкими вносимыми потерями, большими развязками и низкими уровнями видеопросачивания. Доступны следующие диапазоны частот: $0,16 \pm 0,025$; 0,4–0,6; 0,01–1,00; 5,2–5,9; 0,004–6,000; 2–6; 9–10; 6–18; 5–18; 1–18; 0,5–18,0; 0,3–18,0; 0,03–27,00 ГГц.

На широкий температурный диапазон рассчитаны DPDT-переключатели серии MW12RT, выпускаемые компанией Elbit Systems для диапазонов 0,01–0,5; 0,2–0,5; 0,5–2,0; 2–8 и 2–18 ГГц. Устройства оснащены встроенным драйвером и работоспособны при входных мощностях менее 200 мВт. В первых двух диапазонах время переключения составляет 10 и 1 мкс соответственно, в остальных трех – не превышает 30 нс.

Применительно к задачам связи, локации, измерения и тестирования компания Keysight создала четыре DPDT-переключателя, два из которых на pin-диодах и два – на арсенид-галлиевых полевых транзисторах. В pin-диодных устройствах была использована интегральная pin-диодная микросхема, дополненная несколькими шунтирующими pin-диодами с идентичными характеристиками. Эти pin-диодные DPDT-переключатели (модели P9400A и P9400C) предназначены для диапазонов частот 0,1–8,0 ГГц и 0,1–18,0 ГГц. Оба устройства отличаются низкими вносимыми потерями и превосходными межпортовыми развязками (табл. 5). Еще более

высокий уровень развязки обеспечивается в переключателях U9400A и U9400C, реализованных на полевых транзисторах (рис. 32). Эти изделия характеризуются также низкими уровнями вносимых потерь и видеопросачивания – всего 90 мВ (пик-пик), в отличие от pin-диодных переключателей, где этот показатель превышает 1 В (пик-пик). Благодаря столь низкому уровню видеопросачивания эти изделия подходят для тестирования весьма чувствительных к уровню допустимых напряжений компонентов, например смесителей и усилителей. При этом не только повышается точность измерений, но и исключается возможность выхода из строя чувствительных тестируемых компонентов.

Еще одно преимущество этих переключателей – небольшое время установления развязки при переключении,

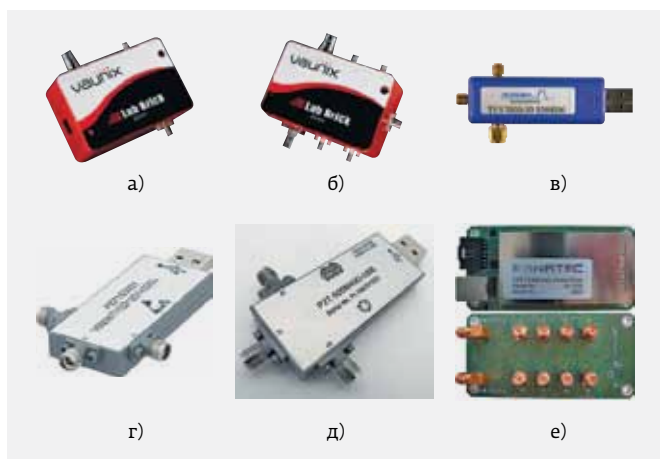


Рис. 33. Конструкции переключателей, программируемых по USB-интерфейсу: а – LSW-602PDT (Vaunix); б – LSW-602P4T (Vaunix); в – TES7000-50 (Telemakus); г – PE7IS3901 (Pasternack); д – P2T-500M40G-USB (PMI); е – RI 2582 (Ranatec)

например, из режима с малым ослаблением в режим с максимальным ослаблением. Это время определяется от момента начала переключения до момента, когда развязка достигает установившегося значения с точностью 0,01 дБ. В обычных переключателях на полевых

транзисторах время установления превышает 50 мс, в моделях U9400A и U9400C – равно 0,35 мс. Данное обстоятельство в сочетании с чрезвычайно высокой развязкой позволяет эффективно использовать эти DPDT-переключатели при тестировании больших партий компонентов. Высокий уровень развязки в разработанных DPDT-переключателях делает их конкурентоспособными с электро-механическими переключателями в тех вариантах применения, где допустимые вносимые потери могут составлять несколько децибел.

ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛИ, ПРОГРАММИРУЕМЫЕ ПО USB-ИНТЕРФЕЙСУ

Ряд компаний специализируется на создании переключателей, программируемых по USB-интерфейсу (табл. 6). Подобные устройства находят применение при разработке, испытаниях и тестировании различного рода изделий в лабораторных, полевых и промышленных условиях. Управление этими переключателями выполняется с помощью графического интерфейса пользователя (Graphic User Interface, GUI), совместимого с операционной системой Windows или другими специальными программами. Для хранения подобных программ используется флеш-память, объем которой, например в переключателях компании Telemakus, достигает 0,5 Гбайт. По интерфейсу USB на переключатели подается также питающее напряжение.

В настоящее время на рынке представлены устройства типа SPDT, SP4T, DP8T (рис. 33). SPDT-переключатели могут использоваться как для коммутации двух сигналов (рис. 34а), так и для формирования радиоимпульсов из синусоидальных колебаний (рис. 34б). В некоторых изделиях, например компании Vaunix, помимо управления по USB, предусмотрена возможность ручного управления, что особенно полезно в лабораторных применениях. Модели PE7IS3901 и P2T-500M40G-USB программируемых переключателей имеют чрезвычайно широкий диапазон рабочих частот (до 40 ГГц). Две модели TES6000-30 и TES7000-50 компании Telemakus отличаются весьма высокой (менее 33 нс) скоростью переключения (табл. 6).

Широкими функциональными возможностями обладает переключатель RI 2582 компании Ranatec (см. рис. 33е), обеспечивающий подключение каждого из двух входов

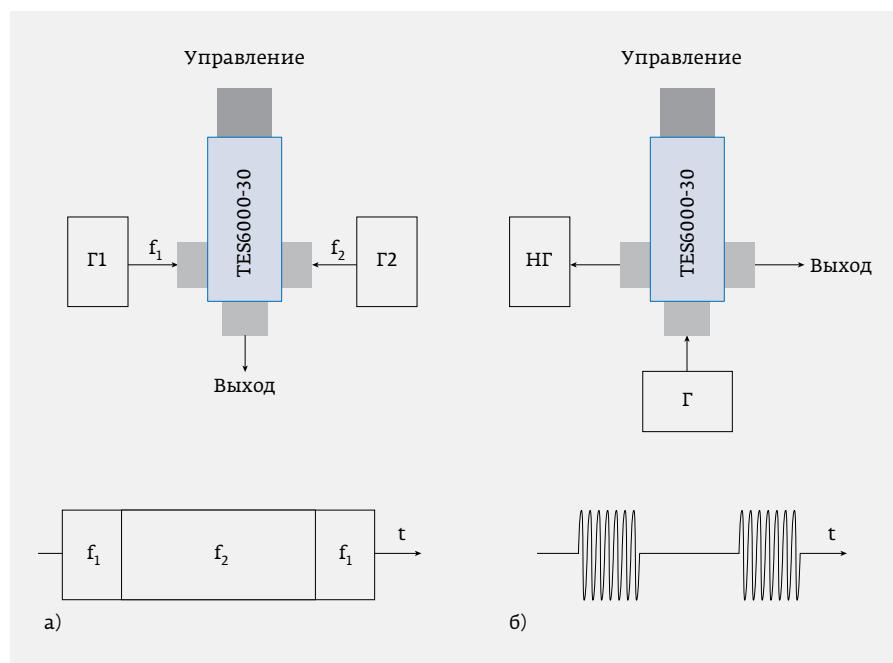


Рис. 34. Схемы включения и временные диаграммы, поясняющие работу программируемого переключателя в режимах формирования частотно-манипулированных (а) и амплитудно-модулированных (б) сигналов. Г – генератор; Г1 – генератор 1; Г2 – генератор 2; НГ – нагрузка; f_1 , f_2 – частоты; t – время

Таблица 6. Характеристики переключателей, программируемых по USB-интерфейсу

Компания	Модель	Тип переключателя	Диапазон частот, ГГц	IL, дБ	Iso, дБ	T _п , нс	P _{доп.} , Вт
Vaunix	LSW-602PDT	SPDT	0,01–6,0	1,5–6,0	65	300	10
Vaunix	LSW-602P4T	SP4T	0,01–6,0	1,5–6,0	60	300	10
Telemakus	TES3000-60	SPDT	0,05–3,0	<1,0	60	2000	100 (P _{1дБ})
Telemakus	TES6000-30	SPDT	0,1–6,0	<2,0	30 (4 ГГц)	33	2
Telemakus	TES7000-50	SPDT	0,1–7,0	<3,0	50 (4 ГГц)	33	0,25
Pasternack	PE71S3900	SPDT	0,5–18,0	<6,0	>60	–	0,1
Pasternack	PE71S3901	SPDT	0,5–40,0	<6,0	>60	–	0,1
PMI	P2T-500M40G-USB	SPDT	0,5–40,0	<6,0	>60	–	0,1
Ranatec	RI 2582	DP8T	0,1–4,8	3,8–6,0	70	–	0,1

к любому из восьми выходов. Устройство эффективно при большом объеме тестируемых изделий.

Все программируемые переключатели отличаются относительно низкой стоимостью.

выпускаются в полных волноводных диапазонах, а в двух (60,0–90,0 и 75,0–110,0 ГГц) – полосы рабочих частот не превышают 10 ГГц (можно заказать изделия с данной полосой в пределах указанных диапазонов).

ВОЛНОВОДНЫЕ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛИ НА PIN-ДИОДАХ

Волноводные переключатели широко используются в верхней части СВЧ-диапазона в радиолокационных и связных системах, в тестовом оборудовании для формирования лучей и переключения антенных устройств, для защиты входных цепей приемников, формирования радиоимпульсов нужной амплитуды и длительности, в дуплексорах и мультиплексорах, для изменения пути прохождения сигналов, подключения и отключения нагрузок и пр.

Номенклатура волноводных устройств, их характеристики (табл. 7) и конструкции (рис. 35) отличаются значительным разнообразием. Четыре серии волноводных pin-переключателей производит компания Millitech. Серия PSP включает семь моделей, перекрывающих диапазон частот от 18 до 110 ГГц, причем в пяти из них (18,0–26,5; 26,5–40,0; 33,0–50,0; 40,0–60,0 и 50,0–75,0 ГГц) переключатели

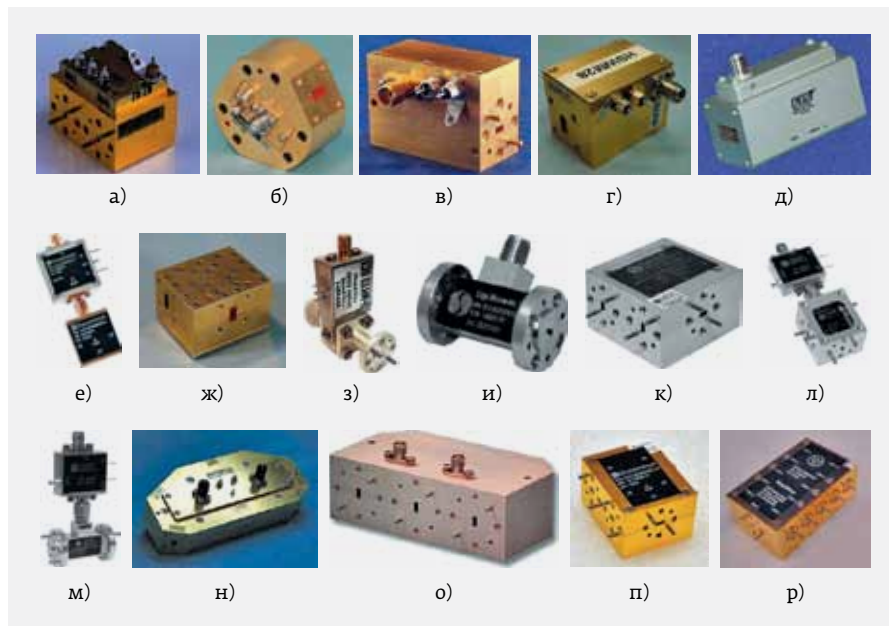


Рис. 35. Конструкции волноводных pin-переключателей: а – серия PDT, I-конфигурация (Millitech); б – серия PDT, Y-конфигурация (Millitech); в – серия HSW (HXI); г – HSWM28 (HXI); д – MA32032 (CPI); е – CPD-93355025-01 (Ducommun Technologies); ж – серия 912 (Mi-Wave); з – SPST-10/94/1 (ELVA-1); и – серия SKS (Sage Millimeter); к – серия SK4 (Sage Millimeter); л – серия SKD (Sage Millimeter); м – серия SKS (Sage Millimeter); н – серия PS3/PS4 (Millitech); о – серия QSN (QuinStar); п – CP4-60086030-02 (Ducommun Technologies); р – CP10-77308030-D2 (Ducommun Technologies)

Таблица 7. Характеристики волноводных pin-переключателей

Компания	Модель	Тип переключателя	Диапазон частот, ГГц	Полоса рабочих частот, ГГц	IL, дБ	Iso, дБ	T _п , нс	P _{доп} , Вт
CPI	MA32032SPST	SPST	10,25–10,50	0,25	<1,2	70	<250	<0,35
Millitech	PSH-42	SPST	18,0–26,5	8,5	<2,0	>30	2	0,25
ELVA-1	SPST-42	SPST	18,0–26,5	8,5	0,7	>30	4–6	<1,0 (пиковая)
Microwave Resources	SPSTK	SPST	18,0–26,5	8,5	<1,0	>20	250	–
Millitech	PDT-42-022 AO	SPDT	18,0–26,5	8,5	<1,8	22	300	<0,25
HXI	HSW3403	SPST	22,0–33,0	11	2,6	55	20	0,1
HXI	HSW22801	SPDT	26,5–40,0	10,0	1,6	23	15	–
HXI	HSW2203	SPST	33,0–50,0	17	3,0	53	20	0,1
Microwave Resources	SPDTU	SPDT	40,0–60,0	20,0	<2,0	>21	250	–
Millitech	PDT-15-062 AO	SPDT	57,0–66,0	9,0	<2,5	22	300	<0,25
Millitech	PSP-15	SPST	50,0–75,0	25	<2,0	>20	150	<0,25
ELVA-1	SPST-15	SPST	50,0–75,0	25,0	0,8	>30	4–6	<1,0 (пиковая)
Ducommun Technologies	CPS-63253025-01	SPST	50,0–75,0	–	3,0	25	<100	<0,5
Ducommun Technologies	CP4-77305030-D2	SP4T	75,0–78,0	3,0	<6,5	>30	<150	–
Ducommun Technologies	CP10-77308030-D2	SP10T	75,0–78,0	3,0	<10,0	>30	<150	–
Sage Millimeter	SK4-6937738030-1212-R1	SP4T	69,0–77,0	8,0	–	30	100	–
Sage Millimeter	SK4-7238138030-1212-R1	SP4T	72,0–81,0	8,0	–	30	100	–
Sage Millimeter	SKS7538532625-1212-R1	SPST	75,0–85,0	10	2,6	25	100	0,25
Sage Millimeter	SKD-758533025-1212-R1	SPDT	75,0–85,0	3,0	–	25	100	–
Millitech	PSH-12	SPST	60,0–90,0	5	<3,0	>20	2	<0,25
Millitech	PDT-10-098 AO	SPDT	96,0–100,0	4,0	<3,0	18	300	<0,25
Sage Millimeter	SKD-9031045030-1010-R1	SPDT	90,0–100,0	5,0	–	30	100	–
Sage Millimeter	SKS-9031042825-1010-R1	SPST	90,0–100,0	10,0	2,8	25	100	0,25
Millitech	PSP-10	SPST	75,0–110,0	10	<2,2	>20	<150	<0,25
Microwave Resources	SPSTW	SPST	75,0–110,0	15%	<2,5	>19	250	–
Microwave Resources	SPDTW	SPDT	75,0–110,0	15%	<3,5	>19	250	–
ELVA-1	SPST-06	SPST	110,0–150,0	40,0	1,5	>30	4–6	<0,8 (пиковая)

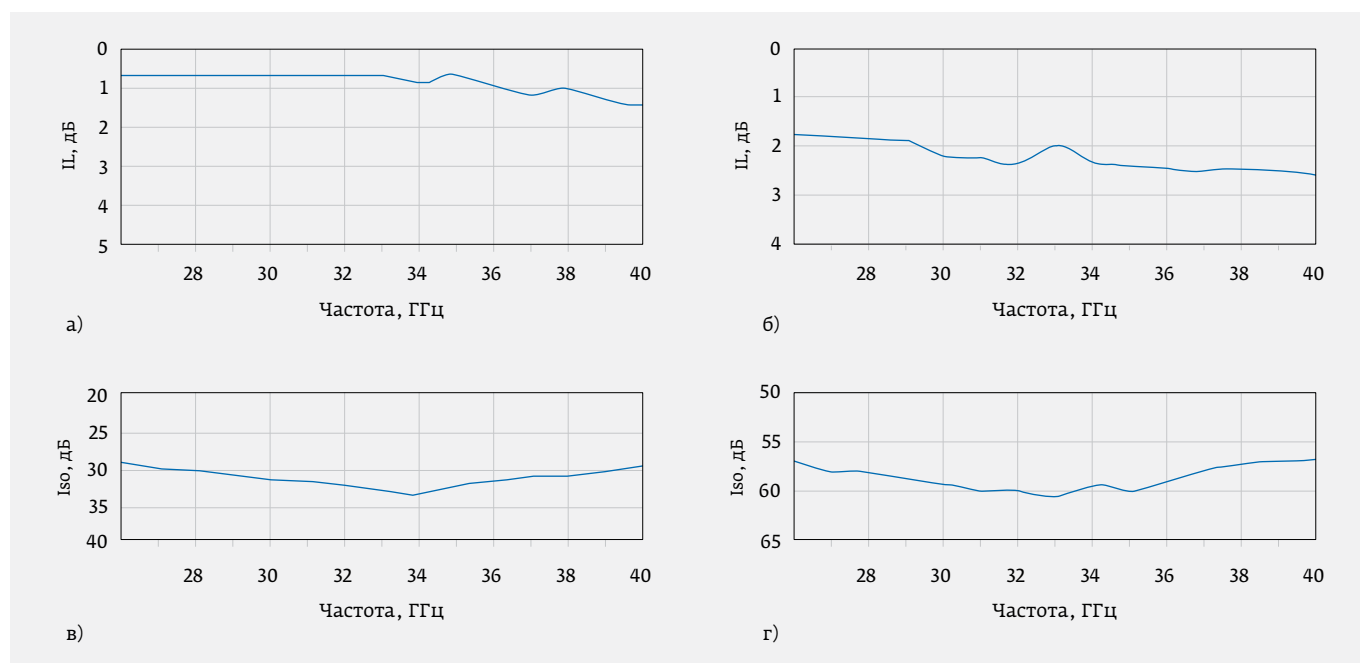


Рис. 36. Зависимости вносимых потерь IL (а, б) и развязки Iso (в, г) от частоты в волноводных SPST pin-переключателях HSW2801 (а, в) и HSW2803 (б, г), выпускаемых компанией NXI

Стандартное время переключения в изделиях этой серии обычно равно 20 нс при переходе из положения с малым ослаблением в положение с большим ослаблением и 150 нс при переходе из положения с большим ослаблением в положение с малым ослаблением. Переключатели могут поставляться как с драйверами, так и без них.

Кардинальное снижение времени переключения до 2 нс достигается в SPST-переключателях отражательно-го типа серии PSH благодаря сужению диапазона рабочих частот и специальным драйверам, идеально совместимым с переключателями. Низкая стоимость, малые габариты и небольшая потребляемая мощность драйверов позволяют интегрировать их в переключатели без существенного увеличения габаритов устройства. Время задержки в таких драйверах не превышает 8 нс, что позволяет коммутировать переключатели с частотой 20 МГц. Изделия этой серии могут поставляться как с драйверами, так и без них. В серию входят семь моделей pin-диодных SPST-переключателей, работающих в диапазонах частот 18,0–26,5; 26,5–40,0; 33–50; 40–60; 50–75; 60–90; 75–95 ГГц. Достижимые рабочие полосы в этих изделиях равны 8,5; 10; 10; 6; 6; 5; 5 ГГц соответственно, вносимые потери составляют 2,0–3,5 дБ, развязка по мере повышения частоты снижается от 30 до 18 дБ. Для увеличения развязки можно использовать несколько последовательно включенных переключателей с установленными между ними вентилями. Такое решение позволяет повысить развязку до 40–60 дБ при увеличении вносимых потерь до 5,5–6,5 дБ.

Помимо SPST-устройств, компания Millitech выпускает SPDT-переключатели PDT-серии, которые отличаются конструктивным исполнением (см. рис. 35а, б). Предлагается 27 моделей в диапазонах частот: 18,0–26,5; 26,5–40,0; 33–40; 33–43; 33–50; 40–45; 43–47; 45–50; 40–47; 47–53; 53–60; 50–60; 55–75; 57–66; 66–75; 60–89; 60–66; 65–71; 71–76; 76–81; 81–86; 85–90; 75–85; 80–100; 85–92; 92–96; 96–100 ГГц. Вносимые потери в этих переключателях по мере повышения частоты возрастают от 1,8 до 3,0 дБ, а развязка снижается с 30 до 18 дБ.

Многопозиционные pin-диодные переключатели типа SP3T и SP4T реализуются в рамках серий PS3 и PS4. Первая представлена четырьмя моделями: PS3-28, PS3-15, PS3-12, PS3-10, рассчитанными на работу в диапазонах частот 26,5–40,0; 50–75; 60–90 и 75–110 ГГц. Переключатели типа SP4T (модели PS4-28, PS4-22, PS4-19) предназначены для диапазонов частот 26,5–40,0; 33–50 и 40–60 ГГц. Все многопозиционные устройства имеют вносимые потери 2,4–2,7 дБ, а развязка составляет 20–18 дБ. Времена нарастания и спада в переключателях обоих типов одинаковы (20 и 300 нс соответственно). Большую скорость переключения можно реализовать за счет некоторого увеличения вносимых потерь.

Достаточно широкую линейку pin-диодных SPST-переключателей серии HSW в диапазоне 18–50 ГГц выпускает компания NXI. Использование кремниевых или арсенид-галлиевых pin-диодов позволяет поставлять переключатели либо с низкими вносимыми потерями, либо с увеличенной развязкой (рис. 36). Высокие характеристики

и надежность изделий достигаются, в частности, благодаря золочению внутренней поверхности корпуса переключателя. Увеличенная до 1 Вт входная мощность обеспечивается компанией в изделиях серии HSWM в диапазоне частот 18–80 ГГц. Из 12 стандартных переключателей, входящих в эту серию, шесть имеют конфигурацию SPST и столько же – SPDT. Многопозиционные устройства производятся в соответствии с техническими требованиями заказчиков. Так же как и в HSW-серии предусмотрена возможность обеспечения либо малых вносимых потерь, либо высокой (до 60 дБ) развязки. Стандартные модели этой серии с временем переключения 3 нс комплектуются TTL-драйверами. Опционально можно заказать изделия с ЭСЛ-драйверами, уменьшенным до 2 нс временем переключения и увеличенной до нескольких ватт входной мощностью.

Крупный производитель волноводных устройств – компания Sage Millimeter, в линейке продукции которой представлены SPST-, SPDT- и SP4T-переключатели, реализованные с использованием pin-диодов. В серии SKS (SPST-переключатели) предлагаются поглощающие и отражательные модели. Первые доступны в диапазонах частот 2,0–4,0; 4,0–8,0; 8,0–18,0; 0,5–18,0; 18,0–26,5; 26,5–40,0; 33–50; 18–50 ГГц, для них характерны вносимые потери от 1,1 до 2,5 дБ и развязка от 80 до 30 дБ. Скорость переключения во всех моделях равна 100 нс, а допустимая входная мощность меняется от 1 до 0,25 Вт по мере увеличения частоты. Отражательные SPST-переключатели выпускаются в диапазонах 2,0–4,0; 4,0–8,0;

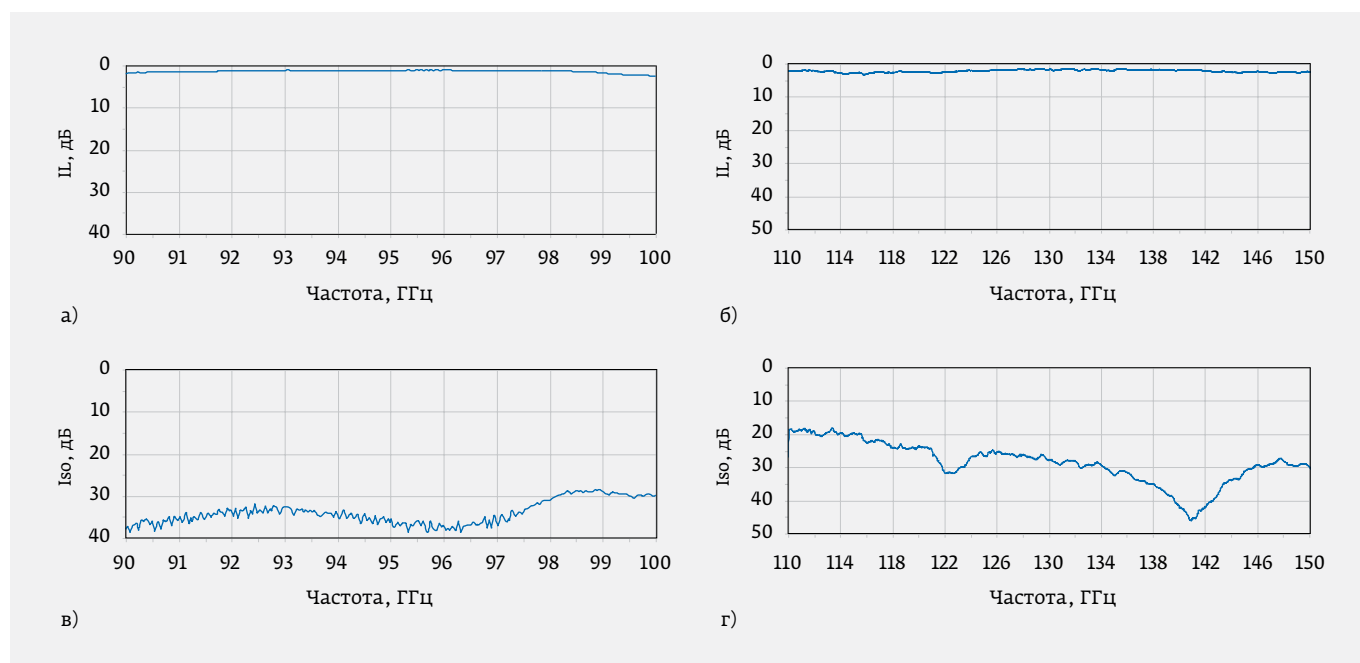


Рис. 37. Зависимости вносимых потерь IL (а, б) и развязки Iso (в, г) в SPST-переключателях SPST-10/94 (а, в) и SPST-06/140 (б, г), выпускаемых компанией ELVA-1

8,0–18,0; 0,5–18,0; 18,0–26,5; 26,5–40,0; 18,0–40,0; 33,0–50,0; 18–50; 45,0–55,0; 55,0–65,0; 75–85,0; 90,0–100,0 ГГц. Вносимые потери в этих устройствах находятся в пределах 0,8–2,8 дБ, а развязка уменьшается по мере повышения частоты от 80 до 25 дБ. Скорости переключения и допустимые входные мощности данных устройств такие же, как и у поглощающих. Основное преимущество отражательных переключателей – расширенный диапазон рабочих частот. Включив на входе и выходе отражательного переключателя вентили, их легко трансформировать в поглощающие.

SPDT-переключатели компании Sage Millimeter рассчитаны на работу в диапазонах частот 18,0–26,5; 26,5–40,0; 18,0–40,0; 33,0–55,0; 18,0–50,0; 55,0–65,0; 75,0–85,0; 90,0–100,0 ГГц. По мере повышения частоты вносимые потери возрастают с 2,5 до 5,0 дБ, а развязка снижается от 40 до 25 дБ. Допустимая мощность и время переключения во всех моделях равны 0,25 Вт и 100 нс соответственно.

Помимо SPST- и SPDT-изделий, компания выпускает 4-позиционные отражательные и поглощающие переключатели (серия SK4) в диапазонах частот 18,0–26,5; 26,5–40,0; 18,0–40,0; 33,0–55,0; 18,0–50,0; 45,0–55,0; 55,0–65,0; 50,0–75,0; 69,0–77,0; 72,0–81,0 ГГц. Вносимые потери в этих устройствах меняются от 4 до 8 дБ, а развязка – от 40 до 30 дБ. Время переключения и допустимая входная мощность такие же, как у SPDT-переключателей. Все эти изделия поставляются как с драйверами (рис. 35л, м), так и без них (драйверы с коаксиальными входом и выходом на рис. 35л, м расположены сверху).

В девяти волноводных диапазонах (18–150 ГГц) SPST-переключатели, обеспечивающие работу в 10%-ной полосе относительно центральной частоты, производит компания ELVA-1. Низкие вносимые потери и достаточно высокая развязка (рис. 37) свидетельствуют о высоком качестве изделий. Встроенные драйверы обеспечивают время переключения 4–6 нс. Развязка 60 дБ в переключателе может быть реализована по желанию заказчика.

Достаточно широкий набор переключателей для гражданской и военной авиационной техники, радиолокаторов, медицинских и телекоммуникационных приложений, спутниковых систем связи, измерительного и тестового оборудования производит компания Discomm Technologies. В диапазонах частот 50–75, 60–90 и 75–110 ГГц компания выпускает SPST- и SPDT-переключатели отражательного типа на основе арсенид-галлиевых pin-диодов. Помимо этого, компания предлагает многопозиционные модели переключателей CP4-60086030-02 (рис. 35п), CP4-77305030-D2 и CP10-77308030-D2 (рис. 35р), первый из них для диапазона 56–64 ГГц, а два других – 75–78 ГГц. При необходимости переключатели отражательного типа трансформируются в поглощающие посредством подключения вентиля к входному и выходному портам.

По заказу отражательные и поглощающие волноводные переключатели на pin-диодах типа SPST и SPDT выпускает компания Cernex. В диапазонах частот 18,0–26,5 и 26,5–40 ГГц доступны устройства с рабочей полосой, совпадающей с этими двумя диапазонами. В диапазонах 33–50, 40–60, 50–75, 60–90, 75–110 ГГц рабочая полоса не превышает 10 ГГц. В SPST-переключателях вносимые потери не выходят за пределы 1,2–2,5 дБ, а в SPDT-переключателях меняются от 1,8 до 3,0 дБ. Развязка во всех переключателях превышает 20 дБ. Время переключения находится в пределах 100–250 нс.

Две серии (910 и 911) отражательных SPST-переключателей предлагает на заказ компания Mi-Wave. Оба вида устройств отличаются низкими вносимыми потерями и могут поставляться как с различными драйверами, так и без них. Рабочая полоса в изделиях 910-й и 911-й серий составляет соответственно 6 и 10% центральной рабочей частоты. При этом развязка достигает 60 дБ. В отражательных SPDT-переключателях 912-й серии рабочая полоса равна 6% от центральной рабочей частоты, а развязка доходит до 40 дБ.

Для относительно низких (10,25–10,50 ГГц) частот выпускает переключатели компания CPI. В узкой рабочей полосе обеспечиваются небольшие вносимые потери (менее 1,2 дБ), значительная (до 70 дБ) развязка и время переключения менее 250 нс.

Компания Microwave Resources производит SPST- и SPDT-переключатели для семи диапазонов частот (18,0–26,5; 26,5–40,0; 33,0–50,0; 40,0–60,0; 50,0–75,0; 60,0–90,0; 75–110,0 ГГц), причем в первых пяти обеспечивается полный диапазон рабочих частот, а в двух последних рабочая полоса не превосходит 15% центральной рабочей частоты.

Трехпозиционные SP3T-переключатели (серии QSN) поставляются компанией QuinStar.

Таким образом, на рынке представлено широкое разнообразие твердотельных СВЧ-переключателей. На основе информации, приведенной в статье, можно выбрать оптимальный переключатель для решения конкретной задачи.