

УДК 621.3.049.78

РАЗРАБОТКА БИБЛИОТЕКИ СИСТЕМНЫХ МОДЕЛЕЙ МЭМС РЕЗОНАТОРОВ

Соловьев А.А.¹, Певцов Е.Ф.¹, Колчужин В.А.²

¹МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Российская Федерация,
solovev_aa@mirea.ru

²QORVO Munich GmbH, Мюнхен, Федеративная Республика Германия

Аннотация: представлена библиотека системных моделей логических МЭМС вентилях, включающая трех-, пяти- и девятиконтактные микрорезонаторы с электростатическим возбуждением. Проанализированы динамические характеристики и логические операции на разработанных моделях.

Ключевые слова: МЭМС, резонаторы, логические элементы, вентили, системное моделирование.

I. ВВЕДЕНИЕ

В последнее время МЭМС резонаторы находят применение в качестве логических элементов, обеспечивая низкое энергопотребление, сокращая количество функциональных компонентов по сравнению с КМОП-технологиями, а также позволяя перепрограммирование в процессе работы и повышая надежность благодаря бесконтактному режиму функционирования [1].

В работе представлена библиотека системных моделей, состоящая из трех-, пяти- и девятиконтактных МЭМС резонаторов с электростатическим возбуждением для выполнения на их основе логических операций. Созданное тестовое окружение позволяет проверить функционирование модели и провести симуляции статического, частотного и динамического (во временной области) откликов структуры.

II. ТРЕХКОНТАКТНЫЙ МЭМС РЕЗОНАТОР

Трехконтактный резонатор представляет собой систему "пружина-масса-демпфер", состоящую из недеформируемой сейсмической массы, подвешенной на четырех подвесах (см. рис. 1). Собственная частота выбрана 439,49 кГц, масса равна 0,019 мкг, зазор между сейсмической массой и боковыми электродами равен 4 мкм. Коэффициент демпфирования равный $2,57 \cdot 10^{-6}$ мкН·с/мкм для $Q=20$

Для создания системных моделей был выбран язык описания аппаратных средств VHDL-AMS. Аналоговое поведение компонентов реализовано через величины, терминалы и уравнения.

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, определено напряжение схлопывания, которое составляет 276,1 В. Зависимости тока на чувствительном электроде от частоты напряжения смещения на подвижном электроде приведены на рис. 1. При увеличении напряжения на подвижном электроде электростатическая сила возрастает, что вызывает смещение резонансного пика влево и увеличение амплитуды осцилляций.

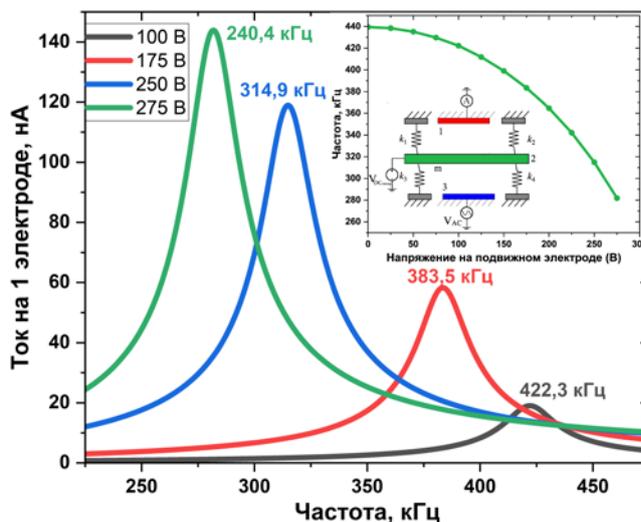


Рисунок 1. Зависимость АЧХ от напряжения на подвижном электроде, $V_1 = 1$ В (АС)

Реализация логических операций построена на принципе резонанса [2], когда резонансная частота подвижного электрода и частота подаваемого синусоидального сигнала совпадают, высокий выходной ток емкостным способом детектируется на чувствительном электроде. Для реализации логической операции «НЕ» на входной электрод, подается импульсный сигнал (рис. 2).

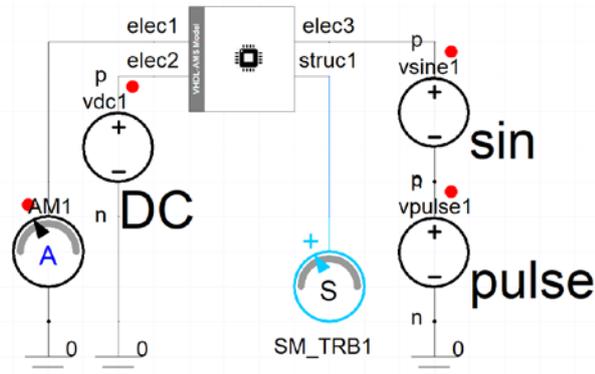


Рисунок 2. Подключение резонатора и источников для выполнения логической операции «НЕ»

Для реализации логических операций на подвижный электрод 2 подано смещение 250 В, на управляющий электрод 3, подается 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. Частота синусоидального сигнала на электроде 3 равна 314,89 кГц, при которой резонатор работает как логический вентиль «НЕ» (рис. 3).

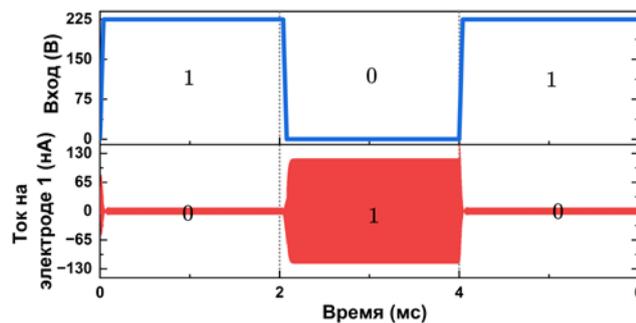


Рисунок 3. Осциллограмма, демонстрирующая реализацию логической операции «НЕ»

III. ПЯТИКОНТАКТНЫЙ МЭМС РЕЗОНАТОР

Для реализации полного функционального набора логических вентилях на основе одного резонатора, была использована конструкция с 4 боковыми электродами по два с каждой стороны подвижного элемента резонатора (рис. 4) [3]. Собственная частота выбрана 195 кГц, а сейсмическая масса равна 0,042 мкг, коэффициент демпфирования d равен $0,34 \cdot 10^{-6}$ мкН·с/мкм для $Q=150$.

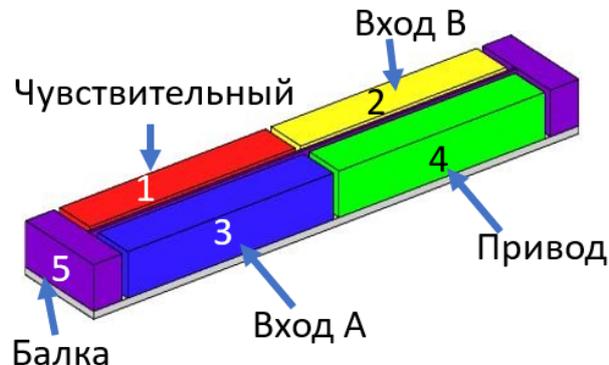


Рисунок 4. Пятиконтактный МЭМС резонатор для выполнения логических операций

Для пятиконтактного резонатора три различные частоты можно получить, подавая на цифровые входы 2 и 3 комбинации «0-0», «0-1/1-0» и «1-1» соответственно (рис. 5), где напряжение цифровой «1» равно 30 В, а напряжение цифрового «0» равно 0 В, на подвижный электрод 5 подано смещение 30 В.

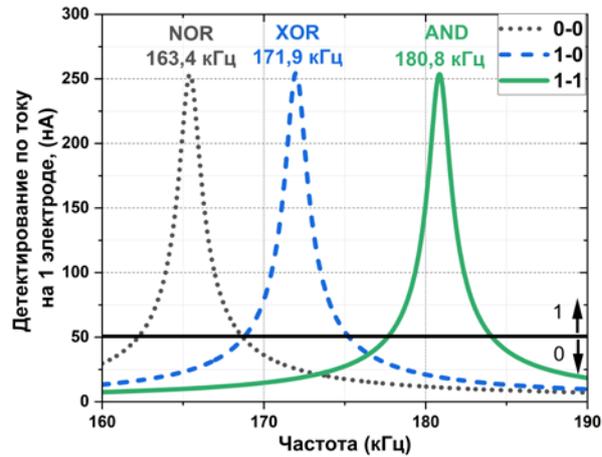


Рисунок 5. АЧХ резонатора при различных входных комбинациях цифровых входах 2 и 3, $V_4=1$ В (АС)

Если частота синусоидального сигнала на приводном электроде 4 равна 163,4 кГц, только входная комбинация «0-0» приводит к совпадению между вынужденной резонансной частотой подвижного электрода и частотой сигнала возбуждения. В остальных случаях выходной сигнал будет слабым. Следовательно, резонатор в данном случае работает как логический вентиль «ИЛИ-НЕ» (рис. 6).

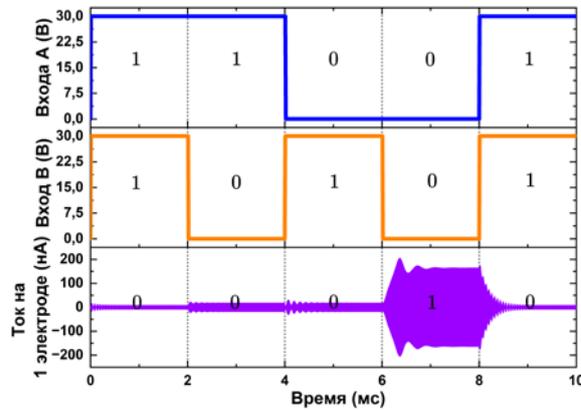


Рисунок 6. Осциллограмма, демонстрирующая реализацию логической операции ИЛИ-НЕ

IV. ДЕВЯТИКОНТАКТНЫЙ МЭМС РЕЗОНАТОР

Для реализации мультывходового логического вентиля, необходимо большее количество боковых электродов. На рис. 7 представлена АЧХ при различных комбинациях на цифровых входах 9-контактного МЭМС резонатора с собственной частотой 110 кГц, массой 22 мкг. Напряжение смещения на подвижном электроде и напряжение цифровой единицы «1», подаваемое на входы вентиля, выбраны близкими к напряжению схлопывания для большего разделения резонансных пиков и равняются 95 В, амплитуда синусоидального сигнала 1 В (АС), коэффициент демпфирования d равен $3,80 \cdot 10^{-4}$ мкН·с/мкм для $Q=40$.

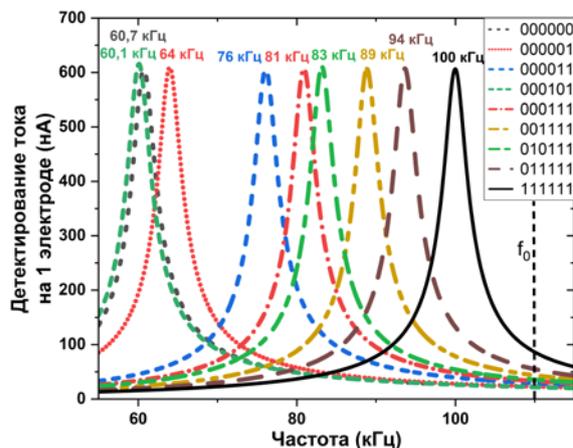


Рисунок 7. АЧХ 9-контактного резонатора при различных входных комбинациях цифровых входах

Данный резонатор позволяет реализовать, например, 6-входовый логический вентиль «И», осциллограмма которого представлена на рис. 8.

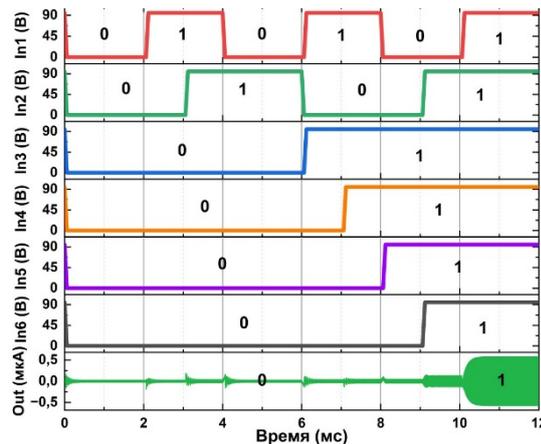


Рисунок 8. Осциллограмма, демонстрирующая работу логического вентиля 6И

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлена библиотека системных моделей трех-, пяти- и девятиконтактных микрорезонаторов с электростатическим возбуждением и варианты логических элементов на их основе. Полученная библиотека элементов и тесты могут применяться для сквозного автоматизированного проектирования цифровых схем на МЭМС-элементах, например, аналого-цифровых и цифро-аналоговых преобразователей, триггеров и арифметико-логических устройств.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (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).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Li R., Fariborzi H. Ultra-Low Power Data Converters with BEOL NEM Relays, in 2018 IEEE 61st International Midwest Symposium on Circuits and Systems (WSCAS), 2018, pp. 627-630.
- [2] Hafiz M. et al. Microelectromechanical reprogrammable logic device, Nat. Commun. 7, 2016, pp. 1–9.
- [3] Kolchuzhin V. LMGT_MEMS_component_library, URL: https://github.com/Kolchuzhin/LMGT_MEMS_component_library/tree/master/resonator/transducer_e5 (дата обращения: 10.11.2024).

DEVELOPMENT OF THE LIBRARY OF SYSTEM MODELS FOR MEMS RESONATORS

A. Solovev¹, E. Pevtsov¹, V. Kolchuzhin²

¹MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russian Federation, solovev_aa@mirea.ru

²Qorvo Munich GmbH, Munich, Federal Republic of Germany

Abstract: The library of system models of logic MEMS gates including three-, five-, and nine-terminal electrostatically excited microresonators is presented. The dynamic characteristics and logic operations on the developed models are analyzed.

Keywords: MEMS, microelectromechanical resonators, logic elements, gates, system modeling.