

# МЭМС структуры в системах приема радиосигналов

И.А. Ефремов

Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и  
Николая Григорьевича Столетовых, efremov.eia@gmail.com

**Аннотация** — В современных беспроводных системах приема и обработки радиосигналов в последнее время активно применяются передовые разработки в области микроэлектроники. Одна из наиболее развивающихся областей микроэлектроники – MEMS технология, использование которой позволяет улучшить качество обработки радиосигналов в мультистандартных реконфигурируемых телекоммуникационных устройствах новых поколений систем связи.

**Ключевые слова** — MEMS, перестраиваемые фильтры, широкополосный прием, моделирование, ADS, SDR.

## I. ВВЕДЕНИЕ

С развитием микроэлектронных технологий устройства приема радиосигналов обретают все большую способность качественно принимать и обрабатывать необходимый сигнал на фоне побочных сигналов и помех.

Для наилучшего приема используются разнообразные фильтрующие элементы и структуры, которые позволяют выделить нужный сигнал. Однако разработка устройства, которое могло бы качественно принимать сигналы с разными видами модуляции в широком диапазоне частот, требует оперативной перестройки фильтра на выбранный диапазон частот и изменения характеристик самого фильтра. Данное свойство приемного устройства позволяет сохранять высокое качество принимаемого сигнала независимо от его вида и местоположения в частотной области.

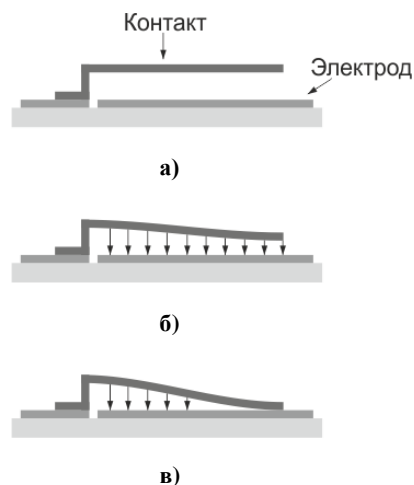
В статье рассмотрены вопросы применения MEMS (Micro-Electro Mechanical Systems) коммутаторов для построения перестраиваемых структур фильтров преселектора и трактов промежуточной частоты, а также их моделирования с использованием САПР Advanced Design System.

## II. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ О MEMS

В последнее время одним из приоритетных направлений в развитии элементов коммутации являются MEMS структуры. Можно сказать, что MEMS – это множество микроустройств самой разнообразной конструкции и назначения, в производстве которых используются модифицированные технологические приемы микроэлектроники. Данные системы получают путем комбинирования механических и элект-

ронных систем на общей подложке при помощи технологий микропроизводства. MEMS-технологии используются для разработки различных устройств – коммутаторов, электромеханической памяти, датчиков давления, движения и других. Для решения проблем, рассматриваемых в данной статье, MEMS структура будет использована в качестве устройства коммутации ВЧ сигналов.

Принцип работы MEMS коммутируемых систем основывается на принципе работы электромагнитного реле. Между контактом и электродом создается разность потенциалов, которая вызывает движение контакта и приводит к замыканию контакта и электрода (рис. 1).



**Рис. 1. Работа контакта коммутационной MEMS структуры; а) контакт в состоянии покоя; б) на контакт и электрод воздействует небольшая разность потенциалов; в) достигнуто пороговое значение разности потенциалов, контакт замкнулся**

В состоянии покоя контакт и электрод разомкнуты и имеют бесконечно большое сопротивление. При воздействии разности потенциалов между контактом и электродом контакт начинает прогибаться, приближаясь к электроду. По достижении порогового значения разности потенциалов контакт замыкается на электрод, образуя соединение, имеющее малое сопротивление. Соответственно, при отключении управляющего напряжения контакт возвращается в исходное положение, размыкая соединение.

Приведенная выше характеристика MEMS структуры делает их наиболее привлекательной по сравнению с коммутацией ВЧ сигналов при помощи переключаемых диодов, которая сейчас широко используется, так как дает возможность получать более качественные характеристики коммутируемого соединения в совокупности с малыми размерами используемых элементов и малым током потребления.

### III. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ MEMS КОММУТАТОРОВ В ПРЕСЕЛЕКТОРНЫХ ТРАКТАХ

Рассмотрим MEMS коммутатор для его применения в преселекторе приемника радиочастотных сигналов. Преселектор используется для выделения необходимого диапазона принимаемых частот, что позволяет избавляться от сильных помех, расположенных в радиочастотном спектре. Использование преселектора в приемниках, которые рассчитаны на прием единственного диапазона частот, не представляет никакой сложности, так как устанавливаемый на входе необходимый фильтр с нужной полосой пропускания используется постоянно. Однако в SDR приемниках, которые в основном используются для приема радиочастотных сигналов в диапазоне от 0 до 2000 МГц, необходимо использовать несколько фильтров, имеющих разные полосы пропускания. Для решения данной проблемы хорошо подойдут рассмотренные коммутационные MEMS структуры. Обладая хорошими коммутационными характеристиками, они могут быть использованы для выбора необходимого полосового фильтра из нескольких, установленных в преселекторе.

При помощи программы имитационного моделирования Advanced Design System компании Agilent было проведено моделирование преселектора, содержащего 5 полосовых фильтров Чебышева, настроенных на частоты 50 МГц, 150 МГц, 250 МГц, 350 МГц и 450 МГц. Часть данной модели приведена на рис. 2. Ширина полосы пропускания каждого фильтра 105 МГц. Данная модель преселектора дает возможность перекрыть диапазон в 500 МГц 5 полосами. Полосы пропускания перекрывают друг друга – это сделано для того, чтобы избежать потери сигнала на краях работы фильтров. Переключение фильтров в модели выполняет модель выключателя. Подобно MEMS структуре данная модель имеет большое сопротивление в выключенном состоянии и малое сопротивление во включенном состоянии. Каждый фильтр имеет коммутируемое соединение на входе и на выходе. Это сделано для того, чтобы сигнал не терял своей мощности и не образовывались шумы вне полосы пропускания выбранного фильтра. Моделирование было выполнено методом анализа по переменному току, что позволяет получить малосигнальные передаточные характеристики.

Поскольку MEMS структуры имеют очень быстрое время коммутации (менее 1 мкс), то приведенная структура преселектора будет хорошо работать в динамическом режиме. То есть быстрое переключение

диапазонов никак не отразится на форме и качестве конечного фильтрованного сигнала.

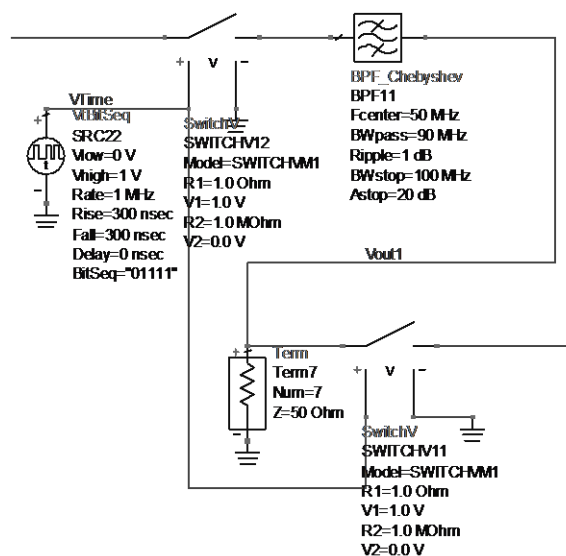


Рис. 2. Модель преселектора с использованием MEMS структуры

Результат моделирования (рис. 3а) отображает работу системы с выбранным фильтром с центральной частотой 250 МГц. Также приведен спектр системы с одновременным включением всех фильтров (рис. 3б).

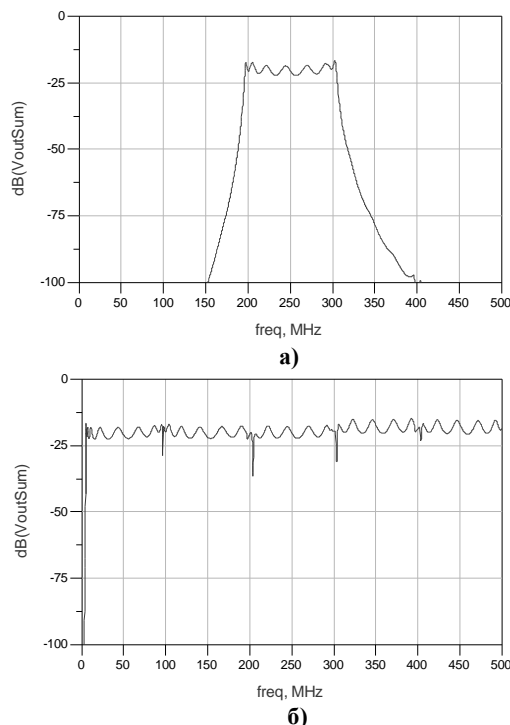


Рис. 3. Результаты моделирования преселектора с использованием MEMS структуры; а) спектр сигнала при одном включенном фильтре; б) накопленный спектр сигнала в динамическом режиме

В подобном преселекторе могут использоваться фильтры разных структур и с разными характеристиками. Поскольку MEMS коммутаторы не имеют внутренних нелинейных характеристик во включенном состоянии (искажения появляются в сигнале только в момент коммутации), то характеристики установленных фильтров остаются именно такими, какими они были бы при приеме единственного диапазона частот.

#### IV. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ MEMS КОММУТАТОРОВ ДЛЯ ФИЛЬТРАЦИИ УЗКОПОЛОСНЫХ СИГНАЛОВ

Рассмотренное в предыдущем параграфе применение MEMS коммутаторов для трактов преселектора позволяет выделить большую часть спектра для последующей обработки. Однако в выделенном диапазоне все равно располагается много сигналов, которые надо отфильтровать. Для этого можно применить фильтры, построенные на основе технологии с переключаемыми емкостями.

##### A. Теоретические сведения

Принцип работы такого фильтра на переключаемых емкостях лежит в использовании набора конденсаторов, являющейся частью LC фильтра, соединяемых между собой в любые последовательности при помощи MEMS коммутаторов [3].

На рис. 4 приведена структура, состоящая из 4 конденсаторов, подключаемых при помощи MEMS коммутаторов. В таком режиме работы из 4 конденсаторов можно получить 16 значений емкости, выбирая их при помощи цифрового управления.

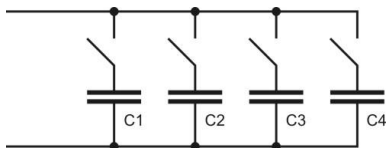


Рис. 4. Использование MEMS структуры для переключаемых емкостей

Подобным образом можно работать и с индуктивностями. Однако приведенная на рис. 4 структура может легко быть реализована в интегральной схеме, поскольку технологический процесс изготовления конденсаторов прост и его результат будет занимать на чипе немного места. Индуктивности, в свою очередь, представляют большую проблему при изготовлении их в кристалле из-за требования большого количества места. Их реализация в кристалле возможна только в случае работы со сверхвысокими частотами.

##### B. Реализация фильтра с переключаемыми емкостями

Для исследования фильтра с переключаемыми емкостями была построена модель, представляющая собой полосовой фильтр II структуры, созданный при помощи системы автоматического построения и расчета фильтров программы ADS для работы в диапазоне 900 МГц. Фильтр с такой частотой предполагается использовать непосредственно после преселектора, одна-

ко перестроив на другую центральную частоту, его можно будет применить и в тракте ПЧ. В каждом плече фильтра используется по 4 переключаемые емкости, включенных параллельно постоянной емкости. Если отключены все переключаемые емкости системы, то центральная частота фильтра равна 900 МГц. Часть принципиальной схемы фильтра приведена на рис. 5.

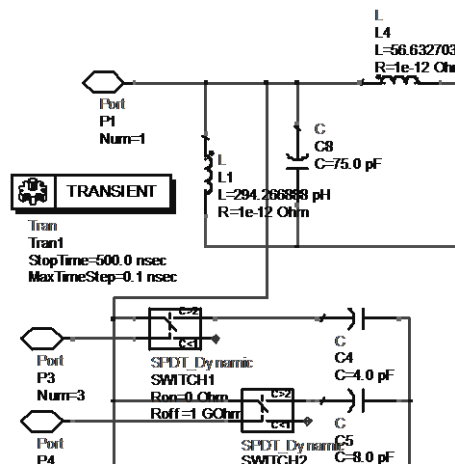


Рис. 5. Фильтр с использованием переключаемых емкостей

Приведенная модель фильтра была сформирована в один компонент, имеющий вход и выход ВЧ сигнала и входы управления коммутаторами для выбора необходимой емкости. Выбирая различные компоненты, можно получить емкости от 0 до 60 пФ с шагом 4 пФ.

##### C. Моделирование фильтра с переключаемыми емкостями

Для моделирования разработанного фильтра была построена схема в цифровой области проектирования программы ADS, приведенная на рис. 6.

На ВЧ вход фильтра подается белый шум с постоянным уровнем, что позволяет на выходе при помощи компонента «SpectrumAnalyzer» увидеть частотный диапазон сигнала, который пропускает фильтр.

Управление выбором нужной емкости в данном проекте реализовано при помощи установки необходимого номера значения емкости в компоненте ConstInt, который далее декодируется в параллельный поток управляющих сигналов, усиливается до уровня необходимого для срабатывания ключа и подается на входы компонента фильтра. Моделирование было проведено при помощи компонента ParameterSweep, в котором был настроен анализ каждого значения емкости.

Результаты моделирования приведены на рис. 7. На графике представлено несколько выделенных диапазонов, которые зависят от значений выбранных конденсаторов.

Необходимо отметить, что при линейном увеличении емкости центральная частота фильтра меняется нелинейно. Это обусловлено тем, что резонансная частота LC фильтров является обратно пропорциональной

номиналам компонентов, используемых в нем, так как на разных частотах конденсатор одного и того же номинала имеет разную проводимость. Для обеспечения точности выбираемой частоты необходимо использовать матрицу с наибольшим количеством конденсаторов наименьшего номинала.

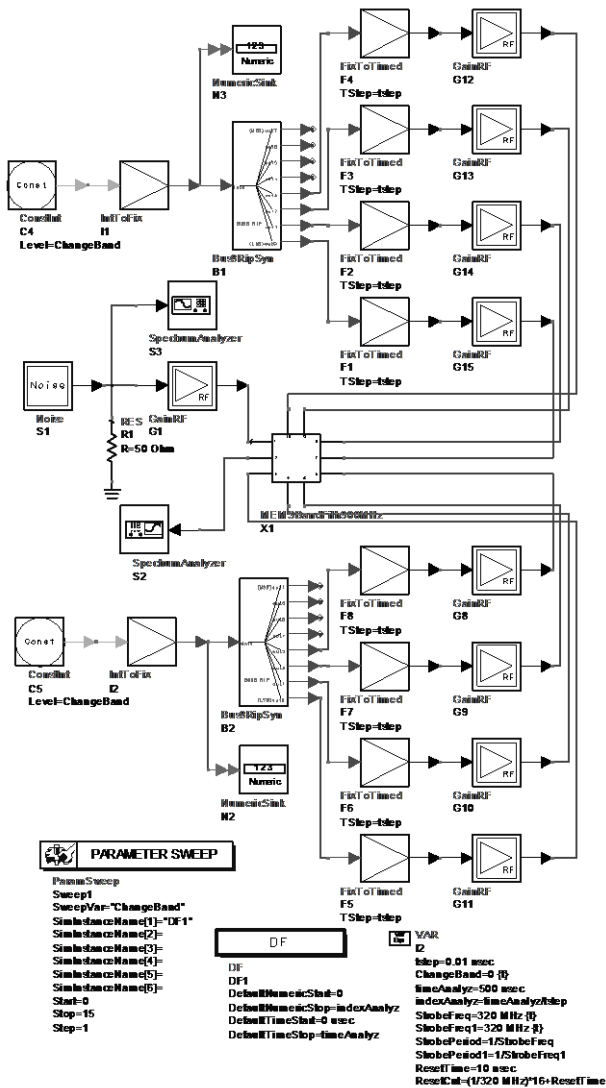


Рис. 6. Проект для моделирования фильтра на переключаемых емкостях

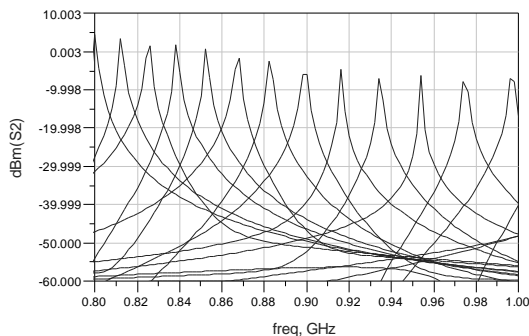


Рис. 7. Результат моделирования фильтра на переключаемых емкостях

На рис. 7 также видно, что в зависимости от выбранного диапазона уровень сигнала разный. Это объясняется тем, что изменяются только значения конденсаторов. Для подстройки мощности сигнала необходимо также менять индуктивность либо уровень сигнала на входе фильтра.

#### D. Моделирование фильтра с переменной шириной полосы пропускания

Помимо изменения центральной частоты фильтра при помощи MEMS переключателей можно также осуществить изменение полосы пропускания фильтра. Для этого необходимо иметь переключаемые индуктивности. Как уже упоминалось, индуктивности сложно реализовывать в интегральной микросхеме, поэтому их предполагается использовать как внешние компоненты. Однако при разработке сверхвысокочастотных компонентов индуктивности будут иметь малые значения и могут быть внесены в интегральный компонент.

Для моделирования фильтра с перестраиваемой полосой использовалась схема, приведенная на рис. 5. В ней произведены изменения, касающиеся переключения индуктивности L4 в прямом пути прохождения сигнала. Результат моделирования приведен на рис. 8.

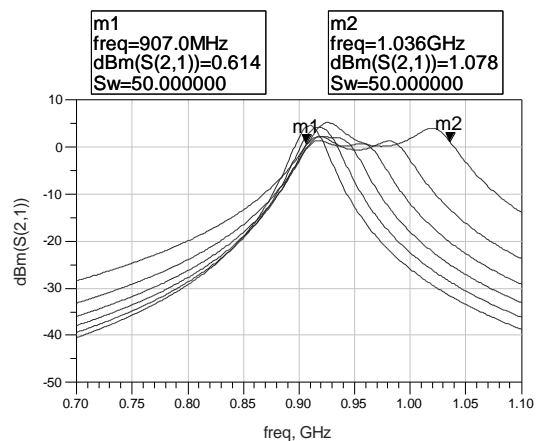


Рис. 8. Результат моделирования фильтра с изменяемой полосой пропускания

Как видно на рис. 8 фильтр структуры с переключаемыми емкостями и индуктивностями может быть настроен на разную полосу пропускания. При моделировании использовались по шесть значений индуктивности и емкости. В приведенном примере значение меняет индуктивность и один конденсатор из двух возможных, поэтому изменяется только одна граница фильтрации. Переключая две емкости, можно изменить полосу пропускания с сохранением центральной частоты фильтра.

На рис. 8 маркерами обозначена полоса пропускания фильтра шириной 130 МГц. Как видно из графика она неравномерна. Это объясняется малым порядком фильтра. Для повышения качества фильтрации необходимо использовать более сложные структуры фильтров.

## V. АНАЛИЗ ЭФФЕКТА КОММУТАЦИИ

При работе с MEMS переключателями искажения возникают только в момент коммутации. После окончания переходных процессов после переключения они не дают никаких помех и искажений, которые могли бы повлиять на характеристики систем, так как представляют собой проводник практически с нулевым сопротивлением.

Для анализа эффекта коммутации ключа была разработана модель, приведенная на рис. 9.

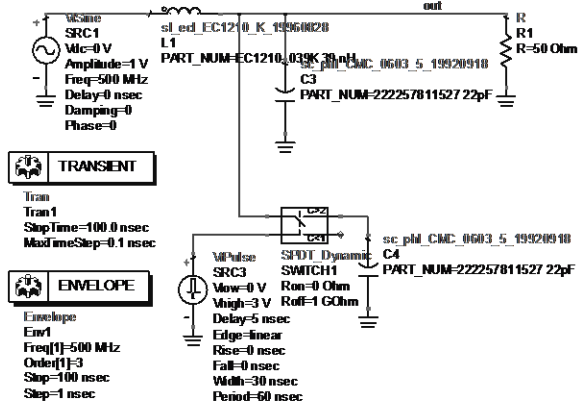


Рис. 9. Проект для моделирования эффекта коммутации

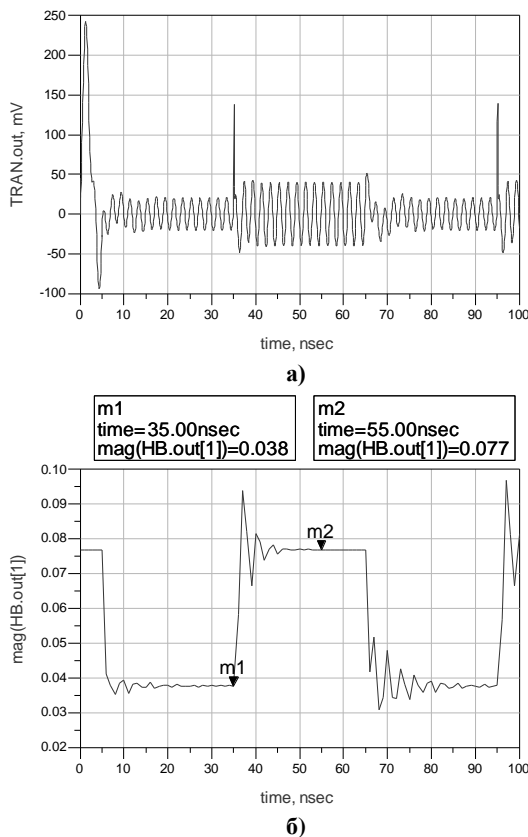


Рис. 10. Результаты моделирования эффекта коммутации; а) Временная форма сигнала; б) Значение уровня огибающей сигнала

В данном проекте реализован LC фильтр низкой частоты, к которому параллельно выходному конденсатору подключен коммутатор, выполняющий во время моделирования подключение/отключение еще одного конденсатора, тем самым меняя полосу пропускания. Моделирование выполнялось при помощи компонента Transient, позволяющего осуществлять анализ во временной области стандартными методами численного интегрирования, и компонента Envelope, проводящего анализ методом огибающей, используя комбинацию анализов в частотной и временной областях. Результат моделирования данного фильтра приведен на рис. 10.

На представленных графиках видно, что в момент коммутации происходит скачкообразное изменение параметров сигнала, и еще некоторое время идет установление устойчивой работы фильтра. На приведенной временной развертке сигнала (рис. 10а) некоторое время после коммутации видно непостоянство огибающей. На рис. 10б видно, что переходный процесс перестройки моделируемого фильтра занимает примерно 20 нс.

Однако приведенная модель является идеальной, так как MEMS компонент в данном случае моделируется только в виде переключателя, однако при реализации в интегральном виде он будет представлять собой некоторую цепочку RLC элементов. Используя материалы исследований в области построения интегрированных MEMS структур [6], была построена модель переключателя, представленная на рис. 11.

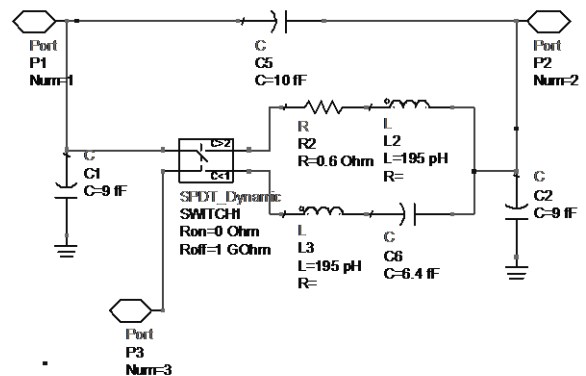


Рис. 11. Эквивалентная схема MEMS коммутатора

Было проведено моделирование структуры, приведенной на рис. 11, используя проект для исследования эффекта коммутации, приведенный на рис. 9. Однако, поскольку емкости, используемые в эквивалентной модели, имеют очень маленькие номиналы (фемтофарады), моделирование во временной области стало невозможно, так как требовался очень маленький шаг анализа. Анализ был проведен методом огибающей. Результат моделирования показан на рис. 12.

По графику (рис. 12) видно, что форма и характеристики сигнала, полученного при анализе эквивалентной схемы, практически полностью соответствуют характеристикам, полученным при использовании



только модели переключателя (рис. 10). Значит, данные, которые будут получены при моделировании схем, использующих только модель переключателя, можно считать верными. Моделирование полной эквивалентной схемы в совокупности с другими компонентами в настоящее время невозможно, потому, что, как уже упоминалось, емкости эквивалентной схемы имеют очень малые значения, что сильно нагружает процесс моделирования.

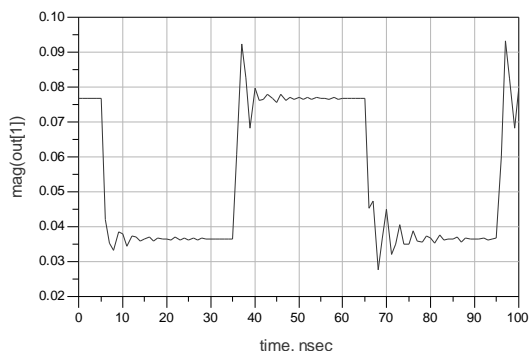


Рис. 12. Результат моделирования эквивалентной схемы MEMS коммутатора

## VI. ПРИМЕНЕНИЕ MEMS ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЕЙ

Рассмотренные в данной статье MEMS переключатели, применительно к выбору широкого диапазона частот для использования в преселекторе и выбора узкого диапазона частот для окончательной фильтрации сигнала, могут быть применены в широкодиапазонных сканирующих приемниках. Использование данных структур в устройствах стандартного применения (телефонах, радиоприемниках и других) нецелесообразно, так как нет необходимости в большой скорости переключения диапазонов частот. Единственное, где может потребоваться быстрая перестройка – это стандарт GSM (в нем используется метод расширения спектра при помощи ППРЧ (Постоянной Перестройки Радио Частоты)), однако в телефонах, использующих данный стандарт, используется перестройка гетеродина для вывода частоты канала в центр ПЧ.

Пример использования фильтров с MEMS переключателями в сканирующих SDR приемниках специализированного назначения можно увидеть в структурной схеме, показанной на рис. 13.

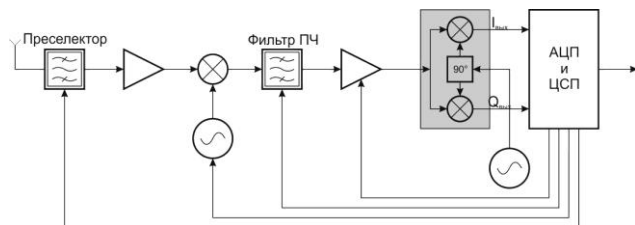


Рис. 13. Структурная схема SDR

Преселектор в данном случае будет использоваться для выбора необходимого диапазона радиочастот. Быстрое переключение позволит просматривать большой диапазон частот с высоким качеством. Перестройка

фильтра ПЧ позволит качественно принимать сигналы с различной шириной канала (позволяя регулировать полосу пропускания фильтра) либо выделять нужный узкополосный сигнал в полосе ПЧ, который необходимо обработать.

## VII. ВЫВОДЫ

Рассмотренное применение MEMS структур в качестве коммутаторов высокочастотных сигналов позволит создавать фильтры как широкополосные (для преселекторов), так и узкополосные с изменяемой полосой пропускания (для промежуточной частоты), способные к быстрой перестройке и небольшим искажениям. Использование таких фильтров повысит качество и характеристики SDR систем.

Как было сказано, фильтры с использованием MEMS структур могут быть полностью интегрированными (реализация банка конденсаторов может быть осуществлена в кристалле), что позволит получить малый размер конечного устройства.

Приведенные в данной статье модели могут быть использованы для построения сквозной модели специализированного приемника радиосигналов.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Резнев А.А., Вернер В.Д. Тенденции развития МЭМС. Москва: ООО «Амиант», 2010. 275 с.
- [2] Ефремов И.А. Автоматизация проектирования телекоммуникационных систем на основе программно-определяемого радио // 15-ый Юбилейный Международный молодежный форум «Радио-электроника и молодежь в XXI веке». Сб. материалов форума. Харьков: ХНУРЭ, 2011. Т. 3. С. 95 – 96.
- [3] Elliott R. Brown. RF-MEMS Switches for Reconfigurable Integrated Circuits // IEEE transactions on microwave theory and techniques, 1998. Vol. 46. No. 11. P. 1868–1880.
- [4] Jeffrey L. Hilbert. RF-MEMS for Wireless Communications // IEEE Communications Magazine, 2008. No. 8. P. 68 – 74.
- [5] RF MEMS Switches and Integrated Switching Circuits / A. Q. Liu, A. B. Yu, M. F. Karim, M. Tang // Journal of semiconductor technology and science, 2007. Vol. 7. No. 3. P. 166–176.
- [6] A High Isolation Series-Shunt RF MEMS Switch / Yuan-Wei Yu, Jian Zhu, Shi-Xing Jia, Yi Shi // Sensors, 2009. No. 9. P. 4455 – 4464.
- [7] Capacitive and Resistive RF-MEMS switches 2.5D & 3D Electromagnetic and Circuit Modelling / M.A. Llamas, D. Girbau, E.Pausas, L. Pradell, S. Aouba, C. Villeneuve, V. Puyal, P. Pons, R.Plana, S. Colpo, F. Giacomozzi // Proceedings of the 2009 Spanish Conference on Electron Devices (Santiago de Compostela, Feb 11-13, 2009). SdC, 2009. P. 451–454.
- [8] Makoto Mita, Hiroshi Toshiyoshi. An equivalent-circuit model for MEMS electrostatic actuator using open-source software Qucs // IEICE Electronics Express, 2009. Vol. 6. No. 5. P. 256–263.
- [9] Tahir F.A., Aubert H., Girard E. Equivalent electrical circuit for designing MEMS-controlled reflectarray phase shifters // Progress In Electromagnetics Research, 2010. PIER–100. P. 1–12.