



# Проектирование и моделирование РЧ МЭМС-переключателей и переменных конденсаторов

## Рынок РЧ МЭМС-переключателей и история их создания

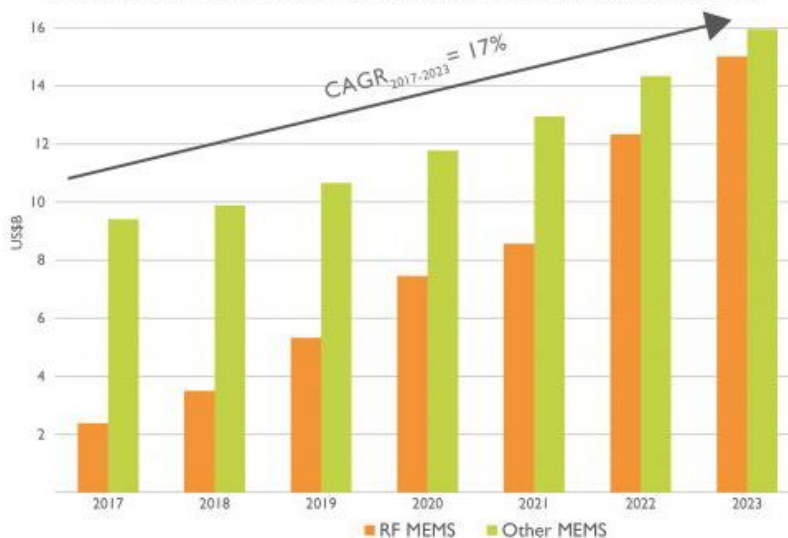
В последнее десятилетие радиочастотные МЭМС-переключатели использовались в небольших приложениях на рынках аэрокосмического, оборонного, телекоммуникационного и автоматизированного испытательного радиочастотного оборудования. В настоящее время растет интерес к использованию радиочастотных МЭМС-переключателей на большом рынке мобильных устройств, для решения проблем радиочастотного проектирования и улучшения функциональности и производительности современных радиотехнологий. Радиочастотные МЭМС-устройства могут обеспечить настройку антенн с низким затуханием для различных базовых диапазонов и перестраиваемые усилители мощности. Радиочастотные МЭМС-переключатели и реле также обеспечивают широкую полосу пропускания, низкие вносимые потери, отличную изоляцию и превосходную линейность.

Радиочастотные МЭМС могут быть изготовлены с использованием стандартного оборудования для обработки полупроводников и обеспечивают возможность крупносерийной и недорогой интеграции с окружающими схемами с помощью технологий системы на кристалле (SoC), МЭМС на CMOS или интегрированных пассивных устройств (IPD).



### 2017-2023 Прогнозы МЭМС-рынка: Радиочастотные и другие устройства

(Source: Status of the MEMS Industry 2018 report, Yole Développement, May 2018)



Yole Développement is part of Yole Group of Companies

©2018 - www.yole.fr - www2-icrnews.com

Рисунок 1. Прогноз развития рынка радиочастотных МЭМС



## Коммерциализация радиочастотных МЭМС

Разработка радиочастотных МЭМС-переключателей началась более чем 20 лет назад, но успех на рынке в то время был незначительным. Основным препятствием для ранней коммерциализации была надежность. Радиочастотные переключатели должны выдерживать миллиарды циклов переключения. Было сложно найти материалы, которые были бы достаточно твердыми, чтобы выдержать большое количество циклов переключения, и в то же время достаточно мягкими, чтобы обеспечить хороший контакт в закрытом состоянии, при замыкании. Радиочастотные МЭМС-переключатели (в первую очередь, их электроды) требуют технологии изготовления, основанной на композитных слоях механических материалов. На надежность радиочастотных МЭМС-переключателей влияют электрические и механические напряжения в этих композитных материалах, а также температурные зависимости и чувствительность к ударам и вибрациям.

Растет спрос на радиочастотные МЭМС-переключатели и другие радиочастотные МЭМС-устройства в телекоммуникационных системах нового поколения и смартфонах. Согласно недавнему отчету компании Yole Développement, рынок радиочастотных МЭМС-устройств в период с 2018 по 2024 год вырастет примерно на 100%. Yole отметил, что развитие связи 5G увеличит спрос на устройства на основе МЭМС, такие как РЧ МЭМС BAW-фильтры, в связи с потребностью в активных антеннах в устройствах 5G. Кроме того, радиочастотные МЭМС-генераторы будут использоваться при развертывании новых базовых станций и периферийных вычислений, связанных с 5G.

## Принцип работы, технологии и типы

Радиочастотные МЭМС-переключатели — это небольшие микромеханические переключатели, которые имеют низкое энергопотребление и могут быть изготовлены с использованием традиционной технологией изготовления МЭМС-устройств. Они похожи на выключатель света в комнате, где контакт размыкается или замыкается для проведения сигнала через выключатель. В случае радиочастотных МЭМС-устройств механические компоненты переключателя имеют размер лишь микроны. В отличие от выключателя света, сигнал, проводимый в радиочастотном МЭМС-переключателе, находится в радиочастотном диапазоне.

## Технологии изготовления

Радиочастотное переключение может выполняться с использованием ряда различных технологий. Существует два основных типа радиочастотных переключателей, конкурирующих с радиочастотными МЭМС-переключателями: электромеханические радиочастотные переключатели и твердотельные радиочастотные переключатели. В твердотельных переключателях используются полупроводниковые технологии, такие как кремниевые или PIN-диоды, FET (полевые транзисторы) и гибридные технологии (которые включают PIN и FET), и они построены с использованием кремниевых подложек. Радиочастотные МЭМС-переключатели конкурируют с постоянно совершенствующимися переключателями на основе RF-SOI (кремний

на изоляторе), которые сегодня являются ведущим решением на рынке.

Существует множество типов радиочастотных МЭМС-переключателей, и они могут приводиться в действие (или переключаться) с помощью различных механизмов. Электростатическое срабатывание обычно используется в конструкциях радиочастотных МЭМС-переключателей из-за низкого энергопотребления и небольших размеров. МЭМС-переключатели также могут открываться или закрываться с помощью инерционной, электромагнитной, электротермической или пьезоэлектрической силы.

Типичный радиочастотный МЭМС-переключатель с «консольной балкой» показан на рисунках 2 и 3. В этой конфигурации фиксированная балка подвешена над подложкой. Когда балка принудительно опускается вниз, электрод на балке контактирует с электродом на подложке, переводя переключатель в состояние "включено" и замыкая цепь.

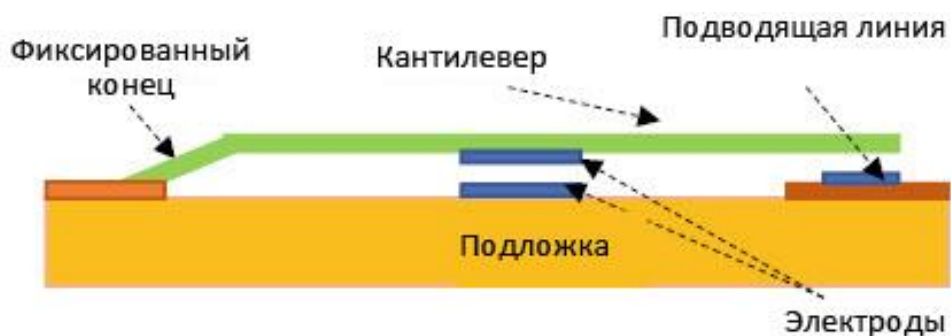


Рисунок 2. Радиочастотный МЭМС-переключатель консольного типа (предоставлен [1])

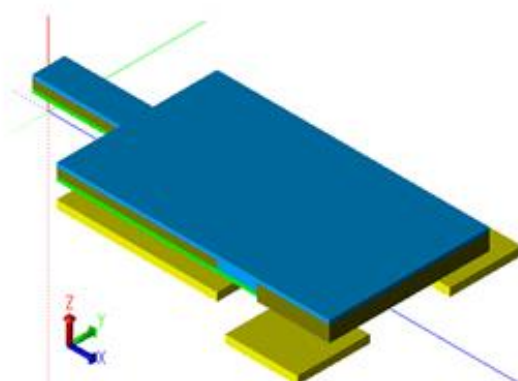


Рисунок 3. Модель радиочастотного переключателя с консольной балкой из CoventorMP®, показывающая состояния включения и выключения

## Емкостные радиочастотные МЭМС-переключатели, их преимущества и перспективы

Последнее поколение радиочастотных МЭМС-переключателей – это в основном емкостные устройства. Емкостные переключатели работают с использованием емкостной связи и хорошо подходят для высокочастотных радиочастотных приложений. Во время работы к балке, подвешенной как мост через подложку, прикладывается сила. Когда балка тянется вниз под действием силы (например, электростатической силы), балка контактирует с диэлектриком на подложке, и сигнал прекращается. Поперечное сечение емкостного переключателя «мостового» типа показано на рисунке 4, а трехмерная модель CoventorMP® емкостного радиочастотного МЭМС-переключателя в недеформированном состоянии показана на рисунке 5.

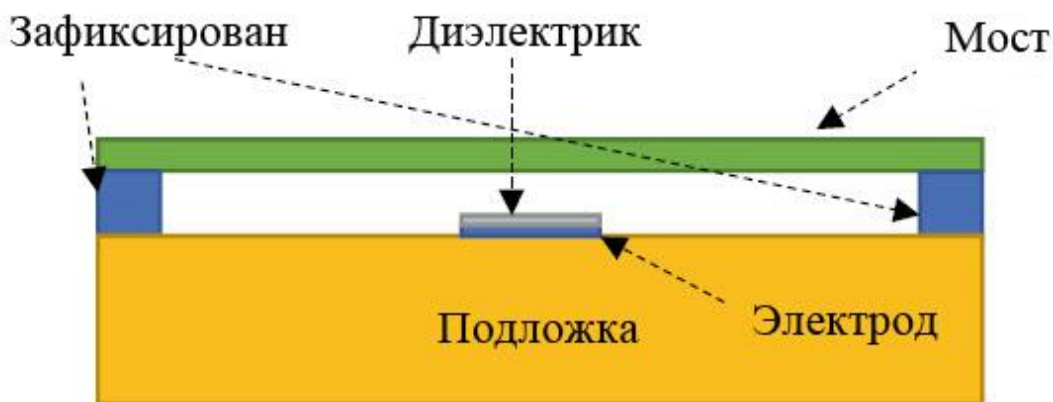


Рисунок 4. Емкостной РЧ МЭМС-переключатель мостового типа (предоставлен [1])

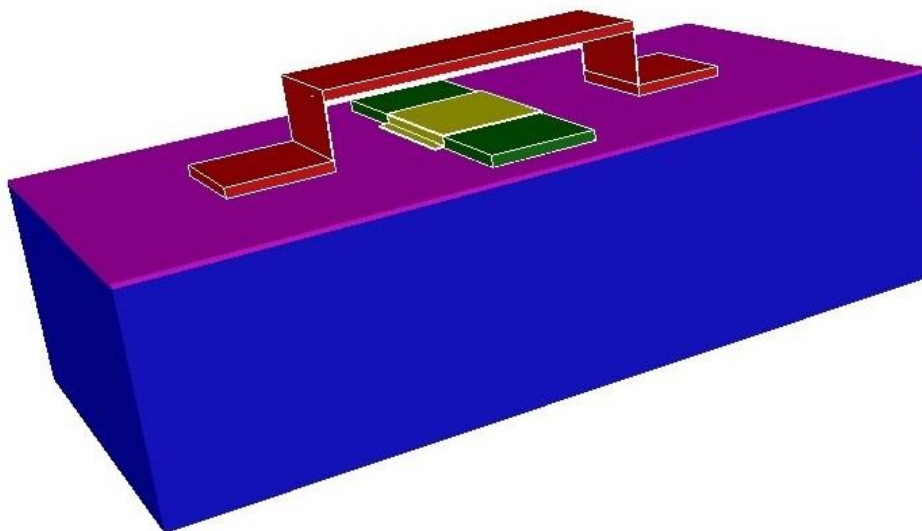


Рисунок 5. Модель CoventorMP® мостового радиочастотного переключателя в недеформированном, "поднятом" состоянии



Благодаря своей механической природе, радиочастотные МЭМС-переключатели имеют ряд преимуществ перед существующими технологиями, включая очень низкое сопротивление в закрытом состоянии и очень высокое сопротивление в открытом состоянии. Радиочастотные МЭМС-переключатели обладают такими преимуществами, как небольшой размер, низкое энергопотребление, быстрое время переключения, низкие потери сигнала, высокая изоляция в выключенном состоянии, возможности интеграции в масштабе схемы и другие. Радиочастотные МЭМС-переключатели на частотах в диапазоне десятков ГГц будут широко использоваться в будущих телекоммуникационных системах, таких как мобильная сотовая связь 5G, особенно по мере того, как новые производственные процессы и материалы становятся более доступными. РЧ МЭМС устройства, включая РЧ МЭМС переключатели, будут переживать резкий рост как часть следующего поколения 5G и других телекоммуникационных систем.

## Задачи и проблемы проектирования и изготовления

Существует множество перспективных применений для радиочастотных МЭМС-переключателей, включая использование в перестраиваемых фильтрах, антеннах, сенсорных приемниках и радиочастотных идентификаторах [2]. Почему так трудно разрабатывать эти устройства?

МЭМС-переключатели и переменные конденсаторы с электростатическим приводом используют нестабильность "притяжения" для достижения срабатывания и фиксации с низким энергопотреблением. Высокая степень нелинейности в сочетании с механическим контактом и производственными эффектами, такими как градиенты напряжения тонкой пленки, делают создание высокопроизводительной и надежной конструкции особенно сложной задачей. Следовательно, многие из этих устройств были выведены на рынок только после нескольких лет дорогостоящих циклов исследования кремния.

Существует несколько проблем, которые необходимо решить при разработке радиочастотного МЭМС-переключателя. С механической точки зрения, устройство должно выдерживать миллиарды циклов срабатывания, открывая и закрывая привод высоконадежным способом. Для предотвращения прямого контакта между электродами часто используются контактные блоки. Также очень важно понимать динамическое нелинейное поведение устройства. При проектировании устройства необходимо оптимизировать замыкание, размыкание и частотный гистерезис, чтобы обеспечить соответствие конечным спецификациям продукта. Более того, переходное поведение радиочастотного МЭМС-переключателя очень чувствительно к размерам устройства и изменчивости технологического процесса, что делает эти параметры критически важными для производительности и выхода годной продукции. РЧ МЭМС-переключатели также часто используют сложные композитные материалы, такие как слои металлов и диэлектриков, которые демонстрируют индуцированные при изготовлении остаточные напряжения и градиенты напряжений. Каждый из этих факторов оказывает существенное влияние на достижение конечных характеристик устройства и соблюдение проектных спецификаций.



Моделирование поведения этих нелинейных радиочастотных МЭМС-компонентов является непростой задачей. Сложная физика и переходное поведение этих устройств не могут быть точно смоделированы с помощью аналитических формул. К сожалению, также очень трудно моделировать переходные процессы открытия и закрытия этих устройств с использованием обычных объемных конечно-элементных инструментов из-за резкого изменения воздушного зазора между открытым и закрытым состояниями устройства. Любое моделирование анализа конечных элементов (МКЭ) требует сложного преобразования или повторного создания сетки при каждой итерации решателя. Статическое моделирование переключателя в инструменте МКЭ может занять много часов вычислительного времени, в то время как моделирование переходных процессов практически невозможно. Это существенно ограничивает ценность обычных инструментов конечных элементов для исследования и оптимизации конструкции.

Динамическое поведение радиочастотного МЭМС-переключателя необходимо понимать, чтобы не только разработать лучший переключатель, но и спроектировать систему вокруг него. Вся система включает в себя микросхему МЭМС, управляющую электронику и интегральные схемы, радиочастотные компоненты и корпус. Оптимизация всей системы является ключом к успеху и требует реалистичной (а не идеалистичной) модели устройства и системы.

Быстрое и точное моделирование этих устройств, выполненное до изготовления, может устранить многие из этих трудоемких циклов проектирования. MEMS+ и CoventorWare решают эти проблемы и вместе обеспечивают комплексную платформу для проектирования радиочастотных переключателей и варакторов.

## Решение проблем, связанных с разработкой РЧ МЭМС-переключателей с помощью MEMS+

Инструмент MEMS+® компании Coventor — это инновационное средство для решения проблем разработки и проектирования РЧ МЭМС-переключателей. Три инновационные возможности MEMS+ помогают преодолеть трудности, связанные с разработкой радиочастотных МЭМС-переключателей.

**Возможность №1** — это способность фиксировать переходное поведение переключателя. MEMS+ позволяет создавать высокоточные модели, предсказывающие детальные физические характеристики, включая нелинейное поведение, вызванное механикой контакта и гистерезисом (см. рис. 6). Это обеспечивает глубокое понимание поведения при замыкании и размыкании, а также прогнозируемое, реалистичное понимание того, как будет работать переключатель.

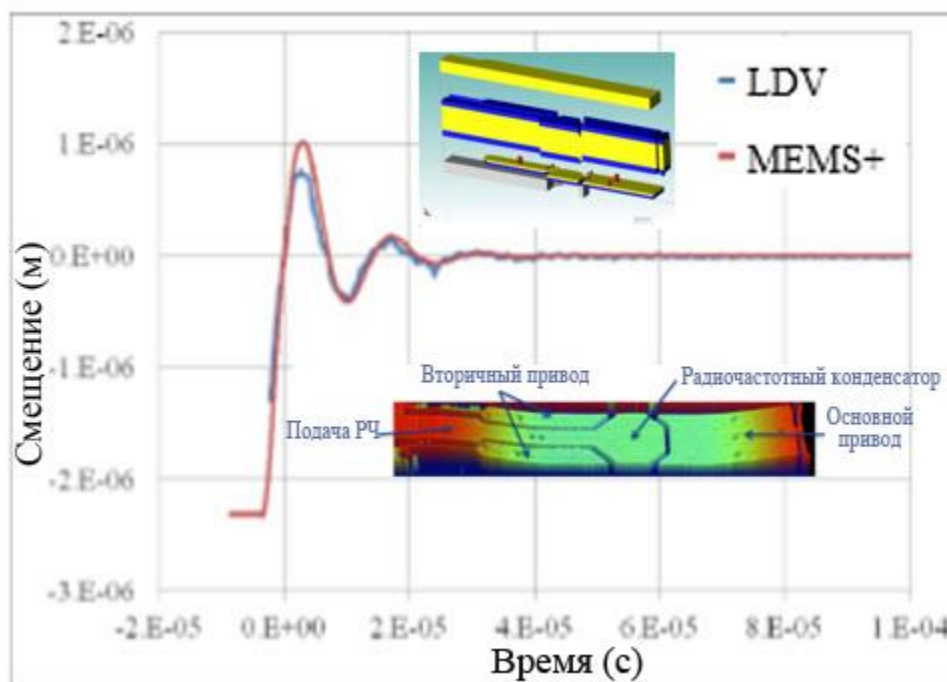


Рисунок 6. Переходные колебания размыкания переключаемого МЭМС конденсатора, отображающие соответствие между измерениями лазерного доплеровского виброметра (LDV) и динамической моделью MEMS+ [3, 4]

**Возможность № 2** — это исследование конструкторско-технологического пространства. Компактные модели, созданные в MEMS+, сокращают время моделирования с нескольких дней до нескольких минут. Такое быстрое время моделирования позволяет широко исследовать область проектирования и изготовления устройств. Изменения в геометрии, технологическом процессе и выборе материалов могут быть быстро исследованы в экспериментальной модели, ускоряя нахождение инженерами-разработчиками компромиссов между конструкцией

устройства (геометрией) и технологией (технологическим процессом, материалами). Сбои в обеспечении надежности, вызванные взаимодействием между конструкцией и процессом, могут быть выявлены на ранней стадии, что ускоряет процесс оптимизации выхода годной продукции (см. рис. 7).

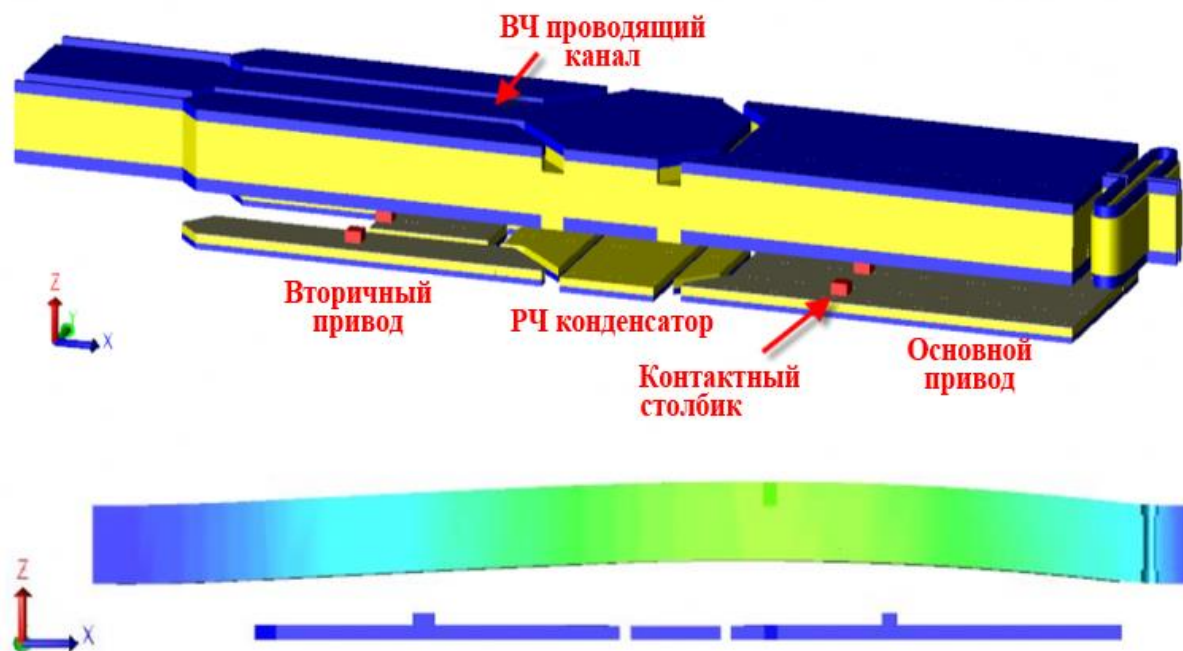


Рисунок 7. 3D вид модели радиочастотного МЭМС-переключателя, показывающий изгиб при остаточном напряжении [2]

**Возможность № 3** — это способность точно моделировать поведение устройства на уровне системы. Модели MEMS+ позволяют получать быстрые и точные результаты моделирования, что необходимо во время моделирования на системном уровне. Трехмерные мультифизические модели MEMS+ могут быть перенесены непосредственно в инструменты моделирования на уровне системы и симуляторы электрических цепей, что позволяет быстро спроектировать РЧ МЭМС-переключатель с окружающими схемами и системами. Эти реалистичные модели устройств MEMS+ могут быть использованы для оптимизации всего продукта или системы. Например, разработчик может исследовать оптимальную модуляцию напряжения на управляющих электродах в цепи управления. Идеальные, упрощенные поведенческие МЭМС модели, используемые при проектировании системы, могут привести к ухудшению производительности изделия или даже к полному отказу. Смоделированные результаты с помощью MEMS+ соответствуют измеренным значениям (см. рис. 8).

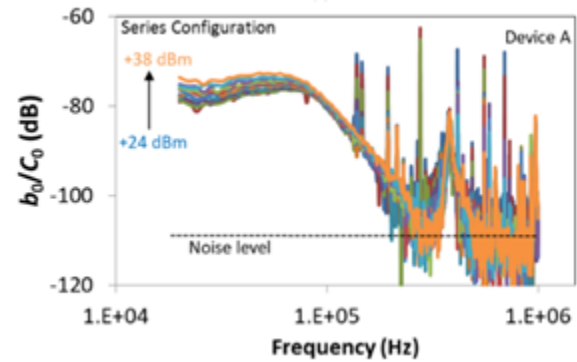
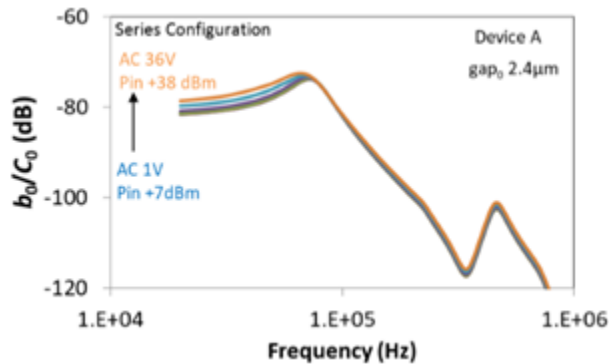


Рисунок 8. Нормированное изменение емкости в зависимости от входной мощности, отображаемое при моделировании на системном уровне, с смоделированными значениями (слева) и измеренными значениями (справа) [4]

## Быстрое исследование и оптимизация конструкции

Используя MEMS+, инженеры-конструкторы могут легко построить 3D-модель устройства из нескольких элементов высокого порядка (таких как балки Бернулли), как показано ниже.

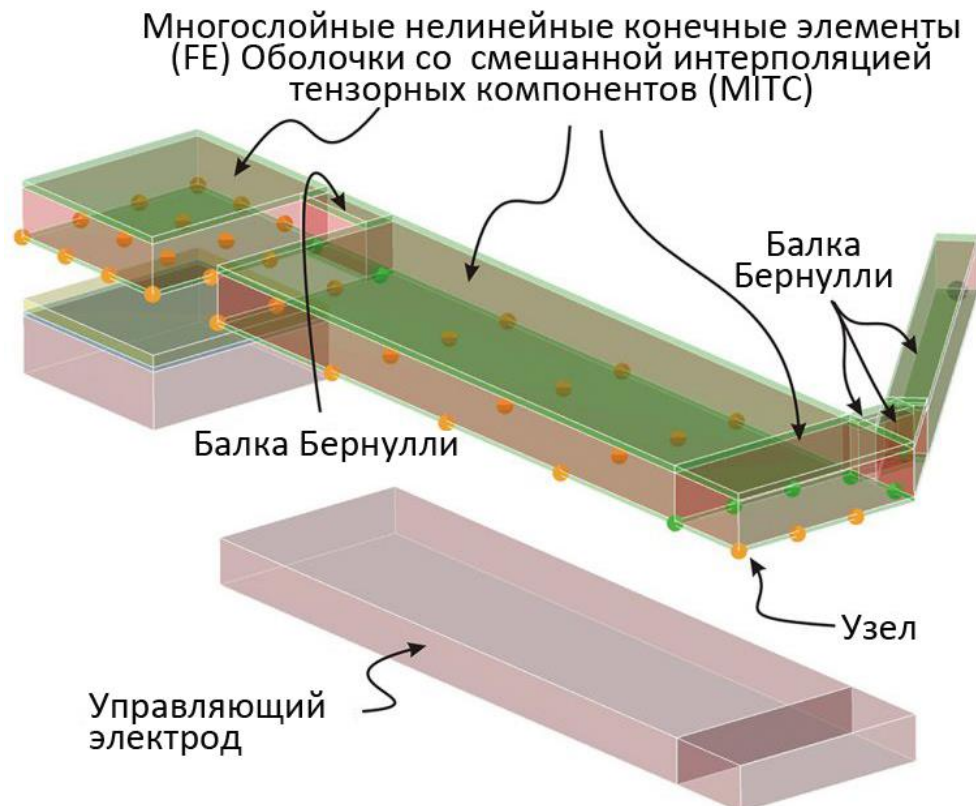


Рисунок 9. Четверть модели радиочастотного переключателя IHP Nanotech в MEMS+, показывающая механические элементы. Модель также содержит электростатические и жидкостные элементы (для наглядности они не показаны) [1].



После построения модели весь диапазон связанных, сложных мультифизических процессов может быть смоделирован в самом инструменте MEMS+ или совместно со средами проектирования MATLAB®, Simulink® или Cadence®. Результаты достигаются на порядки быстрее, чем при обычном моделировании методом конечных элементов. Инструмент MEMS+® компании Coventor — это инновационное решение для достижения этих целей. Три инновационные возможности MEMS+ помогают преодолеть трудности, связанные с разработкой радиочастотных МЭМС-переключателей.

Благодаря своей скорости и точности, MEMS+ позволяет разработчику выполнить большое количество симуляций в разумные сроки и полностью исследовать пространство конструкции. Этот глубокий анализ может быть использован для оптимизации конструкции и исследования чувствительности к изменениям технологического процесса. Например, состояния притяжения, размыкания и метастабильности МЭМС-переключателя (или варактора) очень чувствительны к изменениям технологического процесса. Понимание влияния этих изменений имеет решающее значение для достижения желаемой производительности и выхода годной продукции. Чтобы понять эту чувствительность, инженеру-конструктору необходимо изменять многие параметры во время моделирования методом конечных элементов. Такой подход может занять недели моделирования с использованием обычных инструментов конечных элементов. С MEMS+ это моделирование может быть выполнено в течение нескольких часов, при этом для каждого отдельного моделирования требуется всего несколько минут.

Радиочастотные переключатели также демонстрируют сложные переходные процессы, такие как дребезг контактов и прилипание контактов. Эти явления, вместе с контактными силами и сопротивлением, должны быть точно смоделированы и включать поддержку конструкций с многослойными тонкими пленками и выступами с углублениями. Модели MEMS+ полностью справляются с этими задачами.

## Верификация и детальный анализ с помощью CoventorWare

Маршрут проектирования в MEMS+ не исключает использования обычного анализа методом конечных элементов. MEMS+ может экспортировать проекты в широко используемые 2D и 3D форматы для дальнейшего анализа в других инструментах. CoventorWare может напрямую импортировать модели MEMS+ и генерировать сетку для анализа программным обеспечением CoventorWare. Затем можно провести специальное моделирование для проверки квазистатических результатов, таких как напряжение при притяжении и отталкивании, или исследовать дополнительные результаты проектирования, такие как концентрация напряжений.

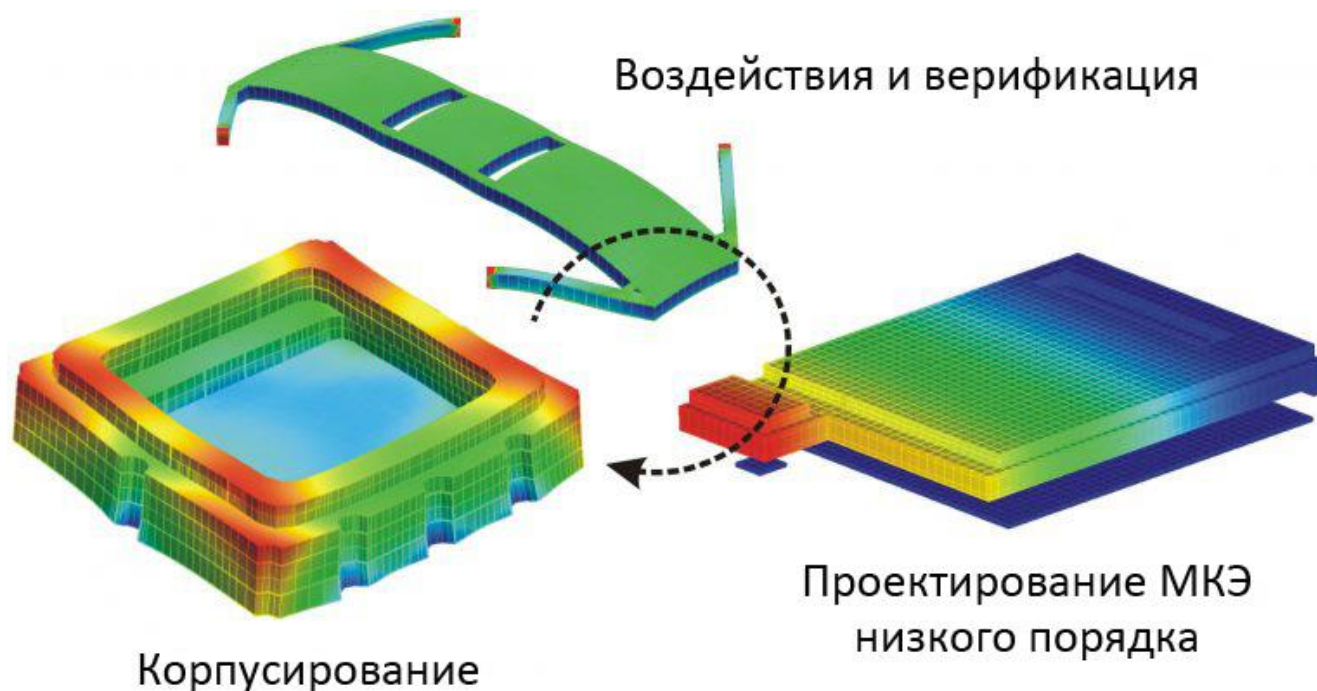


Рисунок 10. Анализатор CoventorWare для детального проектирования и верификации

## Моделирование схем и систем МЭМС + ИС

Радиочастотные переключатели и варакторы часто объединяются в массивы и должны быть интегрированы с окружающей их управляющей электроникой. Совместное моделирование МЭМС-устройств с электроникой необходимо для определения общей производительности и обеспечения соответствия конечного продукта проектным спецификациям. В отличие от обычных моделей конечных элементов, модели MEMS+ можно легко включить в блок-схемы Simulink и принципиальные схемы Cadence. В отличие от моделей, созданных вручную, модели MEMS+ точно отражают сложную физику переключателей и варакторов. Понимание этой физики крайне важно, поскольку она оказывает значительное влияние на конечную электрическую конструкцию устройства.

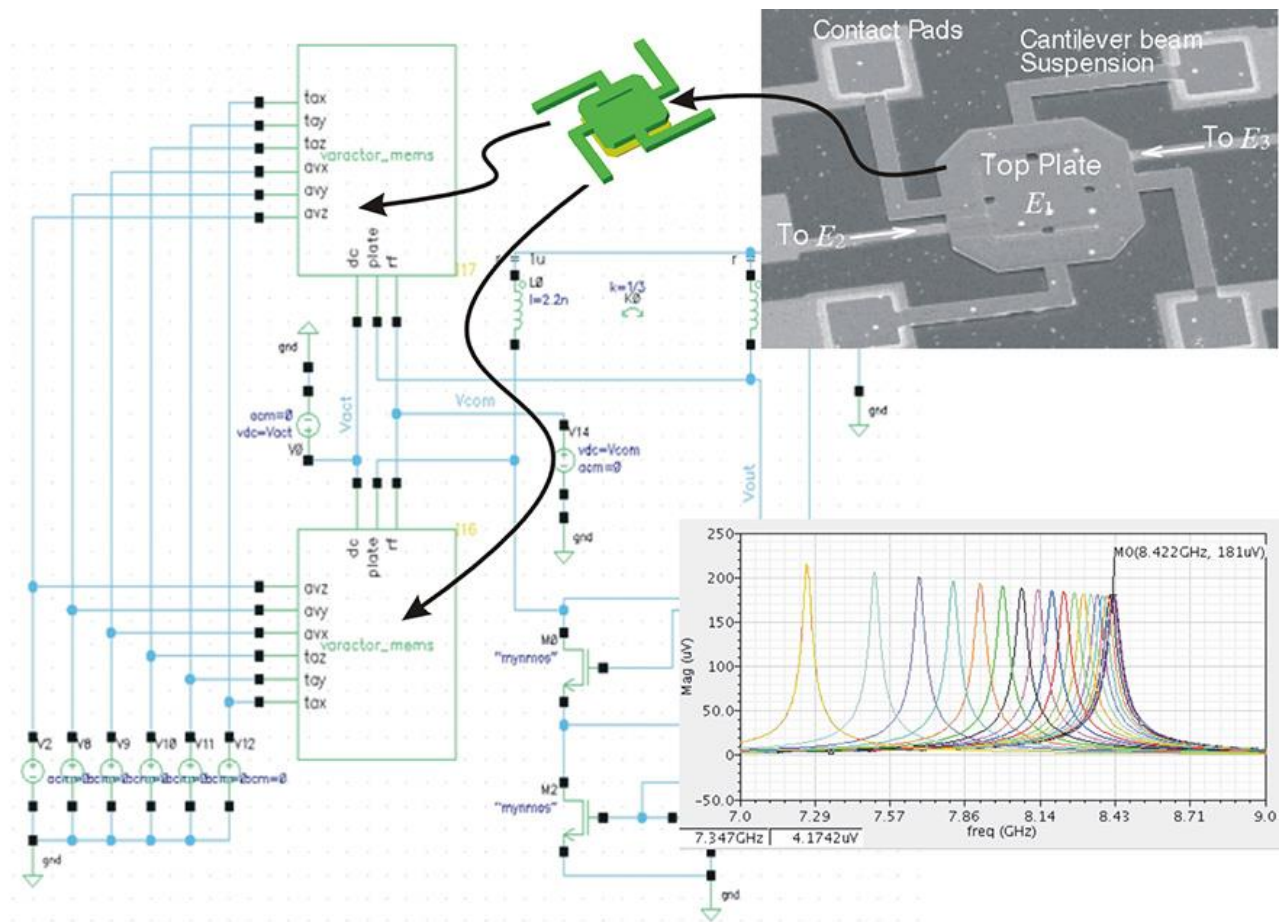


Рисунок 11. Генератор, управляемый напряжением, разработанный в программном обеспечении Cadence, с использованием модели варактора MEMS+ на основе конфигурации двух параллельных пластин с перестраиваемым конденсатором [2]



## Комплексная платформа для разработки радиочастотных переключателей и варакторов

MEMS+ - это уникальная среда для быстрой разработки радиочастотных МЭМС-продуктов, включая омические переключатели, варакторы и связанные с ними схемы управления. Имитационные модели MEMS+ являются параметрическими и точно отражают сложную физику радиочастотных МЭМС-устройств эффективным вычислительным способом. Такая эффективность вычислений позволяет быстро смоделировать МЭМС-конструкцию в ее схеме управления. Модели MEMS+ можно исследовать параметрически, изменяя производственные характеристики, такие как свойства материала и градиенты напряжения в тонкой пленке, а также геометрические свойства конструкции. Сложность и точность моделей MEMS+ обеспечивают совместную оптимизацию конструкции радиочастотных МЭМС и ИС для достижения оптимальной производительности и выхода годной продукции. Полевые решатели CoventorWare дополняют модели MEMS+ и могут использоваться для проверки деталей конструкции вместе с результатами модели MEMS+.

## Использованная литература:

1. Kurmendra, Dr; Kumar, R., "A review on RF micro-electro-mechanical-systems (MEMS) switch for radio frequency applications". Microsystem Technology (2020).
2. Cao, T.; Hu, T.; Zhao, Y., "Research Status and Development Trend of MEMS Switches: A Review". Micromachines 2020, 11, 694.
3. Yole Développement, "Status of the MEMS Industry 2019"
4. A. Mehdaoui, S. Rouvillois, G. Schröpfer, G. Lorenz, M. Kaynak, M. Wietstruck. "Residual Stress and Switching Transient Studies for BiCMOS Embedded RF MEMS Switch Using Advanced Electro-Mechanical Models." 14th International Symposium on RF MEMS and RF Microsystems (MEMSWAVE 2013), Germany, July 2013.
5. Jun Zou, Chang Liu, Jose E. Schutt-Aine, "Development of a wide-tuning range two-parallel-plate tunable capacitor for integrated wireless communication systems", Int. J. RF Microwave Computed Aided Eng., Vol.11, No. 5, pp. 322-329, Sept. 2001.
6. New Simulation and Experimental Methodology for Analyzing Pull-in and Release in MEMS Switches, M. Kamon, S. Maity, D. DeReus, Z. Zhang, S. Cunningham, S. Kim, J. McKillop, A. Morris, G. Lorenz, L. Daniel, IEEE Transducers 2013, Barcelona, SPAIN, 16-20 June 2013
7. Dynamic Characterization of Tunable RF MEMS Products, Dana DeReus, Shawn Cunningham, Saravana Natarajan, Art Morris, Jeff Hilbert, IEEE MEMS 2014, san Francisco, USA, January 26-30, 2014
8. Linearity and RF Power Handling on Capacitive RF MEMS Switches, David Molinero, Samira Aghaei, Arthur S. Morris, Shawn Cunningham, IEEE Transaction of Microwave Theory and



Techniques, Vol. 67, No 12, 2019

9. <https://www.coventor.com/blog/rf-mems-switches-understanding-their-operation-advantages-and-future/>
10. [https://www.globalspec.com/learnmore/telecommunications\\_networking/rf\\_microwave\\_wireless\\_components/rf\\_switches](https://www.globalspec.com/learnmore/telecommunications_networking/rf_microwave_wireless_components/rf_switches)
11. <https://www.coventor.com/mems-solutions/rf-switch-varactor/>
12. <https://www.coventor.com/blog/overcoming-rf-mems-switch-development-challenges/>