

doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-3-508-519
УДК 621.3.049.7

Проектирование микроэлектромеханического логического элемента на основе гребенчатого резонатора

Александр Анатольевич Соловьев¹✉, Евгений Филиппович Певцов²,
Владимир Анатольевич Колчужин³

^{1,2} МИРЭА — Российский технологический университет, Москва, 119454, Российская Федерация
³ Qorvo Munich GmbH, Мюнхен, 81829, Германия

¹ solovev_aa@mirea.ru ✉, <https://orcid.org/0009-0008-3578-0963>

² pevtsov@mirea.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6264-1231>

³ vladimir.kolchuzhin@ieee.org, <https://orcid.org/0000-0002-6009-1499>

Аннотация

Введение. КМОП-технология практически достигла физического предела уменьшения размеров транзисторов и обладает существенными эксплуатационными ограничениями при экстремальных температурах и ионизирующем излучении. В работе предлагается методика проектирования логических элементов на основе альтернативной технологии, использующей гребенчатые микроэлектромеханические резонаторы, работающие на бесконтактном принципе и перепрограммируемые в процессе эксплуатации. **Метод.** Предложена методика расчета геометрических параметров устройства с помощью аналитических выражений и с учетом технологических норм, необходимых для достижения заданных характеристик: собственной частоты колебаний резонатора (100 кГц) и коэффициента добротности (20) при атмосферном давлении. **Основные результаты.** Определены оптимальные геометрические параметры устройства, характеристики емкостных ячеек, влияющие на чувствительность устройства и добротность с учетом воздушного демпфирования. Точность расчетов достаточна для проектирования фотошаблонов без использования специализированного программного обеспечения. Разработана компактная модель логического микроэлектромеханического элемента, позволяющая проводить системный анализ динамических характеристик и реализовывать функционально полный набор логических операций. **Обсуждение.** Разработанный маршрут проектирования может применяться для создания логических микроэлектромеханических элементов с возможностью перепрограммирования в процессе работы и дальнейшего каскадирования таких устройств для построения сложных цифровых схем. Работа полезна разработчикам микроэлектромеханических акселерометров и гироскопов и предлагает альтернативный подход к созданию трехмерных моделей на основе библиотеки параметрических компонентов и генерации компактных моделей для системного анализа.

Ключевые слова

МЭМС, микроэлектромеханические резонаторы, логические элементы, вентили, системное моделирование, ИЛИ-НЕ, Исключающее ИЛИ

Благодарности

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 РТУ МИРЭА (соглашение от 01.09.2021 № 075–15-2021-689, уникальный идентификационный номер 2296.61321X0010).

Ссылка для цитирования: Соловьев А.А., Певцов Е.Ф., Колчужин В.А. Проектирование микроэлектромеханического логического элемента на основе гребенчатого резонатора // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2025. Т. 25, № 3. С. 508–519. doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-3-508-519

Design of the microelectromechanical logic element based on a comb-drive resonator

Alexander A. Solovev¹✉, Evgeny F. Pevtsov², Vladimir A. Kolchuzhin³

^{1,2} Russian Technology University MIREA, Moscow, 119454, Russian Federation

³ Qorvo Munich GmbH, Munich, 81829, Germany

¹ solovev_aa@mirea.ru✉, <https://orcid.org/0009-0008-3578-0963>

² pevtsov@mirea.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6264-1231>

³ vladimir.kolchuzhin@ieee.org, <https://orcid.org/0000-0002-6009-1499>

Abstract

CMOS technology has nearly reached the physical limits of transistor scaling and exhibits significant operational limitations at extreme temperatures and ionizing radiation. This work proposes a methodology for designing logic elements based on an alternative technology utilizing comb-drive microelectromechanical resonators operating on a non-contact principle and reconfigurable during operation. A method is proposed for calculating the geometric parameters of the device using analytical expressions and considering technological norms necessary to achieve specified characteristics: the natural frequency of resonator oscillations (100 kHz) and the quality factor (20) at atmospheric pressure. Optimal geometric parameters of the device, characteristics of capacitive cells affecting the sensitivity of the device and the quality factor, taking into account air damping, are determined. The accuracy of the calculations is sufficient for designing photomasks without using specialized software. A compact model of a logic microelectromechanical element has been developed, allowing for system analysis of dynamic characteristics and implementation of a functionally complete set of logic operations. The developed design flow can be applied to create logic microelectromechanical elements with the possibility of reprogramming during operation and further cascading of such devices for constructing complex digital circuits. The article is useful for developers of microelectromechanical accelerometers and gyroscopes and proposes an alternative approach to creating three-dimensional models based on a library of parametric components and generating compact models for system analysis.

Keywords

MEMS, micro-electro-mechanical systems resonators, logic gates, system-level modeling, NOR gate, XOR gate

Acknowledgements

This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (State Assignment for Universities No. ФГФЗ-2023-0005) and carried out using equipment of the Shared Equipment Center of RTU MIREA (Agreement No. 075-15-2021-689 dated 01.09.2021, unique identification number 2296.61321X0010).

For citation: Solovev A.A., Pevtsov E.F., Kolchuzhin V.A. Design of the microelectromechanical logic element based on a comb-drive resonator. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2025, vol. 25, no. 3, pp. 508–519 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-3-508-519

Введение

Элементная база современных вычислительных устройств основана на КМОП-технологии, которая практически достигла физического предела уменьшения размеров транзисторов и обладает существенными эксплуатационными ограничениями при экстремальных температурах и ионизирующем излучении. В связи с этим возрастает интерес к альтернативным подходам, среди которых перспективным направлением являются вычисления на основе микроэлектромеханических систем (МЭМС).

Особое внимание представляют МЭМС-резонаторы, используемые в датчиках, приводах, переключателях, фильтрах и логических элементах [1]. Резонансные структуры применяются в механических логических вычислениях из-за устойчивости к вибрациям, возможности перепрограммирования в процессе эксплуатации [2] и бесконтактному принципу работы, в отличие от гальванических переключателей, подверженных деградации контактных площадок [3].

В работах [4, 5] представлены конструкции логических МЭМС-элементов на основе резонаторов, представляющие балку, закрепленную с двух сторон, два и более боковых неподвижных электрода, которые являются управляющими электродами для приведения балки в действие, цифровыми входами и выходами логического вентиля. Однако недостатками данных

устройств являются малые управляющие емкости резонатора, влияющие на чувствительность устройства, а добротность равная 100 при давлении в 800 Па делает невозможным функционирование при атмосферном давлении без дорогостоящего герметичного корпуса.

В настоящей работе рассмотрен процесс проектирования логического МЭМС-элемента на основе гребенчатого микромеханического резонатора с поперечным перемещением электродов с повышенной чувствительностью, работой при атмосферном давлении с заданным демпфированием. В качестве исходных параметров системы использованы собственная частота колебаний резонатора 100 кГц и коэффициент добротности 20 при атмосферном давлении, определенный в ходе исследования [6], обеспечивающий необходимое разделение пиков амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) для выполнения логических операций «ИЛИ-НЕ», «Исключающее ИЛИ», «И» и минимальное время перехода между логическими состояниями.

На этапе предварительного проектирования рассчитываются аналитические выражения для определения геометрических параметров устройства с учетом технологических норм, необходимых для достижения заданных характеристик. Аналитические выражения позволяют определить характеристики емкостных ячеек, влияющие на чувствительность устройства, а также добротность с учетом воздушного демпфирования с точностью, достаточной для проектирования фотоша-

блонов, без необходимости использования специализированного программного обеспечения.

Для создания трехмерной модели применен не традиционный метод конечных элементов (МКЭ), обеспечивающий высокую точность, но требующий значительных вычислительных ресурсов, а подход на основе библиотеки параметрических трехмерных компонентов, что сокращает время моделирования при сохранении заданной точности [7].

Результатом процесса проектирования является компактная модель логического МЭМС-элемента для системного анализа динамических характеристик и реализации функционально полного набора логических операций, созданная из трехмерной параметрической модели.

Расчет геометрических размеров МЭМС-резонатора

В работе рассматривается гребенчатый резонатор с поперечным перемещением электродов. В отличие от МЭМС-резонаторов с продольным перемещением электродов, где инерционная масса с электродами смещается вдоль оси гребенчатых структур, в данном устройстве используется поперечное перемещение относительно неподвижных электродов, что обеспечивает высокую чувствительность, поскольку даже при малых перемещениях значительно изменяется емкость.

Разработка конструкции логического МЭМС-резонатора выполнена с учетом технологической реализуемости. Ограничения процесса глубокого ионного травления определяют минимальные размеры элементов, что необходимо учитывать при проектировании. Толщина структуры составляет 50 мкм, минимальная ширина элементов — 3 мкм, минимальный зазор между электродами — 2 мкм.

Определение геометрических параметров инерционной массы является важным этапом проектирования, поскольку ее площадь и форма оказывают прямое влияние на динамические характеристики МЭМС-устройства, включая резонансную частоту и добротность. Размеры МЭМС-устройства ограничены доступной площадью на пластине, например, в случае использования мультипроектной технологии Multi-Project Wafer (MPW). Необходимо учитывать не только размер инерционной массы и гребенчатых электродов, но и подводящих электродов, контактных площадок для соединения с корпусом. При начальном проектировании выбрана прямоугольная форма инерционной массы.

Гребенчатые электроды, размещенные на подвижной инерционной массе и неподвижных боковых электродах, образуют емкостные ячейки. Оптимальное соотношение воздушных зазоров между электродами емкостной ячейки составляет 2,5 при ширине электрода 3 мкм и минимальном зазоре между электродами — 2 мкм [8]. Масса одного электрода гребенчатой структуры, размещенного на инерционной массе, определяется выражением:

$$m_{\text{электрода}} = l_{\text{электрода}} w_{\text{электрода}} \rho h,$$

где $l_{\text{электрода}}$ — длина электрода; $w_{\text{электрода}}$ — ширина электрода; ρ — плотность материала; h — толщина конструкции, определяемая технологическим процессом.

Ширина одной элементарной емкостной ячейки ($w_{\text{ячейки}}$) (рис. 1) включает ширину подвижного и фиксированного электродов и воздушные зазоры между электродами, т. е.

$$w_{\text{ячейки}} = g_1 + 2w_{\text{электрода}} + g_2,$$

где g_1 — зазор между левым электродом статора и электродом ротора; g_2 — зазор между электродом ротора и правым электродом статора.

Количество электродов ($n_{\text{ячеек}}$), размещенных на инерционной массе, рассчитывается с учетом расстояния между гребенками и области крепления подвесов:

$$n_{\text{ячеек}} = \left(\frac{a - d_{\text{гребенок}}}{2w_{\text{ячейки}}} - \frac{w_{\text{подвеса}} - g_1}{w_{\text{ячейки}}} \right) n_{\text{гребенок}},$$

где a — длина центральной части инерционной массы; $d_{\text{гребенок}}$ — расстояние между боковыми электродами; $w_{\text{подвеса}}$ — ширина подвесов; $n_{\text{гребенок}}$ — количество боковых электродов. Масса всех подвижных электродов определяется суммированием масс отдельных электродов $m_{\text{гребенок}} = m_{\text{электрода}} n_{\text{ячеек}}$. Общая масса подвижного электрода определяется как сумма масс центральной части ($m_{\text{инерц}}$) и электродов гребенчатой структуры, размещенных на инерционной массе $m = m_{\text{инерц}} + m_{\text{гребенок}}$.

Для определения зависимости электрической емкости от величины межэлектродного зазора применяется выражение для плоского конденсатора [9]:

$$C_i = \frac{\epsilon_0 \epsilon l_{\text{перекр}} h}{g_i}, \quad (1)$$

где ϵ_0 — электрическая постоянная; ϵ — диэлектрическая проницаемость среды между электродами (в настоящей работе принимаемая за 1); $l_{\text{перекр}}$ — длина перекрытия электродов емкостной ячейки; g_i — межэлектродный зазор, где $i = 1$ для левой, $i = 2$ для правой части емкостной ячейки.

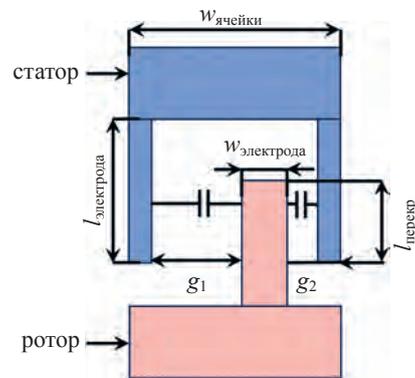


Рис. 1. Схема емкостной ячейки.

$l_{\text{перекр}}$ — длина перекрытия электродов

Fig. 1. Capacitor cell schematic.

$l_{\text{перекр}}$ is the length of the electrode overlap

Формула (1) учитывает только однородное электрическое поле между электродами емкостной ячейки. Однако в реальных конструкциях влияние краевых эффектов может увеличивать емкость до 45 % по сравнению с расчетными значениями [10]. В [11] предложена зависимость емкости левой и правой частей ячейки от краевых эффектов, предполагающая линейное распределение электрического поля в неперекрывающейся области.

$$C_{fi} = \frac{\varepsilon_0 f h}{g_{срi}}, g_{срi} = 0,92 \frac{g_i + \sqrt{g_i^2 + f^2}}{2},$$

где $g_{срi}$ — среднее расстояние между электродами; $i = 1$ для g_1 , $i = 2$ для g_2 ; $f = l_{\text{электрода}} - l_{\text{перекр}}$ — длина неперекрывающейся части электрода; 0,92 — коэффициент, установленный экспериментально, применимый при $f/g \leq 10$.

Емкость фронтальной части ($C_{\text{фронт}}$) ячейки определяется аналогично боковой, но без учета смещения [11]:

$$C_{\text{фронт}} = \varepsilon_0 h \frac{W_{\text{электрода}}}{l_{\text{электрода}} - l_{\text{перекр}}}.$$

Суммарная емкость устройства определяется суммой емкостей правой и левой частей ячейки, краевого поля и фронтальной части, скорректированной на количество ячеек [11]:

$$C = (C_1 + C_2 + C_{f1} + C_{f2} + C_{\text{фронт}}) n_{\text{ячеек}}.$$

Чувствительность емкостной ячейки относительно смещения x определяется как производная емкости по перемещению [12]:

$$\frac{\partial C_i}{\partial x} = \pm \varepsilon \varepsilon_0 l_{\text{перекр}} h \frac{1}{(g_i \mp x)^2}.$$

Общая чувствительность устройства формируется как сумма производных емкостей левой и правой части, скорректированное на число ячеек: $S = \frac{\partial C}{\partial x} = \left(\frac{\partial C_1}{\partial x} + \frac{\partial C_2}{\partial x} \right) n_{\text{ячеек}}$. Конструкция логического МЭМС-элемента на основе резонатора представляет собой инерционную массу, подвешенную на четырех упругих подвесах. Собственная частота колебательной системы f_0 определяется выражением [9]:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_{\text{эфф}}}{m}}, \quad (2)$$

где m — инерционная масса; $k_{\text{эфф}}$ — эффективная жесткость подвесов. Таким образом жесткость системы составляет $k_{\text{эфф}} = 4\pi^2 f_0^2 m$. Для расчета жесткости системы учитываем, что конструкция содержит четыре одинаковых упругих подвеса $k_{\text{эфф}} = 4k_{\text{подвеса}}$.

Жесткость одного упругого подвеса определяется с помощью уравнения прогиба консольной балки под действием силы [9]:

$$k_{\text{подвеса}} = \frac{12E_{\text{Si}}I}{l_{\text{подвеса}}^3},$$

где E_{Si} — модуль упругости кремния; $I = \frac{w_{\text{подвеса}}^3 h}{12}$ — момент инерции для прямоугольного сечения балки, $w_{\text{подвеса}}$ — ширина балки.

Механизм диссипации механической энергии (демпфирование) определяет добротность резонансной конструкции. В настоящей работе рассматривается только воздушное демпфирование, в частности демпфирование сжатой газовой пленки и демпфирование скольжения. Схематическое изображение воздушного демпфирования между электродами гребенки представлено на рис. 2.

Согласно [13], демпфирование, вызванное сжатием воздуха в емкостных ячейках резонатора, зависит от вязкости газа, геометрии канала и количества каналов. Число Кнудсена (Kn) вычисляется по формуле

$$Kn = \frac{\lambda}{g_i},$$

где g_i — воздушные зазоры (g_1 и g_2) между электродами; $\lambda = 66$ нм — средняя длина свободного пробега молекул воздуха при атмосферном давлении.

Эффективная вязкость, учитывающая влияние числа Кнудсена определяется:

$$\eta_{\text{эфф}} = \frac{\eta}{1 + 9,638Kn^{1,159}},$$

где η — вязкость воздуха.

В работе демпфирование сжатия воздуха для случая $l_{\text{перекр}} < h$ для левой и правой сторон ячейки определяется выражением [13]:

$$d_{\text{сжатия}_i} = \left(1 - \frac{0,63l_{\text{перекр}}}{h} + \frac{0,052l_{\text{перекр}}^5}{h^5} \right) \frac{l_{\text{перекр}}^3 h}{g_i^3} \eta_{\text{эфф}} n,$$

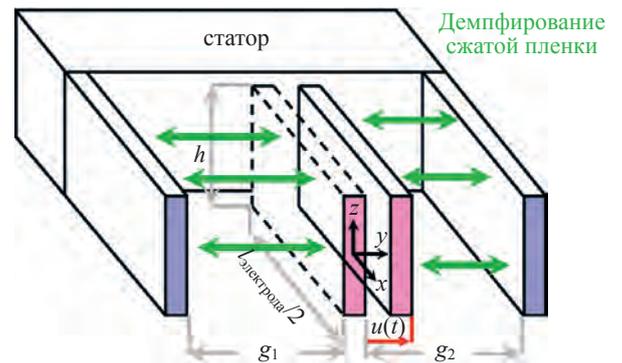


Рис. 2. Схематическое изображение воздушного демпфирования между электродами гребенки. g_1 и g_2 — левый и правый зазоры между электродами статора и ротора; $u(t)$ — перемещение подвижного электрода относительно начального положения в зависимости от времени

Fig. 2. Schematic diagram showing air damping between the comb-drive electrodes.

g_1 and g_2 are the left and right gaps between the stator and rotor electrodes; $u(t)$ — displacement of the movable electrode relative to its initial position as a function of time

где h — толщина структуры; n — количество каналов ($n = 2n_{\text{ячеек}}$).

Общее демпфирование сжатия для всех ячеек резонатора имеет вид

$$D_{\text{сжатия}} = n_{\text{ячеек}} n_{\text{гребенок}} (D_{\text{сжатия}1} + D_{\text{сжатия}2}),$$

где $D_{\text{сжатия}1}$ и $D_{\text{сжатия}2}$ — демпфирование в зазорах g_1 и g_2 емкостной ячейки.

Для вычисления демпфирования от скольжения элементов необходимо учитывать демпфирование от скольжения электродов гребенки сверху и снизу, а затем сложить значения для всех элементов. Длина скользящей части гребенки для расчета демпфирования одинакова сверху и снизу. Для двух гребенок (сверху и снизу) применяется формула:

$$l_{\text{гребенок}} = 2w_{\text{ячейки}} n_{\text{ячеек}}$$

Если ширина скользящей части не равна 0, то зазор (g) между поверхностями с учетом ширины канала определяется по формуле [13]

$$g = \frac{h}{1 + 8,5 \frac{h}{l_{\text{гребенок}}}},$$

в противном случае $g = h$.

Эффективная вязкость воздуха ($\eta_{\text{эфф}}$) описывается упрощенной формулой [13]:

$$\eta_{\text{эфф}} = \frac{n}{1 + 2Kn}$$

Число Кнудсена (Kn) определяется как отношение длины свободного пробега молекул газа (λ) к толщине структуры (h): $Kn = \frac{\lambda}{h}$. Демпфирование скольжения зависит от расстояния между поверхностями и определяется формулой Куэтта [13]:

$$D_{\text{скольжения}} = n l_{\text{электрода}} w_{\text{электрода}} \frac{\eta_{\text{эфф}}}{g},$$

где $n = 2n_{\text{гребенок}} n_{\text{ячеек}}$ — количество каналов для электродов гребенки снизу.

Общее демпфирование определяется как сумма демпфирования сжатой газовой пленки и демпфирования скольжения $D = D_{\text{сжатия}} + D_{\text{скольжения}}$. Добротность (Q) задается изменением начального перекрытия электродами емкостной ячейки и имеет вид [9]

$$Q = \frac{\sqrt{mk_{\text{эфф}}}}{D}, \quad (3)$$

где D — общее демпфирование.

Параметрические исследования

Разработка МЭМС-устройств требует мультифизического подхода для учета взаимосвязи параметров. После предварительного расчета следует этап параметрического исследования зависимости размеров

элементов конструкции на ключевые характеристики устройства: рабочую частоту, напряжение схлопывания и коэффициент добротности.

Для автоматизации параметрических исследований разработана программа для персонального компьютера на языке MATLAB [14]. Программа может быть интегрирована с другим специализированным программным обеспечением для уточнения механического поведения устройства после первичного анализа.

Высокая резонансная частота необходима для повышения быстродействия логического элемента. Уменьшение массы подвижного электрода m увеличивает рабочую частоту f_0 , при этом важно сохранить достаточную длину инерционной массы для размещения максимального количества емкостных ячеек. Для уменьшения массы также применяется перфорация — создание сквозных отверстий в инерционной массе.

Оптимизация добротности является ключевым этапом проектирования логического МЭМС-элемента, поскольку эти параметры влияют на скорость переключения, энергопотребление и возможность реализации логических операций при атмосферном давлении.

Высокая добротность минимизирует потери энергии и увеличивает амплитуду колебаний, но также увеличивает время переключения из «1» в «0». Снижение добротности уменьшает время переключения, но требует увеличения напряжения для достаточного разделения пиков АЧХ.

Для гребенчатого резонатора с поперечным перемещением добротность регулируется изменением перекрытия электродов емкостной ячейки. Увеличение перекрытия повышает газовое демпфирование, что снижает добротность и позволяет достичь целевого значения 20, установленного в ходе анализа [6].

Для расчетов в качестве подвесов использовались консольные балки, закрепленные одним концом на углах инерционной массы, а другим — на анкерах. В МЭМС, таких как акселерометры и гироскопы, часто применяются П-образные подвесы, состоящие из двух балок и соединяющей перемычки в верхней части (рис. 3). Жесткость П-образного подвеса определяется жесткостью балок и рассчитывается как последовательное соединение этих элементов $\frac{1}{k_{\text{общ}}} = \frac{1}{k_{\text{вертик1}}} + \frac{1}{k_{\text{вертик2}}}$. П-образные подвесы компактнее других конструкций и обеспечивают движение вдоль выбранной оси, так как жесткость в других направлениях значительно выше, что предотвращает нежелательные колебания.

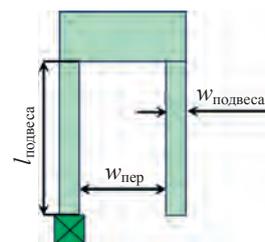


Рис. 3. Конструкция П-образного подвеса. $w_{\text{пер}}$ — ширина перемычки

Fig. 3. Design of the n-shaped suspension. $w_{\text{пер}}$ — width of the bridge

Напряжение схлопывания — напряжение, при котором подвижный электрод притягивается к неподвижному под действием электростатической силы, что приводит к схлопыванию электродов. Для его расчета между парой электродов используется выражение [9]:

$$V_{\text{схл}} = \sqrt{\frac{8k_{\text{эфф}}g^3}{27\varepsilon A}}, \quad (4)$$

где g — начальный зазор между электродами; $A = l_{\text{перекр}}h$ — площадь перекрытия электродов.

Для снижения управляющего напряжения логического элемента необходимо уменьшать напряжение схлопывания. Для этого можно уменьшить жесткость подвесов ($k_{\text{эфф}}$) увеличить площадь перекрытия электродов (A) или уменьшить начальный зазор (g). Поскольку зазор фиксирован на предыдущем шаге, основной метод уменьшать напряжение схлопывания — снижение жесткости подвесов за счет их удлинения. На рис. 4 показана зависимость резонансной частоты (f_0), рассчитываемая с помощью выражения (2), напряжения схлопывания ($V_{\text{схл}}$) (4), и добротности (Q), рассчитан-

ной с помощью выражения (3) от длины подвеса и перекрытие электродов емкостной ячейки.

Таким образом, для достижения ключевых характеристик устройства (собственной частоты колебаний — 100 кГц и коэффициента добротности — 20) рассчитаны длина подвеса ($l_{\text{подвеса}} = 165$ мкм) и перекрытие электродов емкостной ячейки ($l_{\text{перекр}} = 22$ мкм).

В таблице представлены геометрические параметры и характеристики логического МЭМС-элемента на основе гребенчатого резонатора.

Трехмерная модель логического МЭМС-элемента

Анализ МЭМС-устройства требует учета взаимодействия электростатики и механики, а также механизмов диссипации механической энергии. Традиционные сеточные методы, такие как МКЭ, обеспечивают высокую точность, но требуют значительных вычислительных ресурсов. В данной работе использован подход на основе библиотеки параметрических трехмерных компонентов, что сокращает время моделирования при сохранении заданной точности [7].

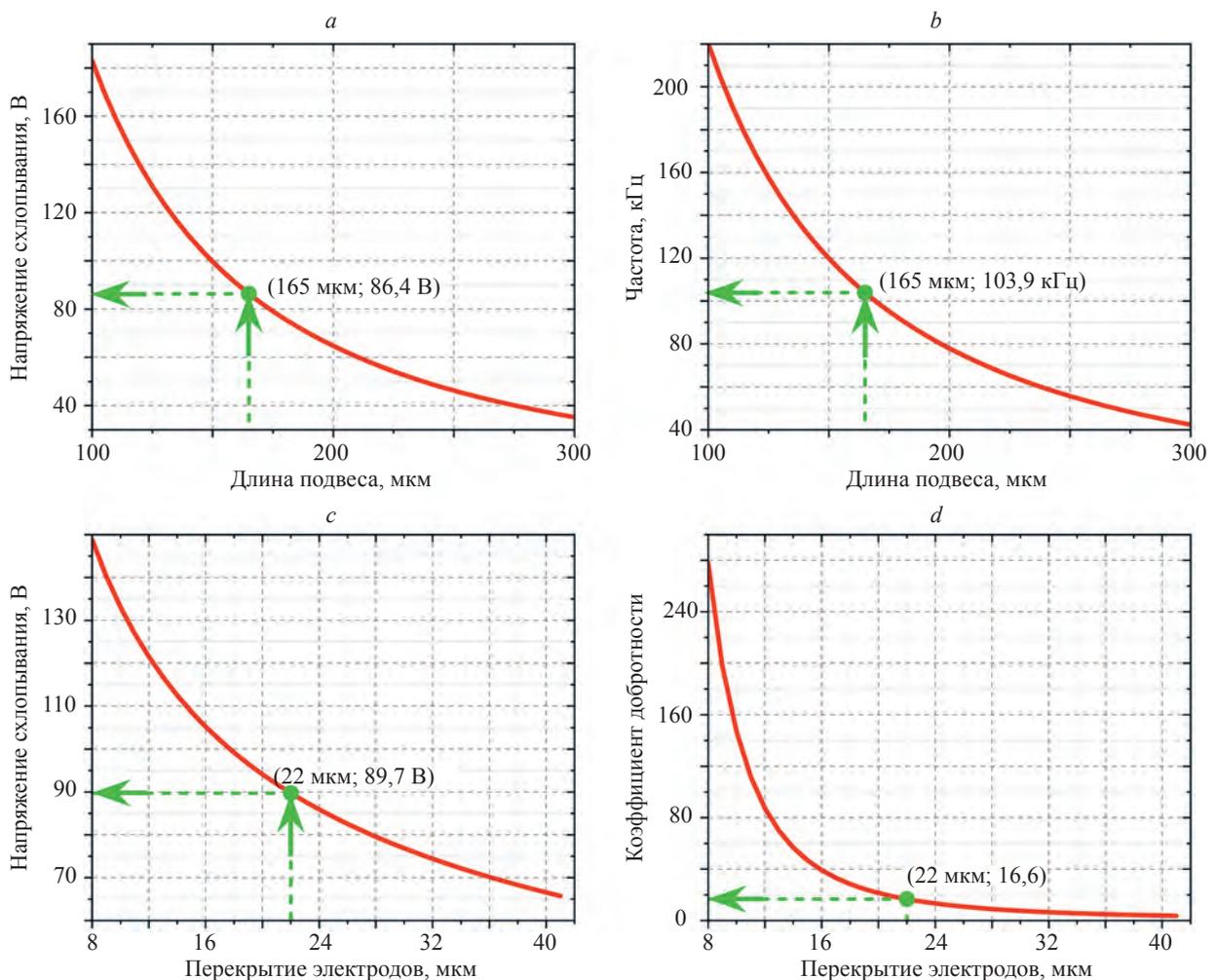


Рис. 4. Параметрический анализ. Зависимости напряжения схлопывания (a) и частоты (b) от длины подвеса; коэффициента напряжения схлопывания (c) и добротности (d) от перекрытия электродов емкостной ячейки
 Fig. 4. Parametric analysis. Dependence of pull-in voltage (a) and frequency (b) vs. suspension length; Dependence of pull-in voltage coefficient (c) and quality factor (d) vs. the overlap of capacitive cell electrodes

Таблица. Параметры оптимизированной конструкции
Table. Optimized Design Parameters

Свойство	Значение	Свойство	Значение
Характеристики		Емкостная ячейка	
Частота, кГц	103	Длина электрода, мкм	50
Добротность	17	Ширина электрода, мкм	3
Инерционная масса		Перекрытие электродов, мкм	22
Длина, мкм	360	Зазор 1, мкм	2
Ширина, мкм	60	Зазор 2, мкм	5
Масса, мкг	1,12	Количество ячеек	13×4
Упругие подвесы		Емкость и чувствительность	
Длина, мкм	165	Емкость устройства, пФ	0,56
Ширина, мкм	5	Чувствительность, мкФ/м	0,147

Библиотека содержит базовые элементы МЭМС: балки, пластины, гребенчатые электроды, моделируемые аналитическими уравнениями как многополосники. Поведенческие модели элементов учитывают нелинейную физику [7], технологические нормы (углы боковых стенок, остаточные напряжения, перфорации) и физические эффекты (демпфирование, электростатика, механика) [15]. В отличие от МКЭ, количество степеней свободы снижено за счет решения дифференциальных уравнений только в узловых точках [16]. Параметризация позволяет изменять геометрические размеры (длину подвесов, площадь инерционной массы, перекрытие электродов), оптимизируя добротность и частотные характеристики устройства. Компоненты соединяются в узловых точках, формируя сложные конструкции без построения сетки [17]. Динамика системы описывается дифференциальными уравнениями с матрицами жесткости, массы и демпфирования [16, 18].

Разработанный логический МЭМС-элемент на основе гребенчатого резонатора (рис. 5) включает инерционную массу 5 — жесткой пластины с перфорацией, закрепленной с помощью четырех П-образных упругих подвесов 6, состоящих из 12 балочных элементов [19]

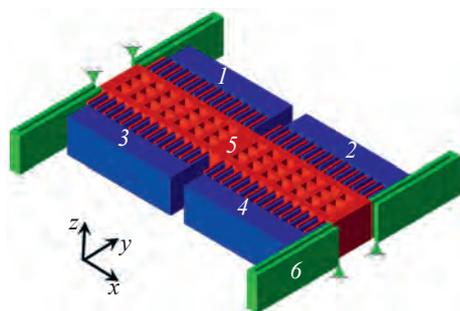


Рис. 5. Трехмерная модель микроэлектромеханического логического элемента.

1–4 — боковые гребенчатые электроды-статоры; 5 — несущая инерционная масса с гребенчатыми электродами-роторами; 6 — П-образных упругие подвесы

Fig. 5. 3D model of the microelectromechanical logic element.
1–4: side comb-drive stator electrodes, 5: supporting inertial mass with comb-drive rotor electrodes, 6: n-shaped spring suspensions

(по три балки на каждый подвес), моделируемых по теории Тимошенко с учетом нелинейных деформаций и обеспечивающих 6 степеней свободы, четырех емкостных гребенчатых структур 1–4, выполняющих функции электростатических приводов, рассчитываемые методом Шварца–Кристоффеля [19].

Модель обладает 6 механическими степенями свободы, электростатические силы рассчитываются в 76 точках интегрирования в гребенках и системой демпфирования, которая учитывает эффект сжимаемой газовой пленки, моделируемый на основе уравнений Рейнольдса с учетом периодичности гребенчатых структур. Данный метод обладает ограничением: из-за библиотечного представления геометрии невозможно добавить нестандартные элементы, например ограничители перемещения несущей массы.

Системная компактная модель

Проектирование МЭМС требует совместного моделирования в составе управляющей схемы для анализа переходных процессов [20]. Для этого используется структурно-поведенческая модель на языках описания аппаратуры Verilog-A, VHDL-AMS.

МКЭ создает модели с тысячами степеней свободы (Degree of Freedom, DoF), что значительно усложняет их применение для системного анализа из-за высокой вычислительной сложности. Модели сокращенного порядка позволяют описать динамическое поведение устройства, сохраняя при этом точность моделирования. Одним из методов редукции является метод модальной суперпозиции, сокращающий размерность модели при сохранении нелинейного электростатического взаимодействия [21].

В настоящей работе генерируется компактная модель из трехмерной модели на основе библиотеки параметрических трехмерных компонентов. Компактная модель содержит матрицы, интерполяционные параметры (например, интерполятор Лагранжа), аппроксимацию нелинейностей и информацию о выводах. Моделирование инициализируется в DC (Direct Current)- или AC (Alternating Current)-состоянии, а на каждом временном шаге восстанавливаются нелиней-

ные электростатические члены высокого порядка, что позволяет учитывать электростатическое смягчение без значительного усложнения вычислений. Число DoF сокращается с нескольких сотен до нескольких десятков параметров. Компактные модели точны только для заданной конфигурации параметров, что требует баланса между скоростью и точностью, учитывая ограниченное количество выбранных нелинейных эффектов. Созданная системная модель [22] экспортируется в среду проектирования интегральных схем как список соединений и схемный символ для совместного моделирования с МЭМС.

Тестирование модели

Целью тестирования является проверка корректности функционирования модели с помощью анализа статического, частотного и динамического откликов структуры, определения величины постоянного смещения инерционной массы и управляющего напряжения, при которых разница в резонансных частотах (Δf) при различных комбинациях на боковых электродах не менее 6 кГц при добротности (Q) около 20 и реализация на модели логических операций «ИЛИ-НЕ», «Исключающее ИЛИ», «И».

Эффект схлопывания возникает при превышении критического напряжения, при котором подвижный электрод притягивается к неподвижному под действием электростатической силы. На рис. 6, а показан анализ схлопывания для двух схем подключения электродов пятиконтактного логического МЭМС-элемента:

- электроды 1, 2 и 3 плавающие, электрод 4 имеет нулевой потенциал, на электрод 5 подается линейно изменяемое напряжение (рис. 5). Напряжение схлопывания составляет 84,5 В, что немного ниже расчетного значения 87,6 В, полученного по формуле (3);
- электроды 1 и 2 плавающие, электроды 3 и 4 имеют нулевой потенциал, на подвижный электрод 5 пода-

ется линейно изменяемое напряжение. Напряжение схлопывания снижается до 59,8 В из-за увеличения площади электростатического взаимодействия между подвижным и боковыми электродами.

- при разности потенциалов «0–1» или «1–0» подвижный электрод притягивается к соответствующему боковому электроду под действием электростатической силы;
- в случае комбинаций «0–0» или «1–1» разность потенциалов между противоположными боковыми электродами компенсируется, что удерживает подвижный электрод в равновесии.

Гармонический анализ используется для исследования реакции устройства на внешнее гармоническое возбуждение. В основе работы логического МЭМС-элемента лежит изменение резонансной частоты подвижного электрода за счет эффекта электростатического смягчения жесткости системы. Изменение входных комбинаций напряжений на боковых электродах (цифровые входы 2 и 3) и на подвижном электроде 5 позволяет динамически управлять резонансной частотой МЭМС-элемента, что обеспечивает выполнение различных логических операций на одном устройстве.

На пятиконтактном логическом МЭМС-элементе три различных резонансных частоты реализуются при следующих комбинациях на боковых электродах 2 и 3 (рис. 7):

- комбинация «0–0»: резонансная частота $f_1 = 75,5$ кГц (операция «ИЛИ-НЕ»);
- комбинация «0–1» или «1–0»: частота $f_2 = 86,6$ кГц (операция «Исключающее ИЛИ»);
- комбинация «1–1»: резонансная частота $f_3 = 93,5$ кГц (операция «И»).

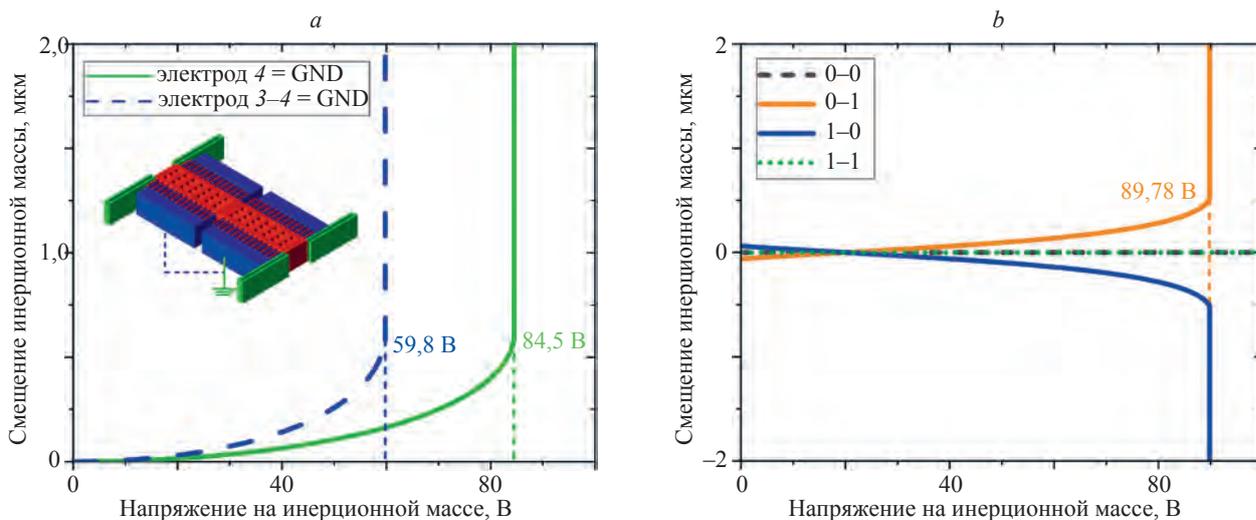


Рис. 6. Анализ эффекта схлопывания при смещении двух (а) и трех (б) электродов. GND — земля (Ground)

Fig. 6. Pull-in effect analysis for the displacement of (a) two and (b) three electrodes. GND — Ground

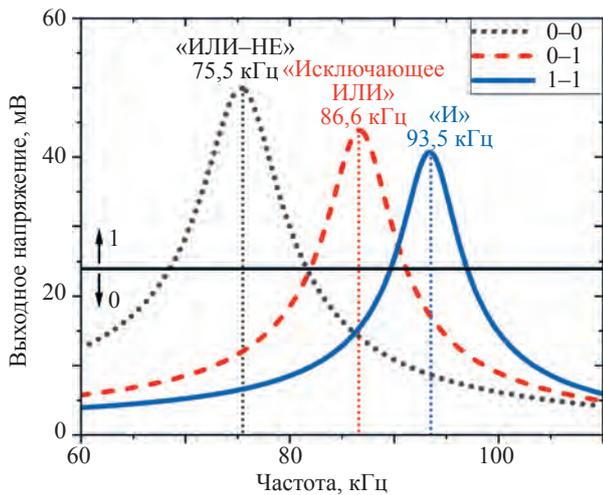


Рис. 7. Амплитудно-частотные характеристики резонатора при различных входных комбинациях на цифровых входах боковых электродов 2 и 3 при $Q = 20$ для напряжений электродов 4 и 5: $V_{схл4} = 1$ В (АС), $V_{схл5} = 60$ В (DC)

Fig. 7. Frequency response of the resonator for various input combinations at digital inputs 2 and 3, $Q = 20$, $V_4 = 1$ V (AC), $V_5 = 60$ V (DC)

На подвижный электрод 5 подается постоянное напряжение 60 В, так как в данном случае разница в частоте Δf между «0–0» и «0–1» максимальная и составляет не менее 6 кГц при $Q = 20$.

Реализация логических операций

Разработанный МЭМС логический элемент способен выполнять базовые логические операции такие, как «И», «ИЛИ-НЕ» и «Исключающее ИЛИ». Схема подключения МЭМС-элемента к внешним источникам представлена на рис. 8.

Для реализации логической операции «И» на электрод 4 подается синусоидальный сигнал с частотой f_3 . Резонанс возникает только при комбинации «1–1», когда частота сигнала возбуждения совпадает с резонансной частотой подвижного электрода. Это приводит к детектированию «высокого» выходного сигнала на чувствительном электроде 1. В остальных случаях выходной сигнал имеет низкую амплитуду. На рис. 9, с показана осциллограмма, подтверждающая реализацию логической операции «И». Аналогично, для реализации логической операции «ИЛИ-НЕ» на электрод 4 подается синусоидальный сигнал с частотой f_1 (рис. 9, а), а при возбуждении с частотой f_2 выполняется логическая операция «Исключающее ИЛИ» (рис. 9, b).

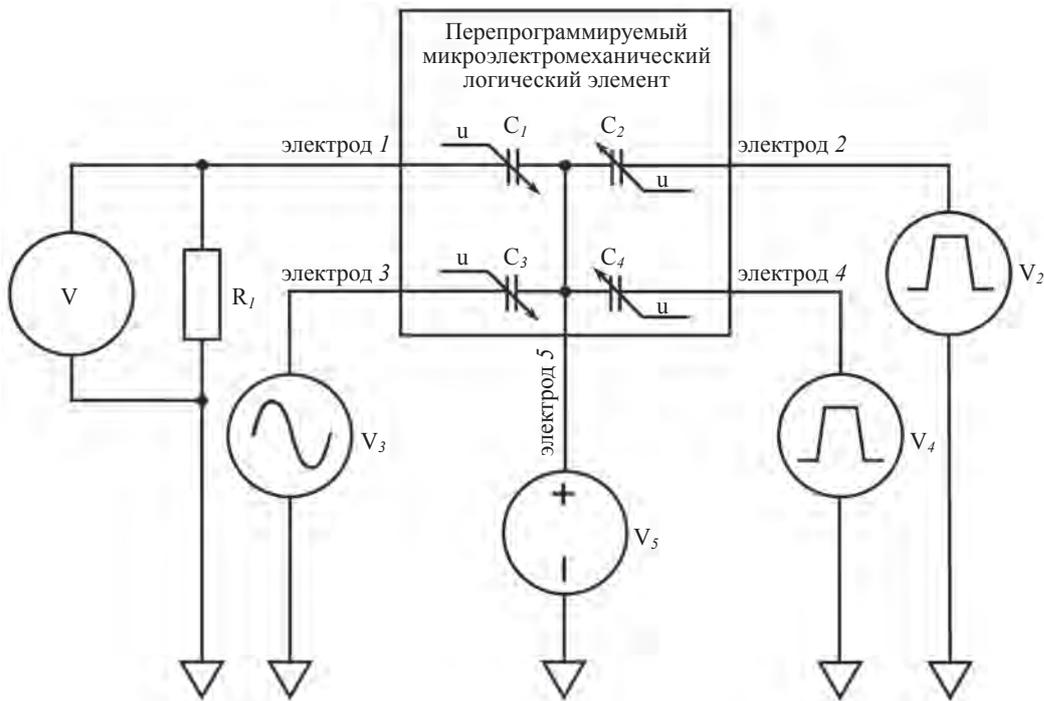


Рис. 8. Подключение микрорезонатора и внешних источников для выполнения логических операций
Fig. 8. Connection of the microresonator and external sources for implementing logic operations

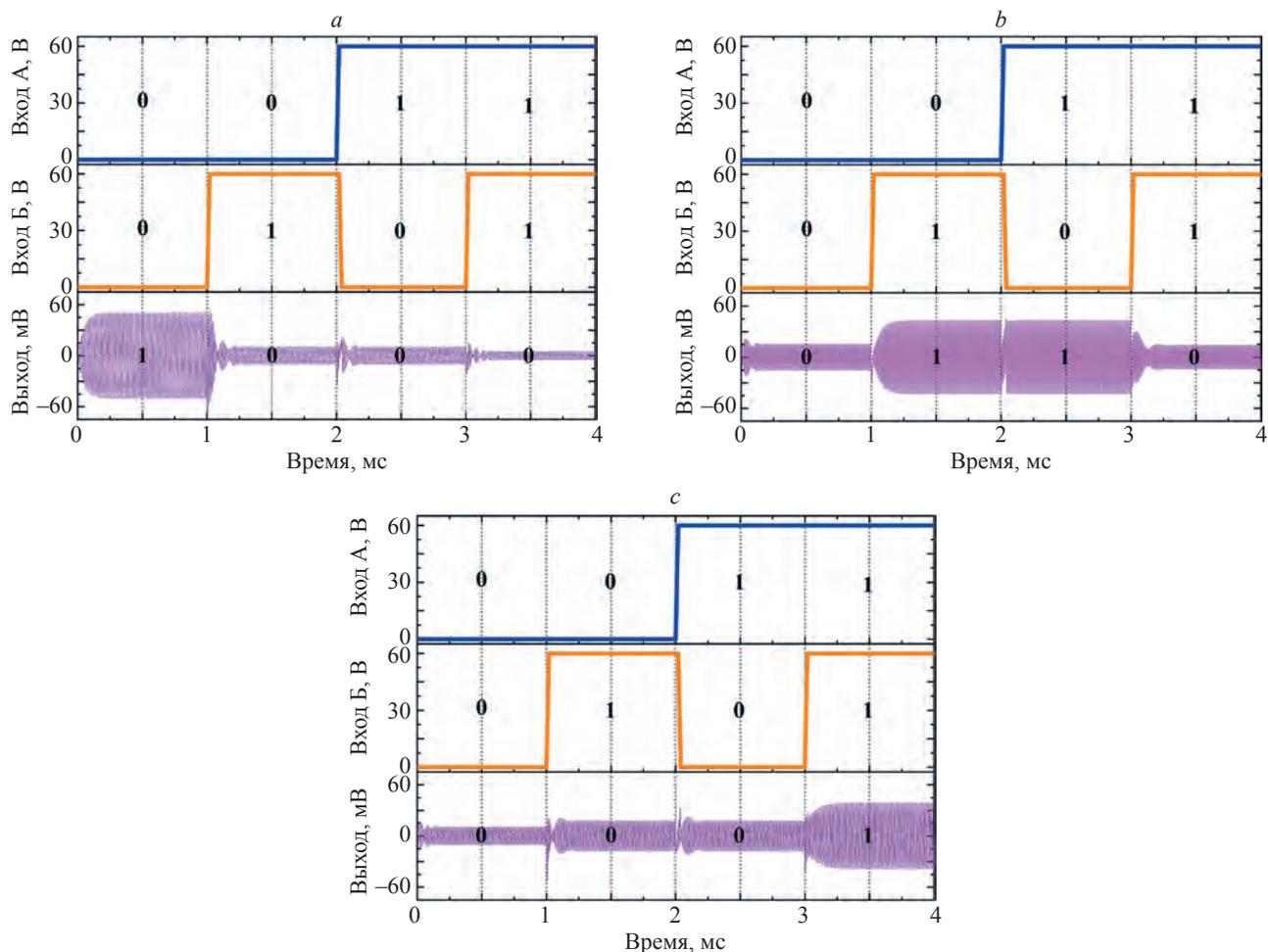


Рис. 9. Осциллограммы, демонстрирующие реализацию логических операций: «ИЛИ-НЕ» (a); «Исключающее ИЛИ» (b); «И» (c)

Fig. 9. Oscilloscope traces demonstrating the implementation of logic operations: NOR (a); XOR (b); AND (c)

Закключение

В работе представлен процесс проектирования логического микроэлектромеханического элемента на основе гребенчатого резонатора. Оптимизированы геометрические параметры емкостных ячеек и подвесов с учетом технологических норм, которые обеспечили собственную частоту колебаний 100 кГц, напряжение схлопывания 84,5 В и добротность 20 при атмосферном давлении достаточные для разделения пиков амплитудно-частотной характеристики и необходимой скорости переключения логических состояний. Чувствительность конструкции составляет 147 нФ/м за счет увеличения емкости до 0,56 пФ.

Анализ динамических характеристик подтвердил возможность выполнения логических операций путем изменения резонансной частоты подвижного электрода

за счет электростатического уменьшения жесткости резонатора.

Разработанный маршрут проектирования может применяться для создания логических МЭМС-элементов с возможностью перепрограммирования в процессе работы и дальнейшего каскадирования таких устройств для построения сложных цифровых схем. Альтернативный подход к созданию трехмерных моделей на основе библиотеки параметрических компонентов и генерации компактных моделей для системного анализа может быть использован для разработки МЭМС-акселерометров и гироскопов. Дальнейшая оптимизация конструкции будет направлена на поиск других форм инерционной массы для размещения на ней большего количества емкостных ячеек и увеличения чувствительности устройства.

Литература

References

- Nanaiah K.C., Younis M.I. Dual electro-mechanical oscillator for dynamically reprogrammable logic gate. Patent US11031937B2, 2021.
- Hafiz M.A.A., Kosuru L., Younis M.I. Microelectromechanical reprogrammable logic device // *Nature Communications*. 2016. V. 7. P. 11137. <https://doi.org/10.1038/ncomms11137>
- Fariborzi H., Chen F., Nathanael R., Chen I-Ru, Hutin L., Lee R., Liu T.-J.K., Stojanovic V. Relays do not leak – CMOS does // *Proc. of the 50th ACM/EDAC/IEEE Design Automation Conference (DAC)*. 2013. P. 1–4.
- Ilyas S., Ahmed S., Hafiz A.A., Fariborzi H., Younis M. Cascadable microelectromechanical resonator logic gate // *Journal of Micromechanics and Microengineering*. 2019. V. 29. N 1. P. 015007. <https://doi.org/10.1088/1361-6439/aaf0e6>
- Ilyas S., Hafiz M.A.A., Fariborzi H., Younis M.I. Mechanical resonator based cascadable logic device. Patent US20190341920A1, 2021.
- Соловьев А.А., Певцов Е.Ф., Колчужин В.А. Системное моделирование мультиконтактного микроэлектромеханического логического элемента // *Нано- и микросистемная техника*. 2024. Т. 26. № 6. С. 260–267.
- Asselot J., Krust A., Parent A., Welham C. High order MEMS models for system design // *Proc. of the IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*. 2018. P. 1–5. <https://doi.org/10.1109/iscas.2018.8351644>
- Gridchin A.V., Kolchuzhin V.A., Gridchin V.A. An optimization of initial gap in electrostatic comb drive // *Proc. on the 13th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE)*. 2016. P. 13–15. <https://doi.org/10.1109/APEIE.2016.7802182>
- Senturia S.D. *Microsystem Design*. Springer, 2005. 689 p.
- Parker G.W. What is the capacitance of parallel plates? // *Computers in Physics*. 1991. V. 5. P. 534–540. <https://doi.org/10.1063/1.4823017>
- Maj C., Nazdrowicz J., Stawiński A. Fringing field modelling in MEMS capacitive comb-drive accelerometers // *Methods and tools in CAD — selected issues*. 2021. P. 15–27. https://doi.org/10.24427/978-83-66391-87-1_02
- Yazdi N., Najafi K., Salian A. A high-sensitivity silicon accelerometer with a folded-electrode structure // *Journal of Microelectromechanical Systems*. 2003. V. 12. N 4. P. 479–486. <https://doi.org/10.1109/JMEMS.2003.815837>
- Veijola T., Turowski M. Compact damping models for laterally moving microstructures with gas-rarefaction effects // *Journal of Microelectromechanical Systems*. 2001. V. 10. N 2. P. 263–273. <https://doi.org/10.1109/84.925777>
- Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024682380 РФ. Программа аналитического расчета геометрических размеров логических МЭМС вентилях на основе гребенчатых резонаторов: № 2024680765. заявлено 10.09.2024. опубликовано 23.09.2024. Бюл. № 10 / Колчужин В.А., Соловьев А.А., Певцов Е.Ф. правообладатель ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет».
- Schröpfer G., Lorenz G., Krust A., Vernay B., Breit S., Mehdaoui A., Sanginario A. MEMS system-level modeling and simulation in smart systems // *Smart Systems Integration and Simulation*. 2016. P. 145–168. https://doi.org/10.1007/978-3-319-27392-1_6
- Lorenz G., Morris A., Lakkis I. A top-down design flow for MOEMS // *Proceedings of SPIE*. 2001. V. 4408. P. 126–137. <https://doi.org/10.1117/12.425351>
- Zhang Z., Kamon M., Daniel L. Continuation-based pull-in and lift-off simulation algorithms for microelectromechanical devices // *Journal of Microelectromechanical Systems*. 2014. V. 23. N 5. P. 1084–1093. <https://doi.org/10.1109/jmems.2014.2304967>
- Lorenz G., Schröpfer G. 3D parametric-library-based MEMS/IC design // *System-Level Modeling of MEMS*. 2013. P. 407–424. <https://doi.org/10.1002/9783527647132.ch17>
- Haase J., Reitz S., Wünsche S., Schwarz P., Becker U., Lorenz G., Neul R. Netzwerk- und Verhaltensmodellierung eines mikromechanischen Beschleunigungssensors. *Proc. of the Workshop Methoden und Werkzeuge zum Entwurf von Mikrosystemen im Rahmen des 2. Statusseminars zum BMBF-Verbundprojekt Modellbildung für die Mikrosystemtechnik MIMOSYS*, 1997, pp. 23–30. (in German)
- Neul R., Becker U., Lorenz G., Schwarz P., Haase J., Wünsche S. A modeling approach to include mechanical microsystem components into the system simulation. *Proc. of the Proceedings Design, Automation and Test in Europe*, 1998, pp. 510–517. <https://doi.org/10.1109/DATE.1998.655906>

- into the system simulation // Proc. of the Proceedings Design, Automation and Test in Europe. 1998. P. 510–517. <https://doi.org/10.1109/DATE.1998.655906>
21. Kolchuzhin V., Dotzel W., Mehner J. Challenges in MEMS parametric macro-modeling based on mode superposition technique // Proc. of the 10th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems, EuroSimE, 2009. P. 1–4. <https://doi.org/10.1109/ESIME.2009.4938481>
 22. Kolchuzhin V. Verilog-A_components. [Электронный ресурс]. URL:https://github.com/Kolchuzhin/Verilog-A_components/tree/main/MIREA (дата обращения: 06.02.2025).
21. Kolchuzhin V., Dotzel W., Mehner J. Challenges in MEMS parametric macro-modeling based on mode superposition technique. *Proc. of the 10th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems, EuroSimE*, 2009, pp. 1–4. <https://doi.org/10.1109/ESIME.2009.4938481>
 22. Kolchuzhin V. *Verilog-A_components*. Available at: https://github.com/Kolchuzhin/Verilog-A_components/tree/main/MIREA (accessed: 06.02.2025).

Авторы

Соловьев Александр Анатольевич — старший преподаватель, МИРЭА — Российский технологический университет, Москва, 119454, Российская Федерация, <https://orcid.org/0009-0008-3578-0963>, solovev_aa@mirea.ru

Певцов Евгений Филиппович — кандидат технических наук, доцент, директор дизайн центра, МИРЭА — Российский технологический университет, Москва, 119454, Российская Федерация, [sc 6602652601](https://orcid.org/0000-0001-6264-1231), <https://orcid.org/0000-0001-6264-1231>, pevtsov@mirea.ru

Колчужин Владимир Анатольевич — кандидат наук, ведущий инженер-конструктор, Qorvo Munich GmbH, Мюнхен, 81829, Германия, [sc 8966061600](https://orcid.org/0000-0002-6009-1499), <https://orcid.org/0000-0002-6009-1499>, vladimir.kolchuzhin@ieee.org

Статья поступила в редакцию 10.02.2025
Одобрена после рецензирования 02.05.2025
Принята к печати 26.05.2025

Authors

Alexander A. Solovlev — Senior Lecturer, Russian Technology University MIREA, Moscow, 119454, Russian Federation, <https://orcid.org/0009-0008-3578-0963>, solovev_aa@mirea.ru

Evgeny F. Pevtsov — PhD, Associate Professor, Director of the Design Center, Russian Technology University MIREA, Moscow, 119454, Russian Federation, [sc 6602652601](https://orcid.org/0000-0001-6264-1231), <https://orcid.org/0000-0001-6264-1231>, pevtsov@mirea.ru

Vladimir A. Kolchuzhin — PhD, Senior Design Engineer, Qorvo Munich GmbH, Munich, 81829, Germany, [sc 8966061600](https://orcid.org/0000-0002-6009-1499), <https://orcid.org/0000-0002-6009-1499>, vladimir.kolchuzhin@ieee.org

Received 10.02.2025
Approved after reviewing 02.05.2025
Accepted 26.05.2025



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»