

## Микроэлектромеханические системы для переключения радиочастотных каналов (обзор)

Е. М. Торина<sup>1,2</sup>, В. Н. Кочемасов<sup>1</sup>, А. Р. Сафин<sup>2,3</sup>✉

<sup>1</sup>ООО "Радиокомп", Москва, Россия

<sup>2</sup> Национальный исследовательский университет "МЭИ", Москва, Россия

<sup>3</sup>Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова  
Российской академии наук, Москва, Россия

✉ [arsafin@gmail.com](mailto:arsafin@gmail.com)

### Аннотация

**Введение.** С ростом требований к показателям качества и линейности радиочастотных переключателей сигналов все больший интерес вызывают переключатели на основе микроэлектромеханических систем (МЭМС-ПК). Они обладают рядом преимуществ по сравнению с другими технологиями. В статье рассмотрены особенности работы и производства МЭМС-ПК. Описаны технологии изготовления и герметизации, механизмы деградации параметров МЭМС-ПК и рассмотрены возможные конструктивные решения, позволяющие улучшить показатели качества устройства. Представлены количественные параметры производимых МЭМС-ПК.

**Цель работы.** Обзор устройства и производства МЭМС-переключателей, а также факторов, способствующих и препятствующих массовому распространению этих устройств.

**Материалы и методы.** В основе поиска и подбора литературы для обзора лежит хронологический принцип. Глубина поиска для рассмотрения параметров конечных компонентов не более 10 лет, для рассмотрения технологий и структурных решений – более 10 лет, ввиду желания проследить историю создания МЭМС-переключателей. Конечный массив источников сформирован из научных публикаций, содержащих фактографическую информацию, представленную в обзоре, или дополняющих ее, а также официальных данных от производителей устройств.

**Результаты.** Описаны основные характеристики, технологии производства и корпусирования; испытания, необходимые для описания параметров конечных устройств; рассмотрены материалы, используемые для изготовления МЭМС-ПК. Описаны механизмы деградации, известные на данный момент, и способы борьбы с ними. Рассмотрены конструкционные решения, позволяющие улучшить показатели качества МЭМС-переключателей. Рассмотрены достижимые параметры МЭМС-переключателей, предлагаемые на данный момент производителями.

**Заключение.** Несмотря на то, что изготовление структурных частей МЭМС-переключателей относительно недорого за счет схожести технологических процессов с хорошо отработанным КМОП-процессом, стоимость МЭМС-ПК пока значительно превышает стоимость изготовления транзисторных и  $p-i-n$ -диодных переключателей. Наиболее дорогостоящими являются этапы корпусирования и испытаний. Для большинства приложений использование МЭМС-ПК предпочтительнее, чем электромеханических реле, по ряду показателей. Замена твердотельных переключателей на МЭМС-ПК целесообразна тогда, когда определяющими показателями качества являются линейность и уровень FOM, а не габариты и скорость переключения. В любом случае следует ожидать дальнейшего активного развития рынка МЭМС-ПК и улучшения их характеристик.

**Ключевые слова:** МЭМС-переключатель, параметры МЭМС, деградация МЭМС

**Для цитирования:** Торина Е. М., Кочемасов В. Н., Сафин А. Р. Микроэлектромеханические системы для переключения радиочастотных каналов (обзор) // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2026. Т. 29, № 1. С. 6–29.  
doi: 10.32603/1993-8985-2026-29-1-6-29

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 09.06.2025; принята к публикации после рецензирования 14.01.2026; опубликована онлайн 27.02.2026

## Microelectromechanical Systems for Radio Frequency Channel Switching (Review)

Elena M. Torina<sup>1,2</sup>, Victor N. Kochemasov<sup>1</sup>, Ansar R. Safin<sup>2,3</sup>✉

<sup>1</sup>LLC "Radiokomp", Moscow, Russia

<sup>2</sup>National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, Russia

<sup>3</sup>Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics  
of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

✉ arsafin@gmail.com

### Abstract

**Introduction.** In view of the growing demand for the quality and linearity of RF signal switches, microelectromechanical system (MEMS)-based switches (MEMS-SW) are attracting particular interest. Such devices offer several advantages over other technologies. This article examines the operational and manufacturing specifics of MEMS-SWs, including fabrication and sealing technologies, degradation mechanisms, and design improvements expected to enhance the device performance. Quantitative parameters of commercially available MEMS-SWs are presented.

**Aim.** To review MEMS switch design, production, and factors influencing their mass adoption.

**Materials and methods.** The literature review follows a chronological approach. For evaluating end-component parameters, sources published over the past 10 years were prioritized, while technologies and structural solutions were traced over longer periods to document the evolution of MEMS switches. The final dataset comprised peer-reviewed publications with factual data and official manufacturer specifications.

**Results.** Key characteristics, production and packaging technologies, and required testing methods are described. Materials for MEMS-SW fabrication are analyzed, along with known degradation mechanisms and mitigation strategies. Design solutions for enhancing the performance and parameters of current MEMS-SW are discussed.

**Conclusion.** Although MEMS switch structural components are relatively affordable due to the similarities of fabrication processes with CMOS technology, MEMS-SWs costs remain significantly higher than those of transistor and PIN diode switches, primarily due to packaging and testing expenses. MEMS-SWs outperform electromechanical relays in most applications and are preferable for solid-state switches when linearity and FOM are critical, rather than the size or the switching speed. Continued market growth and performance improvements are anticipated.

**Keywords:** MEMS switch, MEMS parameters, MEMS degradation

**For citation:** Torina E. M., Kochemasov V. N., Safin A. R. Microelectromechanical Systems for Radio Frequency Channel Switching (Review). Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2026, vol. 29, no. 1, pp. 6–29.

doi: 10.32603/1993-8985-2026-29-1-6-29

**Conflict of interest.** The authors declare no conflicts of interest.

Submitted 09.06.2025; accepted 14.01.2026; published online 27.02.2026

**Введение.** Микроэлектромеханические системы (МЭМС) – устройства, сочетающие в себе полупроводниковые и механические технологии, что позволяет им демонстрировать уникальные параметры. Первые МЭМС-устройства изготавливались еще в середине прошлого века, и к 1974 г. было налажено производство, однако по началу большая часть рынка была занята сенсорами, в частности акселерометрами. МЭМС-переключатели (МЭМС-ПК), которым посвящена данная статья, начали разрабатываться в 1980-х гг., и с тех пор их рынок постоянно растет [1, 2].

В МЭМС-ПК используется механическое движение миллиметровых подвижных частей для обеспечения замыкания или размыкания цепи в линии передач. Развитию этих устройств способствовали поиски "идеального" переключателя, который должен обеспечивать очень малое сопротивление во включенном ( $R_{\text{on}} \rightarrow 0$ ) и очень малую емкость в выключенном ( $C_{\text{off}} \rightarrow 0$ ) состояниях в широкой полосе частот. Часто для оценки качества переключателя используют произведение  $R_{\text{on}}$  и  $C_{\text{off}}$ , называемое Figure of Merit ( $\text{FOM} = R_{\text{on}} C_{\text{off}}$ ),

стремясь к его минимизации. Переключатели должны при этом быть миниатюрными, иметь высокую надежность и линейность, а также вносить низкие потери [3, 4].

В основном МЭМС-переключатели удовлетворяют предъявленным требованиям. Классические электромеханические переключатели уступают МЭМС по массогабаритным показателям и надежности. По сравнению с твердотельными переключателями, работающими на  $p-i-n$ -диодах и полевых транзисторах, МЭМС-устройства имеют целый ряд преимуществ [5, 6]:

- очень низкий FOM =  $R_{on}C_{off}$  (менее 10 фс). Разница с твердотельными устройствами в десятки раз, что обеспечивает более высокую изоляцию или низкие вносимые потери на любой частоте по сравнению с другими полупроводниковыми технологиями;

- очень высокую линейность: коэффициент интермодуляционных продуктов третьего порядка ПРЗ выпускаемых на рынок устройств достигает 95 дБм. В научной литературе описаны лабораторные образцы, достигшие уровня ПРЗ 127 дБм [7];

- очень малое энергопотребление. МЭМС-переключатели с электростатическим или пьезоэлектрическим приводом потребляют энергию 10...100 нДж при срабатывании и ничего не потребляют в стационарном режиме;

- МЭМС-переключатели могут формироваться на кварцевых или стеклянных подложках – для обеспечения ультранизких емкостей, на кремниевых подложках – для сопряжения с микросхемами, на подложках из GaAs или GaN – для сопряжения с СВЧ-транзисторами;

- высокую радиационную стойкость.

Несмотря на явные преимущества, МЭМС-ПК присущи и недостатки, ограничивающие их применение для некоторых приложений [3, 6]:

- относительно низкая скорость переключения. Типичные значения времени переключения ( $T_{п}$ ) МЭМС-ПК – десятки микросекунд. Снизить этот показатель можно лишь за счет увеличения управляющих напряжений;

- для надежной работы электростатических МЭМС-переключателей необходимо напряжение 10...90 В, что предполагает использование высоковольтных драйверов;

- МЭМС-переключатели выдерживают до триллиона циклов холодного переключения, число которых снижается по мере увеличения входной мощности коммутируемого сигнала в режиме горячего переключения. Данные о долгосрочной (в течение нескольких лет) надежности МЭМС отсутствуют;

- необходимость герметизации, обусловленная требованием получения приемлемых характеристик. Это существенно усложняет технологию изготовления и сильно удорожает изделие.

МЭМС-ПК нашли широкое применение в устройствах специального назначения, в военной и космической технике. Кроме того, они используются в автомобильной технике, в системах спутниковой связи, измерительной технике, анализаторах спектра, защитных системах, матричных переключателях и аттенюаторах [5].

Далее рассматриваются особенности работы МЭМС-переключателей, включая производство МЭМС-ПК, технологии и материалы их изготовления, механизмы деградации параметров, конструктивные решения для совершенствования устройств. Также приводятся достижимые параметры современных МЭМС-ПК.

### Основные понятия и конструкции МЭМС ПК. Механизмы управления МЭМС.

Конструкция МЭМС-переключателя предполагает наличие неподвижной и подвижной частей – мембраны, актуатора или балки, положение которой определяет, включен переключатель или выключен.

Механизмы управления актуатором МЭМС могут быть различными – электростатическим, пьезоэлектрическим, электромагнитным и термоэлектрическим [1, 2]. Каждый из этих механизмов имеет свои особенности и варианты реализации. Рассмотрим принципы работы разных механизмов на примере МЭМС-ПК с резистивными контактами.

*Электростатический привод.* Переключатель с электростатическим приводом в выключенном состоянии (клеммы К1 и К2 отключены, рис. 1, а) предполагает, что выступы электродов выходного контакта подвижной и неподвижной частей разомкнуты. В этом положении переключатель ЗАКРЫТ. Чтобы привести в движение актуатор, необходимо подать управ-

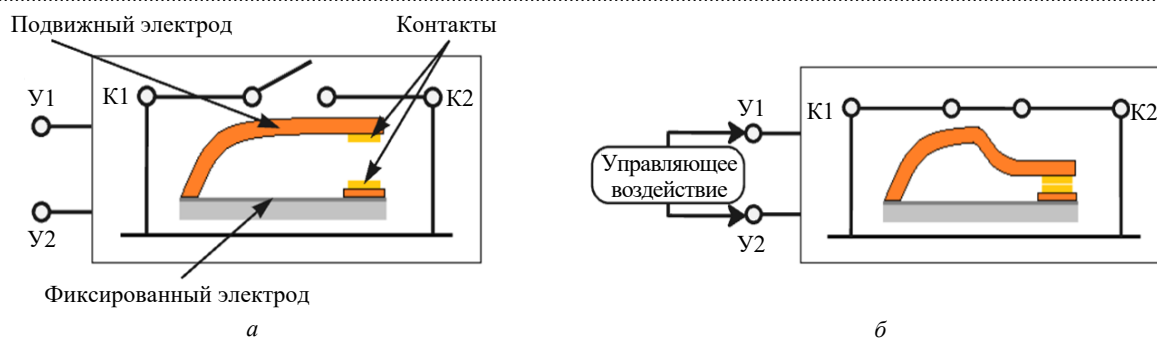


Рис. 1. Упрощенное представление МЭМС-переключателя: а – в выключенном состоянии; б – во включенном состоянии [4]

Fig. 1. Simplified representation of a MEMS switch: а – in the off state; б – in the on state [4]

ляющее напряжение (рис. 1, б), что заставит подвижный электрод приблизиться к неподвижному. При превышении напряжением определенного порога  $U_{pi}$  (от англ. pull-in – втянуть, встречается также  $U_{th}$  от threshold – порог), называемого "напряжением срабатывания", электроды и контакты K1 и K2 замкнутся и переключатель включится [4]. В этом положении переключатель ОТКРЫТ.

Напряжение срабатывания электростатических МЭМС-ПК довольно высокое – 10...90 В. Однако потребляемый ток при этом пренебрежимо мал [5]. Технологии изготовления электростатических МЭМС включают в себя стандартные операции, используемые в электронике: окисление, травление, литографию, эпитаксию, гальваническое покрытие [2].

Требуемое управляющее напряжение электростатических МЭМС-ПК с емкостным контактом ниже, чем в изделиях с резистивным контактом, поскольку для обеспечения низкого сопротивления контакта не требуется большое прижимное усилие актуатора [6].

**Электромагнитный привод.** Подвижная часть МЭМС изготовлена из ферромагнитного материала или покрыта им, чтобы быть чувствительной к изменениям магнитного поля. Кроме того, магнитное поле создается за счет пропускания тока через катушку, выводы которой являются управляющими электродами переключателя U1 и U2. Она окружает деформируемую мембрану (рис. 1, а, б). Таким образом, при подаче тока смещения часть актуатора МЭМС деформируется из-за взаимодействия между магниточувствительным материалом и внешним наведенным магнитным полем [4].

В МЭМС-переключателе в исходном положении (рис. 1, а) через выводы U1 и U2 не протекает ток управления. При этом между входным и выходным портами переключателя K1 и K2 обеспечивается высокий импеданс и переключатель закрыт. Когда ток проходит через катушку, вокруг МЭМС создается магнитное поле и подвижная часть деформируется до тех пор, пока не опустится на неподвижную (рис. 1, б). В таком случае импеданс между K1 и K2 становится очень мал и переключатель открыт [4].

Сопоставляя электростатические и электромагнитные МЭМС-ПК, отметим, что электромагнитные имеют существенно меньший ресурс работы [2].

**Пьезоэлектрический привод.** Подвешенная МЭМС-мембрана в этом случае покрывается тонкой пленкой материала, обладающего пьезоэлектрическими свойствами. Пьезоэлектрические материалы, близкие по свойствам электропроводности к изоляторам, проявляют свойство механической деформации при падении напряжения на противоположных сторонах образца материала. Поскольку пьезоэлектрическая тонкая пленка обычно покрывает подвижную часть МЭМС, ее расширение из-за пьезоэлектрического эффекта приводит к смещению актуатора вниз. В исходном положении МЭМС-ПК с пьезоэлектрическим приводом (рис. 1, а) находится в закрытом состоянии (контакт разомкнут). Когда на выводы U1 и U2 подается напряжение смещения, пьезоэлектрический материал расширяется, контакты K1 и K2 замыкаются и ПК переходит в открытое состояние (рис. 1, б) [4].

Пьезоэлектрические МЭМС требуют меньшего (3...20 В) управляющего напряжения, по сравнению с электростатическими, при этом также не

Табл. 1. Параметры МЭМС-переключателей с разными типами приводов [5, 10, 11]

Tab. 1. Parameters of MEMS switches with different types of drives [5, 10, 11]

Тип привода	$U_{пр}$ , В	$I_{упр}$ , мА	Размер, мкм	$T_{п}$ , мс	Контактная сила, мкН	Радиационная устойчивость
Электростатический	10...90	0	100 × 440	1...0.2	50...1000	Максимальная
Электромагнитный	3...5	20...150	1000 × 500	0.2...1	50...200	Минимальная
Пьезоэлектрический	3...20	0	200 × 340	0.05...0.5	50...200	Средняя
Термоэлектрический	3...5	5...100	200 × 220	0.3...10	500...4000	Средняя

потребляют ток [5]. Достоинство пьезоэлектрического привода заключается в том, что реверсом управляющего напряжения можно разомкнуть "залипшие" (подвергшиеся микросварке при переключении мощного сигнала) контакты МЭМС-переключателя, а недостаток – в том, что на актуатор надо наносить дополнительное покрытие, что усложняет технологический цикл и требует дополнительного оборудования [6].

*Термоэлектрический привод.* Для приведения в движение актуатора в этом случае используется свойство теплового расширения материалов. Электрический ток проходит через подвешенную мембрану, которая нагревается за счет своего сопротивления и, следовательно, расширяется из-за повышения температуры. В качестве альтернативы можно вызвать тепловое расширение подвесной мембраны, генерируя тепло не в самой части МЭМС, а, например, встраивая микронагреватели под устройство. Последнее решение позволяет использовать материалы с гораздо более высоким удельным сопротивлением (например, поликристаллический кремний), чем металлы, обычно используемые для структурных частей микросистемы (например, золото, медь, алюминий и т. д.). Поэтому желаемое повышение температуры обеспечивается при пропускании через нагреватель весьма слабого тока. Пока управляющее напряжение не подано и нагрева нет, клеммы К1 и К2 разомкнуты (рис. 1, а), переключатель выключен. При поступлении напряжения смещения на выводы У1 и У2 ток проходит через МЭМС, а выделяемое тепло замыкает клеммы К1 и переключатель открывается (рис. 1, б) [4].

Технология создания тепловых МЭМС предусматривает стандартные процессы окисления, осаждения из газовой фазы, литографии, плазменного и жидкостного травления. При помощи этих методов создается подвижная балка, состоящая из слоев SiO<sub>2</sub> и TaSi<sub>2</sub>, которая

изгибается при подаче напряжения за счет термического расширения TaSi<sub>2</sub> [2].

Параметры переключателей с разными типами приводов существенно различаются (табл. 1), но каждый вариант находит свое применение.

Среди рассмотренных приводов наиболее часто используется электростатический. Причин тому несколько: во-первых, на технологическом уровне электростатическое срабатывание не требует осаждения редких материалов, как, например, в случае с пьезоэлектрическими или ферромагнитными приводами, что упрощает производственный процесс и снижает затраты. Во-вторых, на уровне эксплуатации такой способ возбуждения не вызывает необратимые изменения механических свойств МЭМС, что может произойти, например, при термоэлектрическом срабатывании [4]. Термоэлектрические и электромагнитные приводы могут создавать значительные механические усилия на контактах МЭМС-переключателя, что позволяет переключать сигналы более высокой мощности, но имеют большее время срабатывания и потребляют энергию во включенном состоянии. По этим причинам названные приводы не получили такого широкого распространения, как электростатический и пьезоэлектрический [6]. Следует также отметить, что технологии изготовления электростатических МЭМС совместимы с интегральными технологиями на основе кремния и полупроводниковых соединений A<sup>II</sup>B<sup>VI</sup> и A<sup>III</sup>B<sup>V</sup> [9]. Далее будем рассматривать характеристики и технологии электростатических МЭМС, так как именно этот привод наиболее часто используется производителями МЭМС-переключателей, доступных в гражданском секторе рынка. По уровню чувствительности к радиационному воздействию МЭМС-устройств можно выстроить следующий ряд от наиболее к наименее чувствительному типу привода: электростатиче-

ский > пьезоэлектрический > термоэлектрический > электромагнитный [11].

**Типы контактов МЭМС.** Контакты МЭМС-переключателей бывают двух видов: резистивные "металл–металл" (рис. 2) и емкостные "металл–диэлектрик–металл" (рис. 3). Резистивные контакты имеют подвижную часть, обычно кантилевер, характеризующуюся сопротивлением в открытом состоянии  $R_{on}$ , которое обычно составляет доли ома, и емкостью в закрытом состоянии  $C_{off}$ , типовое значение которой – единицы фемтофард. Переключатель с емкостными контактами представляет собой дискретно перестраиваемый конденсатор, образованный подвижной мембраной и неподвижной частью. Расстояние между пластинами такого конденсатора контролируется положением мембраны. При этом отношение емкостей во включенном и выключенном состояниях  $C_{on}/C_{off}$  может достигать 100 и более [6, 8]. Эти переключатели имеют очень малые потери на высоких частотах (0.1 дБ на 40 ГГц) и высокую линейность (более 66 дБм) [6].

Оба вида контактов имеют свои преимущества и недостатки.

Основным критерием при создании переключателей резистивного типа (рис. 4, а, б) является площадь контакта. Большие области контакта обладают меньшим сопротивлением и, соответственно, меньшей температурой контактного пятна. Истинная площадь контакта определяется, прежде всего, прикладываемой силой и твердостью материала, а также его способностью формировать поверхностный слой с большим сопротивлением. Также необходимо учитывать силу адгезии в контактном пятне, поскольку кантилевер переключателя должен быть достаточно жестким, чтобы преодолеть силу адгезии после снятия управляющего напряжения [9].

В открытом состоянии изоляция переключателя ухудшается по мере увеличения частоты, так как между подвешенным кончиком кантилевера МЭМС и нижним контактом присутствует паразитное последовательное сопротивление. Потери в закрытом состоянии не превышают 0.5 дБ на частотах до 40 ГГц [4].

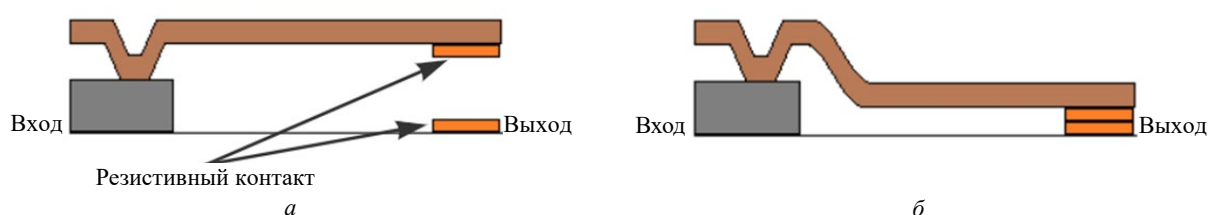


Рис. 2. Упрощенное изображение МЭМС-переключателя с резистивным контактом: а – в выключенном; б – во включенном состояниях

Fig. 2. Simplified image of a MEMS switch with a resistive contact: a – in the off state; b – in the on state



Рис. 3. Упрощенное изображение МЭМС-переключателя с емкостным контактом: а – в выключенном; б – во включенном состояниях

Fig. 3. Simplified image of a MEMS switch with a capacitive contact: a – in the off state; b – in the on state

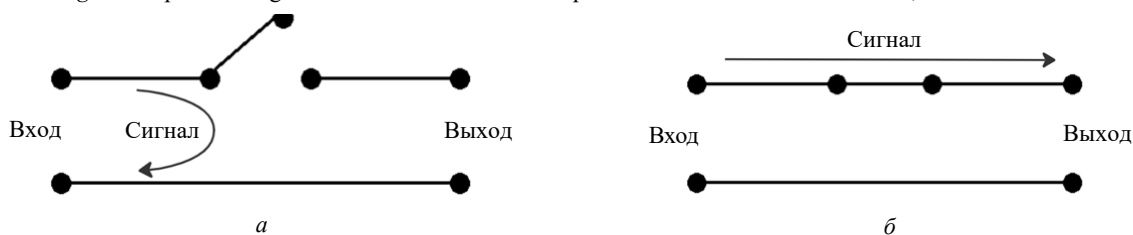


Рис. 4. Принцип работы МЭМС-переключателя с резистивным контактом: а – в выключенном; б – во включенном состояниях [4]

Fig. 4. Operating principle of a MEMS switch with a resistive contact: a – in the off state; b – in the on state [4]

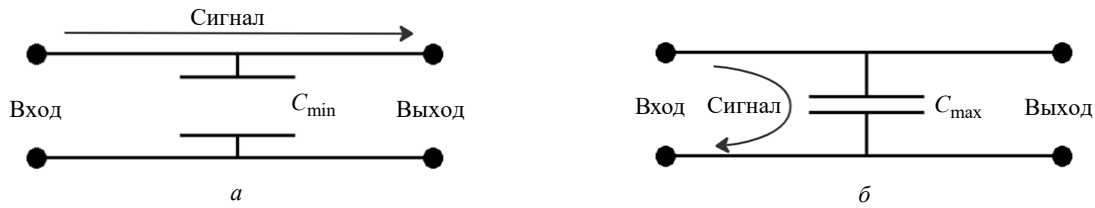


Рис. 5. Принцип работы МЭМС-переключателя с емкостным контактом: а – во включенном; б – в выключенном состояниях [4]

Fig. 5. Operating principle of a MEMS switch with a capacitive contact: a – in the on state; б – in the off state [4]

Емкостный переключатель ведет себя по-другому. МЭМС такого типа не замыкает контакт между входной и выходной клеммами, а регулирует коэффициент передачи за счет изменения импеданса между клеммой и "землей" (рис. 5). Когда ПК включен, расстояние между мембраной и неподвижной частью ключа максимально, поэтому шунтирующая емкость минимальна  $C_{\min}$  (рис. 5, а). Маленькая емкость обеспечивает большое параллельное сопротивление, и большая часть сигнала проходит между входом и выходом устройства. Когда мембрана втянута, емкость максимальна  $C_{\max}$  (рис. 5, б). В этом случае емкость создает низкий параллельный импеданс и большая часть сигнала проходит в землю, переключатель выключен.

МЭМС с резистивным типом контакта обычно обладают более широкой частотной полосой – от 0 до десятков, иногда сотен гигагерц. Однако напряжение управления таких МЭМС довольно велико, до 90 В. МЭМС с емкостными контактами плохо работают на низких частотах, и, как следствие, их частотный

диапазон уже. Однако в таких МЭМС нет необходимости создавать большую силу притяжения на контакте, поэтому необходимое управляющее напряжение в них ниже.

**Особенности работы и основные параметры электростатических МЭМС.** Работу любых электростатических МЭМС можно представить в виде конденсатора с плоскими пластинами, одна из которых неподвижна, а другая подвешена на пружине жесткостью  $k$  (рис. 6, а). Для простоты рассматривается устройство с одной степенью свободы.

При подаче напряжения между пластинами возникает электростатическая сила, заставляющая подвижную пластину приближаться к неподвижной, изменяя результирующую емкость конденсатора (рис. 6, б). Если считать, что пространство между пластинами воздушное, то эту силу можно оценить по формуле

$$F_э = \frac{1}{2} \frac{\epsilon_0 S}{(x_0 - x_1)^2} U_{см}^2,$$

где  $\epsilon_0$  – электрическая постоянная;  $S$  – пло-

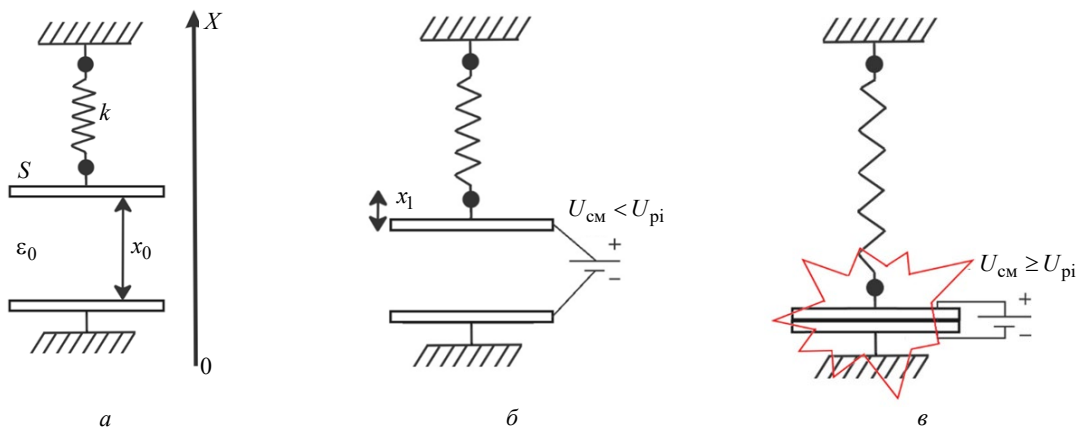


Рис. 6. Представление работы МЭМС-ПК как конденсатора с подвижной пластиной: а – в состоянии равновесия; б – при приложенном смещении, меньшем напряжения срабатывания; в – при приложенном смещении, большем напряжения срабатывания [4]

Fig. 6. Representation of the operation of the MEMS switch as a capacitor with a moving plate: а – in the equilibrium state; б – with an applied bias less than the response voltage; в – with an applied bias greater than the response voltage [4]

щадь перекрытия пластин;  $U_{см}$  – напряжение смещения;  $x_0$  – расстояние между пластинами конденсатора при нулевом смещении;  $x_1$  – вертикальное перемещение подвижной пластины.

Выражение для  $F_э$  можно преобразовать с учетом формулы расчета емкости плоского конденсатора:

$$F_э = \frac{1}{2} \frac{C(x)}{x_0 - x_1} U_{см}^2.$$

Пока напряжение смещения ниже порогового напряжения  $U_{pi}$ , расстояние между пластинами конденсатора уменьшается (рис. 6, б). В то же время перемещение подвижной пластины удлиняет удерживающую ее пружину, что приводит к возникновению противоположной относительно  $F_э$  механической силы, которая, в соответствии с законом Гука, определяется формулой

$$F_{мех} = -kx_1,$$

где  $k$  – жесткость пружины.

Сила  $F_{мех}$  препятствует дальнейшему перемещению пластины, однако она зависит от координаты перемещения пластины прямо пропорционально, в то время как  $F_э$  – обратно пропорциональна квадрату перемещения пластины. Решая систему уравнений, можно получить выражение для расчета порогового напряжения:

$$U_{pi} = \sqrt{\frac{8}{27} \frac{kx_0^3}{\epsilon_0 S}}.$$

Когда напряжение смещения становится равным пороговому, подвижная пластина резко падает на неподвижную (рис. 6, в). По сути,  $U_{pi}$  – это предельное значение управляющего напряжения, при котором механическая сила может компенсировать электростатическую.

Чтобы разомкнуть переключатель после срабатывания, необходимо уменьшать модуль управляющего напряжения смещения  $U_{см}$ . Причем пороговое напряжение  $U_{po}$  (от англ. pull-out – выдвигать), при котором пластины разомкнутся, оказывается меньше, чем напряжение срабатывания. Это напряжение называется напряжением вытягивания или открывания и может быть оценено по формуле [4]

$$U_{po} = l_{из} \sqrt{\frac{2kx_0}{\epsilon_{из} S}},$$

где  $l_{из}$  и  $\epsilon_{из}$  – толщина и абсолютная диэлектрическая проницаемость изоляционного слоя между пластинами.

Так как  $U_{po} < U_{pi}$ , характеристика срабатывания/отпускания (включения/выключения) имеет петлю (рис. 7). Причем для электростатических МЭМС эта характеристика симметрична относительно 0.

МЭМС подчиняются ньютоновской механике, в частности, уравнению движения Даламбера. Следовательно, для перемещения пластины можно записать дифференциальное уравнение [3]:

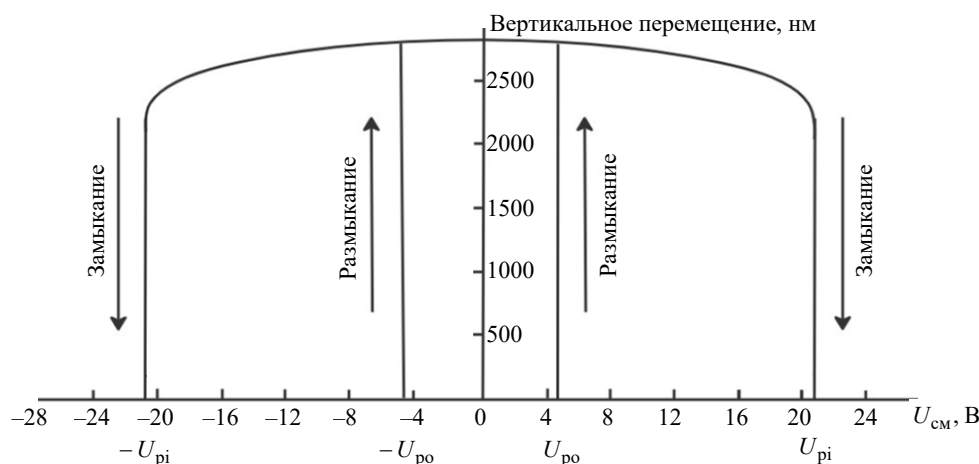


Рис. 7. Типичная для МЭМС-ключа характеристика включения/выключения [4]

Fig. 7. Typical on/off characteristic of a MEMS switch [4]

$$mx_1'' + bx_1' + kx_1 = F_3,$$

где  $m$  и  $b$  – масса и коэффициент демпфирования моста или кантилевера.

Это уравнение второго порядка. Его решение описывает свободные колебания механической системы с частотой  $\omega_0 = \sqrt{k/m}$ . Коэффициент демпфирования можно записать через добротность  $Q = k/(\omega_0 b)$ . Добротность ограничена процессом удаления воздуха из-под моста или кантилевера. Низкая добротность приводит к большому значению времени переключения. Если переключатель работает в вакууме, то добротность можно увеличить, однако это приводит к длительному времени установления как для механизмов срабатывания, так и для механизмов разблокировки [3].

Время включения можно оценить по простой формуле [3]

$$t_{th} = 3.67 \frac{U_{pi}}{U_{cm} \omega_0}. \quad (1)$$

Время выключения при условии нулевого смещения [11]:

$$t_{po} = \frac{2\pi}{4\omega_0}. \quad (2)$$

Малое время переключения, согласно этим формулам, возможно только при больших значениях резонансной частоты, что, в свою очередь, обязывает использовать системы с большой жесткостью пружины и малой массой. При этом напряжение срабатывания становится очень большим, что отрицательно влияет на надежность и не позволяет снизить время переключения ниже единиц микросекунд.

Важными параметрами МЭМС-переключателей является их  $S$ -матрица.  $S$ -параметры дают информацию о важнейших характеристиках системы:  $S_{11}$  – коэффициент отражения входного напряжения;  $S_{12}$  – коэффициент передачи обратного напряжения (с выхода на вход);  $S_{21}$  – коэффициент передачи прямого напряжения (со входа на выход);  $S_{22}$  – коэффициент отражения выходного напряжения [11].

$S$ -параметры определяются как в разомкнутом, так и в замкнутом состояниях МЭМС-ключа. Параметр  $S_{21}$  в разомкнутом состоянии определяет изоляцию ключа и может быть оценен как [3]

$$|S_{21}|^2 = 4\omega^2 C_{off}^2 Z_0^2,$$

где  $C_{off}$  – емкость разомкнутого МЭМС;  $Z_0$  – импеданс линии передачи.

При замкнутом ПК  $S_{21}$  определяет вносимые потери и оценивается как [3]

$$|S_{21}|^2 = 1 - \frac{R_{on}}{Z_0},$$

где  $R_{on}$  – сопротивление замкнутого ПК.

Следует отметить, что характер зависимости  $S$ -параметров от частоты переключаемого сигнала различен для переключателей емкостного и резистивного типов [4].

Другим важным параметром МЭМС-ПК, определяющим их качество, является FOM =  $= R_{on} C_{off}$ . Чем ниже значение этого параметра, тем выше допустимые рабочие частоты переключателя. В сравнении с твердотельными ПК МЭМС-переключатели обладают меньшим значением FOM.

#### Производство МЭМС-переключателей.

**Проблемы стандартизации.** Прежде чем перейти непосредственно к технологиям производства МЭМС, следует обратить внимание на общемировую проблему стандартизации технологических процессов и испытаний этих устройств. Несмотря на более чем двадцатилетнюю историю коммерциализации МЭМС, индустрия долгое время опиралась на индивидуальные тестовые решения. В результате даже однотипные устройства от разных производителей, а иногда и внутри одной компании создаются и проверяются по различным методикам, что приводит к высокой сложности и стоимости проектирования и производства МЭМС. Разработка собственного тестового оборудования для каждого устройства значительно увеличивает сроки производства, при этом подобные решения часто не обладают гибкостью и сложно масштабируются. Однако некоторые поставщики МЭМС выступают против стандартизации, так как хотят защитить свою интеллектуальную собственность за счет запатентованных процессов производства. Для заказчиков это выливается в невозможность прямого сравнения характеристик изделий по технической документации, так как данные получены с помощью несовместимых методик [12–14].

Эта проблема международная, и некоторые шаги по ее решению уже были приняты. Техническим комитетом по микро- и наномеханическим системам (МЭМС/НЭМС) в рамках ассоциации (SEMI) был разработан ряд стандартов по метрологии. Большой трудностью отрасли на сегодня остается переход от индивидуальных решений к стандартизированным. Для потребителя ситуация усугубляется тем, что даже при наличии стандартов производители не всегда их используют для паспортизации продукции, а терминология может различаться. Переход к стандартизированным подходам, несмотря на сложность задачи, необходим прежде всего по экономическим причинам. Как отмечают эксперты, тестирование и калибровка сложных МЭМС-устройств могут составлять от 15 до 30 % и более от их общей себестоимости. Переход на стандартизированное тестовое оборудование позволяет использовать базовые платформы (стандартные тестеры) для разных продуктов, сокращает время тестирования и значительно снижает расходы [12, 14].

Рассмотрим ряд испытаний, которыми пользуются большинство производителей.

**Испытания МЭМС.** Прежде всего для МЭМС-переключателей обязательно получают  $S$ -параметры, которые полезны для нахождения критических параметров переключателя, таких, как емкость и контактное сопротивление, а также для выявления паразитных составляющих и построения точных радиочастотных моделей, однако не раскрывают всей картины. До выпуска МЭМС-устройств на рынок проводится ряд других испытаний на различных этапах производства и эксплуатации с целью определения показателей качества МЭМС-переключателей [15]:

- Испытания во временной области. Используются для измерения напряжения срабатывания, напряжения отпускания, скорости переключения, механического резонанса и заряда диэлектрика.

- Измерение скорости переключения. Этот тест применим на всех этапах создания МЭМС-переключателя – от НИОКР до производства и проверки надежности. Расчетные значения времени включения (1) и выключения (2) предсказывают скорость переключения. Однако измере-

ние скорости переключения в зависимости от напряжения несколько сложнее для устройств, склонных к накоплению заряда в диэлектрике (МЭМС с емкостными контактами), поскольку это приводит к смещению напряжения срабатывания. Для таких устройств характеристика сдвига напряжения срабатывания из-за зарядки может быть измерена одновременно со скоростью переключения и учтена при измерении.

- Измерение резонансной частоты, дающее информацию об отношении коэффициента жесткости "пружины" к массе подвижной балки. Обычно измерения проводятся детектированием выходного сигнала при изменении частоты сигнала на входе.

- Измерение напряжений втягивания и вытравивания (включения/выключения). Для проведения таких испытаний напряжение смещения медленно изменяют и записывают критические точки, при которых ключ замыкается/размыкается.

- Измерение заряда, накопленного в диэлектрике исполнительного механизма. Эти тесты полезны для исследования свойств диэлектриков, для диагностики срока службы переключателя и в качестве инструмента контроля качества на производстве. Накопление заряда в диэлектрике исполнительного механизма приводит к асимметричному сдвигу положительного и отрицательного напряжения втягивания (рис. 8) и ускорению проявлений деградационных эффектов.

- Испытания на удерживание, оценивающие способность устройства оставаться во включенном состоянии в течение длительного периода времени без повреждений или сбоев в работе.

- Испытания переменной мощностью. Изменяя мощность коммутируемого сигнала измеряется способность переключателей с омическими контактами рассеивать тепло и способность переключателей с емкостными контактами сопротивляться срабатыванию под воздействием ВЧ-напряжения.

- Бесконтактное измерение жесткости пружины, размеров балки и зазоров привода с помощью лазерного излучения. Эти тесты требуют доступа к неупакованному устройству, поэтому обычно проводятся только на этапе разработки.

- Контактное сопротивление. Измерения кон-

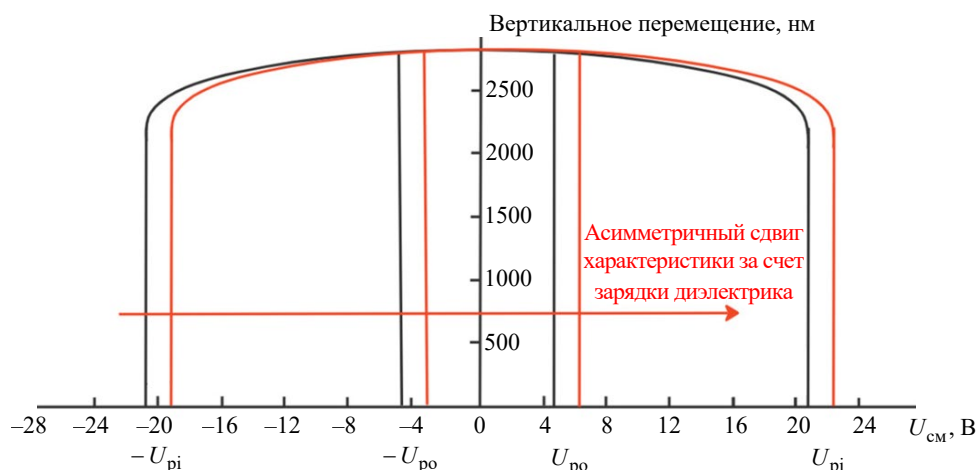


Рис. 8. Сдвиг характеристики включения/выключения МЭМС за счет накопления заряда в диэлектрике

Fig. 8. Shift of the MEMS on/off characteristic due to charge accumulation in the dielectric

такого сопротивления проводятся для МЭМС с омическими контактами. Теоретически оценить контактное сопротивление можно по формуле  $R_{\text{он}} = \rho / \sqrt{\pi S_k}$ , где  $\rho$  – удельная плотность материала контактной пластины;  $S_k$  – площадь контакта выступа, которая зависит от твердости материала контакта и силы притяжения [16]. Однако на значение  $R_{\text{он}}$  сильно влияют такие загрязнения контактов, как влага, пыль и пр. Также его значение зависит от мощности и частоты проходящего сигнала: при больших нагрузках на контактах выделяется тепло, которое может повлиять на металлический контакт. На высоких частотах загрязнение контакта влияет на сигнал как эквивалентный конденсатор большой емкости, включенный последовательно с контактным сопротивлением. Герметизация позволяет устранить многие проблемы загрязнения контактов [17], однако она удорожает и усложняет серийное производство МЭМС.

- Повторяемость сопротивления. В некоторых приложениях особое внимание уделяется дисперсии контактного сопротивления, а не его абсолютному значению.

- Измерения емкости как для замкнутых, так и для разомкнутых МЭМС. Такие испытания являются дешевой альтернативой ВЧ-тестированию во временной области.

- Чувствительность характеристик МЭМС к изменению температуры и параметров окружающей среды. Существуют стандарты тестирования (военные и коммерческие), которые

определяют рабочий диапазон параметров окружающей среды и допустимые отклонения характеристик прибора. Сюда же относится тестирование на чувствительность к накопленному электростатическому заряду МЭМС, выраженных на полупроводниковых подложках.

- Радиационная стойкость. Испытания радиацией и высокоэнергетическими импульсами имеют решающее значение для устройств, которые будут использованы в космосе, на высотных платформах или могут подвергнуться воздействию в непосредственной близости от потенциальных ядерных событий. Тип излучения для разных приложений может сильно различаться. Так, фазовращатель космического базирования будет подвергаться воздействию низкоуровневой космической радиации и случайных вспышек в течение многих лет, в то время как самонаводящаяся система противоракетной обороны, вероятно, должна будет пережить близлежащий ядерный взрыв во время полета. Требования радиационной стойкости для других приложений обычно не нужны, поскольку незащищенные полупроводниковые компоненты, также являющиеся частью этих систем, скорее всего, откажут до МЭМС.

- Удары и вибрация. Большинство радиочастотных МЭМС-переключателей могут выдерживать высокие уровни ударов и вибрации без повреждений благодаря их малой массе и высоким механическим резонансным частотам. Отклонение в 1 мкм нарушит работу большинства устройств, но, вероятно, не вызовет повреждений. Отклонения менее 100 нм не по-

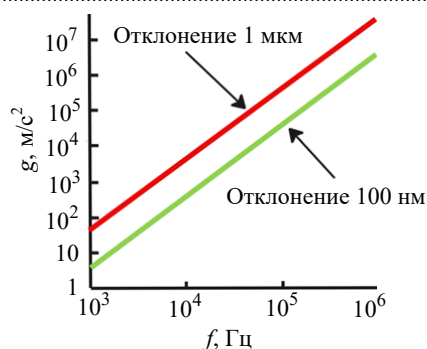


Рис. 9. Расчетная зависимость ускорения, необходимого для отклонения механических частей на 1 мкм и 100 нм, от резонансной частоты

Fig. 9. Calculated dependence of the acceleration required to deflect mechanical parts by 1  $\mu m$  and 100 nm from the resonant frequency

вливают на работу большинства устройств (рис. 9). Меньшие по размеру и более жесткие радиочастотные МЭМС-устройства могут работать при ударах силой  $10^6 g$  и более. Такие условия эксплуатации важны в нишевых областях, таких, как военная, космическая техника, а также промышленное бурение и георазведка. Переключатели с омическими контактами могут быть более уязвимыми к ударам в активированном состоянии, так как дополнительная нагрузка от удара может повредить контакты. Эти испытания проводят с устройствами как во включенном, так и в выключенном состояниях, если это необходимо для практического применения.

• Герметичность корпуса. Классический подход к оценке герметичности заключается в накачивании пространства корпуса гелием и наблюдении за выделением газа из корпуса. Однако объем корпуса МЭМС очень мал (примерно  $10^{-12} m^3$ ), чтобы вмещать в себя или высвободить измеряемое количество гелия. Поэтому для испытаний герметичности обычно применяют 2 подхода: в первом случае вместо МЭМС-устройства в корпус зашивается специальный датчик, а во втором – в качестве такого датчика используется сам коммутатор. Например, по изменению скорости переключения можно сделать вывод о давлении внутри корпуса и, как следствие, о его герметичности. Плюс второго подхода в том, что его можно применять в течение всего периода эксплуатации МЭМС.

• Срок службы. Результатом испытаний на срок службы может быть либо количество цик-

лов, либо время работы устройства. Важно, чтобы срок службы был получен в тех эксплуатационных условиях, в каких предполагается работа переключателя. Так, количество циклов без отказа при холодном переключении обычно значительно превышает количество циклов при горячем переключении. Однако для многих приложений использование переключателя предполагается при наличии сигнала на входе. Проведение таких испытаний сталкивается со сложностью: если проводить испытания переключателя в реальном времени, то это будет очень долго и дорого. Поэтому используют различные способы ускорения появления дефектов, например выводя за рамки рабочих значений температуру или давление.

• Выход годных. Как правило, этот параметр не интересует конечных пользователей, но очень важен для производства. Проверка выхода годных проводится с использованием различных тестов на разных этапах производственного процесса, а также зависит от уровня зрелости и объема выполняемого производства. Конечная цель – выполнение одного этапа тестирования, будь то на уровне пластины или на уровне конечного продукта.

**Технологии производства МЭМС.** Сегодня существуют 2 основных метода производства МЭМС – объемная и поверхностная обработка [4, 13].

При поверхностной обработке устройство выращивается на поверхности подложки. С концептуальной точки зрения процесс поверхностной микрообработки аналогичен процессу наложения слоев КМОП, но у МЭМС есть подвижные части. Подход поверхностной обработки заключается в следующем: на основу-подложку наносятся структурные слои – будущие части МЭМС и жертвенные слои – временная опора структуры. Жертвенные слои временно поддерживают микромембраны во время изготовления, затем их удаляют травлением.

Объемная технология предполагает создание структурных частей МЭМС непосредственно из материала подложки. Обычно в качестве подложки используется кремний, но есть примеры изготовления МЭМС из других материалов. Процесс представляет собой выборочное удаление конкретных областей под-

ложки для формирования нужной структуры. Это происходит за счет травления кремния по маске из пленок оксида кремния или нитрида кремния, а также золота или хрома [18].

На данный момент существует большое количество различных способов травления. Если ограничиться рассмотрением кремния в качестве подложки, то технологии травления можно разделить на 3 типа: жидкостное анизотропное (ЖАТ), плазменное и комбинированное ЖАТ + реактивно-ионное травление. Каждый из них включает в себя ряд способов, обладающих своими достоинствами и недостатками. Тенденции развития технологий травления заключаются в более высоких требованиях к прецизионности (до десятков нанометров), скорости травления (не менее 3 мкм/мин), селективности маски, а также равномерности травления по пластине. Особое внимание уделяется возможности контроля за процессом [18].

**МЭМС + КМОП.** КМОП-микросхемы, интегрированные вместе с МЭМС-переключателем, позволяют значительно снизить внешнее питающее напряжение, так как в интегральной схеме можно реализовать преобразователь тока или схему накачки заряда. Существует 4 метода интеграции МЭМС + КМОП-компонентов [19, 20]:

1. Предварительное изготовление МЭМС. В этом случае большая часть процесса изготовления МЭМС проходит до интеграции с КМОП-схемой. Этот метод используется, когда для создания МЭМС-устройства необходима высокотемпературная обработка. После создания МЭМС-структуры пластина герметизируется и поверх нее изготавливается КМОП-схема. Однако окончательно подвижные части высвобождаются позже, и есть вероятность, что при этом произойдет деградация КМОП-элементов. Кроме того, сложность представляет формирование межсоединений МЭМС-устройства и КМОП-схемы.

2. Совместное изготовление МЭМС- и КМОП-элементов. Эта технология отличается высокой гибкостью и позволяет разработчику корректировать процесс изготовления МЭМС/КМОП-схемы и минимизировать деградацию параметров компонентов обоих устройств. Поскольку профили распределения легирующей примеси в кремнии выдерживают температуру до 900 °С,

а операции металлизации проводятся на завершающих Back end of line (BEOL)-этапах изготовления МЭМС/КМОП-схемы, процессы формирования КМОП- и МЭМС-компонентов можно чередовать. Было показано [20], что данный метод подходит для создания структур на подложках КНИ (Кремний на изоляторе).

3. Постформирование МЭМС. Достоинство этого метода – возможность применения КМОП-микросхем, изготовленных контрактными производителями, с последующим созданием поверх них МЭМС-структур. Недостатков можно выделить несколько: во-первых, из-за недопустимости размещения МЭМС на поверхности КМОП-схемы при высоких температурах исключается процесс создания поликремниевых структур с низкими механическими напряжениями, проводимый при температуре 900 °С. МЭМС-структуры изготавливаются с помощью технологии, не требующей температуры выше 450 °С. Вторая проблема метода – обеспечение планарности поверхности КМОП-схемы, поверх которой формируется МЭМС-структура. В-третьих, сложности с выбором жертвенного слоя: удаление традиционно используемой пленки оксида кремния может повредить микросхему.

4. Постформирование МЭМС в BEOL-слоях металлизации КМОП-схемы. Для интеграции МЭМС-структур и КМОП-схемы можно использовать слои металлизации схемы, формируемые на заключительном этапе ее создания. МЭМС-структура изготавливается с помощью процессов сухого травления, не влияющих на параметры компонентов готовой КМОП-схемы. Преимущество этого метода интеграции перед тремя рассмотренными методами заключается в отсутствии необходимости осаждения дополнительных слоев металла и диэлектриков и проведения литографии для формирования нужной структуры. Объединение МЭМС с КМОП-схемой можно выполнять на кристалле, а не обязательно на пластине. Недостаток метода – зависимость интегрируемой МЭМС-микроструктуры от металлизации КМОП-схемы, которая и определяет ее тип.

**Материалы МЭМС.** Для создания МЭМС-устройств могут использоваться различные материалы. Их можно разделить на две группы:

материалы структурных слоев, используемые для формирования несущих конструкций и проводящих частей, а также материалы жертвенных слоев [21].

Так как работу МЭМС-переключателя можно представить в виде движущейся пластины на пружине (см. рис. 6), то к подвижным элементам МЭМС можно предъявить следующие требования: высокие пределы упругости и усталости, высокая релаксационная стойкость, наличие минимальной вязкости и стойкости. Для МЭМС-устройств используются как неорганические материалы, так и некоторые полимеры (полиимиды, поливинилиденфторид, органическое стекло) [21].

Интерес представляет использование пленок карбида кремния в качестве материала кантилевера. Это позволяет реализовать конструкции с повышенной виброустойчивостью, повысить резонансную частоту и снизить время переключения. Высокий коэффициент теплопроводности позволяет коммутировать более сильные токи, высокая механическая прочность снижает деградацию контактных областей по сравнению с использованием металлов или кремния. Высокая тепловая стойкость и низкий коэффициент теплового расширения позволяют увеличить диапазон рабочих температур [22].

Выбор структурного материала тесно связан с выбором материала для жертвенного слоя и технологией изготовления МЭМС, так как структурный слой не должен быть поврежден при травлении. В качестве жертвенных слоев используется поликремний, полиимиды, различные металлы: медь, алюминий, никель и т. д. [21].

Выбор материала контактов очень важен для резистивных МЭМС. Обычно это сплавы, содержащие золото, никель, алюминий, медь, платину, титан, серебро, палладий и пр. [21]. Необходимо обратить внимание на область контакта: чем она больше, тем меньше сопротивление во включенном состоянии и меньше его температура. Реальная площадь определяется приложенной силой и твердостью материала контакта [23]. В зависимости от значения мощности проходящего сигнала меняется нагрузка на контакты и требования к ним. Обычно в переключателях стремятся понизить управляющее напряжение. При создании переключателей с низким управляющим напряже-

нием, а значит, и малой силой упругости подвижного электрода наиболее подходящим материалом для омического контакта является золото – благодаря низкой твердости, очень низкому контактному сопротивлению, высокой температуре плавления (среди мягких металлов), высокой степени сопротивления окислению, устойчивости к абсорбции и возможности использования различных методов напыления. Однако из-за пластичности золото обладает большой силой сцепления между контактами. Кроме того, такие МЭМС будут менее долговечными относительно твердых металлов, в результате чего количество циклов переключения уменьшается в 10 раз. Поэтому в качестве контактного материала большинство производителей используют сплавы на основе золота.

Для некоторых приложений уместно использование других металлов [9, 21]. Родий имеет меньшую адгезию, однако вдвое большее удельное сопротивление и твердость, чем у золота. В результате поведение обоих металлов в условиях пластической деформации очень схоже. При больших силах притяжения адгезия не имеет значения, поэтому для материалов контактов лучше выбирать твердые металлы. Недостатком в этом случае является увеличение сопротивления коммутатора. Одно из возможных решений – применение двух или трех параллельных контактов, как это делала компания "Radant MEMS", использовавшая в качестве материала контакта тугоплавкий сплав собственной разработки [23].

Выбор материала диэлектрического слоя для емкостных МЭМС связан, с одной стороны, со значением емкости конденсатора во включенном состоянии, а с другой – с вопросом накопления заряда в диэлектрике при воздействии сильных полей. Обычно это свойство связано с плотностью ловушек в объеме материала. Так, например,  $\text{SiO}_2$  имеет более низкую плотность ловушек, чем часто используемый для емкостных МЭМС  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , полученный по той же технологии. Однако емкость в выключенном состоянии для МЭМС-ПК со слоем  $\text{SiO}_2$  увеличится, что ухудшит переключательные свойства на высоких частотах. Поэтому выбор диэлектрического материала зависит от предполагаемых эксплуатационных условий конечного устройства [23].

**Герметизация МЭМС.** Характеристики МЭМС-переключателей очень чувствительны к загрязнениям и влаге, так как их наличие меняет контактные свойства между подвижными и неподвижными частями переключателя. Поэтому МЭМС-переключатели корпусируются, причем для исключения попадания влаги корпусирование должно быть герметичным. Выбор технологии корпусирования – важный этап разработки МЭМС-устройства. Корпусирование – дорогостоящий этап создания МЭМС, на него приходится около 30 % всей стоимости устройства, тогда как на производство интегральной схемы и подвижных частей – 12 и 18 % соответственно [3, 16].

Изоляция МЭМС от содержащейся в атмосфере влаги происходит за счет вакуумной герметизации. В зависимости от предполагаемых эксплуатационных условий уровень вакуума, требуемый для работы переключателя, – средний или высокий, а уровень внутреннего давления должен быть достаточно низким ( $10 \dots 10^{-2}$  Па) [24].

Герметизация прежде всего предполагает заключение устройства в корпус. Наиболее часто встречаются 2 типа корпусов – металлические, которые просты в сборке, прочны, экранируют электромагнитные поля, и керамические, обладающие высокой механической прочностью, устойчивостью к химическим реагентам. В качестве материалов крепления используются материалы, не пропускающие влагу – стекла, кремний, керамика и металлы. Однако при выборе материала следует также обратить внимание на коэффициент термического и линейного расширения. Например, если МЭМС-ПК изготовлен на одной подложке с ИС, то тепло, выделяющееся при работе ИС, может изменить свойства материала и, как следствие, ухудшить герметизацию МЭМС [16, 25].

Существует 3 категории методов соединения материалов при герметизации [25]:

1. Прямое соединение кремний-кремний. Осуществляется за счет возникновения ковалентной связи между двумя поверхностями при высококой температуре. Такой метод создает надежную герметизацию, но его применение ограничено. Из-за необходимости работы с высокими температурами этот способ исключается при герметизации МЭМС с электронной

схемой. Внутрикорпусное давление оказывается повышенным. Реализация метода требует очень высокого качества обработки поверхностей соединяемых деталей.

2. Метод анодного срачивания, основанный на соединении полупроводника *n*-типа (обычно Si) и щелочно-содержащего стекла с ионной проводимостью. Этот метод требует использования специального оборудования, способного совмещать пластины с точностью до нескольких микрометров. При получении высоковакуумного микрообъема с использованием анодного срачивания необходимо учитывать десорбцию газов с поверхностей деталей корпуса и микромеханического элемента. Этот метод чуть менее чувствителен к дефектам и неровностям соединяемых поверхностей, но наличие канавок глубиной 50 нм может стать причиной натекания газов внутрь объема. Кроме того, напыление металлических проводников толщиной более 50 мкм может нарушить герметичность соединения.

3. Соединение через промежуточный слой, в качестве которого используется стеклянная фритта (смесь силикатов или боросиликатов) или припой, термокомпрессионная сварка, эвтектическая пайка. При выборе материалов промежуточных слоев необходимо учитывать следующие параметры: прочность на разрыв; сопротивление сдвигу; усталостную прочность; вязкость разрушения (сопротивление развитию трещин); коэффициент термического расширения; теплопроводность; влагопоглощение материала; возможности дегазации материалов; стоимость.

В процессе работы герметичных изделий с поверхностей материалов могут выделяться газы, поэтому параметры МЭМС ухудшаются. Для поддержания нужной степени вакуума используют газопоглотители – геттеры, которые различаются по избирательности к поглощаемым газам и по способу их применения (распыляемые и нераспыляемые). В качестве базовых материалов геттеров часто берут цирконий и титан. При применении нераспыляемых геттеров возникает проблема образования микрочастиц, которые могут стать причиной замыкания или нарушить свойства МЭМС, поэтому вместе с базовыми материалами используются дополнительные на основе клейких полимеров [16, 25].

Разработаны методы корпусирования и герметизации на пластине [3]. Технологии вакуумной герметизации МЭМС заимствованы из технологий ИС, но имеют свои особенности [16]. В общем виде их можно разделить на две группы [25]:

1. Индивидуальное корпусирование. В этом случае пластина с МЭМС-элементами разделяется на кристаллы, которые затем отдельно корпусируются и герметизируются. Различают индивидуальное корпусирование керамическими и металлокерамическими корпусами.

2. Интегральные технологии герметизации. В общем случае эту группу также можно разделить на две – объемная микрообработка и поверхностная микрообработка.

К технологиям объемной микрообработки относятся технологии пластина-на-пластине (WTW) и чип-на-пластине. К технологиям поверхностной микрообработки принадлежат все технологии, основанные на построении структур за счет осаждения тонких пленок и жертвенных слоев.

**Механизмы деградации МЭМС.** Особенность МЭМС-переключателей, препятствующая их распространению, – ограниченный ресурс. На данный момент МЭМС выдерживают триллионы циклов переключений, но из-за наличия механически движущихся частей ограничение принципиально остается [6]. Надежность МЭМС особенно важна при их длительном использовании, поэтому механизмы деградации МЭМС, приводящие к ухудшению их характеристик, являются предметом активных исследо-

ваний [23]. При исследовании минимизации деградационных процессов прежде всего рассматриваются возможности использования различных материалов для создания структур. Также используются различные конструкционные решения, рассмотренные далее.

Частично механизмы деградации описывались ранее, сейчас рассмотрим этот вопрос подробнее. Прежде всего следует отметить, что доминирующий механизм зависит от типа контакта.

Основные типы деградации для МЭМС с емкостными контактами связаны с явлением зарядки диэлектрика [24]: во-первых, при замыкании контактов заряд переносится с металлической балки в слой диэлектрика и остается в его поверхностных слоях после размыкания, что приводит к смещению напряжения втягивания (см. рис. 8). Во-вторых, инжекция носителей в диэлектрический слой может привести к залипанию: мембрана остается в нижнем положении даже после снятия управляющего напряжения и не перемещается при попытках управления. Проблема зарядки диэлектрика усугубляется тем, что время рекомбинации накопленного заряда очень велико – до нескольких дней.

Для того чтобы заряд в диэлектрике накапливался медленнее, для управления МЭМС используют биполярное напряжение (рис. 10, а). Это возможно, так как полярность управляющего смещения значения не имеет (см. рис. 7). Полярность меняется при каждом срабатывании, кроме того, после срабатывания переключателя

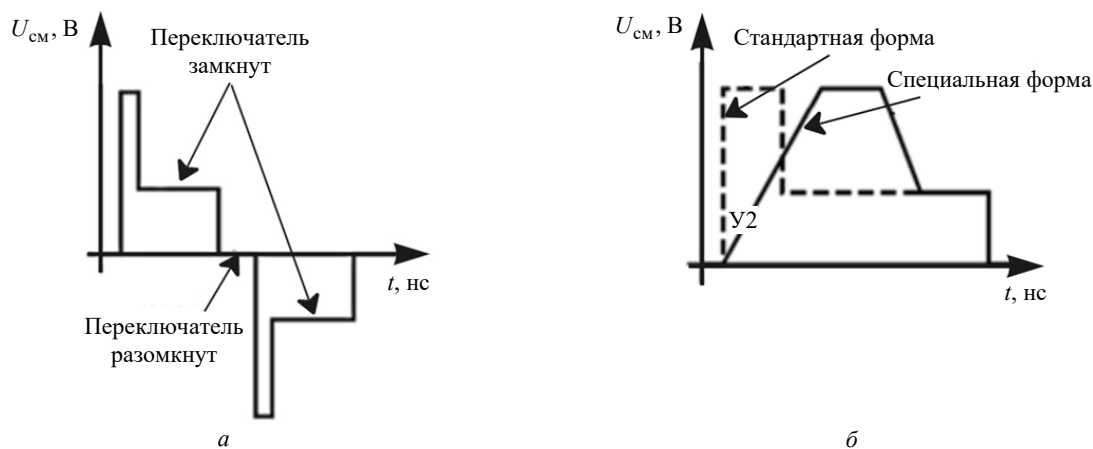


Рис. 10. Формы управляющего напряжения для минимизации процессов деградации: а – для МЭМС с емкостными контактами; б – для МЭМС с резистивными контактами [23]

Fig. 10. Control voltage shapes for minimizing degradation processes: а – for MEMS with capacitive contacts; б – for MEMS with resistive contacts [23]

чатателя управляющее напряжение снижают с 30...90 В до 8...12 В. Это нужно, так как сильное поле при длительном воздействии увеличивает вероятность пробоя диэлектрика. Однако для предотвращения накопления заряда в диэлектрике биполярного управления недостаточно, так как механизмы инжекции и рассасывания заряда в случае положительной и отрицательной полярности не идентичны. Было предложено использовать более сложный управляющий сигнал, который предполагает постоянную быструю смену полярности напряжения, пока переключатель остается в замкнутом положении, но такое решение приводит к генерации НЧ-шумов в линии передачи [23].

Деградация резистивных МЭМС проявляется двумя негативными явлениями [23]: залипанием контактов ввиду эффекта микросварки при коммутации больших токов и деградацией контактного сопротивления ввиду коррозии и повреждения контактов из-за большой энергии удара при срабатывании ключа. Повышают надежность резистивных МЭМС за счет специальной формы управляющего смещения, снижающей энергию удара подвижной части переключателя о неподвижную (рис. 10, б).

Еще один механизм деградации МЭМС – миграция хрома. Этому явлению уделялось довольно мало внимания в литературе, тем не менее оно может быть причиной отказа ПК. Хром часто используется в качестве адгезивного материала между диэлектрическим слоем подложки и контактами МЭМС. При воздействии сильного поля может наблюдаться миграция металла в диэлектрик, образующая проводящие наноструктуры на его поверхности. Мелкие структуры появляются после  $10^2...10^5$  рабочих циклов. Скорость миграции непостоянна, варьируется от образца к образцу и имеет тенденцию увеличиваться по мере эксплуатации. Этот эффект вызывает заедание и короткое замыкание переключателя, а как следствие, его выход из строя. Жизненный цикл устройства снижается до  $10^3...10^6$  рабочих циклов. На данный момент его причины и особенности не до конца изучены, однако показано, что интенсивность миграции зависит от используемых материалов контактов и напряженности приложенного электростатического поля [26].

**Способы улучшения параметров электростатических МЭМС.** Для улучшения параметров переключателей и дополнительной минимизации деградационных эффектов используют различные конструктивные решения МЭМС. Рассмотрим некоторые из них.

Для борьбы с эффектом зарядки диэлектрика в емкостных МЭМС часто используется гребенчатый привод [27–30]. Эта структура (рис. 11) позволяет преодолеть проблему залипания переключателя благодаря наличию зубцов на подвижной и неподвижной частях МЭМС, расположенных строго параллельно друг другу. Благодаря этому исключается перемещение электродов перпендикулярно зубцам. Такая структура позволяет более плавно управлять емкостью устройства, которая пропорциональна количеству зубцов. Однако значение управляющего напряжения увеличивается [28].

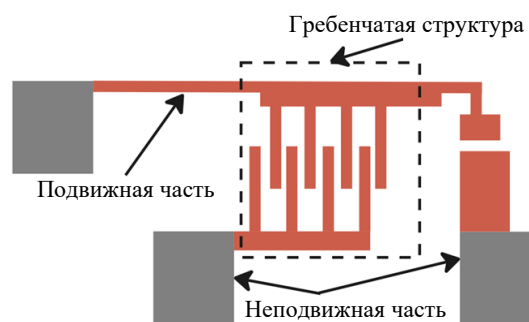


Рис. 11. Схематичное изображение гребенчатого привода МЭМС

Fig. 11. Schematic representation of a MEMS comb drive

Перфорация мембраны МЭМС позволяет повысить ее гибкость, т. е. подвижная часть имеет в этом случае больший прогиб. Также перфорация ускоряет удаление жертвенного слоя и способствует снятию остаточных напряжений. Использование змееобразной структуры для подключения перфорированной мембраны (рис. 12) позволяет отклонять ее при более низком напряжении смещения, так как змееобразная часть играет роль дополнительного пружинного элемента. Показано, что МЭМС-переключатель с перфорированной мембраной, змееобразным подключением и контактами из метаматериала демонстрирует снижение вносимых потерь и улучшение развязки, а также повышение устойчивости к залипанию [31].

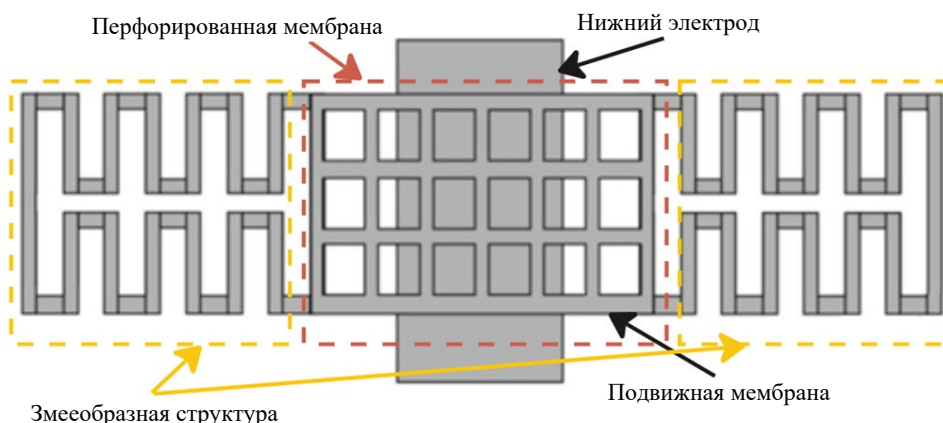


Рис. 12. Схематичное изображения МЭМС (вид сверху) с перфорированной мембраной и змееобразной структурой подключения мембраны [31]

Fig. 12. Schematic diagram of MEMS (top view) with perforated membrane and serpentine membrane connection structure [31]

Для переключателей емкостного типа важным параметром является отношение емкостей во включенном и выключенном состояниях. Чем больше это отношение, тем эффективнее работает переключатель. Многие конструктивные решения, встречающиеся в литературе, направлены на увеличение этого отношения. В классическом переключателе  $\frac{C_{on}}{C_{off}} = \epsilon_{из} \frac{g}{d}$ , где  $\epsilon_{из}$  – диэлектрическая проницаемость слоя изолятора;  $g$  – высота воздушного зазора;  $d$  – толщина диэлектрика.

Отсюда видно, что отношением емкостей можно управлять, выбирая различные материалы диэлектрика, уменьшая его толщину или увеличивая воздушный зазор между подвижными и

неподвижными частями ПК. Также повышению отношения емкостей способствует совершенствование технологий: минимизация шероховатостей слоя диэлектрика позволяет мембране плотнее прилегать к нему. Однако более эффективным решением оказывается использование электрода с "плавающим" потенциалом [7].

В этом случае на диэлектрик наносится тонкий металлический слой. В выключенном состоянии он не имеет гальванической связи с внешними цепями, и его потенциал является плавающим, т. е. определяется электростатической индукцией (рис. 13, а). Эквивалентную схему такого МЭМС-переключателя можно представить как 2 последовательно включенных

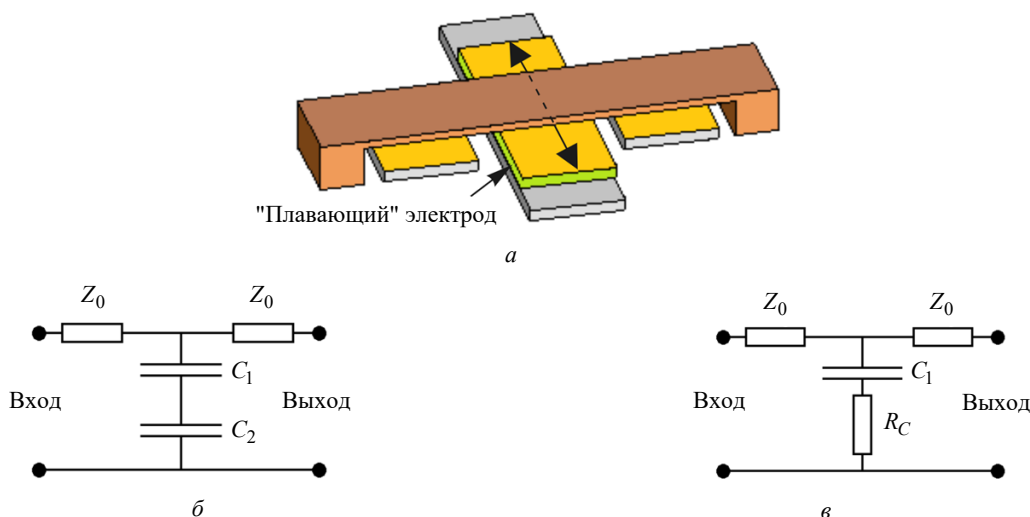


Рис. 13. МЭМС с "плавающим" электродом [7]: а – схематичное изображение структуры; б – эквивалентная схема разомкнутого переключателя; в – эквивалентная схема замкнутого переключателя

Fig. 13. MEMS with a "floating" electrode [7]: а – schematic representation of the structure; б – equivalent circuit of an open switch; в – equivalent circuit of a closed switch

конденсатора вместо одного (рис. 13, б). Первый конденсатор образуется электродом и мембраной с воздухом между обкладками, а второй – линией передачи и электродом с диэлектриком между обкладками. При замыкании происходит контакт "металл–металл" и один конденсатор заменяется сопротивлением (рис. 13, в), что позволяет получить отношение  $C_{\text{off}}/C_{\text{on}}$  больше 4000. Такой переключатель не является емкостным в чистом виде. Строго говоря, получается гибридный емкостный и резистивный МЭМС-ПК [7].

Среди конструктивных решений еще можно отметить разработки, использующие удлиненный кантилевер с двумя или тремя опорными планками, позволяющие снизить управляющее напряжение, а также решение с увеличенным количеством контактных точек подвижной и неподвижной частей МЭМС-ПК, позволяющее повысить его надежность [32].

**Достижимые параметры МЭМС-ПК.** Несмотря на множество преимуществ, МЭМС-переключатели до сих пор не получили широкого распространения в гражданском секторе рынка. Это связано как с проблемами надежности МЭМС, так и со сложностями запуска крупносерийного массового производства при отсутствии которого стоимость устройства заметно возрастает [27, 34]. Рассмотрим основных производителей, представляющих линейки МЭМС-переключателей.

На протяжении более чем 20 лет инженеры и разработчики пытались создать МЭМС-переключатели сигналов, позволявшие достичь отличных показателей качества, будучи при этом пригодными для массового производства. Состав игроков на рынке устройств за это время претерпел множество изменений [33]. Сейчас на рынке лидируют две компании, сумевшие запустить массовое производство.

*Analog Devices* [33–35] одной из первых начала разработки и исследования в области МЭМС еще в 1990 г. В 1998 г. появились первые прототипы МЭМС-переключателей, а в 2011 г. инвестиции в эту отрасль были значительно увеличены, что позволило наладить серийный выпуск надежных и миниатюрных МЭМС-ПК. В 2016 г. была представлена революционная технология ADI, позволившая добиться уникальных результатов в достижимых параметрах МЭМС-ПК.

Переключатели, созданные по этой технологии, изготавливаются с помощью поверхностной микрообработки и корпусируются вместе с интегральной микросхемой драйвера, управляющего работой переключателя. Драйвер запитывается от низковольтного источника питания, а необходимое для управления высоковольтное напряжение формируется либо непосредственно в драйвере, либо поступает извне. Потребляемая мощность устройств не превосходит 10...20 мВт.

Технология переключателей *Analog Devices* подверглась комплексному набору квалификационных испытаний на механическую прочность и износостойкость. Достижимая надежность переключателей – 10 лет непрерывной работы при температуре 85 °С. Это лучший показатель в своем классе.

Достижимые значения FOM менее 8 фс, сопротивление во включенном состоянии может быть менее 2 Ом. Уровень интермодуляционных искажений третьего порядка IP3 до 75 дБм во всей рабочей полосе частот, верхний предел которой достигает почти 35 ГГц.

На данный момент в каталоге компании представлены переключатели SPDT и SP4T стоимостью до \$50 и размерами 5 × 4 мм.

*Menlo Micro* [33, 36–38] предлагает серийно выпускаемые переключатели на основе МЭМС для радиочастотных и мощных приложений. В *Menlo Micro* создан уникальный технологический процесс, основанный на использовании для контактов переключателя специальных металлических сплавов, подобных кремниевым структурам с проводимостью как у металлов. Нестандартные сплавы сохраняют очень высокую механическую прочность в течение длительного срока службы, но одновременно обладают высокой электропроводностью и низкими потерями. Используемые *Menlo Micro* технологии близки к стандартным КМОП-технологиям, вследствие чего МЭМС-ПК могут производиться в больших объемах. Процесс изготовления включает в себя технологию корпусирования, использующую вместо проволочных перемычек многочисленные металлизированные отверстия на поверхности стеклянных подложек. Эта технология, названная разработчиками технологией "идеального" ключа (*Ideal Switch*), существенно снижает размеры изготавливаемых

Табл. 2. Параметры некоторых устройств, выпускаемых компаниями Analog Devices и Menlo Micro [35, 37]

Tab. 2. Parameters of some devices manufactured by Analog Devices and Menlo Micro [35, 37]

Модель	Тип	$D_f$ , ГГц	FOM, фс	IP3, дБм	Iso, дБ	IL, дБ	$P_{доп}$ , Вт	$T_{п}$ , мкс	Площадь, мм <sup>2</sup>
Analog Devices									
ADGM1001	SPDT	0...34	< 8	65	21	1.4	2	200	20
ADGM1144	SP4T	0...18	< 8	73	18.5	0.5	2	200	20
Menlo Micro									
MM5600	DPDT	0...20	18	77	24	1.3	2	< 10	64
MM5130	SP4T	0...24	18	95	45	0.1...1	25	< 10	6.25
MM1200	SPSTx6	–	1.6...32	–	–	–	–	< 16	–

Примечание:  $D_f$  – диапазон рабочих частот; Iso – развязка; IL – вносимые потери;  $P_{доп}$  – допустимая мощность;

$T_{п}$  – время переключения

изделий и потенциально расширяет диапазон рабочих частот до 60 ГГц. Следует также отметить, что компания изготавливает переключатели на кремнии или стекле, что обеспечивает им сверхвысокие характеристики с точки зрения изоляции и радиочастотных параметров.

Технология идеального ключа позволила компании существенно повысить переключаемую мощность своих устройств. На данный момент предлагаемые в линейке устройства могут выдерживать пиковую мощность до 200 Вт.

Кроме этого МЭМС-переключатели Menlo Micro имеют FOM около 20 фс, частотный диапазон до 26 ГГц, количество циклов переключения более 3 трлн. Устройства Menlo Micro обладают очень высокой линейностью. MM5130 с рекордным значением IP3 = 95 дБм обеспечивает улучшение линейности до 10 000 раз по сравнению с твердотельными и электромеханическими переключателями. Выпускаются переключатели SPST, SP4T, DPDT, DP3T. Для удобства разработчиков компания выпускает для своих устройств отладочные платы.

Конечная стоимость устройства не указывается, однако вице-президент отдела разработки Menlo Micro в интервью отметил, что при увеличении объема производства стоимость устройства будет в районе единиц долларов.

Итак, среди современных производителей лидирующие позиции занимают две компании, усовершенствовавшие разные параметры устройств до максимально достижимых значений (табл. 2).

**Закключение.** В статье рассмотрены МЭМС-переключатели сигналов. Описаны основные характеристики, технологии производства и корпусирования; испытания, необходимые для описания параметров конечных устройств; рассмотрены материалы, используемые для изготовления МЭМС-ПК. Несмотря на то, что изготовление структурных частей МЭМС-переключателей относительно недорого за счет схожести технологических процессов с хорошо отработанным КМОП-процессом, стоимость МЭМС-ПК пока значительно превышает стоимость изготовления транзисторных и  $p-i-n$ -диодных переключателей. Наиболее дорогостоящими являются этапы корпусирования и испытаний. Описаны механизмы деградации, известные на данный момент, и способы борьбы с ними. Рассмотрены конструкционные решения, позволяющие улучшить показатели качества МЭМС-переключателей. Рассмотрены достижимые параметры МЭМС-переключателей, предлагаемые на данный момент производителями. Для большинства приложений использование МЭМС-ПК предпочтительнее, чем электромеханических реле, по ряду показателей. Замена твердотельных переключателей на МЭМС-ПК целесообразна тогда, когда определяющими показателями качества являются линейность и уровень FOM, а не габариты и скорость переключения. В любом случае следует ожидать дальнейшего активного развития рынка МЭМС-ПК и улучшения их характеристик.

### Список литературы

1. A Review of Actuation and Sensing Mechanisms in MEMS-Based Sensor Devices / A. S. Algamili, M. H. M. Khir, J. O. Dennis et al. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7838232/> (дата обращения: 03.02.2026).

2. Гридчин А. Микроэлектромеханические реле: технология ближайшего будущего // Электронные компоненты. 2003. № 7. С. 38–40.

3. Rebeiz G. M., Muldavin J. B. RF MEMS switches and switch circuits // IEEE Microwave maga-

zine. 2001. Vol. 2, iss. 4. P. 59–71.

doi: 10.1109/6668.969936

4. Iannacci J. RF-MEMS technology for high-performance passives. Chapter 1. Bristol: IOP Publishing, 2022. 39 p.

5. The search for a reliable MEMS switch / G. M. Rebeiz, Ch. D. Patel, S. K. Han, C.-H. Ko, K. M. J. Ho // IEEE microwave magazine. 2013. Vol. 14, iss. 1. P. 57–67.

doi: 10.1109/MMM.2012.2226540

6. Кочемасов В., Майстренко А. СВЧ-переключатели на основе МЭМС // СВЧ-электроника. 2016. № 1. С. 36–42.

7. Расчет рабочих характеристик МЭМС-переключателя с увеличенным отношением емкостей / И. В. Уваров, Н. В. Марухин, П. С. Шлепаков, Ф. Лукичев // Микроэлектроника. 2020. Т. 49, № 4. С. 271–280. doi: 10.31857/S0544126920040110

8. Щаврук Н. В. Сравнение микроэлектромеханических переключателей для коммутации СВЧ-сигнала // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. 2013. Т. 13, № 1. С. 191–197.

9. Сокин А. Типы радиочастотных и СВЧ-переключателей // Электронные компоненты. 2015. № 8. С. 93–94.

10. Деградиционные процессы устройств микросистемной техники / М. С. Харламов, П. И. Дыдык, А. А. Жуков, В. П. Безмен // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2018. Т. 5, № 3. С. 87–96. doi: 10.30894/issn2409-0239.2018.5.3.87.96

11. Analytical approach in the development of RF MEMS switches / I. E. Lysenko, A. V. Tkachenko, E. V. Sherova, A. V. Nikitin // Electronics. 2018. Vol. 7, № 12. Art. № 415. doi: 10.3390/electronics7120415

12. Шурыгина В. В поисках стандартов МЭМС. Фермеры против ковбоев // Электроника: наука, технология, бизнес. 2013. № 3. С. 119–126.

13. Васильев А., Борисов Е. Производство МЭМС. Перспективы и решения // Электроника: наука, технология, бизнес. 2012. № 3. С. 60–65.

14. MEMS test equipment standardization: A path to efficiency and cost reduction. URL: <https://www.spea.com/en/news/the-future-of-mems-testing-lies-in-standardization/> (дата обращения: 16.11.2025)

15. Ebel J. L., Nyman D. J., Newman H. S. RF MEMS testing-beyond the S-parameters // IEEE Microwave Magazine. 2007. Vol. 8, iss. 6. P. 76–88. doi: 10.1109/MMM.2007.907737

16. МЭМС-переключатели электростатического типа с низким напряжением срабатывания / И. В. Уваров, В. В. Наумов, О. М. Королева, Е. Ваганова // Тр. Физико-технологического института. 2017. Т. 26. С. 55–74.

17. Тимошенко С. П., Бойко А. Н., Калугин В. В. Особенности герметизации микроэлектромеханических приборов // Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России. 2005. № 1. С. 24–28.

18. Анализ современных технологий объемного микропрофилирования кремния для производства чувствительных элементов датчиков и МЭМС / Л. В. Соколов, А. А. Жуков, Н. М. Парфенов, А. Е. Ануров // Нано-и микросистемная техника. 2014. № 10. С. 27–35.

19. Aharon O., Gal L., Nemirovsky Y. Hybrid RF-MEMS switches realized in SOI wafers by bulk micromachining // J. of microelectromechanical systems. 2010. Vol. 19, iss. 5. P. 1162–1174. doi: 10.1109/JMEMS.2010.2067438

20. Шурыгина В. Радиочастотные МЭМС+КМОП. Отработанная технология, готовая к часу пик. Ч. 1, 2 // Электроника: наука, технология, бизнес. 2014. № 2, 3. С. 141–148, 149–174.

21. Конухов Н. В. Сравнительная характеристика материалов для ВЧ-МЭМС переключателей // Россия молодая: передовые технологии – в промышленность. 2021. № 1. С. 18–22. doi: 10.25206/2310-4597-2021-1-18-22

22. Корляков А. В., Лагош А. В., Лучинин В. В. Микроэлектромеханический ключ для СВЧ-применения на основе пленок карбида кремния // Электронная техника. Сер. 1: СВЧ-техника. 2013. № 3. С. 80–85.

23. Лагош А. В., Корляков А. В. Механизмы деградации ВЧ МЭМС-ключей // Нано- и микросистемная техника. 2016. Т. 18, № 5. С. 316–331.

24. Видрицкий А. Э., Ланин В. Л. Вакуумноплотная герметизация микроболометров // Актуальные проблемы физики, электроники и энергетики. 2023. С. 91–96.

25. Технологии вакуумной герметизации МЭМС / С. П. Тимошенко, А. Н. Бойко, Б. М. Симонов, А. В. Заводян // Изв. вузов. Электроника. 2010. № 1 (81). С. 11–23.

26. Uvarov I. V. Migration of adhesive material in electrostatically actuated MEMS switch // Microelectronics Reliability. 2021. Vol. 125. Art. № 114372.

27. Lazarou P., Aspragathos N. A. Planar micromanipulation on microconveyor platforms: recent developments // Mechatronics and Manufacturing Engineering: Research and Development. Cambridge: Woodhead Publishing, 2012. P. 47–97.

28. Delijani F., Fard A. Improve the Reliability and Increased Lifetime of Comb Drive Structure in RF MEMS Switch // Fundamental Research in Electrical Engineering: The Selected Papers of The 1<sup>st</sup> Intern. Conf. on Fundamental Research in Electrical Engineering. Singapore: Springer, 2019. P. 473–482.

29. Bulk micromachined relay with lateral contact / Z. Li, D. Zang, T. Li, W. Wang, G. Wu // J. of Micromechanics and Microengineering. 2000. Vol. 10, № 3. Art. № 329. doi: 10.1088/0960-1317/10/3/305

30. Cao T., Hu T., Zhao Y. Research status and development trend of MEMS switches: A review // Micromachines. 2020. Vol. 11, iss. 7. Art. № 694. doi: 10.3390/mi11070694

31. Рентюк В. Новая концепция емкостного МЭМС-переключателя с контактами из метаматериала // СВЧ-Электроника. 2020. № 4. С. 20–27.

32. Kurmendra, Kumar R. A review on RF micro-electro-mechanical-systems (MEMS) switch for radio frequency applications // *Microsystem Technologies*. 2021. Vol. 27, № 7. P. 2525–2542.

doi: 10.1007/s00542-020-05025-y

33. Кочемасов В., Торина Е., Сафин А. МЭМС-переключатели ВЧ/СВЧ-сигналов. Ч. 1–3 // *Электроника: наука, технология, бизнес*. 2024. Вып. 4–6. С. 76–84; 86–96; 88–97.

34. Analog Devices Fundamentals of ADI Revolutionary MEMS Switch Technology. URL: <https://www.analog.com/en/signals/thought->

[leadership/fundamentals-adi-revolutionary-mems-switch-technology.html](https://www.analog.com/en/signals/thought-leadership/fundamentals-adi-revolutionary-mems-switch-technology.html) (дата обращения: 03.02.2026).

35. Analog Devices Parametric Search. URL: <https://www.analog.com/en/parametricsearch/11317/#/> (дата обращения: 06.07.2023).

36. EEWorld Online MEMS Power Relay for High-Power AC/DC Applications. URL: <https://www.eeworldonline.com/mems-power-relay-for-high-power-ac-dc-applications/> (дата обращения: 10.05.2025).

37. Menlo Micro RF Products. URL: <https://menlomicro.com/products/rf> (дата обращения: 10.05.2025).

38. Leitner J. RF MEMS Switch Performance in Extreme Environments // *Microwave J.* 2021. Vol. 64, № 12. P. 54–60.

### Информация об авторах

**Торина Елена Михайловна** – кандидат технических наук (2016), доцент кафедры формирования и обработки радиосигналов Национального исследовательского университета "МЭИ", старший научный сотрудник ООО "Радиокомп". Автор более 40 научных работ. Сфера научных интересов: радиофизика и электроника; устройства генерирования и формирования радиосигналов.

Адрес: Национальный исследовательский университет "МЭИ", Красноказарменная ул., д. 14, Москва, 111250, Россия

E-mail: dro.em@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0002-4716-2969>

**Кочемасов Виктор Неофидович** – кандидат технических наук (1976), генеральный директор ООО "Радиокомп". Автор более 150 научных публикаций. Сфера научных интересов: радиотехника; устройства формирования и обработки радиосигналов; фильтры СВЧ; синтезаторы частот и сигналов.

Адрес: ООО "Радиокомп", Волгоградский пр., д. 42, Москва, 109316, Россия

E-mail: kochemasovdv@gmail.com

**Сафин Ансар Ризавич** – доктор физ.-мат. наук (2024), доцент, профессор РАН, профессор кафедры формирования и обработки радиосигналов Национального исследовательского университета "МЭИ", заместитель директора по научной работе Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова Российской академии наук. Автор более 100 научных публикаций. Сфера научных интересов: радиофизика и электроника; физика магнитных явлений; спинтроника.

Адрес: Национальный исследовательский университет "МЭИ", Красноказарменная ул., д. 14, Москва, 111250, Россия

E-mail: arsafin@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-6507-6573>

### References

1. Algamili A. S., Khir M. H. M., Dennis J. O. et al. A Review of Actuation and Sensing Mechanisms in MEMS-Based Sensor Devices. Available at: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7838232/> (accessed: 03.02.2026).

2. Gridchin A. Microelectromechanical Relays: Technology of the Near Future. *Electronic Components*. 2003, no. 7, pp. 38–40. (In Russ.)

3. Rebeiz G. M., Muldavin J. B. RF MEMS Switches and Switch Circuits. *IEEE Microwave Magazine*. 2001, vol. 2, iss. 4, pp. 59–71.

doi: 10.1109/6668.969936

4. Iannacci J. RF-MEMS Technology for High-Performance Passives. Chapter 1. Bristol, IOP Publishing, 2022, 39 p.

5. Rebeiz G. M., Patel Ch. D., Han S. K., Ko C.-H., Ho K. M. J. The Search for a Reliable MEMS Switch. *IEEE*

*Microwave Magazine*. 2013, vol. 14, iss. 1, pp. 57–67.

doi: 10.1109/MMM.2012.2226540

6. Kochemasov V., Maistrenko A. Microwave Switches Based on MEMS. *Microwave Electronics*. 2016, no. 1, pp. 36–42. (In Russ.)

7. Uvarov I. V., Marukhin N. V., Shlepakov P. S., Lukichev F. Calculation of Operational Characteristics of MEMS Switch with Increased Capacitance Ratio. *Microelectronics*. 2020, vol. 49, no. 4, pp. 271–280. (In Russ.)

8. Shchavruk N. V. Comparison of Microelectromechanical Switches for Microwave Signal Switching. *Fundamental Problems of Radioelectronic Instrument Engineering*. 2013, vol. 13, no. 1, pp. 191–197. (In Russ.)

9. Sokin A. Types of Radio- and Extra-high Frequency Switches. *Electronic Components*. 2015, vol. 8, pp. 93–94. (In Russ.)

10. Kharlamov M. S., Didyk P. I., Zhukov A. A.,

Bezmen V. P. Degradation Processes in Microsystem Devices. Rocket-Space Device Engineering and Information Systems. 2018, vol. 5, no. 3, pp. 87–96. (In Russ.)

doi: 10.30894/issn2409-0239.2018.5.3.87.96

11. Lysenko I. E., Tkachenko A. V., Sherova E. V., Nikitin A. V. Analytical Approach in the Development of RF MEMS Switches. Electronics. 2018, vol. 7, no. 12, art. no. 415.

doi: 10.3390/electronics7120415

12. Shurygina V. In Search of Mems Standards. Farmers and Cowboys. Electronics: Science, Technology, Business. 2013, vol. 3, pp. 119–126. (In Russ.)

13. Vasiliev A., Borisov E. MEMS Production. Future Directions and Solutions. Electronics: Science, Technology, Business. 2012, vol. 3, pp. 60–65. (In Russ.)

14. MEMS test equipment standardization: A path to efficiency and cost reduction. Available at: <https://www.spea.com/en/news/the-future-of-mems-testing-lies-in-standardization/> (accessed: 16.11.2025)

15. Ebel J. L., Hyman D. J., Newman H. S. RF MEMS Testing-Beyond the S-Parameters. IEEE Microwave Magazine. 2007, vol. 8, iss. 6, pp. 76–88.

doi: 10.1109/MMM.2007.907737

16. Uvarov I. V., Naumov V. V., Koroleva O. M., Vaganova E. Electrostatically Actuated MEMS Switches with Low Actuation Voltage. Proc. of the Physical-Technological Institute. 2017, vol. 26, pp. 55–74. (In Russ.)

17. Timoshenkov S. P., Boyko A. N., Kalugin V. V. Features of Hermetic Sealing of Micromechanical Devices. Defense Complex – Scientific and Technical Progress of Russia. 2005, no. 1, pp. 24–28. (In Russ.)

18. Sokolov L. V., Zhukov A. A., Parfenov N. M., Anurov A. E. Analysis of Modern Technologies Surround Microproteinuria Silicon for the Production of Sensitive Elements of Sensor and MEMS. Nano- and Microsystems Technology. 2014, vol. 10, pp. 27–35. (In Russ.)

19. Aharon O., Gal L., Nemirovsky Y. Hybrid RF-MEMS Switches Realized in SOI Wafers by Bulk Micromachining. J. of Microelectromechanical Systems. 2010, vol. 19, iss. 5, pp. 1162–1174.

doi: 10.1109/JMEMS.2010.2067438

20. Shurygina V. Radiofrequency MEMS + CMOS. Matured Technology Ready for the Peak Hour. Electronics: Science, Technology, Business. 2014, no. 2–3, pp. 141–148, 149–174. (In Russ.)

21. Konukhov N. V. Comparative Characteristics for RF MEMS Switches. Young Russia: Advanced Technologies in Industry. 2021, vol. 1, pp. 18–22. (In Russ.)

22. Korlyakov A. V., Lagosh A. V., Luchinin V. V. Microelectromechanical Switch for Microwave Applications Based on Silicon Carbide Films. Electronic Engineering. Ser. 1: Microwave Engineering. 2013, no. 3, pp. 80–85. (In Russ.)

23. Lagosh A. V., Korlyakov, A. V. Degradation Mechanisms of RF MEMS Switches. Nano- and Microsystem Technology. 2016, vol. 18, no. 5, pp. 316–331. (In Russ.)

24. Vidritsky A. E., Lanin V. L. Vacuum-Tight Sealing of Microbolometers. 2023, pp. 91–96. (In Russ.)

25. Timoshenkov S. P., Boyko A. N., Simonov B. M., Zavodyan A. V. Technologies of Vacuum Hermetic Sealing of MEMS: Review. News of Higher Educational Institutions. Electronics. 2010, no. 1 (81), pp. 11–23. (In Russ.)

26. Uvarov I. V. Migration of Adhesive Material in Electrostatically Actuated MEMS Switch. Microelectronics Reliability. 2021, vol. 125, art. no. 114372.

27. Lazarou P., Aspragathos N. A. Planar Micromanipulation on Microconveyor Platforms: Recent Developments. Mechatronics and Manufacturing Engineering: Research and Development. Cambridge, Woodhead Publishing, 2012, pp. 47–97.

28. Delijani F., Fard A. Improve the Reliability and Increased Lifetime of Comb Drive Structure in RF MEMS Switch. Fundamental Research in Electrical Engineering: The Selected Papers of The 1<sup>st</sup> Intern. Conf. on Fundamental Research in Electrical Engineering. Singapore, Springer, 2019, pp. 473–482.

29. Li Z., Zang D., Li T., Wang W., Wu G. Bulk Micromachined Relay with Lateral Contact. J. of Micromechanics and Microengineering. 2000, vol. 10, no. 3, art. no. 329.

doi: 10.1088/0960-1317/10/3/305

30. Cao T., Hu T., Zhao Y. Research Status and Development Trend of MEMS Switches: A Review. Micromachines. 2020, vol. 11, iss. 7, art. no. 694.

doi: 10.3390/mi11070694

31. Rentyuk V. New Concept of Capacitive MEMS Switch with Metamaterial Contacts. Microwave Electronics. 2020, no. 4, pp. 20–27. (In Russ.)

32. Kurmendra, Kumar R. A Review on RF Microelectro-Mechanical-Systems (MEMS) Switch for Radio Frequency Applications. Microsystem Technologies. 2021, vol. 27, no. 7, pp. 2525–2542.

doi: 10.1007/s00542-020-05025-y

33. Kochemasov V., Torina E., Safin A. MEMS Switches for RF/Microwave Signals. Electronics: Science, Technology, Business. 2024, iss. 4–6, pp. 76–84; 86–96; 88–97. (In Russ.)

34. Analog Devices Fundamentals of ADI Revolutionary MEMS Switch Technology. Available at: <https://www.analog.com/en/signals/thought-leadership/fundamentals-adi-revolutionary-mems-switch-technology.html> (accessed: 03.02.2026).

35. Analog Devices Parametric Search. Available at: <https://www.analog.com/en/parametricsearch/11317#/> (accessed: 06.06.2023).

36. EEWorld Online MEMS Power Relay for High-Power AC/DC Applications. Available at: <https://www.eeworldonline.com/mems-power-relay-for-high-power-ac-dc-applications/> (accessed: 10.05.2025).

37. Menlo Micro RF Products. Available at: <https://menlomicro.com/products/rf> (accessed: 10.05.2025).

38. Leitner J. RF MEMS Switch Performance in Extreme Environments. Microwave J. 2021, vol. 64, no. 12, pp. 54–60.

### Information about the authors

**Elena M. Torina**, Cand. Sci. (Eng.) (2016), Associate Professor of the Department of Radio Signal Generation and Processing of National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Senior Researcher of LLC "Radiokomp". The author of more than 40 scientific publications. Area of expertise: radiophysics and electronics; radio signals oscillators. Address: National Research University "Moscow Power Engineering Institute", 14, Krasnokazarmennaya St., Moscow 111250, Russia

E-mail: dro.em@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0002-4716-2969>

**Victor N. Kochemasov**, Cand. Sci. (Eng.) (1976), General Director of LLC "Radiokomp". The author of more than 150 scientific publications. Area of expertise: radio engineering; devices for the generation and processing of radio signals; microwave filters; synthesizers of frequencies and signals.

Address: LLC "Radiokomp", 42, Volgogradsky Ave., Moscow 109316, Russia

E-mail: kochemasovdv@gmail.com

**Ansar R. Safin**, Dr Sci. (Phys.-Math.) (2024), Associate Professor, Professor of RAS, Professor of the Department of Formation and Processing of Radio Signals of National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Deputy Director for Research of Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia. The author of more than 100 scientific publications. Area of expertise: radiophysics and electronics; physics of magnetic phenomena; spintronics.

Address: National Research University "Moscow Power Engineering Institute", 14, Krasnokazarmennaya St., Moscow 111250, Russia

E-mail: arsafin@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-6507-6573>

---