

# Радиочастотный микромеханический переключатель с ВЫСОКИМ ОТНОШЕНИЕМ ЕМКОСТИ

А.В. Ткаченко<sup>1,2</sup>, И.Е. Лысенко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Южный Федеральный Университет, г. Таганрог

<sup>2</sup>ООО «Радиочастотные микросистемы», г. Таганрог, msqk@mail.ru

**Аннотация** — В данной статье проведено моделирование разработанной конструкции шунтирующего радиочастотного микромеханического переключателя с омическим типом контакта и высоким коэффициентом емкости с подвижной металлической мембраной, расположенной на заземляющих линиях копланарного волновода. Для повышения коэффициента емкости в разработанной конструкции радиочастотного микромеханического переключателя используется неподвижный конденсатор с обкладками металл-диэлектрик-металл. Для снижения величины управляющего напряжения и повышения скорости переключателя в представленной конструкции радиочастотного микромеханического переключателя применен неоднородный змеевидный тип упругого подвеса. Результаты проведенного моделирования электромеханических параметров и электромагнитных параметров рассеивания показывают, что разработанная конструкция шунтирующего РЧ МЭМС переключателя подходит для использования в S-частотном диапазоне и проектирования современных реконфигурируемых многополосных беспроводных устройств.

**Ключевые слова** — радиочастотный микромеханический переключатель, неоднородный змеевидный упругий подвес, высокий коэффициент емкости, высокая изоляция, малые потери на отражение.

## I. ВВЕДЕНИЕ

На современном конкурентном рынке систем беспроводной радиосвязи требуются компактные, недорогие, реконфигурируемые многополосные решения, а реконфигурируемые радиочастотные устройства в настоящее время являются объектом активных исследований. Радиочастотные (РЧ) переключатели, изготовленные с использованием технологии микроэлектромеханических систем (МЭМС) привлекают значительное внимание в качестве переключающих элементов для разработки реконфигурируемых РЧ интерфейсов и устройств [1]-[4], благодаря их высокой РЧ производительности.

По сравнению с традиционными активными полупроводниковыми переключателями, выполненными на основе PIN-диодов и FET-транзисторов РЧ МЭМС переключатели обладают следующими преимуществами: высокая линейность, практически нулевое энергопотребление и высокая РЧ производительность. Однако РЧ МЭМС переключатели не лишены недостатков, главными из которых можно выделить: низкий

коэффициент емкости (в случае шунтирующих РЧ МЭМС переключателей), высокие величины управляющего напряжения (напряжение срабатывания, напряжение переключения), которые, как правило, составляют более 40 В, и проблема электрического заряда диэлектрических слоев, что в свою очередь приводит к прилипанию подвижного электрода конструкции переключателя [5]. При этом высокая величина коэффициента емкости положительно влияет на величину изоляции, а низкие величины управляющего напряжения способствуют реализации монолитных сверхвысокочастотных (СВЧ) интегральных схем (ИС). Также при применении РЧ МЭМС переключателей в перестраиваемых РЧ фильтрах величина коэффициента емкости оказывает влияние на регулируемый диапазон центральной резонансной частоты фильтра.

На сегодняшний день имеется ряд исследований, которые были проведены для достижения высокой величины коэффициента емкости шунтирующих РЧ МЭМС переключателей и низкой величины управляющего напряжения. В работе [6] предложена конструкция РЧ МЭМС переключателя с использованием керамического диэлектрического слоя с высокой диэлектрической проницаемостью. В работе [7] высокий коэффициент емкости был достигнут путем использования искривленной конструкции подвижного электрода РЧ МЭМС переключателя. Другим применяемым методом получения достижения высокой величины коэффициента емкости является увеличение величины воздушного зазора между подвижным электродом РЧ МЭМС и диэлектрическим слоем [8], [9]. Однако существуют некоторые очевидные недостатки данных методов, которые заключаются в том, что проблема заряда диэлектрического слоя становится тем существеннее, чем меньше толщина применяемого диэлектрического слоя, а также электромеханические параметры переключателя изменяются при изменении величины воздушного зазора.

Между тем в ряде работ предложены некоторые подходы для получения высокой величины коэффициента емкости, которые заключаются в использовании диэлектрических материалов с высокой диэлектрической проницаемостью. К таким диэлектрическим материалам относятся:  $HfO_2$  ( $\epsilon_r = 20$ ) [10], STO ( $\epsilon_r = 30-120$ ) [11], [12],  $Ta_2O_5$  ( $\epsilon_r = 32$ ) [13], (Ba, Sr)  $TiO_3$  ( $\epsilon_r > 200$ ) [14], PZT ( $\epsilon_r = 190$ ) [15] и металлоксидные

диэлектрики с высокими диэлектрическими характеристиками [16]. В результате величина коэффициента емкости шунтирующих РЧ МЭМС переключателей составляют более 100 [15, 16]. Однако величина коэффициента емкости ограничена минимальной толщиной диэлектрического слоя, максимальным значением диэлектрической проницаемости и максимальной величиной воздушного зазора между подвижным электродом переключателя и РЧ линией передачи. В связи с этим методы, используемые в работах [7]-[9], не являются наиболее подходящими.

Целью данной работы является разработка конструкции шунтирующего РЧ МЭМС переключателя с высокой величиной коэффициента емкости и малой величиной воздушного зазора с использованием комбинированного подхода. Данный подход повышения величины коэффициента емкости заключается в использовании конструкции плавающего металлического подвижного электрода без ограничений минимальной толщины диэлектрического слоя и минимальной величины воздушного зазора, а также с использованием материала диэлектрического слоя с высокой диэлектрической проницаемостью.

## II. ОПИСАНИЕ ПОДХОДА

Типовая конструкция шунтирующего РЧ МЭМС переключателя содержит копланарную линию передачи (КЛП) РЧ сигнала, подвижную металлическую мембрану, тонкий диэлектрический слой и неподвижные управляющие электроды, как показано на рис. 1. Металлическая мембрана подвешена над КЛП с воздушным зазором  $g_0$ . При приложении постоянного управляющего напряжения на неподвижные управляющие электроды относительно металлической мембраны, электростатическая сила притягивает металлическую мембрану вниз к диэлектрическому слою, и в результате РЧ сигнал шунтируется на заземляющие линии КЛП.

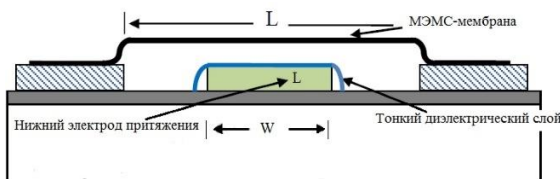


Рис. 1. Типовая конструкция шунтирующего РЧ МЭМС переключателя

Простым и эффективным подходом к получению высокой величины коэффициента емкости шунтирующего РЧ МЭМС переключателя заключается в подключении дополнительного неподвижного конденсатора с обкладками металл-диэлектрик-металл (МДМ) к основному шунтирующему конденсатору.

Разработанная конструкция шунтирующего РЧ МЭМС переключателя с высоким коэффициентом емкости показана на рис. 2 и рис. 3. Данный РЧ МЭМС переключатель содержит КЛП РЧ сигнала, плавающую металлическую мембрану, подвешенную на анкерных областях при помощи неоднородных змеевидных упругих подвесов, диэлектрический слой с высокой

диэлектрической проницаемостью и расположенный на нем металлический слой, образующий дополнительный неподвижный конденсатор с обкладками МДМ.

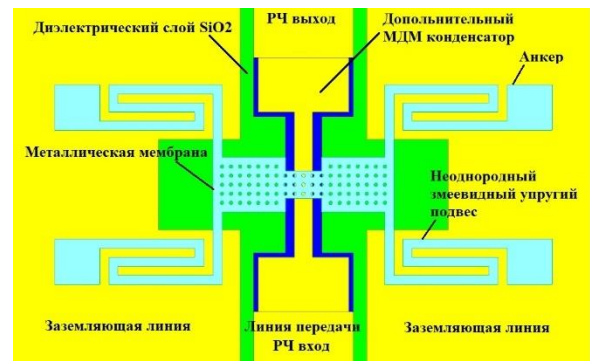


Рис. 2. Топология разработанного шунтирующего РЧ МЭМС переключателя

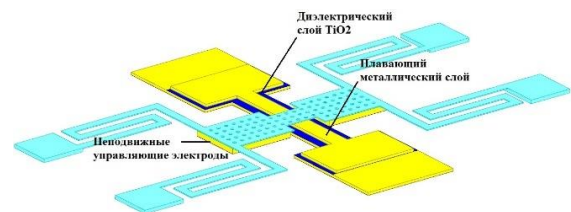


Рис. 3. Схематический вид дополнительного неподвижного МДМ конденсатора разработанного шунтирующего РЧ МЭМС переключателя

Геометрическая конфигурация разработанной конструкции шунтирующего РЧ МЭМС переключателя показана на рис. 4. Подвижная металлическая мембрана переключателя подвешена и закреплена с помощью четырех неоднородных змеевидных упругих подвесов.

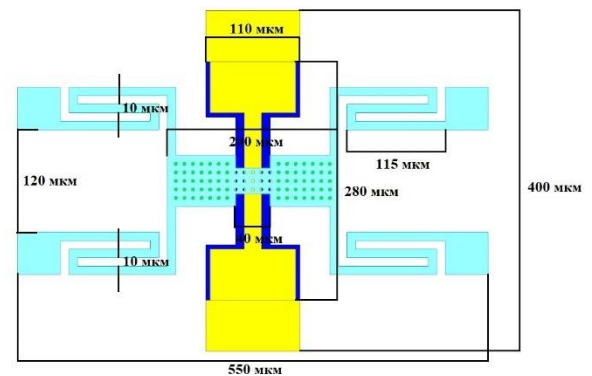


Рис. 4. Геометрическая конфигурация разработанного шунтирующего РЧ МЭМС переключателя

Эквивалентная электрическая схема типовой конструкции шунтирующего РЧ МЭМС переключателя приведена на рис. 5 а) [17]. Характеристическое сопротивление КЛП равно  $Z_0$ .  $Z_{bl}(\alpha, \beta l)$  обозначает характеристическое сопротивление линии передачи между волновым портом и краем подвижной металлической мембраны,  $\alpha$  – константу затухания передачи, а  $\beta l$  – электрическую длину линии передачи.

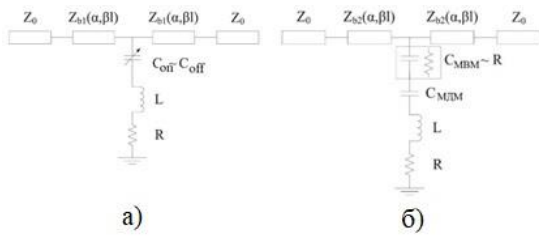


Рис. 5. Электрическая принципиальная схема: а) типового шунтирующего РЧ МЭМС переключателя; б) разработанного шунтирующего РЧ МЭМС переключателя

Эквивалентная электрическая схема разработанной конструкции шунтирующего РЧ МЭМС переключателя с высоким коэффициентом емкости показана на рис. 5 б). В данной конструкции дополнительный неподвижный МДМ конденсатор подключен к шунтирующему конденсатору с обкладками металл-воздух-металл (МВМ), образованный верхним металлическим слоем МДМ конденсатора, подвижной металлической мембраной и воздушным пространством между ними. МДМ конденсатор соединен с МВМ конденсатором последовательно, в случае, когда подвижная металлическая мембрана находится в верхнем положении. В случае, когда подвижная металлическая мембрана находится в нижнем положении, МВМ конденсатор изменяется на сопротивление  $R$  в электрической цепи.

### III. АНАЛИЗ КОЭФФИЦИЕНТА ЕМКОСТИ

Как показано на рис. 1, в случае типовой конструкции шунтирующего РЧ МЭМС переключателя емкость в верхнем положении подвижной металлической мембраны  $C_{on}$  (разомкнутое состояние) и емкость в нижнем положении  $C_{off}$  (замкнутое состояние) соответственно выражаются следующим образом:

$$C_{on} = \epsilon_0 A_u \left( g_0 + \frac{t_e}{\epsilon_r} \right)^{-1}; C_{off} = \epsilon_0 A_d \left( \frac{t_e}{\epsilon_r} \right),$$

где  $\epsilon_0$  – диэлектрическая проницаемость воздушного пространства;  $g_0$  – начальная величина воздушного зазора;  $\epsilon_r$  – относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрического слоя  $TiO_2$ ;  $t_e$  – толщина диэлектрического слоя  $TiO_2$ ;  $A_u$  и  $A_d$  – площадь перекрытия электродов в верхнем и нижнем положении подвижной металлической мембраны, соответственно. Следовательно, если пренебречь краевыми эффектами, отношение емкости в нижнем положении к емкости в верхнем положении подвижной металлической мембраны типового шунтирующего РЧ МЭМС переключателя может быть выражено следующим образом:

$$r_c = \frac{C_{off}}{C_{on}} = \frac{A_d}{A_u} \left( 1 + g_0 \frac{\epsilon_r}{t_e} \right).$$

Отсюда следует, что величина коэффициента емкости ограничена тремя факторами, а именно: (а) относительной диэлектрической проницаемостью

диэлектрического слоя  $\epsilon_r$ ; (б) толщиной диэлектрика  $t_e$ ; (в) начальным значением воздушного зазора  $g_0$ . Данные ограничивающие факторы не решаются легко. Во-первых, величина диэлектрической проницаемости  $\epsilon_r$  определяется точно лишь на этапе отработки технологического маршрута изготовления; во-вторых, проблема заряда диэлектрического слоя существенна, в случае, когда используется тонкий диэлектрический слой; в-третьих, большая величина начального воздушного зазора  $g_0$  приводит к высоким величинам управляющего напряжения.

В разработанной конструкции шунтирующего РЧ МЭМС переключателя определим параметр  $\delta$ , который равен  $\frac{A_{МДМ}}{A_{МВМ}}$ . В случае пренебрежения краевыми

эффектами величины емкости в верхнем и нижнем положении подвижной металлической мембраны величина отношения емкости  $r_c$  может быть рассчитана с помощью уравнения (1):

$$r_c = \frac{C_d}{C_u} = \frac{C_{МДМ}}{C_{МДМ} \square C_{МВМ}} = \frac{C_{МДВ}}{C_{МВМ}} + 1 = \frac{\epsilon_r g_0}{t_e} \frac{A_{МДМ}}{A_{МВМ}} + 1 = \frac{\epsilon_r g_0}{t_e} \delta + 1 \quad (1)$$

Таким образом, величина коэффициента емкости  $r_c$  разработанного шунтирующего РЧ МЭМС переключателя составляет 5701, при диэлектрической проницаемости диэлектрического слоя  $TiO_2 = 90$ , толщине диэлектрического слоя  $t_e = 0.2$  мкм и величине воздушного зазора  $g_0 = 1$  мкм. При использовании, например, в качестве материала диэлектрического слоя  $Si_3N_4$  ( $\epsilon_r = 7.5$ ), который является наиболее распространенным материалом диэлектрического слоя шунтирующих РЧ МЭМС переключателей, величина коэффициента емкости будет равной 476.

### IV. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ

На рис. 6 а) и рис. 6 б) представлены результаты моделирования электромагнитных характеристик разработанной конструкции шунтирующего РЧ МЭМС переключателя, которые определяются параметрами рассеивания (S-параметры) в верхнем и нижнем положении подвижной металлической мембраны.

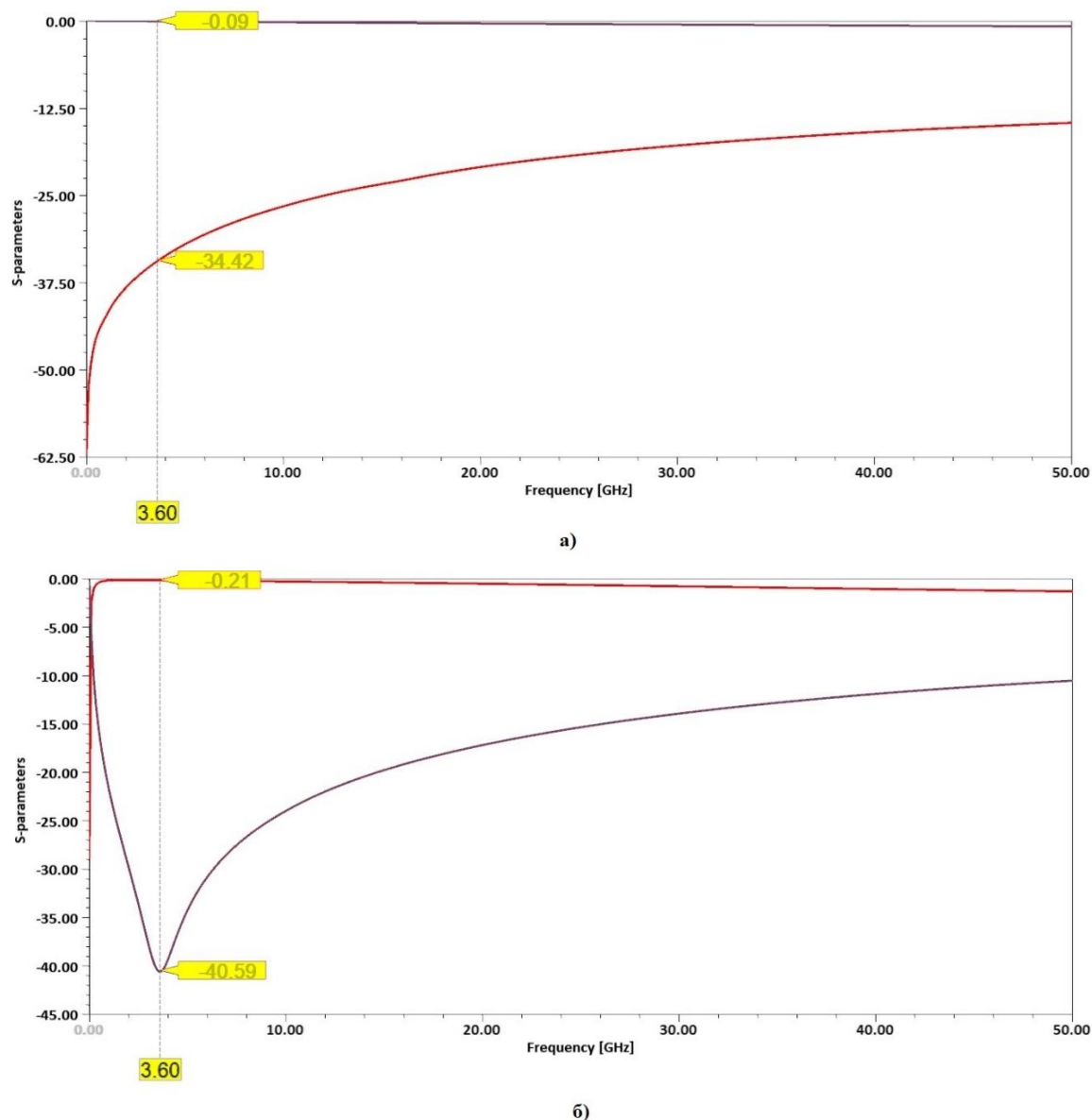


Рис. 6. Результаты моделирования параметров рассеивания разработанной конструкции шунтирующего РЧ МЭМС переключателя: а) в верхнем положении подвижной металлической мембраны; б) в нижнем положении подвижной металлической мембраны

По результатам электромагнитного моделирования можно сделать вывод, что разработанная конструкция шунтирующего РЧ МЭМС переключателя подходит для использования в S-частотном диапазоне. В верхнем положении подвижной металлической мембраны вносимые потери составляют менее -0.1 дБ, потери на отражение менее -30 дБ для данного частотного диапазона. В нижнем положении подвижной металлической мембраны изоляция составляет более -40 дБ на центральной резонансной частоте 3.6 ГГц, а потери на отражение не более -0.21 дБ для данного частотного диапазона.

В разработанной конструкции шунтирующего РЧ МЭМС переключателя коэффициент упругости предложенного неоднородного змеевидного упругого подвеса определяет величину напряжения срабатывания.

Коэффициент упругости неоднородного змеевидного упругого подвеса может быть определен с помощью метода, описанного в работе [2]. Структура неоднородного змеевидного упругого подвеса показана на рис. 7. Каждая секция неоднородного змеевидного упругого подвеса состоит из шести последовательно соединенных сегментов. Величина напряжения срабатывания может быть определена с помощью выражения (2):

$$V_p = \sqrt{\frac{2k_e}{\varepsilon_0 W L_d} \frac{g_0}{3} \left( \frac{2g_0 + t_e}{3 \varepsilon_r} \right)^2} . \quad (2)$$

Расчетное значение эффективного коэффициента упругости  $k_e$  составляет 18.5 Н/м, а величина управляющего напряжения  $V_p \approx 11.6$  В. На рис. 8 а) и рис. 8 б)

представлены результаты моделирования напряженно-деформированного состояния подвижной металлической мембраны под действием приложенного

напряжения срабатывания и времени перемещения в нижнее положение.

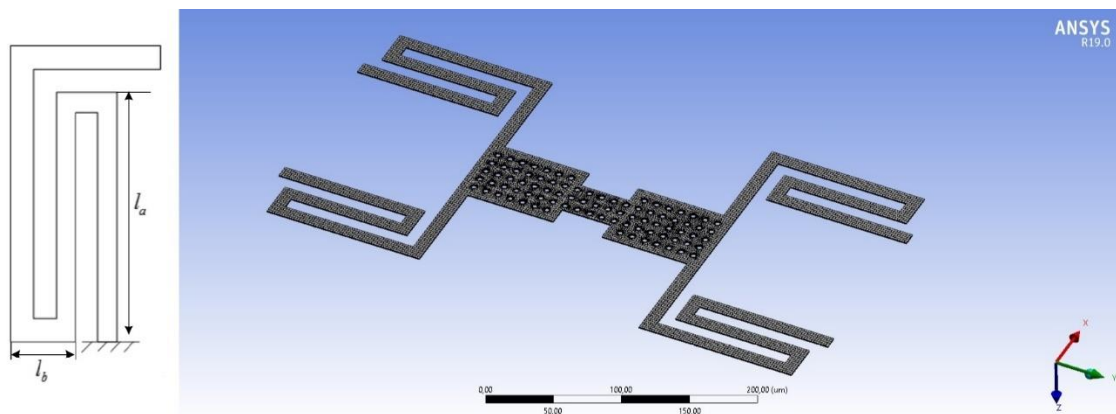
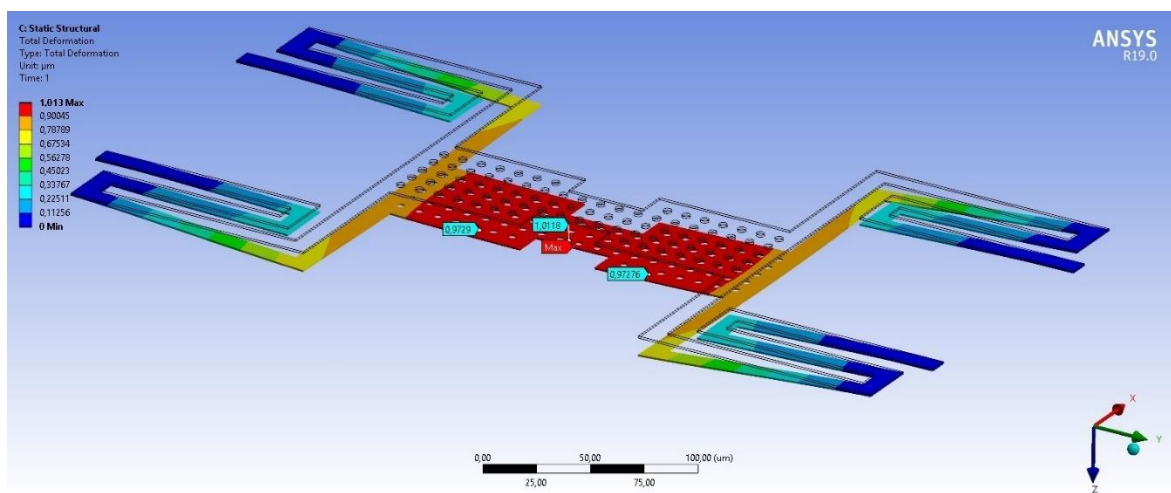
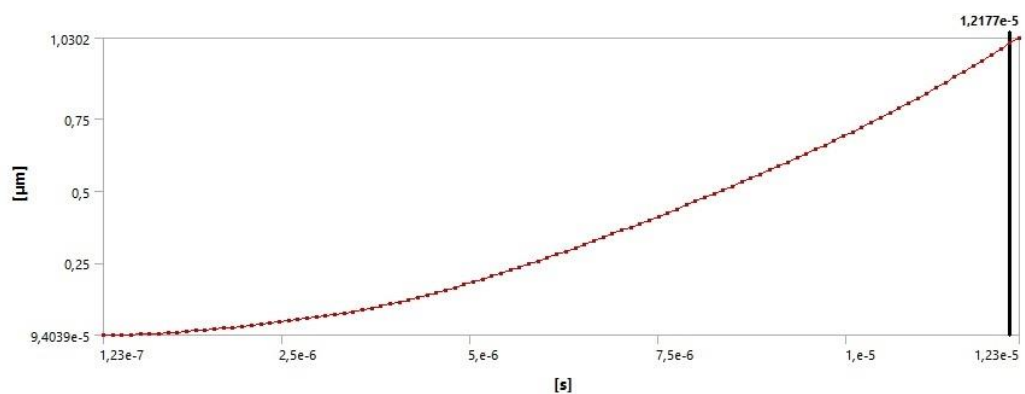


Рис. 7. Структура неоднородного змеевидного упругого подвеса разработанной конструкции шунтирующего РЧ МЭМС переключателя



а)



б)

Рис. 8. Результаты моделирования напряженно-деформированного состояния подвижной металлической мембраны разработанной конструкции шунтирующего РЧ МЭМС переключателя: а) перемещение под действием напряжения срабатывания; б) времени перемещения в нижнее положение

## V. ВЫВОДЫ

Представленный в данной работе шунтирующий РЧ МЭМС переключатель демонстрирует значительное увеличение коэффициента емкости с использованием комбинированного подхода к проектированию. Для верификации предложенного подхода представлена разработанная конструкция шунтирующего РЧ МЭМС переключателя с высоким коэффициентом емкости 5701. При использовании неоднородных змеевидных упругих типов подвесов удается добиться небольшой величины управляющего напряжения и высокого быстродействия. Рассчитанная величина напряжения срабатывания составляет 11.6 В, а время переключения из одного положения подвижной металлической мембраны в другое ~ 12.2 мкс. По результатам электромагнитного моделирования можно сделать вывод, что разработанная конструкция шунтирующего РЧ МЭМС переключателя подходит для использования в S-частотном диапазоне. В верхнем положении подвижной металлической мембраны вносимые потери составляют менее -0.1 дБ, потери на отражение менее -30 дБ для данного частотного диапазона. В нижнем положении подвижной металлической мембраны изоляция составляет более -40 дБ на центральной резонансной частоте 3.6 ГГц, а потери на отражение не более -0.21 дБ для данного частотного диапазона. Таким образом разработанная конструкция шунтирующего РЧ МЭМС переключателя подходит для построения современных реконфигурируемых многополосных беспроводных устройств.

## ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена при поддержке Фонда содействия развитию малых инновационных предприятий по программе Старт-1 (договор №3412ГСИ/55632) на проведение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по теме: «Разработка и испытания экспериментальных образцов однополосного радиочастотного МЭМС-переключателя».

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Lysenko I. E., Tkachenko A. V., Sherova E. V. and Nikitin A. V. Analytical Approach in the Development of RF MEMS Switches // *Electronics*. 2018. № 7(12). P. 1-23.
- [2] Lysenko I. E., Tkachenko A. V., Ezhova O. A., Konoplev B. G., Ryndin E. A. and Sherova E. V. The Mechanical Effects Influencing on the Design of RF MEMS Switches // *Electronics*. 2020. № 9 (2). P. 1-26.
- [3] Kale N.S. Tutorial T4: MEMS: Design, Fabrication, and their applications as chemical and biosensors // *Proceedings of the 28th International Conference on VLSI Design, Bangalore, India, 3–7 January 2015*.
- [4] Mansour R.R. RF MEMS-CMOS device integration: An overview of the potential for RF researchers // *IEEE Microw. Mag.* 2013, 14, P. 39-56.
- [5] Fall M.; Fouladi S.; Domingue F.; Dieppedale C.; Reig B.; Mansour R.R. High capacitance ratio RF MEMS dielectricless switched capacitor // *Proceedings of the European Microwave Conference (EuMC)*. Nuremberg, Germany, 6–10 October 2013. P. 1327-1330.
- [6] Park J.Y.; Kim G.H.; Chung K.W.; Bu J.U. Fully integrated micromachined capacitive switches for RF applications // *IEEE MTT-S Int. Microw. Symp.* 2000, 1, P. 283-286.
- [7] Al-Dahleh R.; Mansour R.R. High-capacitance-ratio warped-beam capacitive MEMS switch designs // *J. Microelectromech. Syst.* 2010, 19, P. 538-547.
- [8] Chang C.; Chang P. Innovative micromachined microwave switch with very low insertion loss // *Sens. Actuators A Phys.* 2010, 79, P. 71-75.
- [9] Bozler C.; Drangmeister R.; Duffy, S.; Gouker M.; Knecht J.; Kushner L.; Parr R.; Rabe S.; Travis L. MEMS microswitch arrays for reconfigurable distributed microwave components // *Proceedings of the IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*. Salt Lake City, UT, USA, 1–21 July 2000; P. 587-591.
- [10] Angira M. et al. On the investigation of an interdigitated, high capacitance ratio shunt RF-MEMS switch for X-band applications // *Proc. of NSTI Nanotechnology (Washington DC, United States)*. 2013. Vol. 2. P. 189-192.
- [11] Park J. Y., Kim G. H., Chung K. W. and Bu J. U. Fully integrated micromachined capacitive switches for RF applications *IEEE MTT-S Int Microwave Symp. Digest (Boston, MA, June 2000)*, P. 283-286.
- [12] Park J. Y., Kim G. H., Chung K. W. and Bu J. U. Monolithically integrated micromachined RF MEMS capacitive switches // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2001. V. 89. № 1-2. P. 88-94.
- [13] Persano A. et al. Ta2O5 thin films for capacitive RF MEMS switches // *J. Sensors*. 2010. 487061.
- [14] Liu Y. et al. High-isolation BST-MEMS switches // *Microwave Symp. Digest, 2002 IEEE MTT-S Int. (IEEE)*. Vol. 1. P. 227-30.
- [15] Ziaei A., Dean T. and Mancuso Y. Lifetime characterization of capacitive power RF MEMS switches // *Proc. 35th European Microw. Conf. (October 2005)*. Vol. 3, P. 4.
- [16] Wang G. et al. Novel reliable RF capacitive MEMS switches with photodefinable metal-oxide dielectrics // *J. Microelectromech. Syst.* 16(3). P. 550-555.
- [17] Rebeiz G. M. *RF MEMS: Theory, Design, and Technology* (New York: Wiley), 2004.

# High Capacitance Ratio Radio-Frequency Micromechanical Switch

A.V. Tkachenko<sup>1,2</sup>, I.E. Lysenko<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Southern Federal University, Taganrog

<sup>2</sup>«RF Microsystems», Llc., Taganrog, msqk@mail.ru

**Abstract** — This paper uses combined approach and its verification to develop design of a shunt RF MEMS switch with ohmic contact type and high capacitance ratio and small air gap. This approach to increasing the value of the capacitance ratio consists in using the design of a floating metal mobile electrode without restrictions on the minimum thickness of dielectric layer and the minimum value of air gap, as well as using material of the dielectric layer with high permittivity. This approach differs from the existing ones in that it eliminates obvious disadvantages, namely, the problem of charging the dielectric layer is solved, and the electromechanical parameters of the switch are improved due to the minimum air gap. When using inhomogeneous serpentine elastic types of suspensions, it is possible to achieve small value of control voltage and high switching speed. The calculated value of the actuation voltage is 11.6 V and the switching time from one position of the movable metal membrane to another is ~ 12.2. Based on the results of electromagnetic modeling, it can be concluded that the developed design of the shunt RF MEMS switch is suitable for use in the S-frequency range. In the up-state of the movable metal membrane, the insertion loss is less than -0.1 dB, and the reflection loss is less than -30 dB for this frequency range. In the down-state of the movable metal membrane, the isolation is more than -40 dB at the central resonant frequency of 3.6 GHz and the reflection loss is not more than -0.21 dB for this frequency range. Thus, the developed design of the RF MEMS shunt switch is suitable for building modern reconfigurable multi-band wireless devices.

**Keywords** — radio-frequency micromechanical switch, inhomogeneous serpentine elastic suspension, high capacitance ratio, high isolation, low insertion loss.

## REFERENCES

- [1] Lysenko I. E., Tkachenko A. V., Sherova E. V. and Nikitin A. V. Analytical Approach in the Development of RF MEMS Switches // *Electronics*. 2018. № 7(12). P. 1-23.
- [2] Lysenko I. E., Tkachenko A. V., Ezhova O. A., Konoplev B. G., Ryndin E. A. and Sherova E. V. The Mechanical Effects Influencing on the Design of RF MEMS Switches // *Electronics*. 2020. № 9 (2). P. 1-26.
- [3] Kale N.S. Tutorial T4: MEMS: Design, Fabrication, and their applications as chemical and biosensors // *Proceedings of the 28th International Conference on VLSI Design*, Bangalore, India, 3–7 January 2015.
- [4] Mansour R.R. RF MEMS-CMOS device integration: An overview of the potential for RF researchers // *IEEE Microw. Mag.* 2013, 14, P. 39-56.
- [5] Fall M.; Fouladi S.; Domingue F.; Dieppedale C.; Reig B.; Mansour R.R. High capacitance ratio RF MEMS dielectricless switched capacitor // *Proceedings of the European Microwave Conference (EuMC)*. Nuremberg, Germany, 6–10 October 2013. P. 1327-1330.
- [6] Park J.Y.; Kim G.H.; Chung K.W.; Bu J.U. Fully integrated micromachined capacitive switches for RF applications // *IEEE MTT-S Int. Microw. Symp.* 2000, 1, P. 283-286.
- [7] Al-Dahleh R.; Mansour R.R. High-capacitance-ratio warped-beam capacitive MEMS switch designs // *J. Microelectromech. Syst.* 2010, 19, P. 538-547.
- [8] Chang C.; Chang P. Innovative micromachined microwave switch with very low insertion loss // *Sens. Actuators A Phys.* 2010, 79, P. 71-75.
- [9] Bozler C.; Drangmeister R.; Duffy, S.; Gouker M.; Knecht J.; Kushner L.; Parr R.; Rabe S.; Travis L. MEMS microswitch arrays for reconfigurable distributed microwave components // *Proceedings of the IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*. Salt Lake City, UT, USA, 1–21 July 2000; P. 587-591.
- [10] Angira M. et al. On the investigation of an interdigitated, high capacitance ratio shunt RF-MEMS switch for X-band applications // *Proc. of NSTI Nanotechnology (Washington DC, United States)*. 2013. Vol. 2. P. 189-192.
- [11] Park J. Y., Kim G. H., Chung K. W. and Bu J. U. Fully integrated micromachined capacitive switches for RF applications *IEEE MTT-S Int Microwave Symp. Digest (Boston, MA, June 2000)*, P. 283-286.
- [12] Park J. Y., Kim G. H., Chung K. W. and Bu J. U. Monolithically integrated micromachined RF MEMS capacitive switches // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2001. V. 89. № 1-2. P. 88-94.
- [13] Persano A. et al. Ta2O5 thin films for capacitive RF MEMS switches // *J. Sensors*. 2010. 487061.
- [14] Liu Y. et al. High-isolation BST-MEMS switches // *Microwave Symp. Digest, 2002 IEEE MTT-S Int. (IEEE)*. Vol. 1. P. 227-30.
- [15] Ziaei A., Dean T. and Mancuso Y. Lifetime characterization of capacitive power RF MEMS switches // *Proc. 35th European Microw. Conf. (October 2005)*. Vol. 3, P. 4.
- [16] Wang G. et al. Novel reliable RF capacitive MEMS switches with photodefinable metal-oxide dielectrics // *J. Microelectromech. Syst.* 16(3). P. 550-555.
- [17] Rebeiz G. M. *RF MEMS: Theory, Design, and Technology* (New York: Wiley), 2004.