

МЭМС-переключатели ВЧ / СВЧ-сигналов

Часть 3

В. Кочемасов, к.т.н.¹, Е. Торина, к.т.н.², А. Сафин, д.ф.-м.н.³

УДК 621.389 | ВАК 2.2.2

В первой и второй частях статьи, опубликованных в четвертом и пятом номерах журнала «ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес» за 2024 год, было рассмотрено устройство МЭМС-переключателей ВЧ/СВЧ-сигналов и рассказано о различных типах таких устройств, выпускаемых рядом производителей. В данном номере приводится информация об особенностях и характеристиках МЭМС-переключателей компании Menlo Micro.

Menlo Micro. После многолетнего сотрудничества в области построения МЭМС-переключателей ряд компаний: General Electric, Ventures, Microsemi, Corning и Paladin Capital Group, обладающих технологиями производства интегральных схем и опытом производства сплавов с уникальными характеристиками, учредили в 2016 году компанию Menlo Micro, инвестируя в ее развитие 18,7 млн долл. Результатом этого сотрудничества стала новая технология создания мощных МЭМС-переключателей с исключительно низкими значениями сопротивлений включения R_{on} и вносимых потерь. Эта технология, базирующаяся на TGV (Through Glass Via) технологии корпусирования, позволила объединять множество микропереключателей. В результате компании удалось увеличить мощность и уменьшить размеры конечных изделий, а также сократить число используемых при производстве компонентов и, как следствие, снизить стоимость производства. Замена проволочных перемычек на металлизированные отверстия в стеклянной подложке более чем на 75% снизила паразитные эффекты, что расширило диапазон рабочих частот переключателей [23–25].

Технологии Menlo Micro близки к стандартным КМОП-технологиям, что позволяет использовать их при крупносерийном производстве. Кроме того, применяемый для контактов переключателя специальный сплав, разработанный компанией, позволяет улучшить долговечность МЭМС ПК типа «металл – металл». При использовании такого сплава величина зазора S между контактами при испытаниях, соответствующих условиям 20-летней

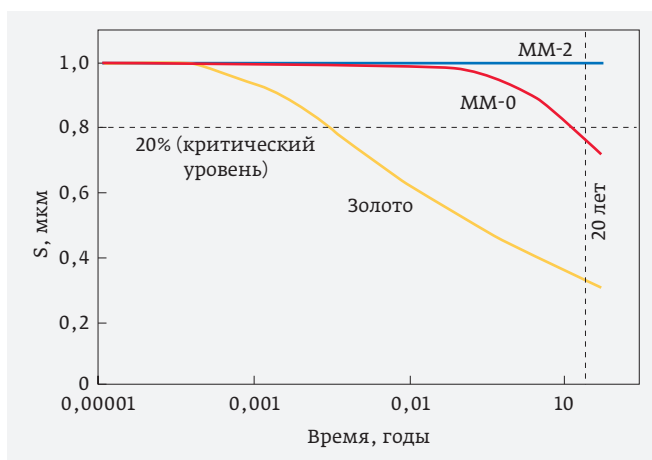


Рис. 29. Зависимость величины зазора S от времени для контактов из золота и двух видов сплавов Menlo Micro: MM-0, MM-2. Температура окружающей среды 85 °С, давление окружающей среды 120 МПа

работы устройства, остается постоянной, а при золотых контактах начинает деградировать уже через час после начала испытаний (рис. 29) и через время, соответствующее 20 годам работы, достигает 35% от ее начального значения. Разработчики назвали новый подход технологией «идеального» переключателя, на основе которого предложили широкую линейку изделий [25, 26].

Микросхема MM7100 [27] является SPST МЭМС переключателем высоковольтных сигналов, выполненным по технологии DMS (Digital-Micro-Switch) компании Menlo Micro (табл. 7). Эти изделия способны переключать напряжения до 400 В и токи до 2 А и при этом предназначены для поверхностного монтажа и обладают исключительно малыми габаритами (0,35×0,35×0,07 мм).

Изделие MM7100 обеспечивает очень низкое сопротивление R_{on} во включенном состоянии и высокую

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

² НИУ «МЭИ», доцент, drozdovaym@mpei.ru.

³ ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, в.н.с., asafin@gmail.com.

развязку в выключенном состоянии. Работая при температуре окружающей среды 85 °С, оно обеспечивает срок жизни, превосходящий 3 млрд циклов. Вследствие упомянутых характеристик эти МЭМС-переключатели являются идеальной заменой своих электромеханических аналогов, а также рpн-диодных переключателей в тех случаях, когда размеры, вес, входная мощность и отвод тепла являются определяющими. Переключатель ММ7100 является неполяризованным реле, вследствие чего ток между входом и выходом (рис. 30а) может течь в обоих направлениях.

Рабочий диапазон переключателя составляет 0–750 МГц, а время переключения не превосходит 5 мкс. Электростатическое напряжение по всем портам не должно превышать 250 В (НВМ). Номинальное высоковольтное управляющее напряжение равно 77,5 В. Максимальная входная мощность в каждом канале не превышает 100 Вт.

ММ1200 [28] – 6-канальный SPST МЭМС ПК, предназначенный для коммутации в сетях постоянного и переменного токов. Каждый канал обеспечивает низкое сопротивление контакта R_{on} и высокую развязку в выключенном состоянии. Число циклов переключения в этом изделии превышает 3 млрд. Все каналы переключателя управляются индивидуально по последовательно-параллельному интерфейсу, обеспечивая независимое управление затворами во всех шести каналах (рис. 30б).

Предельное канальное напряжение постоянного или переменного тока не превышает 150 В, а канальный ток 1 А. При этом общий ток во всех шести каналах не должен превосходить 3 А. Время переключения не превышает 10 мкс. Переключение осуществляется по SPI-интерфейсу. Расположен переключатель в BGA-корпусе с размерами 6,0×6,0×1,3 мм. Внешние напряжения +5 В и +75 В подаются на интегрированный в микросхему драйвер.

Переключатель ММ1200 хорошо подходит для замены электромеханических переключателей, используется в автоматических тестовых и измерительных комплексах, а также служит основой для матричных переключателей. В качестве помощи инженерам компания разработала отладочную плату ММ1200-EVK (рис. 31а).

ММ3100 [29] – это мощный (до 25 Вт на частоте 300 МГц), нормально открытый, 6-канальный МЭМС SPST переключатель для ВЧ/СВЧ-применений. Он выполнен с использованием технологии «идеального» переключателя. Каждый канал обеспечивает вносимые потери 0,5 дБ на частоте 3 ГГц, высокую (18 дБ) развязку в диапазоне от 0 до 3 ГГц и срок жизни более 3 млрд циклов. Каждый канал управляется индивидуально (рис. 30б) по последовательно-параллельному интерфейсу, обеспечивая управление затворами переключателей. Помимо функции SPST-переключателя, ММ3100 может выполнять функции трех

изделий: SP2Т- и SP3Т-переключателей, а также матричного переключателя 2Р3Т. Для управления работой этих переключателей требуются внешние логические цепи и интегрируемый в схему высоковольтный драйвер. Максимальная мощность, подаваемая на вход переключателя, зависит от частоты (рис. 32).

Для удобства работы с микросхемой и проведения измерений ее характеристик была разработана отладочная плата ММ3100-EVK (рис. 31б).

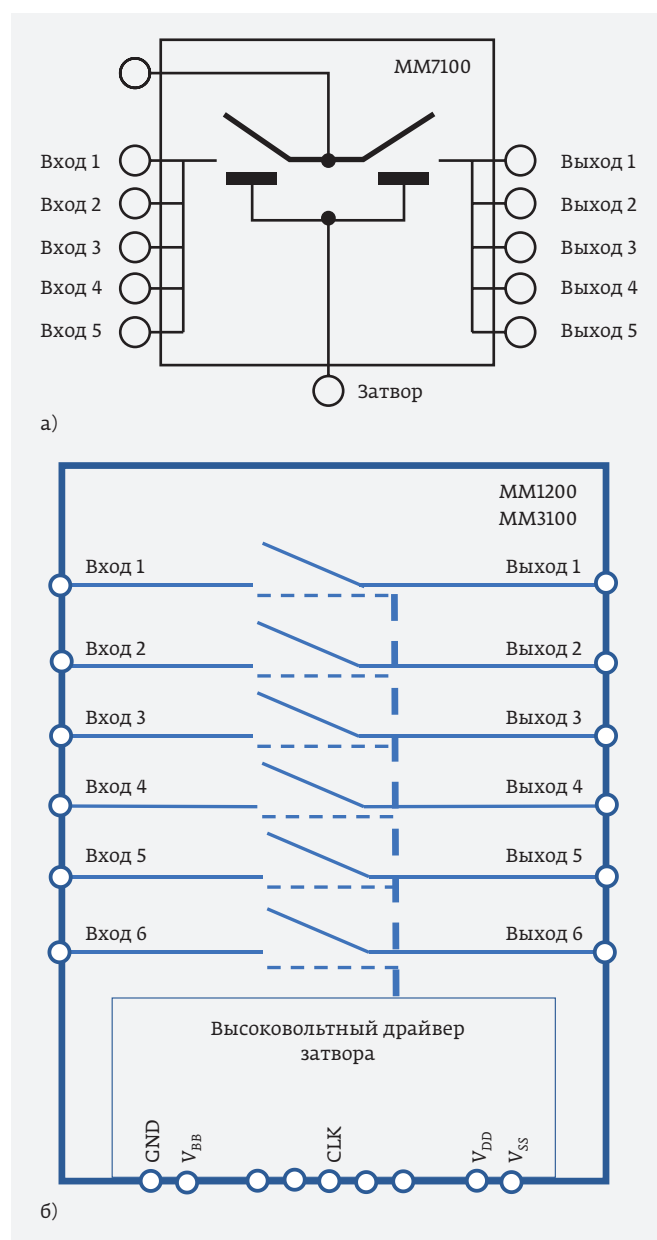
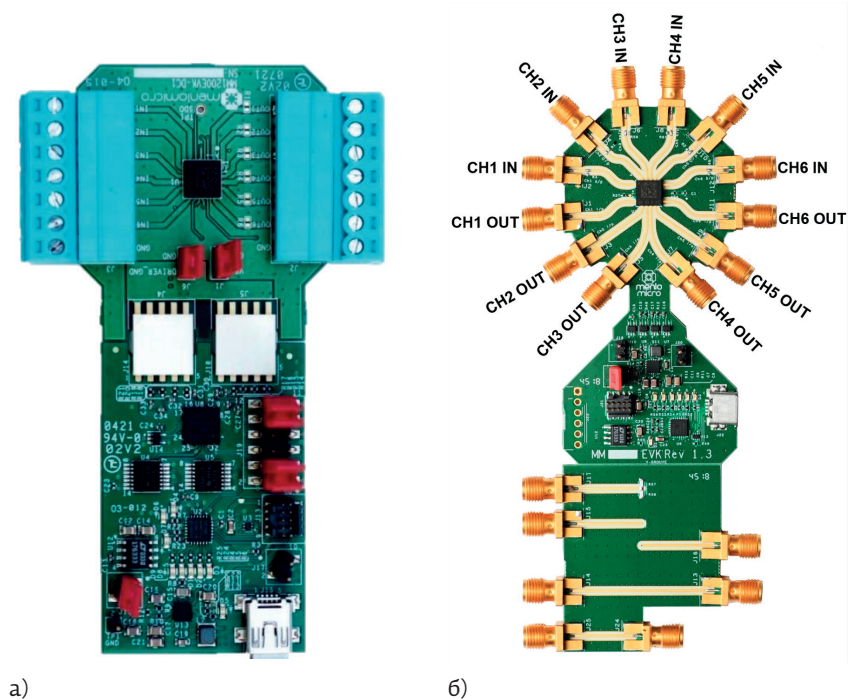


Рис. 30. Структурные схемы многоканальных SPST-переключателей компании Menlo Micro: а – 5-канальный МЭМС-переключатель ММ7100; б – 6-канальные МЭМС-переключатели ММ1200 и ММ3100



в)

Рис. 31. Отладочные платы, разработанные компанией Menlo Micro для выпускаемых переключателей:
а – MM1200-EVK; б – MM3100-EVK;
в – MM5130-EVK2

Представляют также интерес зависимости сопротивления $R_{\text{от}}$ от температуры окружающей среды (рис. 33). Стоит отметить и зависимости вероятности отказов от числа циклов переключения в горячем режиме при различных входных мощностях (рис. 34). Избавиться от горячего режима переключения, а значит, существенно увеличить срок жизни переключателей можно обеспечив соответствующий режим изменения высоковольтного напряжения управления (рис. 35).

MM5130 [30] – это высокоомощный SP4T МЭМС переключатель компании Menlo Micro, который обеспечивает ультранизкие (0,4 дБ) вносимые потери и превосходную ($IP3=95$ дБм) линейность в полосе частот 0–18 ГГц. Время жизни в этом переключателе превышает 3 млрд циклов. MM5130 может также работать в специальном

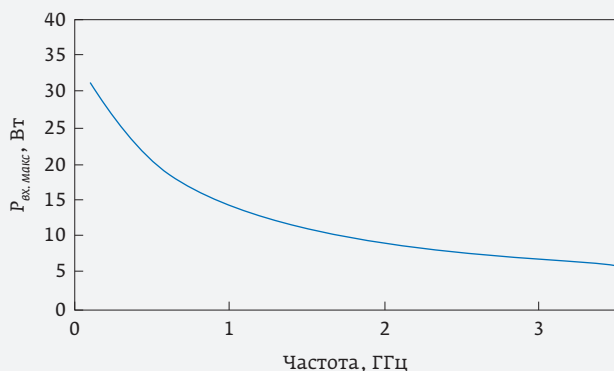


Рис. 32. Зависимость максимальной входной мощности от частоты

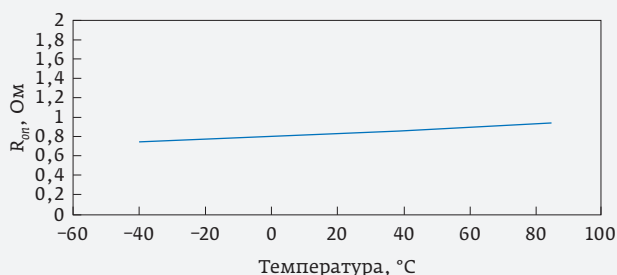


Рис. 33. Зависимость сопротивления включения изделия MM3100 от температуры

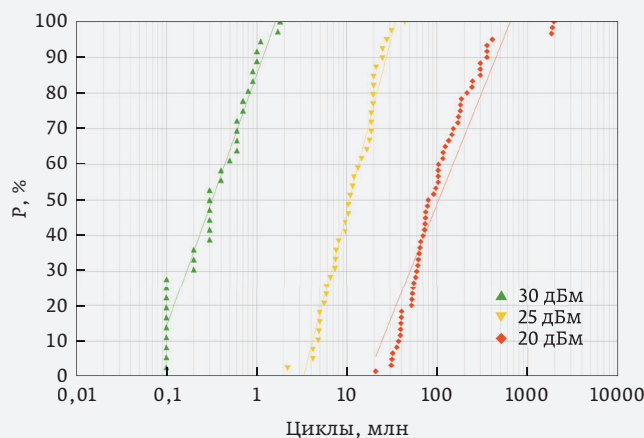


Рис. 34. Зависимость вероятности отказов $P_{\text{о}}$ от количества циклов переключения в горячем режиме при разных значениях входной мощности

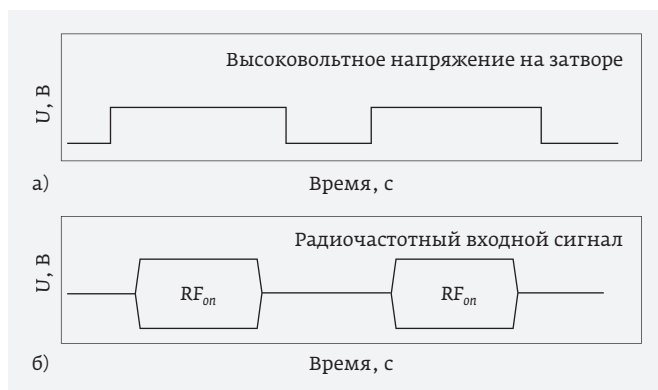


Рис. 35. Эпюры напряжений: а – на затворе; б – входной радиочастотный сигнал

режиме, обеспечивая расширенный диапазон частот (0–26 ГГц). MM5130 идеально заменяет ЭМПК и полупроводниковые ПК в тех применениях, где линейность и вносимое ослабление являются определяющими параметрами. Четыре канала переключателя индивидуально управляются по входам V_{y1} , V_{y2} , V_{y3} , V_{y4} , (рис. 36а). Отметим, что вносимые потери IL и развязки I_{so} мало зависят от номера подключенного канала (рис. 37а, б). Практически постоянным вносимое ослабление остается и по мере увеличения отработанных циклов переключения (рис. 38). Низкими в этом переключателе остаются вторая (H_2) и третья (H_3) гармоники (рис. 39а, б).

Существенно в переключателе различаются времена включения T_{on} и выключения T_{off} (табл. 7). Для помощи разработчикам, осваивающим микросхему MM5130, в компании Menlo Micro была разработана отладочная плата (рис. 31в).

MM5120 [31] – это мощный (25 Вт) SP4Т ПК, также выполненный по технологии «идеального» переключателя. MM5120 обеспечивает исключительно низкие (0,4 дБ) вносимые потери и высокую (> 90 дБм) линейность во всем диапазоне рабочих частот. Срок жизни этого МЭМС ПК превышает 3 млрд циклов переключения, что в совокупности с увеличенным ППЗ и уменьшенным IL позволяет использовать его в качестве идеальной замены ЭМПК. Удобство управления микросхемой обеспечивается встроенными цепями управления, драйвером и схемой накачки заряда (charge pump), необходимой для управления затвором (рис. 36б). Основные параметры переключателя MM5120 IL , I_{so} и RL мало зависят от номера подключенного канала и окружающей температуры (рис. 40а–в; рис. 41а–в).

Интерес представляют и зависимости вероятности отказа P_o от времени (рис. 42а) и числа наработанных циклов (рис. 42б) при двух значениях температуры окружающей среды.

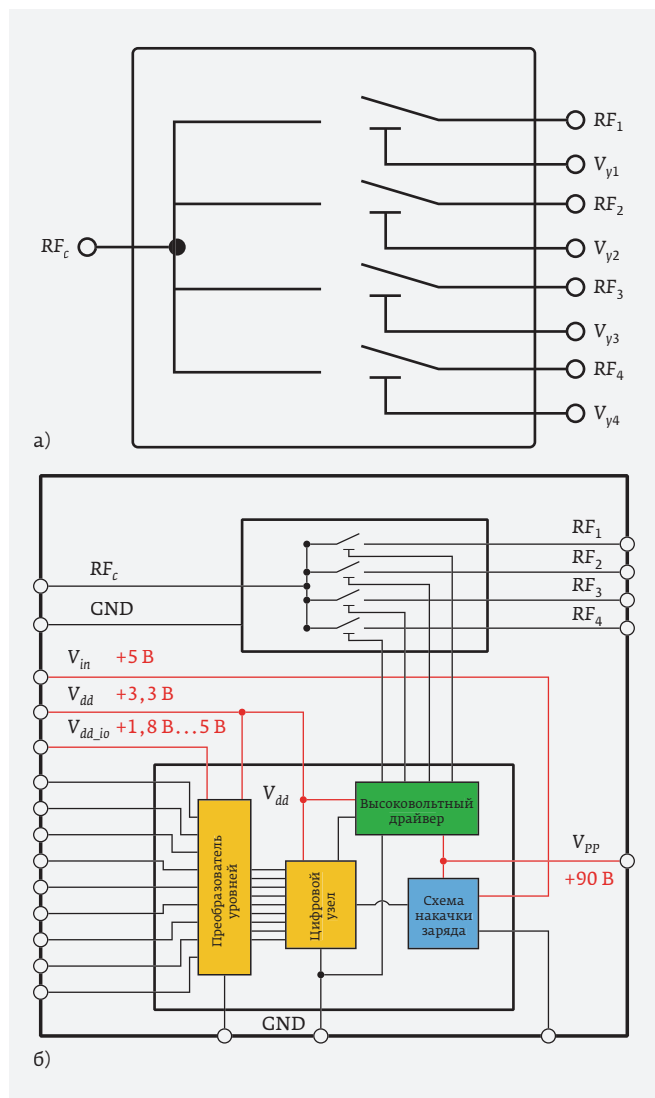


Рис. 36. Структурные схемы SP4Т МЭМС переключателей компании Menlo Micro: а – MM5130; б – MM5120, MM5140

MM5140 [32] – еще один мощный (25 Вт в непрерывном и 100 Вт в импульсном режиме) SP4Т ПК. Он обеспечивает исключительно малое (0,4 дБ) вносимое ослабление и исключительно высокую ($ППЗ > 90$ дБм) линейность в диапазоне частот 0–6,0 ГГц. Предельное число циклов при этом превышает 3 млрд. MM5140 также является идеальной заменой ЭМПК и твердотельных переключателей в тех применениях, где требуются высокая линейность и низкие вносимые потери. В состав микросхемы входит драйвер, управляемый по интерфейсам SPI и GPIO. В эту микросхему, кроме того, интегрирована схема накачки заряда для управления затвором (рис. 36б). Переключатель выполнен в LGA-корпусе с посадочными размерами 5,2×4,2 мм.

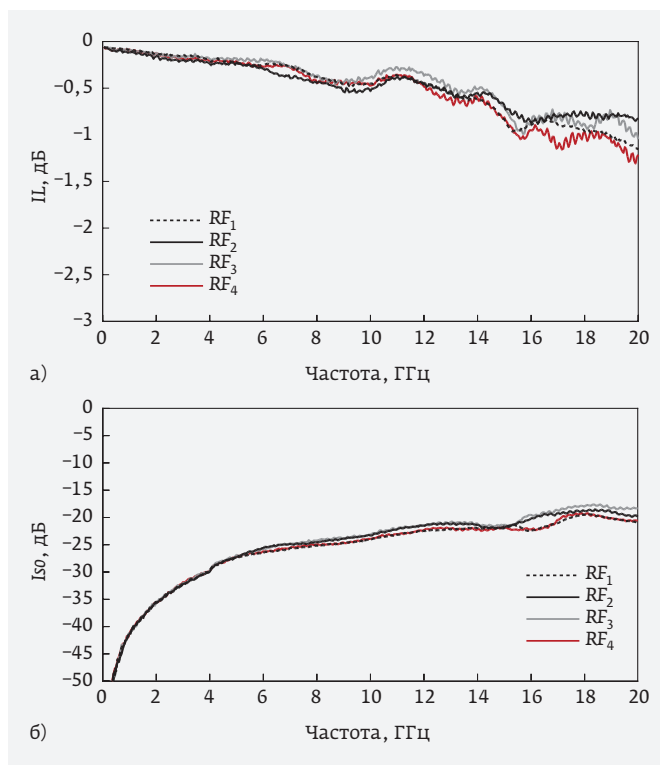


Рис. 37. Зависимости развязки (а) и потерь (б) от частоты для разных портов изделия MM5130 при температуре 25 °С

Микросхема может быть применена в переключаемых и перестраиваемых фильтрах, матричных переключателях с низкими вносимыми потерями, для замены электромеханических переключателей, для настройки антенн, в системах управления антенным лучом и цифровых аттенюаторах. По радиочастотным входам обеспечивается защита от электростатического напряжения 150 В (НВМ).



Рис. 38. Зависимость вносимых потерь в изделиях MM5120 и MM5130 от количества циклов переключения (при температуре окружающей среды 20 °С и мощности входного сигнала 10 дБм)

По всем другим входам защита обеспечивается на уровне 2000 В (НВМ). Микросхема устойчива к ударам 500 г и вибрациям.

Уровни второй и третьей гармоник равны –125 дБн и –150 дБн соответственно. Время включения равно 12 мкс, время выключения – 5 мкс. При температуре 25 °С типовой срок жизни составляет 30 млрд переключений. С повышением температуры до 85 °С срок жизни сокращается до 100 млн переключений. Видеопротестирование в микросхеме равно 16 мВ.

Помимо SPST и SP4T МЭМС переключателей, компания Menlo Micro разработала DPDT-переключатель MM5600 [33]. Этот «идеальный» переключатель (рис. 43) может работать в цифровых линиях связи со скоростью передачи информации 40 Гбит/с или в СВЧ-применениях до 20 ГГц. В переключателе обеспечиваются низкие вносимые потери (1,3 дБ), развязка (24 дБ), интермодуляционные продукты третьего порядка ($IP3 = 77$ дБм) и негармонические составляющие $H_2 = -102$ дБн, $H_3 = -101$ дБн. Напряжение питания $V_{dd} = +6$ В, высоковольтное напряжение, подаваемое на затвор переключателя, равно 100 В. Время на включения/выключения равны 8,5 и 2,5 мкс соответственно. Типичный срок жизни переключателя составляет

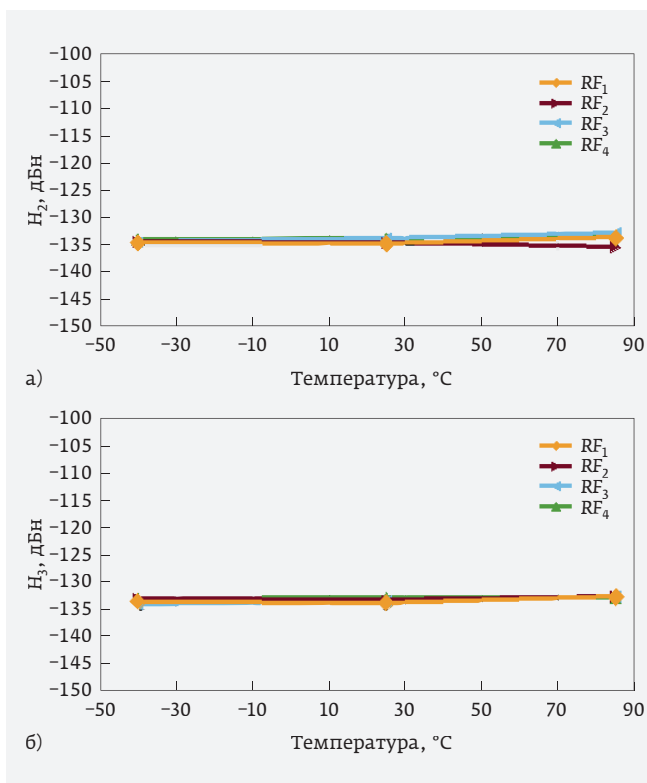


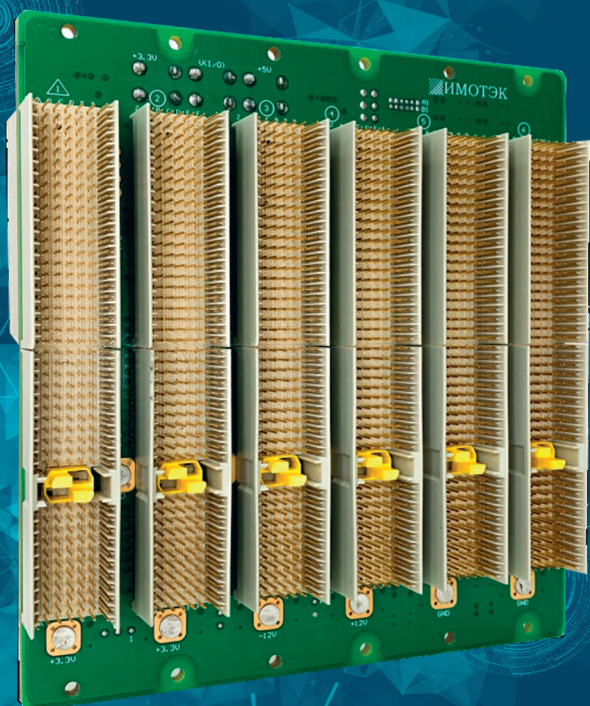
Рис. 39. Зависимости мощности гармонических составляющих сигнала от температуры окружающей среды на частоте 1 ГГц в изделии MM5130: а – вторая гармоника; б – третья гармоника

ОБЪЕДИНИТЕЛЬНАЯ КРОСС-ПЛАТА



имотэк.рф

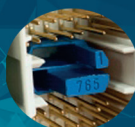
Объединительные кросс-платы являются основными элементами при создании промышленных вычислительных систем с расширенным функционалом.
Соответствует стандартам PICMG
Гарантирует максимально надежную высокопроизводительную работу всей системы
Поддерживает функцию Hot Swap
Обеспечивает подавление высокочастотных помех
Температурный режим работы от -40°C до 85°C



КОНФИГУРАЦИЯ ИСПОЛНЕНИЙ



Питание +3,3 В

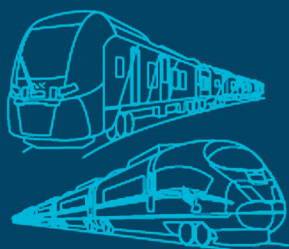


Питание +5 В



Системный слот: слева/справа
Форм-фактор: 3U/6U
Количество слотов: от 2 до 8

ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ



ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ



СЕТЕВЫЕ РЕШЕНИЯ



РОБОТОТЕХНИКА



ВОЕННАЯ ТЕХНИКА

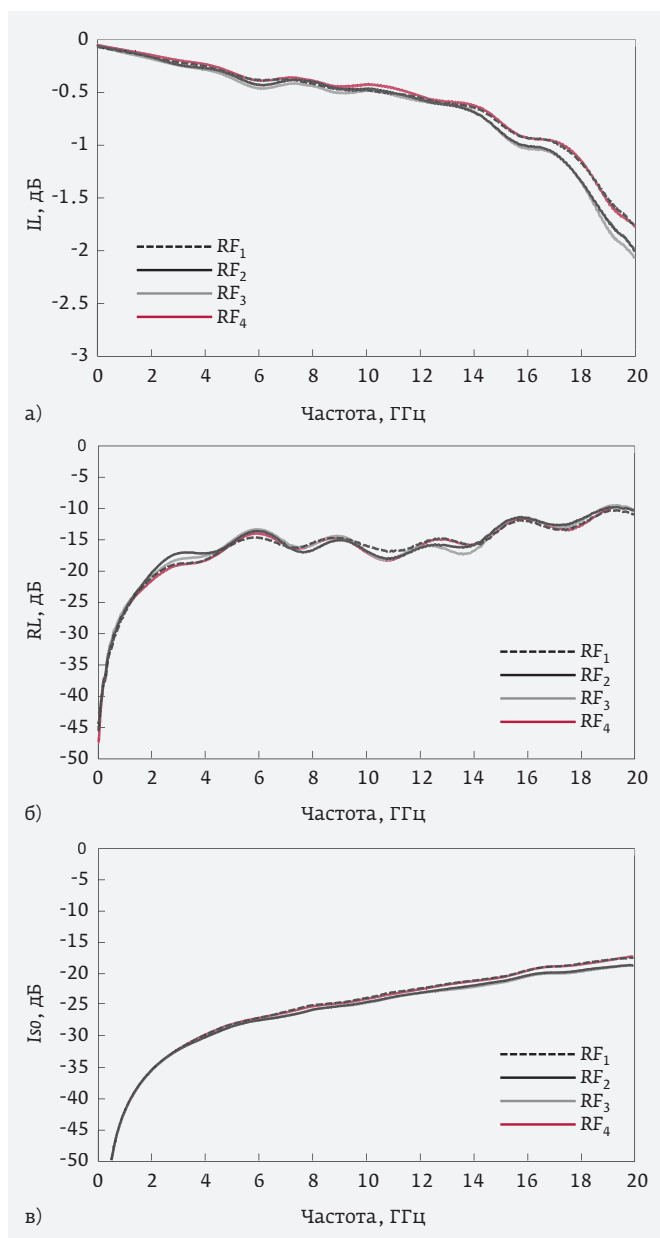


Рис. 40. Зависимость основных параметров изделия MM5120 от частоты для разных каналов при температуре 25 °С: а – вносимые потери; б – возвратные потери; в – развязка

30 млрд циклов. Сопротивление включения $R_{on} = 1,2$ Ом. Вносимые IL и возвратные RL потери, а также развязка Iso при температуре окружающей среды 25 °С в каналах переключателя меняются не очень сильно (рис. 44).

Рынок МЭМС-переключателей активно развивается последние десятилетия. Современные технологии уже позволили добиться впечатляющих характеристик МЭМС ПК с электростатическим приводом,

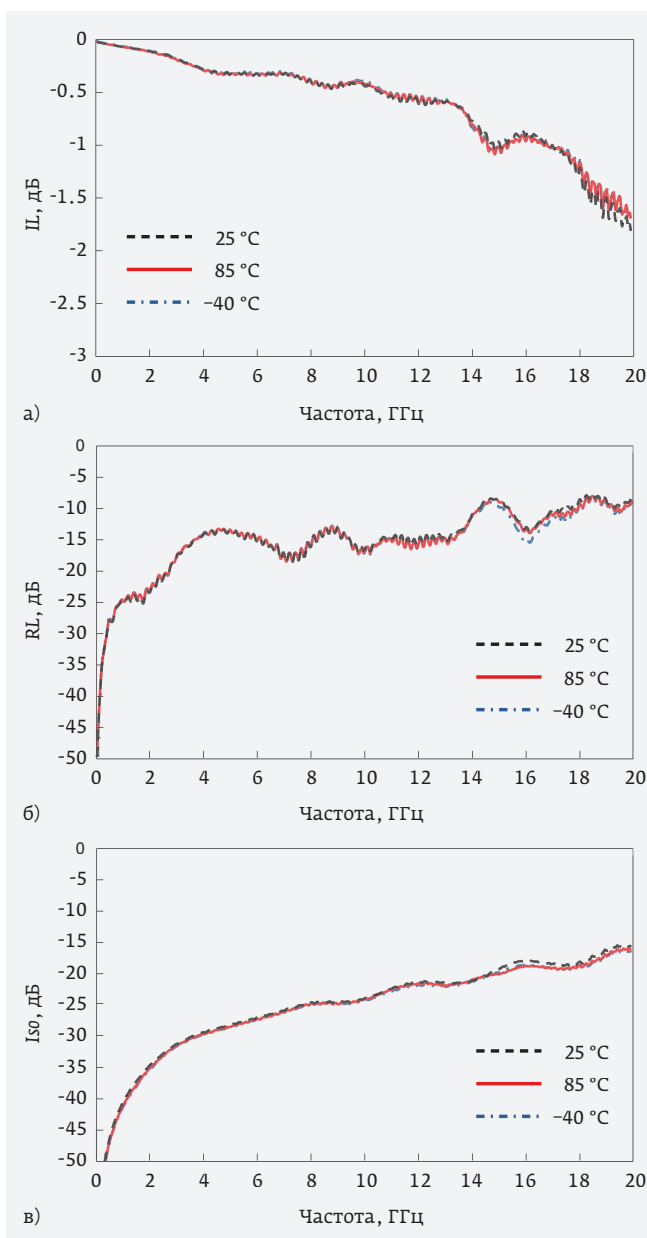


Рис. 41. Зависимость основных параметров изделия MM5120 от частоты для разных значений температуры: а – вносимые потери; б – возвратные потери; в – развязка

серийно выпускаемых промышленностью. На кристаллах размером в несколько квадратных миллиметров были достигнуты рекордные мощности переключения, вносимые потери, линейность, частотный диапазон и надежность, вполне конкурентная со всеми существующими типами переключателей радиосигналов. Применение МЭМС ПК стало целесообразней, чем ЭМПК в большинстве приложений. В тех случаях, когда на переключение отводятся микросекунды и более МЭМС ПК оказываются предпочтительнее полупроводниковых переключателей.



ЗАВОД ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

ЭЛЕМЕНТ

Металлокерамические корпуса (МКК) для интегральных микросхем



Единственное в России серийное
производство многовыводных МКК
(свыше 200 выводов)



Освоены в производстве
все существующие типы МКК



Полный производственный цикл:
контроль изготовления на всех этапах
производства



Комплексная разработка
новых изделий,
собственное опытное производство



Развитая техническая база
инструментального производства:
изготовление контактирующих
устройств и сложной оснастки

Акционерное общество
«Завод полупроводниковых приборов»
Россия, 424003, Республика Марий Эл
г. Йошкар-Ола, ул. Суворова, 26
тел: +7 (8362) 45-70-09, e-mail: info@zppl2.ru



zppl2.ru

Таблица 7. Характеристики МЭМС-переключателей, выпускаемых компанией Menlo Micro

Модель	Тип ПК	Диа-пазон частот, ГГц	$P_{вх. макс.}$, Вт	$P_{вх. имп. макс.}$, Вт	$R_{оп}$, Ом	L , дБ	I_{so} , дБ	$IP3$, дБм	H_2 , дБн	H_3 , дБн	$T_{оп}$, мкс	T_{off} , мкс	Условия тестирования	Число циклов коммутации
MM7100	5×SPST	0–0,75	100	–	0,3	–	–	85	–	–	$5(T_p)$		Холодный режим	$>3 \cdot 10^9$
MM1200	6×SPST	–	–	–	$<0,3$	–	–	–	–	–	8,5	2,5	–	–
MM3100	6×SPST	0–3,0	25 на 1 канал	200 на 1 канал, $Q=10\%$	$<0,3$	0,5	18	85	–130	–140	8,5	2,5	Холодный режим Горячий режим: 20 дБм 25 дБм 30 дБм	$3 \cdot 10^9$ 10^9 10^7 $0,3 \cdot 10^6$
MM5140	SP4T	0–6,0	25	100	$<3,0$	0,4	26	90	–125	–150	12	5	Холодный режим 25 °C 85 °C	$3 \cdot 10^9$ $1 \cdot 10^8$
MM5120	SP4T	0–18,0	25	150	$<3,0$	0,4–1,2	26–17	90	–130	–130	8,5	2,5	Холодный режим 25 °C 85 °C	$3 \cdot 10^{10}$ $1 \cdot 10^8$
MM5130	SP4T	0–26,0	25	150	0,4–1,3	0,4–1,3	25–18	95	–130	–130	8	2	Холодный режим 25 °C 70 °C 85 °C	$3 \cdot 10^{10}$ $1 \cdot 10^9$ $0,1 \cdot 10^9$
MM5600	DPDT	0–20,0	<2	–	1,2	1,3	24	77	–102	–101	8,5	2,5	Холодный режим	$3 \cdot 10^{10}$

Дальнейшее развитие технологий МЭМС позволит улучшить параметры изделий, повысить их надежность и удешевить массовое производство. Сейчас в литературе уже встречаются отчеты о лабораторных образцах с еще более совершенными параметрами. Так, учеными из Канады и Ирана представлен МЭМС-переключатель с термоэлектрическим приводом, показывающий рекордный уровень $IP3$, равный 127 дБ, при $FOM=23$ фс и требуемом питании всего 5 В [34]. Следует ожидать, что МЭМС ПК займут значительную долю рынка в ближайшие годы.

ЛИТЕРАТУРА

23. **Happich J.** MEMS power switches to shrink thanks to through glass via packaging. // <https://www.eenewseurope.com/en/mems-power-switches-to-shrink-thanks-to-through-glass-via-packaging/> [Электронный ресурс. Дата обращения 21.03.2024]

24. **Happich J.** GE spins out MEMS startup: wants cheaper power switches // Electronic Engineering Times Europe. January 2017. PP. 12–13.

25. Micro-mechanical switches for both power and 5G applications. www.Mwee.com, www.menlomicro.com, www.corning.com.

26. **Leitner J.** RF MEMS Switch Performance in Extreme Environments. // Microwave Journal. 2021. No. 12. PP. 54–60.

27. Data sheet на переключатели MM7100 [https://menlomicro.com/images/general/MM7100_Datasheet.pdf].

28. Data sheet на переключатели MM1200 [https://menlomicro.com/images/general/MM1200_Datasheet.pdf].

29. Data sheet на переключатели MM1300 [https://menlomicro.com/images/general/MM1300_Datasheet.pdf].

30. Data sheet на переключатели MM5130 [https://menlomicro.com/images/general/MM5130_Datasheet.pdf].

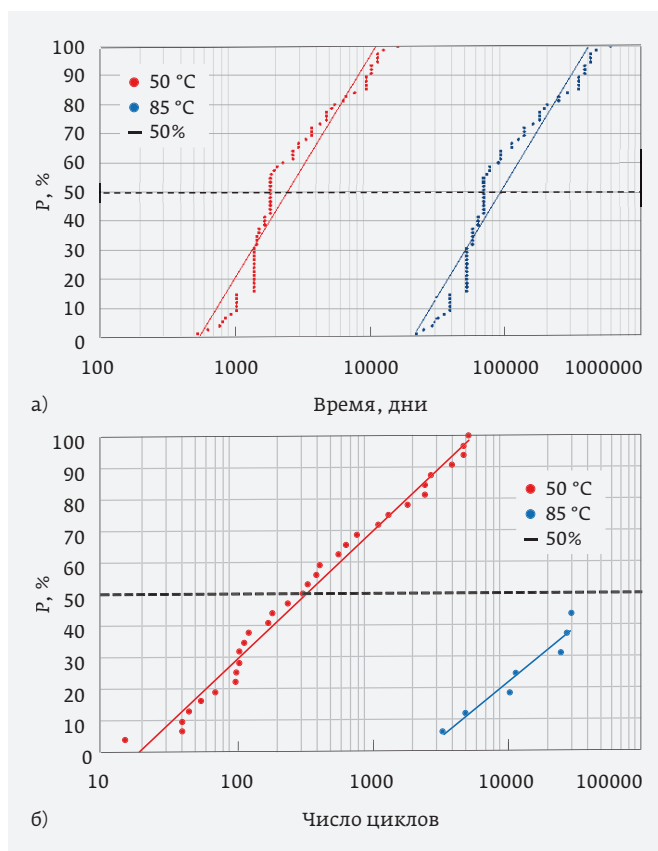


Рис. 42. Зависимости вероятности отказа P_o для изделия MM5120 при разных значениях температуры: а – от времени; б – от количества отработанных циклов

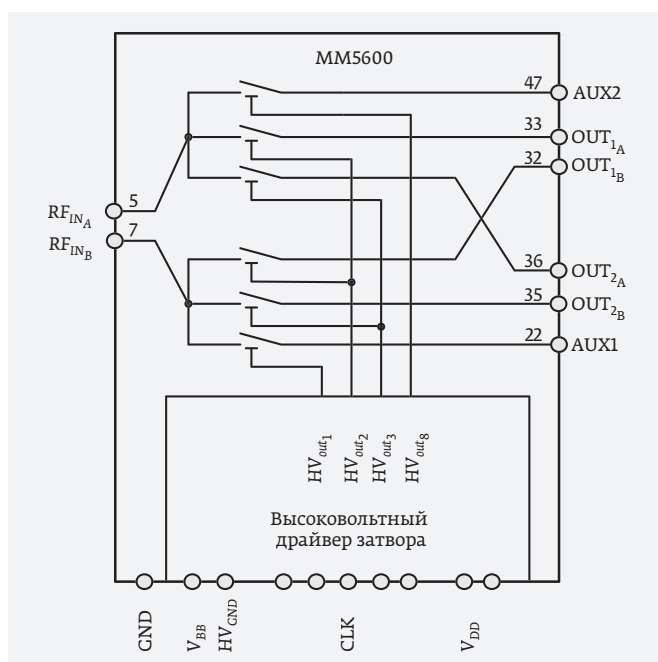


Рис. 43. Структурная схема DPDT-переключателя MM5600 компании Menlo Micro

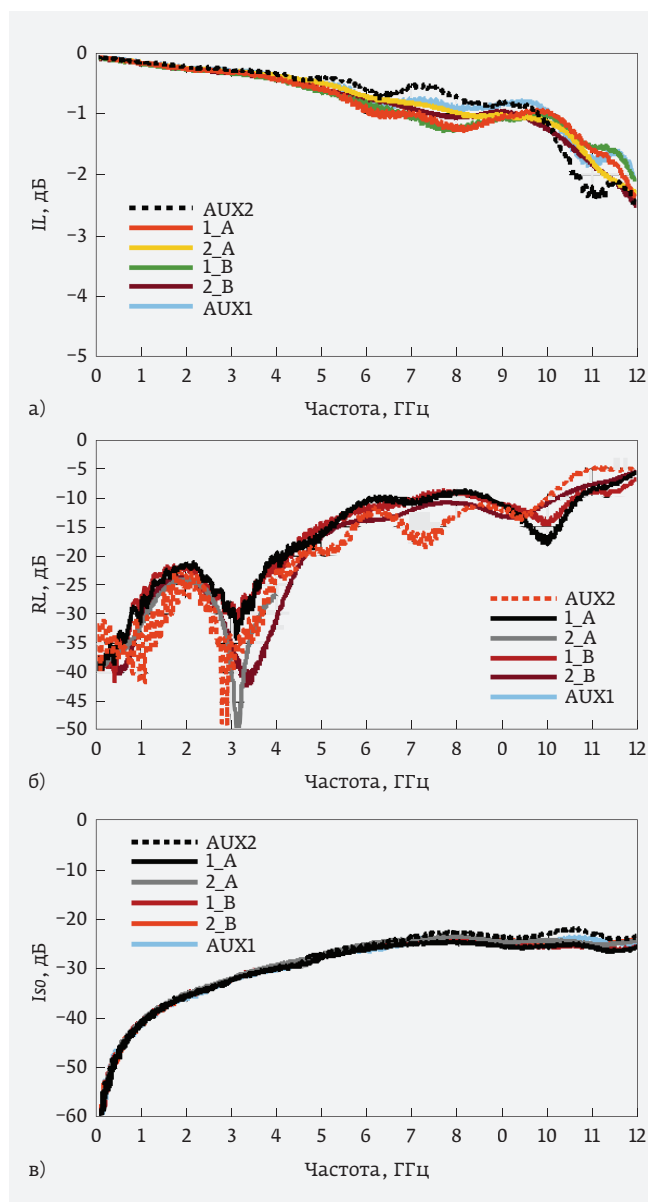


Рис. 44. Зависимость основных параметров изделия MM5600 от частоты для разных каналов при температуре 25 °C: а – вносимые потери; б – возвратные потери; в – развязка

31. Data sheet на переключатели MM5120 [https://menlomicro.com/images/general/MM5120_Datasheet.pdf].
32. Data sheet на переключатели MM5140 [https://menlomicro.com/images/general/MM5140_Datasheet.pdf].
33. Data sheet на переключатели MM5600 [https://menlomicro.com/images/general/MM5600_Datasheet.pdf].
34. Mirzajani H., Ilkhechi A.K., Zolfaghari P. et al. Power efficient, low loss and ultra-high isolation RF MEMS switch dedicated for antenna switch applications // Microelectronics Journal. 2017. V. 69. PP. 64–72.