DOI: 10.22184/1992-4178.2024.235.4.76.84

МЭМС-переключатели ВЧ/СВЧ-сигналов

Часть 1

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

Переключатели (ПК) являются ответственным функциональным узлом многих радиотехнических приложений. С развитием технологий растут требования к их параметрам: мощности, диапазону частот, надежности и др. Электромеханическим и полупроводниковым транзисторным переключателям все труднее удовлетворять этим требованиям, что заставляет разработчиков аппаратуры искать новые решения. Одним из таких решений являются микроэлектромеханические (МЭМС) переключатели, которые в последние десятилетия активно развивались и к настоящему времени представляют собой законченные, надежные и перспективные для различных применений изделия. В статье рассматриваются особенности и характеристики различных МЭМС-переключателей ВЧ/СВЧ-сигналов, выпускаемых рядом производителей.

Микроэлектромеханические системы начинают свою историю с 1954 года, когда в полупроводниковых материалах был обнаружен пьезорезистивный эффект. Однако промышленное производство МЭМС-компонентов стартовало только в 1990-х годах. Первыми устройствами были датчики давления и акселерометры, но к настоящему моменту линейка устройств на основе МЭМС-технологий значительно расширилась [1, 2]. Радиочастотные МЭМС-компоненты изготавливаются обычно на кремниевой подложке с помощью технологий микрообработки, сходной с технологией изготовления интегральных схем. Наибольшую популярность среди МЭМС-компонентов получили:

- стабильные генераторы с низким уровнем фазовых шумов;
- микрофоны;
- датчики;
- варакторы;
- ВЧ/СВЧ-переключатели;
- коммутируемые фильтры, фазовращатели и линии задержки;
- перестраиваемые конденсаторы и индуктивности.

Предметом настоящей статьи будут ВЧ/СВЧ-переключатели, которые к настоящему времени по многим характеристикам превзошли изделия, реализованные по электромеханическим и полупроводниковым технологиям (табл. 1). Современным беспроводным и портативным устройствам необходимо обеспечивать поддержку постоянно растущего числа стандартов связи со все более широкими диапазонами частот и полосами пропускания. К параметрам переключателей приемопередатчика (рис. 1) здесь предъявляются все более жесткие требования. Удовлетворить их становится все труднее и в последние десятилетия разработчики все чаще обращают внимание на МЭМС-устройства. МЭМС-переключатели (МЭМС ПК) являются аналогом электромеханических переключателей (ЭМПК) [3], которые имеют узкую полосу пропускания, ограниченные время срабатывания и количество каналов, а также большие размеры корпуса [4]. Полупроводниковые ПК (ППК) уступают МЭМС-устройствам по таким параметрам, как линейность, радиационная стойкость и значение показателя Figure of Merrit ($FOM = R_{on} \cdot C_{off}$) [5]. МЭМС ПК обеспечивают FOM в десятки раз ниже полупроводниковых аналогов, что говорит о меньших вносимых потерях и лучших изоляционных свойствах.

Новые МЭМС-изделия сочетают в себе некоторые из лучших характеристик электромеханических переключателей (сверхмалое сопротивление в открытом состоянии, малые токи утечки и очень высокую линейность) с достоинствами полупроводниковых переключателей (малые размеры, высокая надежность и малое время переключения). При этом процесс изготовления МЭМС-переключателей похож на стандартный КМОП-процесс и обычно использует технологии интегральных схем на основе кремния.

[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.

Недостатками МЭМС ПК являются:

- достаточно большое по сравнению с ПППК время переключения, которое в отдельных современных изделиях снижено до нескольких микросекунд;
- высокое (10–90 В) управляющее напряжение, затрудняющее использование МЭМС ПК в портативных коммуникационных изделиях;
- ограниченное число переключений, которое однако в современных МЭМС ПК может достигать триллиона циклов холодного переключения. Отметим, что требуемое количество циклов переключения для конкретных приложений может варьироваться от 25 тыс. и менее циклов в активных системах самонаведения ракет до триллиона и более циклов в приемопередающих модулях АФАР и системах автоматического тестирования оборудования. Типичные электромеханические переключатели имеют, как правило, номинальный срок службы менее 10 млн циклов;
- необходимая в МЭМС-переключателях качественная герметизация предполагает сложную технологию, которая сильно увеличивает стоимость переключателя.

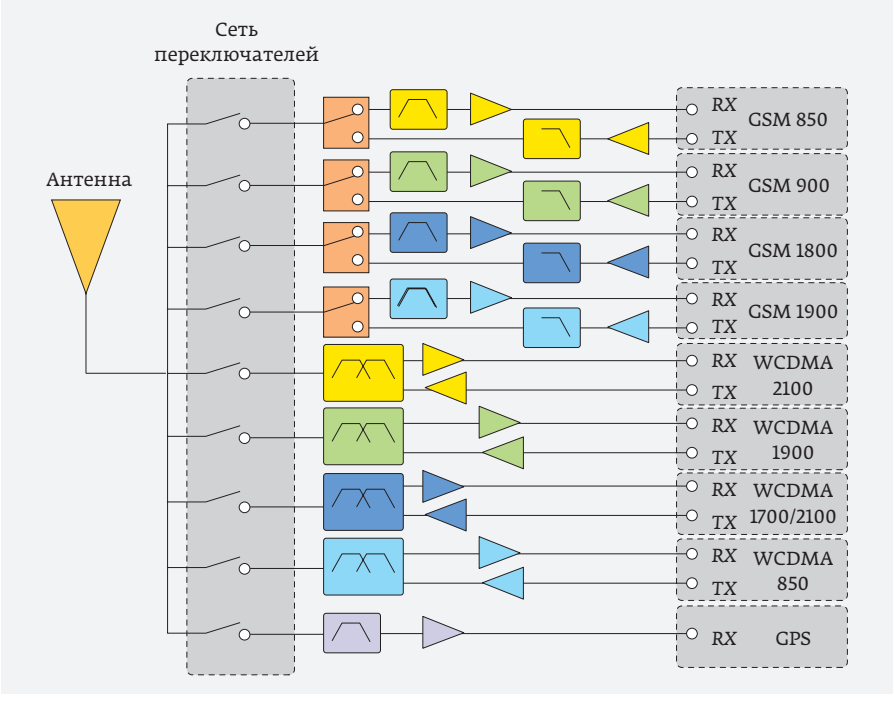


Рис. 1. Пример трансивера, поддерживающего разные диапазоны частот

Несмотря на довольно простое устройство МЭМС-переключателей, их разработка и производство – сложные процессы. Первые длительные и серьезные работы по ВЧ МЭМС-переключателям с металлическими контактами начались в начале 1990-х годов в Северо-восточном университете (Бостон) и компании Analog Devices. Примерно в 2000 году в разработку включилась фирма Radant MEMS, которая постоянно финансировалась Управлением перспективных оборонных исследовательских проектов (DARPA) и другими оборонными агентствами США. К 2013 году у Radant MEMS была целая линейка

Таблица 1. Предельные характеристики СВЧ-переключателей, выполненных по различным технологиям

Параметр	ЭМПК	ПППК				МЭМС
		На pin-диодах	На полевых транзисторах			
			HEMT		КМОП Si	
			GaAs	GaN		
Диапазон частот, ГГц	0–220	0,05–150	0–50	0–20	0–60	0–40
Непрерывная входная мощность, Вт	2000	1300	40	200	100	25
Вносимые потери, дБ	0,03	0,15	0,25	0,25	0,16	0,17
Развязка, дБ	120	100	100	90	90	70
Время переключения, мкс	1000	0,002	0,004	0,01	0,002	2–8
IIP3, дБм	Более 95	84				95

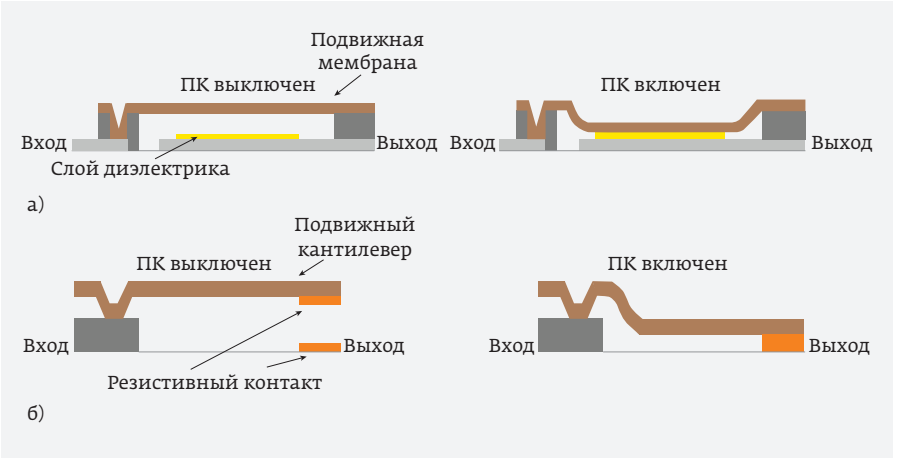


Рис. 2. Упрощенное изображение МЭМС-переключателя с емкостным (а) и резистивным (б) контактами

переключателей, демонстрирующих отличные характеристики [6], однако позже они свернули свое производство. Фирмы Teledyne Scientific, HRL, Motorola и IBM также активно работали над переключателями с металлическими контактами с середины 1990-х по 2000 год, но коммерческие изделия так и не были выпущены, поскольку не удалось создать для этих разработок герметичный корпус. За этим последовали значительные усилия компании TeraVicta Technologies, но на рынок их продукт также не вышел. В период с 2000 по 2010 год более 25 исследовательских лабораторий и компаний по всему миру пытались создать радиочастотные МЭМС-переключатели. Первой успешной компанией среди них оказалась японская OMRON, выпустившая в 2009 году корпусированный переключатель, показавший высокие параметры. Второй стала в 2012 году также японская компания Advantest, которая разработала МЭМС-переключатель с пьезоэлектрическим приводом и управляющим напряжением 12 В [5, 7].

УСТРОЙСТВО И ПРОИЗВОДСТВО МЭМС-ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЕЙ

МЭМС-переключатель предполагает наличие механически движущейся части, положение которой контролируется электрически. Существуют четыре основные способа приведения подвижной части МЭМС ПК в движение: с использованием электростатического, пьезоэлектрического, электромагнитного и термоэлектрического приводов. Каждый из них имеет свои особенности, преимущества и недостатки. Так, МЭМС ПК с электростатическим и пьезоэлектрическим приводами имеют нулевой ток управления и меньшее время переключения, однако требуют достаточно больших значений управляющего напряжения (десятки вольт) и обладают более высокой, относительно других приводов МЭМС, чувствительностью к радиационному воздействию. Термоэлектрические и электромагнитные приводы требуют меньших значений управляющих напряжений (единицы вольт), менее чувствительны к радиации, однако имеют большое время переключения и ненулевой ток управления [8].

На данный момент наиболее широкое распространение получил электростатический привод. В этом случае напряжение подается на управляющий электрод (актуатор) между подвижной и неподвижной частями переключателя. Возникающая при этом электростатическая сила приводит в движение подвижную часть конструкции, и положение ПК меняется. Управляющее напряжение таких ПК обычно равно 10–90 В. Конкретное значение зависит от ряда факторов, в том числе от типа контакта [5, 7].

По типу контактов различают емкостные (рис. 2а) и резистивные (рис. 2б) контакты. Емкостные, называемые также контактами «металл-диэлектрик-металл», представляют собой дискретно перестраиваемый конденсатор, состоящий из закрепленных с двух сторон подвижной мембраны и неподвижной обкладки. Отношение емкостей во включенном и выключенном состояниях $C_{вкл}/C_{выкл}$ контролируется положением подвижной мембраны и может достигать 100 и более единиц. Резистивные контакты, называемые также контактами «металл-металл», имеют подвижную часть, кантилевер, закрепленную с одной стороны. Они характеризуются сопротивлением в открытом состоянии $R_{вкл}$, которое обычно составляет доли ома, и емкостью в закрытом состоянии $C_{выкл}$, типовое значение которой – единицы фемтофарад. В литературе также можно встретить гибрид этих двух вариантов контактов, позволяющий улучшить свойства переключателя [7].

МЭМС-изделия изготавливаются по технологии объемной или поверхностной обработки. Объемная технология предполагает изготовление трехмерной структуры на кремниевой подложке с помощью анизотропного травления кремния. Поверхностная технология использует подложку в качестве механической основы, на которую осаждаются структурные и жертвенные слои. Структурные слои становятся телом ПК, а жертвенные – удаляются [2].

Интеграция КМОП- и МЭМС-компонентов может осуществляться четырьмя способами, каждый из которых

обладает своими достоинствами и недостатками. Способ с предварительным изготовлением МЭМС-компонентов позволяет использовать высокотемпературную обработку, затрудняет формирование межкомпонентных соединений. Совместное изготовление МЭМС и КМОП отличается высокой гибкостью, но нарушает процесс формирования КМОП-элементов. Постформирование МЭМС-компонентов позволяет создавать МЭМС-структуры на КМОП-микросхемах без нарушения процесса. Однако и постформирование, и совместное изготовление компонентов накладывают ограничение на максимальную температуру обработки МЭМС-микросхемы и толщину ее слоя, что ухудшает характеристики переключателя. Последний способ – постформирование МЭМС-компонентов на BEOL-слоях металлизации КМОП-схемы – исключает эти недостатки других способов, однако не позволяет контролировать остаточное напряжение слоев с МЭМС-компонентами [9].

Изготовление МЭМС-переключателей в перспективе при массовом производстве может быть весьма дешевым, однако имеет ряд особенностей. Прежде всего следует отметить, что их характеристики очень чувствительны к загрязнениям и влаге, так как это меняет контактные свойства между подвижными и неподвижными частями ПК. Для устранения этой проблемы требуется весьма дорогое герметичное корпусирование, на которое приходится около 30% всей стоимости изделия. При этом затраты на производство интегральной схемы и подвижных частей составляют 12 и 18% соответственно. Другая сложность – необходимость проведения ряда испытаний. Этап тестирования многоуровневый, включает в себя множество испытаний на всех этапах производства, затраты на которые достигают 40% стоимости [10, 11].

КОМПАНИИ, ВНЕСШИЕ ЗНАЧИТЕЛЬНЫЙ ВКЛАД В РАЗВИТИЕ МЭМС-ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЕЙ

На протяжении более чем 20 лет инженеры и разработчики пытались создать МЭМС-переключатели сигналов, позволяющие достичь отличных показателей качества в условиях массового производства. Состав игроков на рынке устройств за это время претерпел множество изменений. Следует отметить несколько компаний, внесших особенно весомые вклады в развитие МЭМС ПК.

Tronics Microsystems [12]. Компания Tronics Microsystems является пионером в технологии МЭМС на КНИ (кремний на изоляторе) подложках. Компания дополнила оригинальную технологию микрообработки поверхности КНИ, переданную от CEA-Leti, 20-летним опытом разработки и производства стандартных и заказных емкостных МЭМС-изделий.

В 2015 году Tronics Microsystems и Airbus Group, являющаяся мировым лидером в авиационной и космической областях, объявили о своем партнерстве в области разработки МЭМС-переключателей. Целью партнерства было перенести МЭМС-технологии компании Airbus Group на завод в Гренобле, объединив их со своими решениями по герметичной упаковке на уровне пластин (Wafer Level Packaging, WLP).

Разработанная компанией и партнерами технологическая платформа позволяет производить мощные высокочастотные переключатели с уникальной высокой линейностью.

DelfMEMS [13]. Основанная в 2006 году компания DelfMEMS, штаб-квартира которой расположена во Франции, внесла значительный вклад в разработку и производство МЭМС-переключателей, ориентированных на применение в средствах мультистандартной и многорежимной мобильной телефонии. С момента основания компания сосредоточилась на формировании своего патентного портфеля, в чем безусловно преуспела.

В феврале 2015 года компания DelfMEMS продемонстрировала на конгрессе MWC (Mobile World Congress) первый в мире SP12T МЭМС--переключатель, предназначенный для использования в оборудовании стандарта LTE-A.

Прорыв, обеспеченный компанией DelfMEMS, связан с двумя ключевыми моментами. Во-первых, золото, обычно используемое в качестве контактного материала переключателей, было заменено на металлический сплав, который обеспечивал в холодном режиме более 50 млрд переключений. Во-вторых, запатентованная конструкция переключателя FreeFlex гарантирует, что точка соприкосновения контактов в конструкции (рис. 3) немного меняется, что увеличивает срок его службы. Еще одним преимуществом коммутационной конструкции FreeFlex является возможность уменьшения зазора между мембраной и линией передачи, что снижает ползучесть и механические напряжения контактов за счет уменьшения максимального прогиба мембраны. Это приводит к увеличению контактного усилия во включенном состоянии при пониженном напряжении срабатывания и, следовательно, снижает вносимые потери. В разработанном

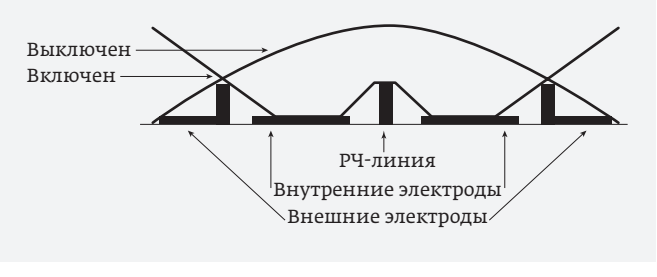


Рис. 3. Электромеханический привод мембранного типа компании DelfMEMS

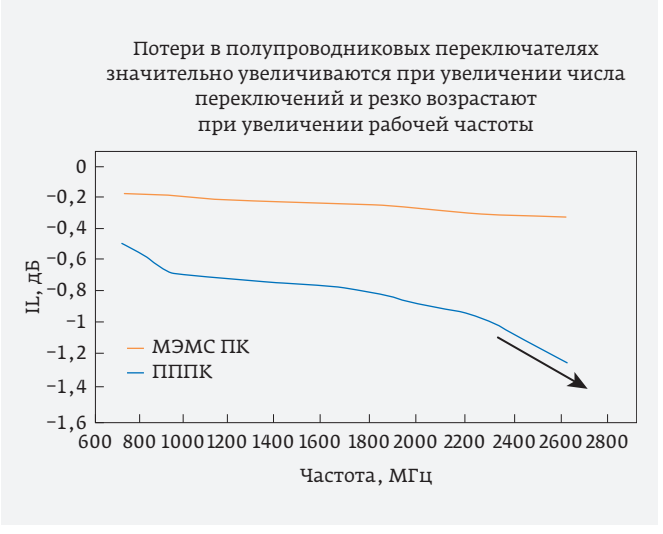


Рис. 4. Вносимые потери в МЭМС ПК SP12T компании DelfMEMS и ППКП

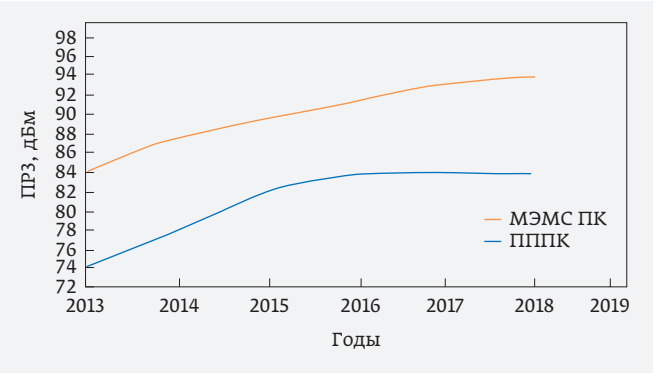


Рис. 5. Интермодуляционные продукты третьего порядка в ППКП и МЭМС ПК

МЭМС-переключателе на 12 положений (SP12T) эти потери в рабочем диапазоне с ростом частоты практически не меняются (рис. 4). Сравнение вносимых потерь *IL(f)* и интермодуляционных продуктов третьего порядка *IIP3* (рис. 5) с аналогичными характеристиками твердотельных переключателей показывает неоспоримое преимущество МЭМС-переключателей.

Предполагалось, что успехи, достигнутые DelfMEMS в технологии МЭМС-переключателей, будут востребованы в средствах мобильной связи нового поколения, например, LTE-A и прежде всего при реализации ультранизких вносимых потерь, а также достаточно высокой развязки и линейности.

МЭМС-переключатели компании DelfMEMS являются компонентами, в которых обеспечивается эффективное притяжение и отталкивание контактов. Эта технология снижает ограничения при построении многопозиционных переключателей. При *FOM* < 10 фс эти изделия обеспечивают вносимые ослабления, развязку и линейность, недостижимые для существующих полупроводниковых технологий. Первые образцы коммерческих переключателей с участием Honeywell/Tronics в Далласе планировались на конец 2015 года. Этим планам не суждено было сбыться.

Radant MEMS [6, 14, 15]. К 2009 году компания Radant MEMS разработала линейку корпусированных

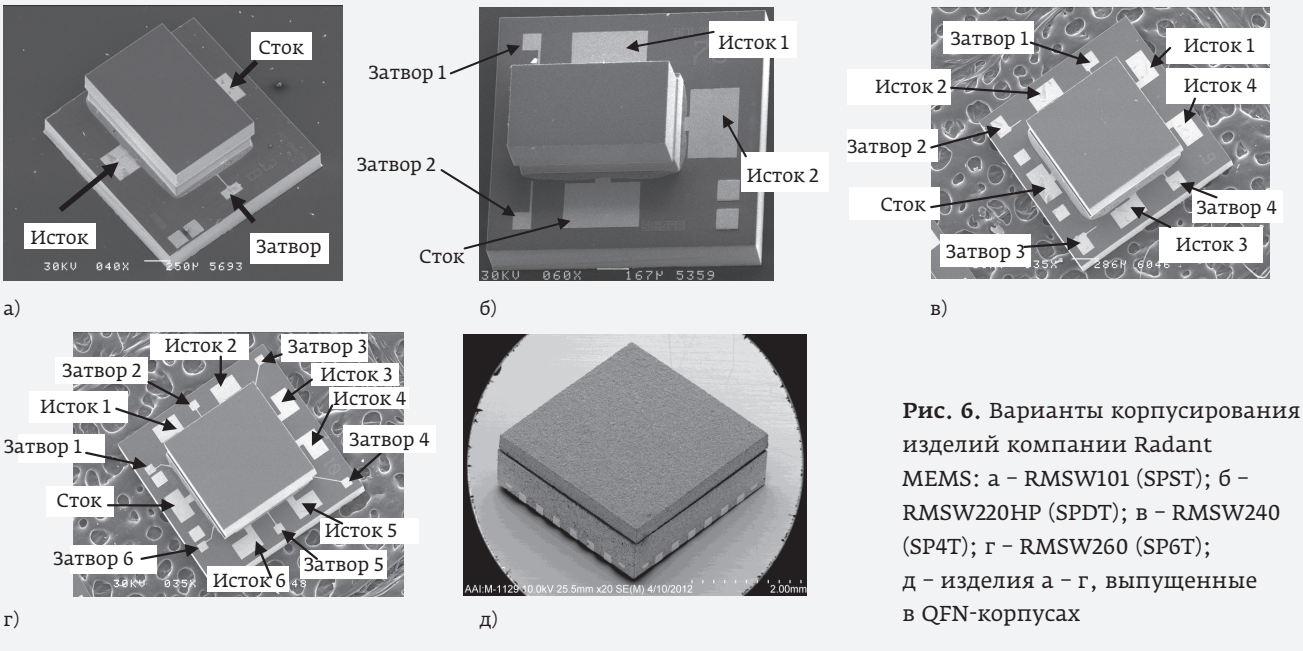


Рис. 6. Варианты корпусирования изделий компании Radant MEMS: а – RMSW101 (SPST); б – RMSW220HP (SPDT); в – RMSW240 (SP4T); г – RMSW260 (SP6T); д – изделия а – г, выпущенные в QFN-корпусах

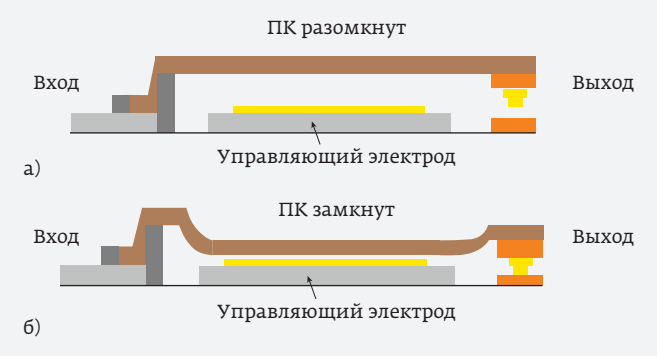


Рис. 7. Упрощенная структура консольного МЭМС-переключателя с электростатическим приводом: а – переключатель разомкнут; б – переключатель замкнут

SPST (RMSW100HP, RMSW101, RMSW200HP, RMSW201, RMSW303), SPDT (RMSW220HP, RMSW221), SP4T (RMSW240) и SP6T (RMSW260) переключателей (рис. 6а–г) с электростатическим приводом, предназначенных для работы в диапазоне частот от нуля до нескольких десятков гигагерц (табл. 2). Эти переключатели (рис. 7), использующие резистивные металлические контакты и консольную балку, работали в герметичной среде, полученной посредством склеивания нескольких пластин.

К 2012 году ряд изделий (RMSW100HP-QFN, RMSW200HP-QFN, RMSW220HP-QFN, RMSW221-QFN, RMSW240-QFN, RMSW260-QFN) были перевыпущены в QFN-корпусах (рис. 6д). Следствием такой доработки стало уменьшение верхней границы рабочего диапазона до 12 ГГц (табл. 2). Во всех изделиях компании для переключения использовалось высокое напряжение ±90 В, поступающее от внешнего источника питания. Для каждого из разработанных в Radant MEMS переключателей применялись свои упрощенные изображения (рис. 8). Время включения T_{on} и выключения T_{off} во всех разработанных переключателях было равно 10 и 2 мкс соответственно.

Для уменьшения сроков освоения разработанных в Radant MEMS переключателей были выпущены отладочные платы (рис. 9). Зависимости вносимых потерь $IL(f)$, развязки $Iso(f)$ и возвратных потерь $RL(f)$ от частоты переключаемого сигнала мало чем отличались от характеристик, приводимых ранее другими производителями (рис. 10).

Большой объем испытаний разработанных компанией Radant MEMS переключателей был проведен как самой компанией, так и независимо рядом лабораторий Министерства обороны США (Исследовательская лаборатория ВВС, Исследовательская лаборатория армии и Военно-морская исследовательская лаборатория). При тестировании было установлено, что отказы происходили

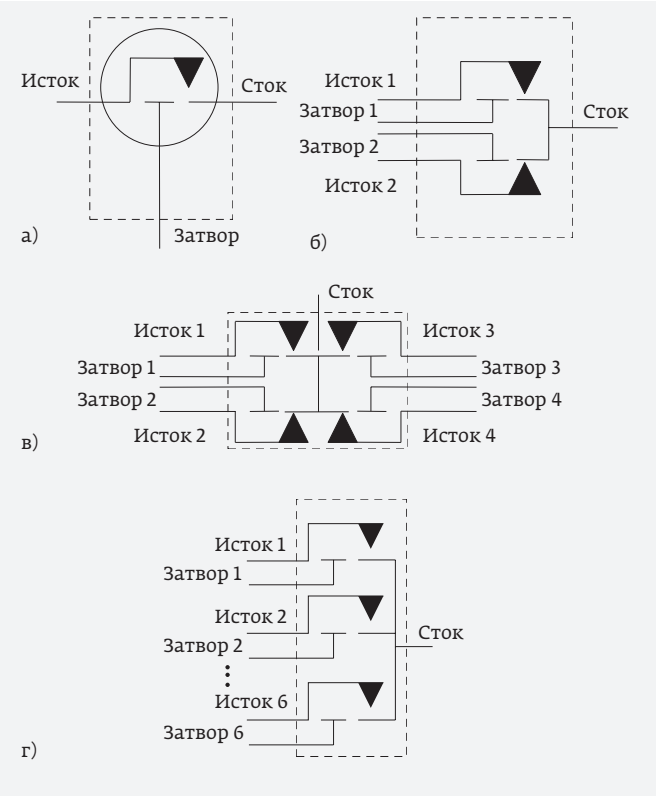
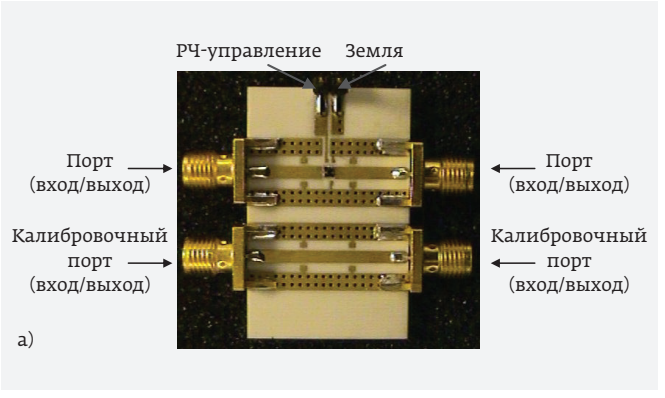
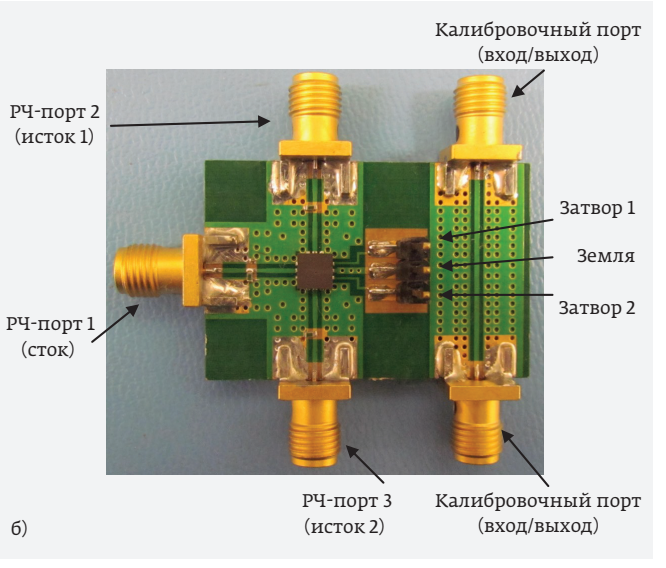


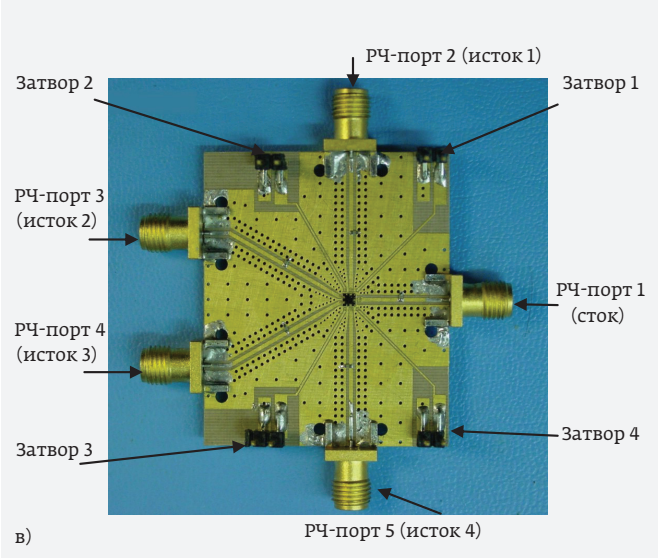
Рис. 8. Упрощенные обозначения переключателей: а – SPST; б – SPDT; в – SP4T; г – SP6T

после одного триллиона переключений. При этом самый длительный срок службы превысил 1,5 триллиона циклов переключения после чего длившиеся 30 мес. испытания были остановлены. Можно констатировать, что исследования в области физики контактов, материалов и способов корпусирования способствовали впечатляющему прогрессу, достигнутому в ходе совершенствования МЭМС-переключателей. Были также проведены совместные с Радиационной метрологической лабораторией испытания на стойкость к γ-излучению. В ходе исследования были испытаны пять образцов SPST-переключателей RMSW200HP. Практически значимых изменений в зависимостях $IL(f)$, снятых до и после воздействия радиации, не наблюдалось (рис. 11).

Разработанные в Radant MEMS радиочастотные переключатели использовались для демонстрации возможностей различных систем военного назначения, включая антенну с электронным управлением для работы в X-диапазоне, содержащую 25000 МЭМС-переключателей. Кроме того, компанией были продемонстрированы возможности создания перестраиваемых фильтров, реконфигурируемых антенн, переключаемых фазовращателей и линий задержки. Однако на данный момент компания прекратила свою деятельность.







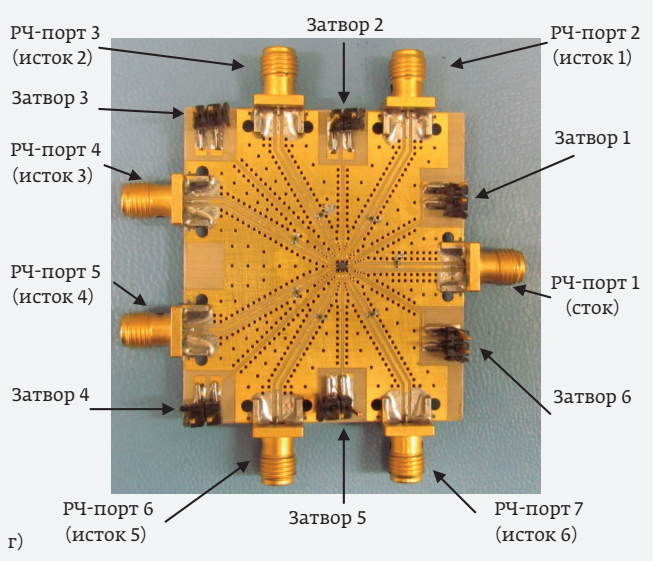


Рис. 9. Отладочные платы для МЭМС-переключателей: а – SPST RMSW100HP/RMSW200HP; б – SPDT RMSW221; в – SP4T RMSW240; г – SP6T RMSW260

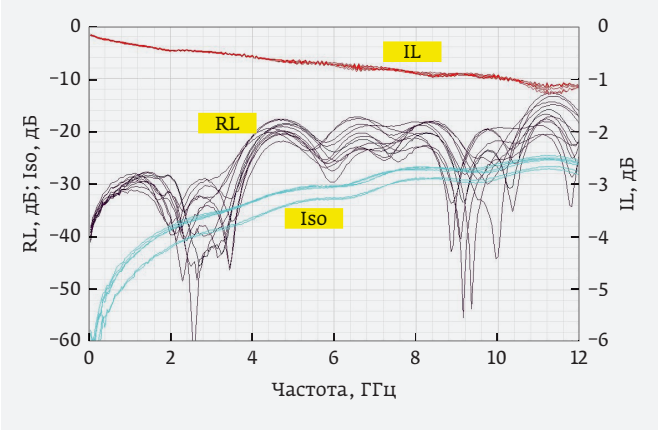


Рис. 10. Вносимые потери IL(f); развязка между каналами Iso(f) и возвратные потери RL(f) для SP6T-переключателя RMSW60 в составе отладочной платы RMSW260-EV12

Рис. 11. Зависимости вносимого ослабления от частоты до и после воздействия радиации

Таблица 2. Характеристики МЭМС-переключателей компании Radant MEMS

Модель	Тип ПК	Диапазон частот, ГГц	$IL_{макс}$, дБ	$Iso_{мин}$, дБ	Холодный режим		Горячий режим	
					$P_{вх\,хп}$*, дБм	Число циклов*	$P_{вх\,гп}$*, дБм	Число циклов*
RMSW100HP	SPST	0–12	0,17–0,28	23–11	36 40 42	10^{11} 10^{9} 10^{3}	–20 –10 20	10^{11} 10^{9} 10^{3}
RMSW101	SPST	0–12	0,23–0,32	26–12	30 33 36	10^{11} 10^{9} 10^{3}	– –10 20	– 10^{9} 10^{3}
RMSW200HP	SPST	0–40	0,40–0,50	20–12	36 40 42	10^{10} 10^{9} 10^{3}	–20 –10 20	10^{11} 10^{9} 10^{3}
RMSW201	SPST	0–20	0,30–0,60	35–18	27 30 33	10^{11} 10^{9} 10^{3}	–20 –10 20	10^{11} 10^{9} 10^{3}
RMSW220HP	SPDT	0–40	0,45–0,80	19–12	36 40 42	10^{10} 10^{9} 10^{3}	–20 –10 20	10^{11} 10^{9} 10^{3}
RMSW221	SPDT	0–20	0,40–0,80	38–25	27 30 33	10^{11} 10^{9} 10^{3}	–20 –10 20	10^{11} 10^{9} 10^{3}
RMSW240	SP4T	0–20	0,30–0,70	40–25	27 30 33	10^{11} 10^{9} 10^{3}	–20 –10 20	10^{11} 10^{9} 10^{3}
RMSW260	SP6T	0–20	0,30–0,80	36–22	27 30 33	10^{11} 10^{9} 10^{3}	–20 –10 20	10^{11} 10^{9} 10^{3}
RMSW303	SPST	0–12	0,30–0,50	70–45	27 30 33	10^{11} 10^{9} 10^{3}	–20 –10 20	10^{11} 10^{9} 10^{3}
RMSW100HP-QFN	SPST	0–12	0,19–0,36	23–11	36 40 42	$>10^{11}$ $>10^{9}$ $>10^{3}$	–20 –10 20	$>10^{11}$ $>10^{9}$ $>10^{3}$
RMSW200HP-QFN	SPST	0–12	0,28–0,50	32–31	36 40 42	$>10^{10}$ $>10^{9}$ $>10^{3}$	–20 –10 20	$>10^{11}$ $>10^{9}$ $>10^{3}$

Таблица 2. Продолжение

Модель	Тип ПК	Диапазон частот, ГГц	$IL_{макс}$, дБ	$Iso_{мин}$, дБ	Холодный режим		Горячий режим	
					$P_{вх\,хп}$*, дБм	Число циклов*	$P_{вх\,гп}$*, дБм	Число циклов*
RMSW220HP-QFN	SPDT	0–12	0,30–0,55	32–22	36 40 42	$>10^{10}$ $>10^{9}$ $>10^{3}$	–20 –10 20	$>10^{11}$ $>10^{9}$ $>10^{3}$
RMSW221-QFN	SPDT	0–12	0,30–0,60	37–26	36 40 42	$>10^{10}$ $>10^{9}$ $>10^{3}$	–20 –10 20	$>10^{11}$ $>10^{9}$ $>10^{3}$
RMSW240-QFN	SP4T	0–12	0,30–0,60	34–23	27 30 33	$>10^{11}$ $>10^{9}$ $>10^{3}$	–20 –10 20	$>10^{11}$ $>10^{9}$ $>10^{3}$
RMSW260-QFN	SP6T	0–12	0,40–0,90	34–22	27 30 33	$>10^{11}$ $>10^{9}$ $>10^{3}$	–20 –10 20	$>10^{11}$ $>10^{9}$ $>10^{3}$

* указаны значения мощности при разных значениях количества переключений. По мере увеличения числа циклов переключений выдерживаемая мощность устройств меняется.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Сысоева С.** МЭМС-технологии. Простое и доступное решение сложных системных задач // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2009. №. 7. С. 80–89.
2. **Шурыгина В.** Долгожданные МЭМС. Технология малых форм // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2002. №. 4. С. 8–13.
3. **Кочемасов В.** Электромеханические переключатели ВЧ/СВЧ-сигналов – основные типы и производители // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2016. №7. С. 114–121, № 8. С. 96–106, №9. С. 128–134.
4. https://www.analog.com/en/technical-articles/fundamentals-adi-revolutionary-mems-switch-technology.html [Электронный ресурс] Дата обращения: 08.12.2023
5. **Кочемасов В., Майстренко А.** СВЧ-переключатели на основе МЭМС // СВЧ-электроника. 2016. № 1. С. 36–42.
6. https://www.radiocomp.ru/joom/images/storage/docs/broshure/RadantMems2012.pdf [Электронный ресурс] Дата обращения: 08.12.2023
7. **Rebeiz G.M., Patel C.D., Han S.K. et al.** The search for a reliable MEMS switch // IEEE microwave magazine. 2013. V. 14. No. 1. PP. 57–67.
8. **Iannacci J.** RF-MEMS technology for high-performance passives. Chapter 1 // IOP Publishing, 2017. 39 p.
9. **Шурыгина В.** Радиочастотные МЭМС + КМОП. Отработанная технология, готовая к часу пик. Части 1, 2 // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2014. № 2, 3.
10. **Rebeiz G.M., Muldavin J.B.** RF MEMS switches and switch circuits // IEEE Microwave magazine. 2001. V. 2. No. 4. PP. 59–71.
11. **Шурыгина В.** В поисках стандартов МЭМС. Фермеры против ковбоев // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2013. № 3. С. 119–126.
12. https://www.tronics.tdk.com [Электронный ресурс] Дата обращения: 08.12.2023
13. https://www.delfmems.com/press_release/delfmems-announces-its-breakthrough-sp12t-rf-mems-ohmic-switch-has-passed-one-billion/ [Электронный ресурс] Дата обращения: 08.12.2023
14. **Maciel J. J., Lampen J. L., Taylor E. W.** Gamma-ray irradiation of ohmic MEMS switches // Nanophotonics and Macrophotonics for Space Environments VI. SPIE. 2012. V. 8519. PP. 2–10.
15. The most Reliable MEMS Switches Devices in the World. RF MEMS Switches and Product Catalog, 2013, PP. 1–59.

ИСПЫТАНИЯ

НА ВОЗДЕЙСТВИЕ СОЛЯНОГО ТУМАНА

ИСПЫТАТЕЛЬНАЯ КАМЕРА UQS-150C

Диапазон значений воспроизводимой температуры: от 25 до 55 °C

Объем собранного соляного раствора: от 1 до 2 мл / 80 см² в час

Форма распыления: непрерывная / циклическая

Соль относится к числу самых распространенных химических соединений в мире. Она присутствует в океане, атмосфере, на земной поверхности, а также в реках и озерах. Как правило, соль оказывает негативное влияние на все окружающие нас предметы, сокращая срок службы изделий.

Вот почему испытания на коррозионную стойкость предпочтительны для многих отраслей производства, а для некоторых отраслей - обязательны.

Хоть самым надежным способом определения срока службы ЭКБ с металлическими элементами и защитными составами являются натурные испытания, однако они могут затянуться на несколько лет. В связи с этим, испытаниям на воздействие соляного тумана проводят в специальных камерах, позволяющих получить данные о стойкости материалов к коррозии за малый промежуток времени.

Существует два основных вида испытаний на воздействие соляного тумана: испытание при постоянном распылении соляного тумана и при циклическом.

Циклические испытания являются предпочтительными, это связано с тем, что они повторяют естественные условия и ускоряют их, поэтому по результатам данного типа испытаний можно прогнозировать жизненный цикл изделий в реальных условиях эксплуатации

ТЕСТПРИБОР