



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-3-26-35>

УДК 621.3.049.7

## СИСТЕМНЫЕ МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МАКРОМОДЕЛИ ЛОГИЧЕСКИХ МЭМС-ВЕНТИЛЕЙ

А. А. СОЛОВЬЕВ<sup>1</sup>, Е. Ф. ПЕВЦОВ<sup>1</sup>, В. А. КОЛЧУЖИН<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*МИРЭА – Российский технологический университет (Москва, Российская Федерация)*

<sup>2</sup>*Qorvo Munich GmbH (Мюнхен, Германия)*

**Аннотация.** Актуальность исследования обусловлена стремительным развитием микроэлектромеханических систем (МЭМС), которые находят применение в качестве логических элементов благодаря низкому энергопотреблению, высокой надежности и возможности перепрограммирования в процессе работы. Однако существующие подходы к проектированию логических МЭМС-вентилей требуют разработки компактных и точных математических моделей для анализа их динамических характеристик и логических операций на системном уровне. В статье представлен метод синтеза параметрических математических моделей логических МЭМС-вентилей на основе кремниевых резонаторов с электростатическим возбуждением. Разработана библиотека конструктивных макромоделей, включающая трех-, пяти- и девятиконтактные МЭМС-резонаторы, которые позволяют проводить анализ статических, частотных и динамических характеристик. Проведены анализ эффекта схлопывания электродов, гармонический анализ и симуляции логических операций, таких как НЕ, И, ИЛИ-НЕ и исключаящее ИЛИ. Разработанные модели могут быть использованы для проектирования аналого-цифровых и цифро-аналоговых преобразователей, триггеров и арифметико-логических устройств на основе МЭМС-технологий.

**Ключевые слова:** микроэлектромеханические системы, МЭМС-резонаторы, логические элементы, вентили, системное моделирование, язык описания аппаратуры.

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

**Для цитирования.** Соловьев, А. А. Системные математические макромодели логических МЭМС-вентилей / А. А. Соловьев, Е. Ф. Певцов, В. А. Колчужин // Доклады БГУИР. 2025. Т. 23, № 3. С. 26–35. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-3-26-35>.

## SYSTEM-LEVEL MATHEMATICAL MACRO-MODELS OF LOGIC MEMS GATES

ALEKSANDR A. SOLOVEV<sup>1</sup>, EVGENY F. PEVTSOV<sup>1</sup>, VLADIMIR A. KOLCHUZHIN<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*MIREA – Russian Technological University (Moscow, Russian Federation)*

<sup>2</sup>*Qorvo Munich GmbH (Munich, Germany)*

**Abstract.** The relevance of the study is due to the rapid development of microelectromechanical systems (MEMS), which are used as logic elements due to low power consumption, high reliability and the ability to reprogram during operation. However, existing approaches to the design of MEMS logic gates require the development of compact and accurate mathematical models to analyze their dynamic characteristics and logical operations at the system level. The article presents a method for synthesizing parametric mathematical models of MEMS logic gates based on silicon resonators with electrostatic excitation. A library of design macromodels has been developed, including three-, five- and nine-pin MEMS resonators, which allow analyzing static, frequency and dynamic characteristics. The analysis of the electrode collapse effect, harmonic analysis and simulation of logical operations such as NOT, AND, OR-NOT and exclusive OR are carried out. The developed models can be used for designing analog-to-digital and digital-to-analog converters, triggers and arithmetic logic devices based on MEMS technologies.

**Keywords:** microelectromechanical systems, MEMS resonators, logic elements, gates, system modeling, hardware description language.

**Conflict of interests.** The authors declare no conflict of interests.

**For citation.** Solovev A. A., Pevtsov E. F., Kolchuzhin V. A. (2025) System-Level Mathematical Macro-Models of Logic MEMS Gates. *Doklady BGUIR*. 23 (3), 26–35. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-3-26-35> (in Russian).

## Введение

Микроэлектромеханические системы (МЭМС) представляют собой одно из наиболее перспективных направлений современной микроэлектроники, которое находит применение в различных областях – от датчиков [1] и исполнительных устройств [2] до сложных логических схем [3]. В последние годы наблюдается значительный рост интереса к использованию МЭМС-резонаторов в качестве логических элементов, что обусловлено их низким энергопотреблением, высокой надежностью и возможностью перепрограммирования в процессе работы [4]. Однако, несмотря на очевидные преимущества, разработка эффективных логических МЭМС-клапанов требует решения ряда задач, связанных с созданием точных и компактных математических моделей, позволяющих анализировать их динамические характеристики и логические операции на системном уровне.

Предметом данного исследования являются системные математические модели логических МЭМС-клапанов на основе кремниевых резонаторов с электростатическим возбуждением. Актуальность исследования обусловлена необходимостью разработки новых подходов к проектированию логических элементов, которые могли бы конкурировать с традиционными КМОП-технологиями по энергоэффективности и функциональной гибкости. Гипотеза исследования заключается в том, что использование электростатического возбуждения и резонансных явлений в МЭМС-резонаторах позволяет реализовать логические операции с высокой точностью и низким энергопотреблением.

Степень изученности проблемы показывает, что, несмотря на значительное количество работ, посвященных МЭМС-резонаторам [5, 6], вопросы системного моделирования логических элементов на их основе остаются недостаточно исследованными. В частности, отсутствуют универсальные библиотеки макромоделей, которые могли бы быть использованы для проектирования сложных цифровых схем. В [7] рассмотрены вопросы синтеза и анализа пятиконтактного логического МЭМС-элемента. В данной статье представлен более комплексный подход, предложен метод синтеза библиотеки параметрических математических моделей логических МЭМС-клапанов на основе трех-, пяти- и девятиконтактных МЭМС-резонаторов.

Цель исследования – создание системных моделей, позволяющих анализировать статические, частотные и динамические характеристики МЭМС-резонаторов, а также реализовать на их основе логические операции. Для этого использован язык описания аппаратуры VHDL-AMS, что обеспечивает точное описание электромеханического поведения резонаторов. Проведены анализ эффекта схлопывания электродов, гармонический анализ и симуляция логических операций, таких как НЕ, И, ИЛИ-НЕ и исключающее ИЛИ.

Результаты исследования демонстрируют возможность реализации логических операций на основе МЭМС-резонаторов с электростатическим возбуждением, что открывает перспективы для создания энергоэффективных и перепрограммируемых цифровых схем. Разработанные модели могут быть использованы для проектирования аналого-цифровых и цифро-аналоговых преобразователей, триггеров и арифметико-логических устройств на основе МЭМС-технологий.

## Трехконтактный МЭМС-резонатор

Трехконтактный МЭМС-резонатор представляет собой систему «пружина–масса–демпфер», состоящую из недеформируемой сейсмической массы, подвешенной на четырех подвесах (рис. 1). Собственная частота выбрана 439,49 кГц, сейсмическая масса – 0,019 мкг, зазор между сейсмической массой и боковыми электродами – 4 мкм.

Для создания системной модели трехконтактного кремниевого микрорезонатора [8] с электростатическим возбуждением был выбран язык описания аппаратных средств VHDL-AMS. Аналоговое поведение компонентов реализовано через величины, терминалы и уравнения. Меха-

ническое поведение резонатора описывается с помощью следующего дифференциального уравнения 2-го порядка:

$$m\ddot{u}(t) + d\dot{u}(t) + ku(t) = F_{exp}(t),$$

где  $d$  – коэффициент демпфирования;  $t$  – время;  $u$  – смещение сейсмической массы от положения равновесия;  $F_{exp}(t)$  – внешняя сила, приводящая резонатор в движение.

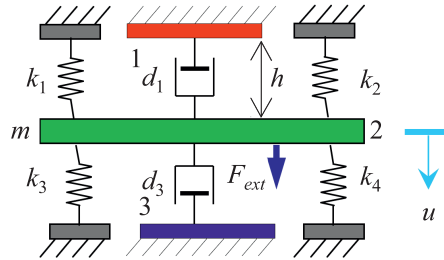


Рис. 1. Эквивалентная механическая схема трехконтактного резонатора  
Fig. 1. Equivalent mechanical circuit of a three-terminal resonator

Согласно расчетам, коэффициент демпфирования  $d = 2,57 \cdot 10^{-6}$  мкН·с/мкм для  $Q = 20$ . Резонатор возбуждается в нужном направлении электростатическими силами  $F_1, F_2, F_3, F_4$  согласно следующему уравнению:

$$F_{elec}(t) = \frac{1}{2} \sum_{r=1,2,3,4} \frac{\partial C_{r5}}{\partial u} (V_r - V_5)^2,$$

где  $C_{r5}$  – емкость между подвижным 5 и боковым  $r$  электродами;  $V_r$  – электрический потенциал на  $r$ -электроде.

Согласно уравнению, электростатическая сила, приложенная к контактам, пропорциональна квадрату разницы потенциалов, а направление силы определяется знаком производной  $\partial C_{r5}/\partial u$ .

Для трехконтактной системы электрическая эквивалентная схема состоит из двух конденсаторов (рис. 2, а) без учета межэлектродных паразитных емкостей. Токи, протекающие в такой системе, можно представить в виде графа (рис. 2, б).

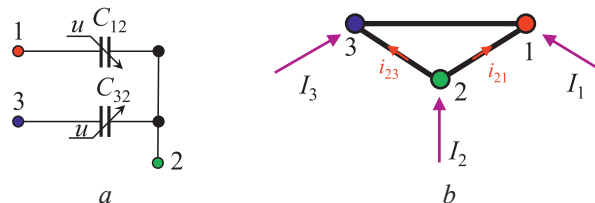


Рис. 2. Эквивалентная электрическая схема МЭМС-резонатора (а) и граф узловых токов (б)  
Fig. 2. Equivalent electrical circuit of a MEMS resonator (a) and a graph of nodal currents (b)

Для нахождения емкостей между подвижным и боковыми электродами используется приближение плоскопараллельного конденсатора согласно выражениям:

$$C_{12}(u) = \xi \xi_0 \frac{A}{h+u}; \quad C_{32}(u) = \xi \xi_0 \frac{A}{h+u},$$

где  $h$  – зазор между электродами;  $u$  – смещение, ограниченное зазором,  $|u| < h$ .

Внешние токи, втекающие в узлы, исходя из графа узловых токов без учета межэлектродных паразитных емкостей (рис. 2, б) имеют следующий вид:

$$I_2 = -i_{21} - i_{23}.$$

За положительное направление принят втекающий в узел ток. Токи  $i_{12}$  и  $i_{32}$ , протекающие через конденсаторы  $C_{12}$  и  $C_{32}$ , пропорциональны количеству зарядов  $Q_{12}$  и  $Q_{32}$ , протекающих в единицу времени:

$$i_{r2} = \frac{\partial}{\partial t} Q_{r2} = \frac{\partial}{\partial t} (C_{r2} (V_r - V_2)).$$

Как видно из уравнения, изменение тока может быть вызвано изменением приложенных электрических потенциалов или перераспределением заряда из-за движения электрода.

В статье представлена концепция МЭМС-резонатора, функционирующего в режиме электро-механической обратной связи, где возбуждение механических колебаний и получение выходного сигнала осуществляется электрически. Механические колебания резонатора возбуждались электрическим способом с помощью синусоидального сигнала, подаваемого на управляющий электрод. Выходной сигнал получался путем детектирования тока на чувствительном электроде. Такой подход отличает устройство от традиционных датчиков и исполнительных устройств, где механическое возбуждение детектируется электрически, а электрическое возбуждение приводит к механическим колебаниям. Данная схема требует более сложной обработки сигналов и управления, что открывает новые перспективы для повышения точности и эффективности работы устройства. Это позволяет повысить чувствительность и реализовать новые функциональные возможности по сравнению с традиционными МЭМС-устройствами.

Функционирование разработанной модели проверено путем симуляции статического, частотного и динамического (во временной области) откликов структуры. Анализ эффекта схлопывания электродов состоял в вычислении смещения подвижного электрода под воздействием приложенного напряжения. Напряжение схлопывания – важный параметр, который ограничивает максимально возможные прикладываемые напряжения к структуре. Напряжение схлопывания между электродами 1–2 равняется 275,87 В согласно формуле

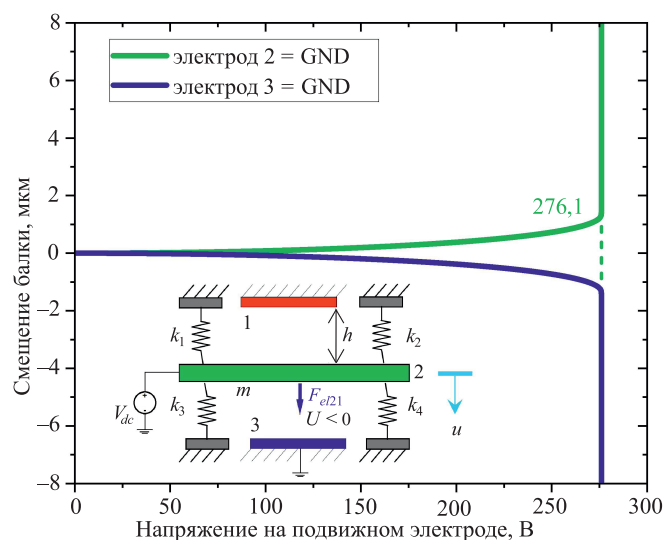
$$V_{PI} = \sqrt{\frac{8k_{eff} gap^3}{27\xi A}},$$

где  $gap = h$  – начальный зазор между подвижным и неподвижными электродами;  $\xi$  – диэлектрическая проницаемость среды;  $A$  – площадь перекрытия между электродами (площадь срабатывания).

На рис. 3 представлены два случая:

- 1) электрод 1 – плавающий, электрод 3 имеет нулевой потенциал, линейно меняющееся напряжение подается на подвижный электрод 3;
- 2) электрод 1 имеет нулевой потенциал, электрод 3 – плавающий, линейно меняющееся напряжение подается на подвижный электрод.

Как видно из рис. 3, напряжение схлопывания составляет 276,1 В.



**Рис. 3.** Анализ эффекта схлопывания при смещении боковых электродов  
**Fig. 3.** Analysis of the pull-in effect with lateral electrode displacement

Гармонический анализ заключается в симуляции реакции структуры на внешнее гармоническое возбуждение. Работа логического элемента основана на изменении резонансной частоты подвижного электрода с использованием эффекта электростатического смягчения жесткости резонатора. Для определения оптимальных величин напряжения смещения, подаваемого на подвижный

электрод, и амплитуды импульсных сигналов, подаваемых на боковые электроды, была проведена серия симуляций. Зависимости тока на чувствительном электроде 1 от частоты напряжения смещения на подвижном электроде 2 приведены на рис. 4. При увеличении напряжения на подвижном электроде электростатическая сила возрастает, что вызывает смещение резонансного пика влево (из-за электростатического смягчения жесткости резонатора) и увеличение амплитуды осцилляций.

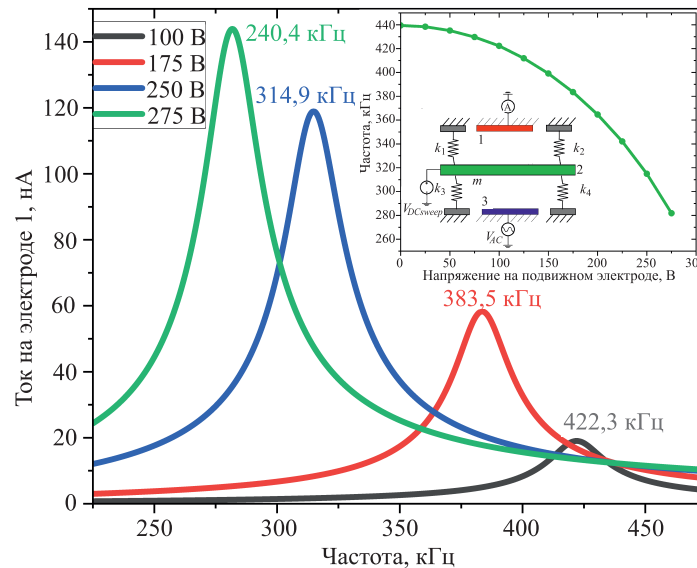


Рис. 4. Зависимость амплитудно-частотных характеристик от напряжения на подвижном электроде 2,  $Q = 20$ ,  $V_3 = 1$  В (AC)

Fig. 4. Amplitude-frequency response dependence on voltage applied to movable electrode 2,  $Q = 20$ ,  $V_3 = 1$  V (AC)

На каждый период импульсного сигнала на цифровом входе нужно как минимум 10 периодов синусоидального сигнала на приводе (электроде 4), чтобы элемент успел переключиться в другое состояние. Поэтому частота переключения логического элемента будет в 10 раз меньше, чем частота резонанса.

Реализация логических операций построена на принципе резонанса [6], когда резонансная частота подвижного электрода и частота подаваемого сигнала совпадают, и высокий выходной ток емкостным способом детектируется на чувствительном электроде 1. Для реализации логических операций на электрод 3, который используется как цифровой вход элемента, подается импульсный сигнал. Необходимо подключить внешние источники напряжения, структурные нагрузки (узловые силы) и задать параметры симуляции (размер шага по времени, время моделирования). На рис. 5 приведена схема подключения для выполнения логической операции НЕ.

Для реализации логических операций на подвижный электрод 2 подавалось смещение 250 В, на управляющий электрод 3, который используется как цифровой вход элемента, подавался импульсный сигнал, где напряжение цифровой «1» принято 225 В, а напряжение цифровой «0» равно 0 В. Напряжение цифровой «1» выбрано меньше напряжения смещения подвижного электрода, так как для снятия на чувствительном электроде 1 сигнала по току необходима разность потенциалов между 1–2 и 2–3 электродами.

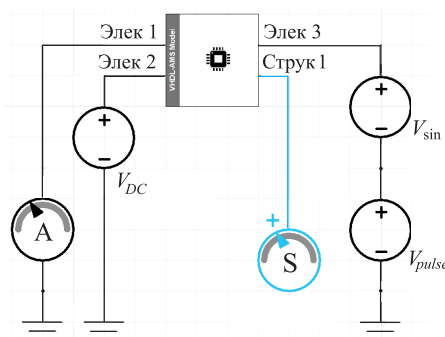
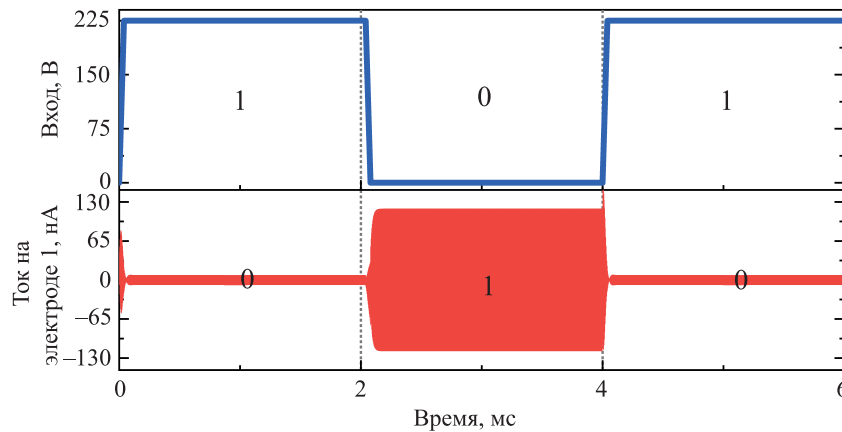


Рис. 5. Подключение микрорезонатора и внешних источников для выполнения логической операции НЕ  
Fig. 5. Connecting a microresonator and external sources to perform a NOT logic operation

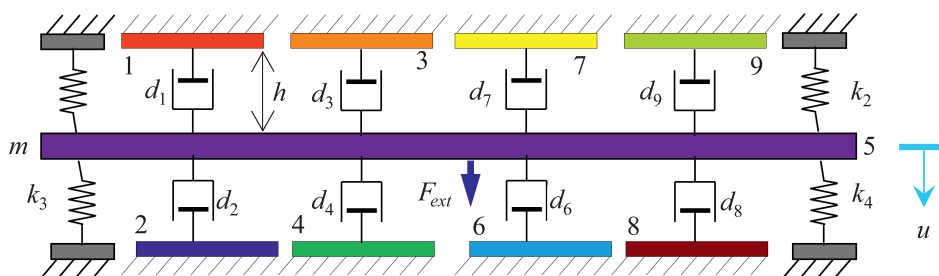
Если частота синусоидального сигнала возбуждения на приводном электроде 3 равна 314,89 кГц (рис. 4), только входной сигнал «0» приводит к совпадению между вынужденной резонансной частотой подвижного электрода и частотой сигнала возбуждения, что соответственно вызывает резонанс, и детектируется «высокий» выходной сигнал по току на чувствительном электроде 1. В случае, когда входной сигнал «1», – выходной сигнал будет слабым. Следовательно, резонатор в данном случае работает как логический вентиль НЕ (NOT). На рис. 6 представлена осциллограмма, демонстрирующая работу вентиль НЕ на основе разработанной модели резонатора.



**Рис. 6.** Осциллограмма, демонстрирующая реализацию логической операции НЕ  
**Fig. 6.** Oscilloscope trace demonstrating the implementation of the NOT logic operation

### Девятиконтактный МЭМС-резонатор

Для реализации мультивходового логического вентиля необходимо большее количество боковых электродов. На рис. 7 изображен девятиконтактный МЭМС-резонатор, который представляет собой систему «пружина–масса–демпфер», состоящую из восьми боковых электродов – по четыре с каждой стороны от недеформируемой сейсмической массы, подвешенной на четырех подвесах.



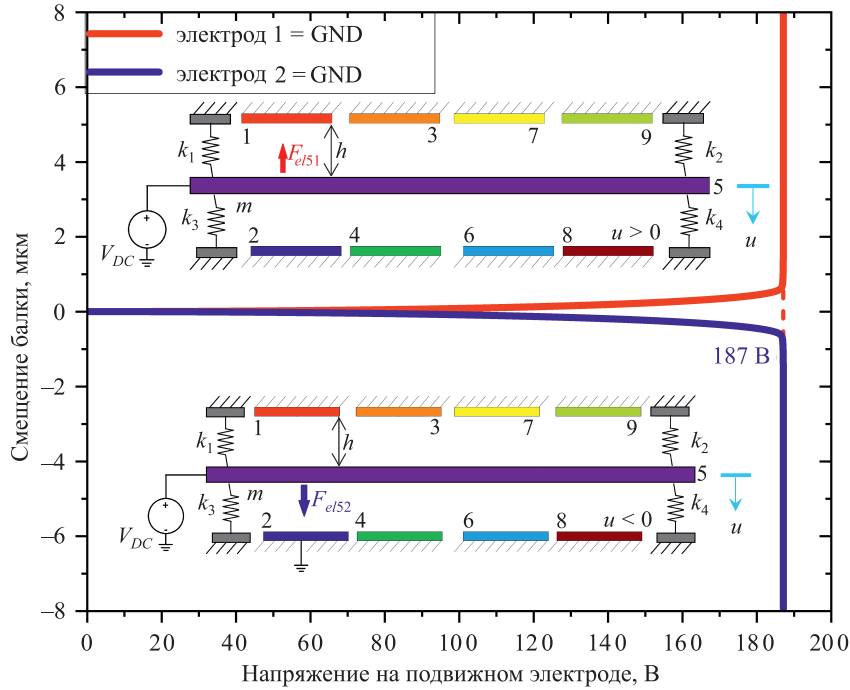
**Рис. 7.** Эквивалентная механическая схема девятиконтактного резонатора  
**Fig. 7.** Equivalent mechanical circuit of a nine-terminal resonator

На рис. 8 показан анализ схлопывания, иллюстрирующего смещение подвижного электрода под воздействием меняющегося напряжения. Рассмотрены два случая:

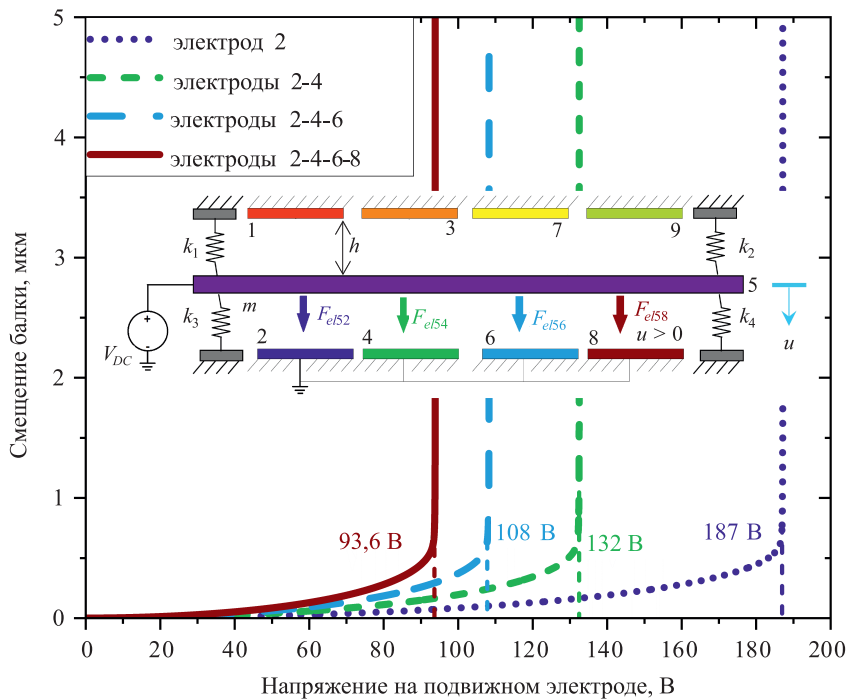
- 1) электрод 1 имеет нулевой потенциал, а остальные электроды – плавающие, и линейно меняющееся напряжение подается на подвижный электрод;
- 2) электрод 2 имеет нулевой потенциал, а остальные электроды – плавающие, и линейно меняющееся напряжение подается на подвижный электрод.

На рис. 9 представлены четыре случая:

- 1) электрод 2 имеет нулевой потенциал, остальные электроды – плавающие, линейно меняющееся напряжение подается на подвижный электрод 5;
- 2) электроды 2 и 4 имеют нулевые потенциалы, остальные электроды – плавающие, линейно меняющееся напряжение подается на подвижный электрод;
- 3) электроды 2, 4 и 6 имеют нулевые потенциалы, остальные электроды – плавающие, линейно меняющееся напряжение подается на подвижный электрод;



**Рис. 8.** Анализ эффекта схлопывания при смещении двух электродов с разных сторон балки  
**Fig. 8.** Analysis of the pull-in effect due to the displacement of two electrodes on opposite sides of the beam

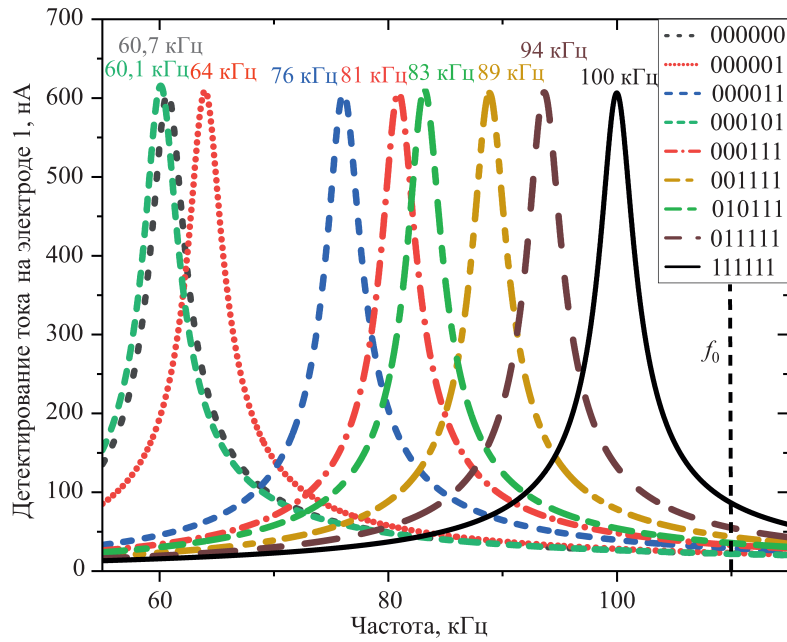


**Рис. 9.** Анализ эффекта схлопывания при смещении четырех электродов с одной стороны  
**Fig. 9.** Analysis of the pull-in effect due to the displacement of four electrodes on one side

4) электроды 2, 4, 6 и 8 имеют нулевые потенциалы, остальные электроды – плавающие, линейно меняющееся напряжение подается на подвижный электрод.

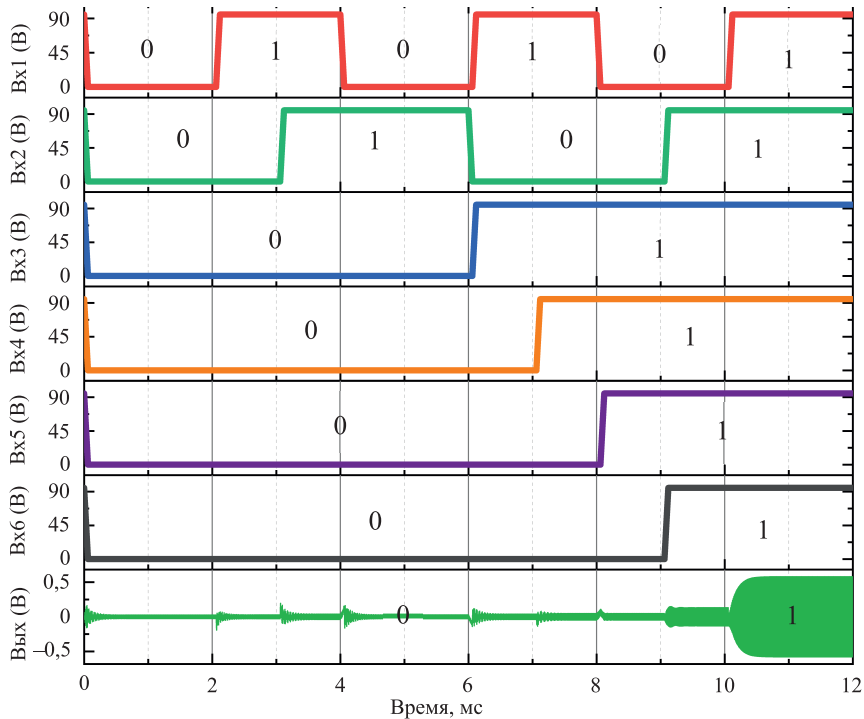
Как видно из рис. 9, в первом случае, когда оба неподвижных электрода имеют нулевые потенциалы, напряжение схлопывания составляет 187 В, что меньше, чем во втором случае (132 В). Это объясняется удвоением площади подключенных электродов и, следовательно, увеличением электростатической силы между подвижным и боковыми электродами. В третьем и четвертом случаях площадь подключенных электродов больше, напряжение схлопывания становится меньше и составляет 108,0 и 93,6 В соответственно.

На рис. 10 представлены амплитудно-частотные характеристики девятиконтактного МЭМС-резонатора с собственной частотой 110 кГц, массой 22 мкг, при различных комбинациях на цифровых входах.



**Рис. 10.** Амплитудно-частотные характеристики девятиконтактного резонатора при различных входных комбинациях цифровых входов: «1» – 95 В, «0» – 0 В,  $V_4 = 1$  В (AC),  $V_5 = 95$  В (DC),  $Q = 40$   
**Fig. 10.** Amplitude-frequency characteristics of a nine-contact resonator with different input combinations of digital inputs: «1» – 95 V, «0» – 0 V,  $V_4 = 1$  V (AC),  $V_5 = 95$  V (DC),  $Q = 40$

Данный резонатор позволяет реализовать, например, шестивходовый логический вентиль И, осциллограмма которого представлена на рис. 11.



**Рис. 11.** Осциллограмма, демонстрирующая работу шестивходового логического вентиля И  
**Fig. 11.** Oscillogram showing the operation of a six-input AND gate



## Заключение

1. Разработаны системные математические модели логических МЭМС-клапанов на основе кремниевых резонаторов с электростатическим возбуждением. Для создания моделей использован язык описания аппаратуры VHDL-AMS, что позволило точно описать электромеханическое поведение резонаторов и провести анализ их статических, частотных и динамических характеристик. Создана библиотека конструктивных макромоделей, включающая трех-, пяти- и девятиконтактные МЭМС-резонаторы, которые могут быть использованы для реализации различных логических операций, таких как НЕ, И, ИЛИ-НЕ и исключающее ИЛИ.

2. Проведенные анализ эффекта схлопывания электродов и гармонический анализ подтвердили возможность управления резонансной частотой резонаторов с помощью электростатического возбуждения. Это открывает новые перспективы для создания энергоэффективных и перепрограммируемых логических элементов, которые могут конкурировать с традиционными КМОП-технологиями. Результаты симуляций демонстрируют, что разработанные модели позволяют точно прогнозировать поведение МЭМС-резонаторов в различных режимах работы, что является важным шагом в направлении их практического применения.

3. Практическая значимость исследований заключается в возможности использования разработанных моделей для проектирования сложных цифровых схем, таких как аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи, триггеры и арифметико-логические устройства на основе МЭМС-технологий. Это может способствовать дальнейшему развитию микроэлектромеханических систем в направлении создания более компактных, энергоэффективных и функционально гибких устройств.

4. Результаты исследования подтверждают перспективность использования МЭМС-резонаторов в качестве логических элементов и открывают новые возможности для их применения в современных микроэлектронных системах.

5. Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (государственное задание для университетов № ФГФЗ-2023-0005) и с применением оборудования Центра коллективного пользования РГУ МИРЭА (соглашение от 01.09.2021 № 075-15-2021-689, уникальный идентификационный номер 2296.61321X0010).

## Список литературы

1. Temperature Measurement System Comprising a Resonant MEMS Device: pat. USA US20110210801, IPC H03H9/2463 / Xavier Rottenberg, Roelof Jansen, Hendrikus Tilmans; Applicant and Patent Holder Interuniversitair Microelektronica Centrum vzw IMEC – US13/033,932. Claimed 24-02-2011; Published 01-09-2011.
2. Relays Do Not Leak: CMOS Does / H. Fariborzi [et al.] // Proceedings of the 50<sup>th</sup> Annual Design Automation Conference. 2013. No 127. P. 1–4.
3. Demonstration of Integrated Micro-Electro-Mechanical Relay Circuits for VLSI Applications / M. Spencer [et al.] // IEEE J. Solid-State Circuits. 2011. Vol. 46, No 1. P. 308–320.
4. Ahmed, S. Micro-Electromechanical Resonator-Based Logic and Interface Circuits for Low Power Applications / S. Ahmed // Ph. D. Thesis, KAUST Saudi Arabia. 2020.
5. Modeling and Simulation of a MEMS Resonator Based Reprogrammable Logic Gate Using Partial Electrodes / S. Ahmed [et al.] // Conference: Symposium on Design, Test, Integration and Packaging of MEMS/MOEMS. Paris, France, 2019. P. 1–5.
6. Hafiz, M. Microelectromechanical Reprogrammable Logic Device / M. Hafiz, L. Kosuru, M. Younis // Nature Communications. 2016. No 7. P. 1–9.
7. Соловьев, А. А. Системное моделирование мультikonтактного микроэлектромеханического логического элемента / А. А. Соловьев, Е. Ф. Певцов, В. А. Колчужин // Нано- и микросистемная техника. 2024. Т. 26, № 6. С. 260–267.
8. LMGT\_MEMS\_component\_library [Electronic Resource]. Mode of access: [https://github.com/Kolchuzhin/LMGT\\_MEMS\\_component\\_library/tree/master/resonator/transducer\\_e5](https://github.com/Kolchuzhin/LMGT_MEMS_component_library/tree/master/resonator/transducer_e5). Date of access: 10.11.2024.

Поступила 08.01.2025

Принята в печать 15.04.2025

## References

1. Xavier Rottenberg, Roelof Jansen, Hendrikus Tilmans (2011) Temperature Measurement System Comprising a Resonant MEMS Device. *Patent USA US20110210801, IPC H03H9/2463, Applicant and Patent Holder Interuniversitair Microelektronica Centrum vzw IMEC – US13/033,932*. Claimed 2011-02-24; Published 2011-09-01.
2. Fariborzi H., Chen F., Nathanael R., Chen I., Hutin L., Lee R., et al. (2013) Relays Do Not Leak: CMOS Does. *Proceedings of the 50<sup>th</sup> Annual Design Automation Conference*. 127, 1–4.
3. Spencer M., Chen F., Wang C., Nathanael R., Fariborzi H., Gupta A., et al. (2011) Demonstration of Integrated Micro-Electro-Mechanical Relay Circuits for VLSI Applications. *IEEE J. Solid-State Circuits*. 46 (1), 308–320.
4. Ahmed S. (2020) Micro-Electromechanical Resonator-Based Logic and Interface Circuits for Low Power Applications. *Ph. D. Thesis, KAUST Saudi Arabia*.
5. Ahmed S., Li R., Zou X., Al Hafiz M. A., Fariborzi H. (2019) Modeling and Simulation of a MEMS Resonator Based Reprogrammable Logic Gate Using Partial Electrodes. *Conference: Symposium on Design, Test, Integration and Packaging of MEMS/MOEMS*. Paris, France. 1–5.
6. Hafiz M., Kosuru L., Younis M. (2016) Microelectromechanical Reprogrammable Logic Device. *Nature Communications*. (7), 1–9.
7. Solovev A. A., Pevtsov E. F., Kolchuzhin V. A. (2024) System Modeling of a Multi-Contact Microelectromechanical Logic Element. *Nano- and Microsystems Technology*. 26 (6), 260–267 (in Russian).
8. LMGT\_MEMS\_component\_library. Available: [https://github.com/Kolchuzhin/LMGT\\_MEMS\\_component\\_library/tree/master/resonator/transducer\\_e5](https://github.com/Kolchuzhin/LMGT_MEMS_component_library/tree/master/resonator/transducer_e5) (Accessed 10 November 2024).

Received: 8 January 2025

Accepted: 15 April 2025

## Вклад авторов / Authors' contribution

Авторы внесли равный вклад в написание статьи / The authors contributed equally to the writing of the article.

## Сведения об авторах

**Соловьев А. А.**, ст. преп. каф. наноэлектроники Института перспективных технологий и промышленного программирования, МИРЭА – Российский технологический университет (РТУ МИРЭА)

**Певцов Е. Ф.**, канд. техн. наук, доц., дир. центра проектирования, РТУ МИРЭА

**Колчужин В. А.**, канд. техн. наук, вед. инж.-констр. Qorvo Munich GmbH

## Адрес для корреспонденции

119454, Российская Федерация,  
Москва, просп. Вернадского, 78  
МИРЭА – Российский  
технологический университет  
Tel.: +7 967 097-18-73  
E-mail: solovev\_aa@mirea.ru  
Соловьев Александр Анатольевич

## Information about the authors

**Solovev A. A.**, Senior Lecturer at the Department of Nanoelectronics of the Institute of Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (MIREA – RTU)

**Pevtsov E. F.**, Cand. Sci. (Tech), Associate Professor, Director of the Design Center, MIREA – RTU

**Kolchuzhin V. A.**, Cand. Sci. (Tech), Senior Designing Engineer, Qorvo Munich GmbH

## Address for correspondence

119454, Russian Federation,  
Moscow, Vernadsky Ave., 78  
MIREA – Russian  
Technological University  
Tel.: +7 967 097-18-73  
E-mail: solovev\_aa@mirea.ru  
Solovev Aleksandr Anatolevich