

DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-4-358-367

Анализ механических колебаний мембран микромеханических переключателей ёмкостного типа

А.М. Авсиевич, И.А. Таратын, А.Ф. Смалюк, В.В. Корогвич, Д.В. Розов

Белорусский национальный технический университет,
пр-т Независимости, 65, г. Минск 220013, Беларусь

Поступила 23.06.2025

Принята к печати 14.11.2025

Управление ёмкостью микромеханических переключателей ёмкостного типа происходит с высокой частотой за счёт изменения расстояния между гибкой мембраной и опорным электродом, поэтому колебания мембраны будут оказывать влияние на электрические сигналы и эксплуатационные характеристики таких переключателей. Целью работы являлось определение величин колебаний тонких мембран при высокочастотном воздействии и сопоставление их с величинами статических прогибов при аналогичном постоянном усилии. Использовался метод конечных элементов с пересчётом положений сетки по методу Эйлера–Лагранжа с последующим модальным и гармоническим анализом колебаний мембраны под действием периодически изменяющейся пондеромоторной силы, рассчитанной для выбранного диапазона напряжений. В качестве материалов мембраны рассматривались золото и вольфрам. Для рассмотренной геометрии амплитуда колебаний мембраны из золота в исследованном дорезонансном диапазоне частот на 16–21 % превышает величину статического прогиба, тогда как для вольфрамовой мембраны – только на 2,2–3,2 %, что объясняется значительно большим модулем упругости вольфрама. Для более жёсткой мембраны также характерны большие значения собственных частот. Увеличение амплитуды пондеромоторной силы приводит к кратному увеличению амплитуд колебаний мембраны, но не изменяет форму амплитудно-частотной характеристики. Показана актуальность исследования колебаний мембран в дорезонансной области. Приведены конструктивные способы повышения жёсткости мембран и оптимизации конструкций МЭМС-систем с элементами, совершающими колебательные движения.

Ключевые слова: микромеханический переключатель ёмкостного типа, мембрана, собственная частота, амплитудно-частотная характеристика, стабильность сигнала

Адрес для переписки:

Авсиевич А.М.
Белорусский национальный технический университет,
пр-т Независимости, 65, Минск 220013, Беларусь
e-mail: ausi@bntu.by

Для цитирования:

А.М. Авсиевич, И.А. Таратын, А.Ф. Смалюк, В.В. Корогвич,
Д.В. Розов.
Анализ механических колебаний мембран микромеханических
переключателей ёмкостного типа.
Приборы и методы измерений.
2025. Т. 16. № 4. С. 358–367.
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-4-358-367

Address for correspondence:

Ausiyevich A.M.
Belarusian National Technical University,
Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus
e-mail: ausi@bntu.by

For citation:

Ausiyevich AM, Taratyn IA, Smaliuk AF, Karohvich VV, Rozau DV.
Analysis of Mechanical Vibrations of Membranes of Capacitive Type
Micromechanical Switches.
Devices and Methods of Measurements.
2025;16(4):358–367. (In Russ.).
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-4-358-367

DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-4-358-367

Analysis of Mechanical Vibrations of Membranes of Capacitive Type Micromechanical Switches

A.M. Ausiyevich, I.A. Taratyn, A.F. Smaliuk, V.V. Karohvich, D.V. Rozau

Belarusian National Technical University,
Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus

Received 23.06.2025

Accepted for publication 14.11.2025

Abstract

Capacitance control of capacitive type micromechanical switches occurs at a high frequency due to a change of the distance between the flexible membrane and the reference electrode. Membrane oscillation will affect the electrical signals and operational characteristics of such switches. The aim of the work was to determine the values of vibrations of thin membranes under high-frequency exposure and compare them with the values of static bending under a similar constant force. The finite element analysis method was used with the recalculation of grid positions using the Euler–Lagrange method, with further modal and harmonic analysis of membrane vibrations under the action of a periodically varying ponderomotor force calculated for the selected voltage range. Gold and tungsten were considered as membrane materials. For considered membrane geometry the oscillation amplitude of the gold membrane in the studied preresonance frequency range is 16–21 % higher than the static bending value, whereas for the tungsten membrane it is only 2.2–3.2 %, which is explained by the significantly higher modulus of elasticity of tungsten. A more rigid membrane is also characterized by high values of natural frequencies. An increasing in the amplitude of the ponderomotor force leads to a multiple increasing of membrane vibration amplitudes, but does not change the shape of the amplitude-frequency response. The relevance of studying membrane vibrations in the preresonance values is shown. Constructive ways of increasing the rigidity of membranes and optimizing the design of MEMS systems with oscillation elements are given.

Keywords: micromechanical switch of capacitive type, membrane, natural frequency, amplitude-frequency response, signal stability

Адрес для переписки:

Авсиевич А.М.
Белорусский национальный технический университет,
пр-т Независимости, 65, Минск 220013, Беларусь
e-mail: ausi@bntu.by

Address for correspondence:

Ausiyevich A.M.
Belarusian National Technical University,
Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus
e-mail: ausi@bntu.by

Для цитирования:

А.М. Авсиевич, И.А. Таратын, А.Ф. Смалюк, В.В. Корогвич,
Д.В. Розов.
Анализ механических колебаний мембран микромеханических
переключателей ёмкостного типа.
Приборы и методы измерений.
2025. Т. 16. № 4. С. 358–367.
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-4-358-367

For citation:

Ausiyevich AM, Taratyn IA, Smaliuk AF, Karohvich VV, Rozau DV.
Analysis of Mechanical Vibrations of Membranes of Capacitive Type
Micromechanical Switches.
Devices and Methods of Measurements.
2025;16(4):358–367. (In Russ.).
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-4-358-367

Введение

В настоящее время МЭМС-переключатели становятся все более значимым элементом различных устройств. Они применяются в устройствах различного назначения. Управление ёмкостью микромеханических переключателей (МП) конденсаторного типа происходит с высокой частотой [1, 2]. Низкое время срабатывания, т. е. переключения с минимальной на максимальную ёмкость, является одним из основных требований к их конструкции. Управление ёмкостью чаще всего обеспечивается регулированием расстояния между пластинами за счёт изменения управляющего напряжения, вызывающего прогиб одной из пластин – тонкой мембраны. Поэтому мембраны являются основным исполнительным элементом МП ёмкостного типа [3]. Любые мембраны из-за относительно небольшой жёсткости склонны к значительным колебаниям при возмущающих воздействиях и имеют несколько собственных частот и форм колебаний [4]. В частности, это характерно для мембран МЭМС-систем. Частота внешних воздействий может приближаться с собственной частоте мембраны [5], а колебания мембраны приводят к изменению её расстояния до неподвижной пластины. Как известно, ёмкость плоского конденсатора зависит от расстояния между его пластинами [6]. Поэтому колебания мембраны могут оказывать значительное влияние на электрические и, как следствие, эксплуатационные характеристики ёмкостных микромеханических переключателей.

Постановка задачи и методология исследования

Согласно данным [7–8], время срабатывания для МП конденсаторного типа находится в пределах 10^{-6} – 10^{-4} с. При этом частота регулирования значительно меньше величины, обратной времени срабатывания. В работе [8] соответствующий параметр (скорость переключения) указан величиной 1 кГц. Подаваемый с частотой переключения управляющий сигнал фактически вызывает вынужденные колебания мембраны МЭМС-конденсатора.

Целью проводимого исследования являлось определение величин колебаний тонких

мембран при высокочастотном воздействии и сопоставление их с величинами статических прогибов при аналогичном постоянном усилии. Для этого использовался метод конечных элементов. Расчет пондеромоторной силы электростатического взаимодействия для характерного диапазона рабочих напряжений производился на основе определения поверхностного тензора Максвелла, деформация мембраны – на основе решения уравнения Коши согласно методике [9] с пересчётом положений сетки конечных элементов по методу Эйлера–Лагранжа [10]. Также согласно рекомендациям [9] осуществлялся модальный анализ с определением собственных частот мембраны и гармонический анализ колебаний мембраны под действием периодически изменяющейся пондеромоторной силы для получения амплитудно-частотных характеристик.

Геометрическая модель мембраны и её параметры

Согласно [3] мембраны имеют форму пластины одинаковой толщины, при этом их форма в плане может быть достаточно сложной. Исследовалась мембрана с распространённой двутавровой формой в плане с полной фиксацией широких элементов относительно корпуса устройства (рисунок 1).

Как известно, колебания всякого элемента определяются его инерционными, жёсткостными и диссипативными параметрами; собственная частота колебаний возрастает с увеличением жёсткости и уменьшается со снижением массы [4]. Варьирование геометрии пластины приводит к изменению как её жёсткости, так и массы, однако значения жёсткости изменяются более существенно. Помимо геометрических параметров жёсткость мембран определяется модулем Юнга её материала. В исследовании рассматривалась модель МП ёмкостного типа с мембраной толщиной 1 мкм без радиусов скруглений с длиной и шириной изгибающейся части соответственно $L = 600$ мкм, $B = 100$ мкм, при ширине центрально расположенного опорного электрода $W = 200$ мкм (рисунок 1). Толщина h принималась 1 мкм, величина зазора между мембраной и опорным электродом – 5 мкм.

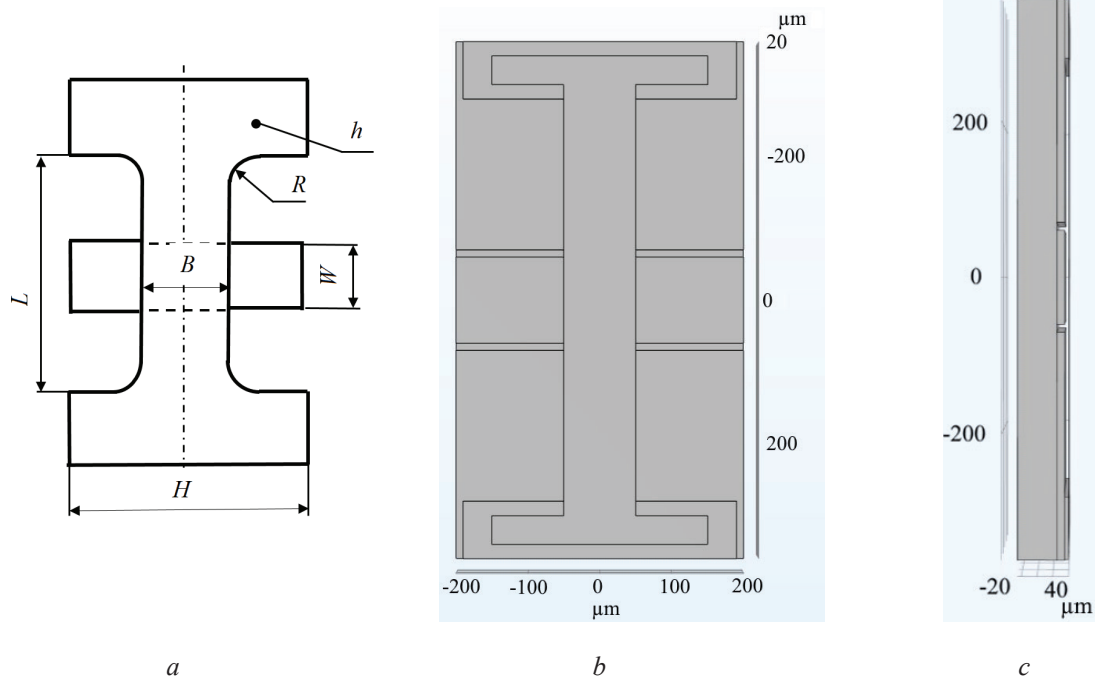


Рисунок 1 – Основные геометрические параметры ёмкостного элемента (a) и его модель в сборе (b, c)
Figure 1 – Basic geometric parameters of the capacitive element (a) and its assembly model (b, c)

В исследовании варьировалась величина электрического напряжения, подаваемого на мембрану, в пределах от нуля до значений, при которых наступает непосредственный контакт мембраны и управляющего электрода. Модельной средой в зазоре конденсатора являлся воздух. В качестве материалов мембраны и опорного электрода также, как и в исследовании [11], принимались золото и вольфрам, диэлектрические покрытия не предусматривались. Золото было выбрано в качестве наиболее технологичного и широко используемого материала со стабильными химическими свойствами. Вольфрам по сравнению с золотом менее широко используется для изготовления мембран [3], но среди применяемых материалов он обладает наиболее высоким модулем Юнга. С учётом определяющего влияния жёсткости на деформацию и колебательные процессы, проведено сравнение амплитуд колебаний золотой и вольфрамовой мембран.

Первоначально производился расчёт сил, действующих на мембрану, в зависимости от приложенного напряжения по формуле [12]:

$$F = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S U^2}{2d^2},$$

где F – сила; ε – диэлектрическая проницаемость материала (для воздуха $\varepsilon = 1$), ε_0 – диэлектрическая постоянная; S – площадь взаимодействия мембраны и опорного электрода, соответствующая прямоугольнику со сторонами B и L на рисунке 1; U – приложенное напряжение; d – зазор между мембраной и опорным электродом. Расчётные значения приведены в таблице 1.

Таблица 1 / Table 1

Расчётные значения пондеромоторной силы в зависимости от приложенного напряжения
Calculated values of the ponderomotor force depending on the applied voltage

Напряжение, В Voltage, V	1	2	4
Сила, Н Force, N	1.06×10^{-6}	4.25×10^{-6}	1.7×10^{-6}

Результаты моделирования

Визуализация результатов расчёта статической деформации мембраны приведена на рисунке 2. Расчётные значения прогиба центра мембраны для различных величин пондеромоторной силы приведены в таблице 2. Мембрана из золота проявила себя более податливой по сравнению с вольфрамовой.

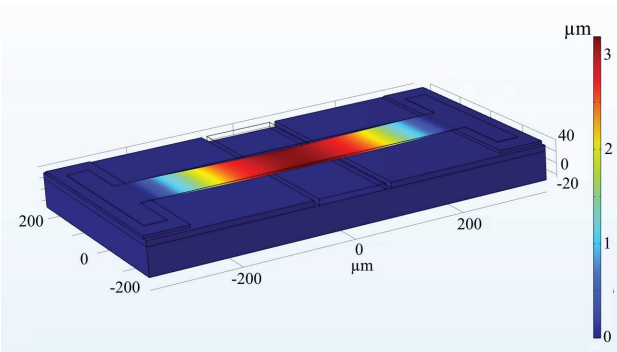


Рисунок 2 – Деформация мембраны из золота при напряжении 4 В

Figure 2 – Deformation of the gold membrane at a voltage of 4 V

Таблица 2 / Table 2

Величина прогиба центра мембраны

The deflection value of the membrane center

Напря- жение, В Voltage, V	Сила, Н Force, N	Прогиб мембраны, мкм Membrane deflection, mcm	
		золото gold	вольфрам tungsten
1	1.0e-6	0.68	0.134
2	4.25e-6	2.89	0.570
4	1.7e-5	11.6	2.28

Известно, что амплитуда механических колебаний любого тела при возбуждающем воздействии максимальна при совпадении частоты внешней силы с собственной частотой [4]. Поэтому первоначально проводился анализ собственных частот и форм колебаний мембраны. Выявлены 6 собственных частот мембран (таблица 3). Для золотой и вольфрамовой мембраны формы для соответствующих номеров собственных частот совпадают, при этом значения частот различаются кратно. Форма колебаний на первой собственной частоте

соответствует форме статически изгибаемой мембраны под действием силы, приложенной по её середине (рисунок 3).

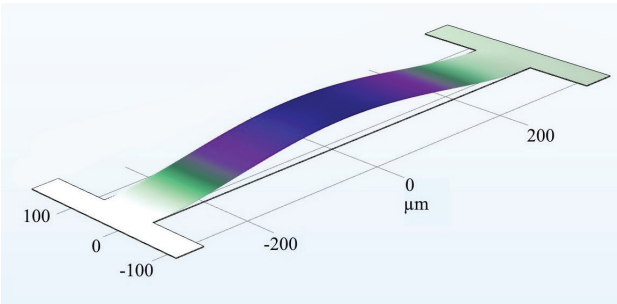


Рисунок 3 – Форма колебаний мембраны на первой собственной частоте

Figure 3 – The form of the membrane vibrations at the first natural frequency

Таблица 3 / Table 3

Собственные частоты мембран из золота и вольфрама

The natural frequencies of the golden and tungsten membrane

Номер собственной частоты Number of natu- ral frequency	Значение собственной частоты мембран, Гц Value of natural frequency, Hz	
	золото gold	вольфрам tungsten
1	5115	12229
2	14188	38819
3	20333	51677
4	28047	66520
5	41787	105630
6	46741	110210

Для вольфрамовой мембраны более высокие значения собственных частот, как и меньшие величины статического прогиба, объясняются повышенной жёсткостью вольфрама по сравнению с золотом (модули Юнга соответственно $E_W = 411$ ГПа и $E_{Au} = 78,5$ ГПа [13]).

Частоты переключения МП ёмкостного типа значительно меньше первой собственной частота, особенно для вольфрамовых мембран. Однако, из-за того, что первая форма колебаний полностью соответствует изгибу мембраны при подаче напряжения,

и амплитудно-частотная характеристика любого колеблющегося объекта имеет форму, близкую к Гауссовой кривой, амплитуды колебаний мембраны в области рабочих частот будут превышать величины статического прогиба и монотонно возрастать с увеличением частоты [4]. Рост этих амплитуд может оказывать влияние на стабильность ёмкости и эксплуатационные параметры переключателя.

Для оценки значимости колебательного процесса проведён гармонический анализ колебаний мембран под действием центрально приложенных сил величиной $1 \cdot 10^{-6}$ Н и $4,25 \cdot 10^{-6}$ Н, соответствующих электрическому напряжению 1 В и 2 В и изменяющихся по гармоническому закону. Соответствующие амплитудно-частотные характеристики представлены на рисунках 4–7.

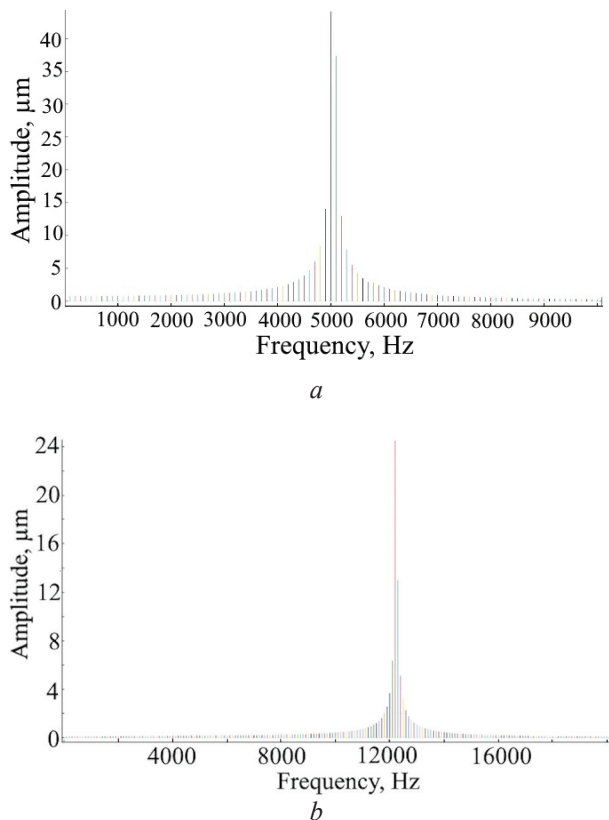


Рисунок 4 – Амплитудно-частотные характеристики мембран при гармоническом нагружении силой $1 \cdot 10^{-6}$ Н: *a* – золото, диапазон частот 100–10000 Гц; *b* – вольфрам, диапазон частот 100–20000 Гц

Figure 4 – Amplitude-frequency characteristics of membranes in the under harmonic loading with a force of $1 \cdot 10^{-6}$ Н: *a* – gold, frequency range 100–10000 Hz; *b* – tungsten, frequency range 100–20000 Hz

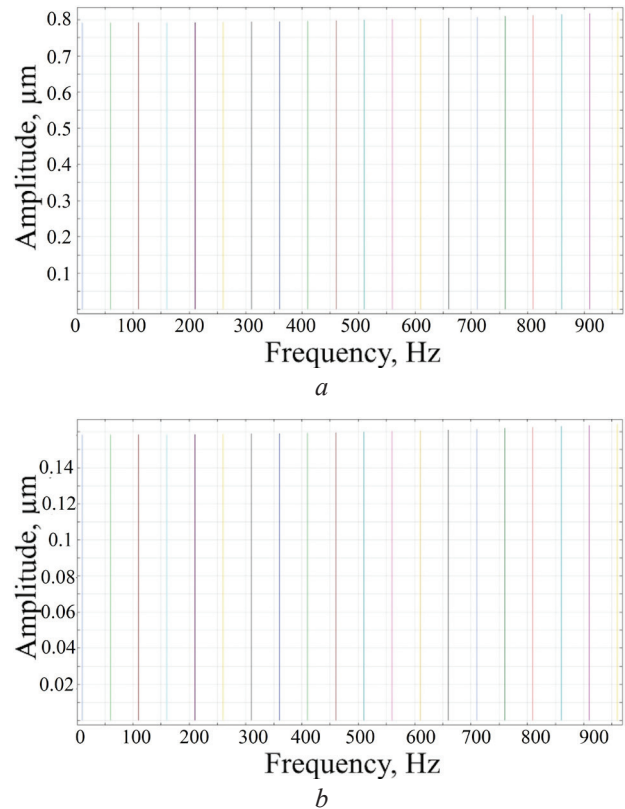


Рисунок 5 – Фрагменты амплитудно-частотных характеристик мембран в диапазоне частот 100–1000 Гц при гармоническом нагружении силой $1 \cdot 10^{-6}$ Н: *a* – золото; *b* – вольфрам

Figure 5 – Fragments of amplitude-frequency characteristics of membranes in the frequency range of 100–1000 Hz under harmonic loading with a force of $1 \cdot 10^{-6}$ Н: *a* – gold; *b* – tungsten

Как следует из результатов моделирования, для золотой мембраны толщиной 1 мкм в рабочем диапазоне частот 100–1000 Гц при силе $1 \cdot 10^{-6}$ Н (рисунок 5*a*) амплитуда колебаний монотонно возрастает от 0,791 до 0,824 мкм. Превышение амплитуды над величиной статического прогиба, указанной в таблице 2, составляет 0,11 мкм или 16 % на частоте 100 Гц и 14 мкм или 21 % на частоте 1000 Гц. Расчётная амплитуда колебаний на первой собственной частоте составляет 44 мкм (рисунок 4*a*), что превышает величину статического прогиба в 65 раз. При гармоническом нагружении золотой мембраны силой $4,25 \cdot 10^{-6}$ Н амплитуда колебаний в диапазоне частот 100–1000 Гц монотонно возрастает от 3,36 до 3,50 мкм (рисунок 7*a*).

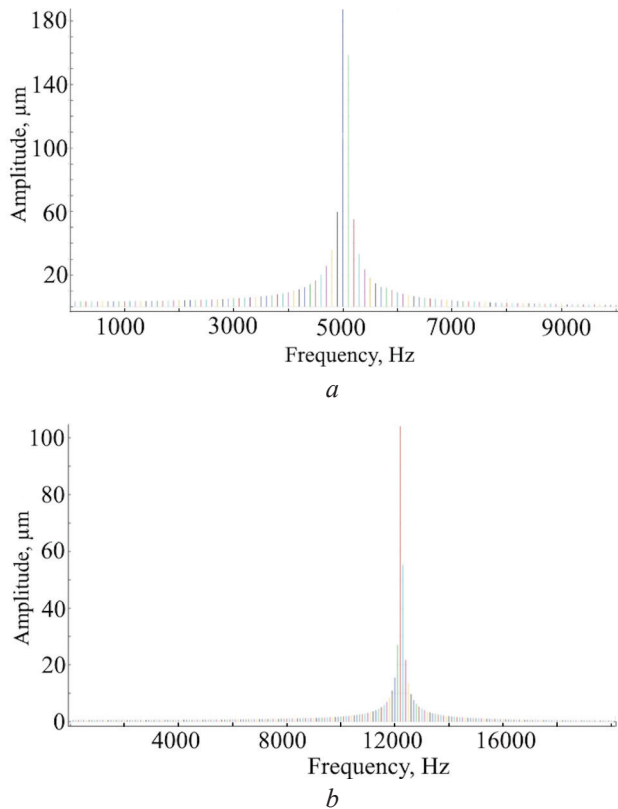


Рисунок 6 – Амплитудно-частотные характеристики мембран при гармоническом нагружении силой $4,25 \cdot 10^{-6}$ Н: *a* – золото, диапазон частот 100–10000 Гц; *b* – вольфрам, диапазон частот 100–20000 Гц

Figure 6 – Amplitude-frequency characteristics of membranes in the under harmonic loading with a force of $4.25 \cdot 10^{-6}$ N: *a* – gold, frequency range 100–10000 Hz; *b* – tungsten, frequency range of 100–20000 Hz

Превышение амплитуды над величиной статического прогиба изменяется от 0,48 мкм до 0,61 мкм, что в относительном выражении составляет от 16 % на частоте 100 Гц до 21 % на частоте 1000 Гц, относительное превышение амплитуды аналогично нагружению силой $1 \cdot 10^{-6}$ Н. Расчётная амплитуда колебаний на первой собственной частоте составляет 188 мкм (рисунок 6*a*), что превышает величину статического прогиба также в 65 раз.

Для вольфрамовой мембраны при усилии $1 \cdot 10^{-6}$ Н и частоте 100 Гц амплитуда колебаний составляет 0,137 мкм, на частоте 1000 Гц – 0,138 мкм (рисунок 5*b*), что незначительно (на 2,2–3,0 %) отличается от величины статического прогиба, указанного в таблице 2. Для вольфрамовой мембраны при усилии $4,25 \cdot 10^{-6}$ Н и частоте 100 Гц амплитуда колебаний составляет 0,5832 мкм, а на частоте 1000 Гц – 0,5881 мкм

(рисунок 7*b*), что также на 2,3–3,2 % превышает величину статического прогиба, равную 0,570 мкм.

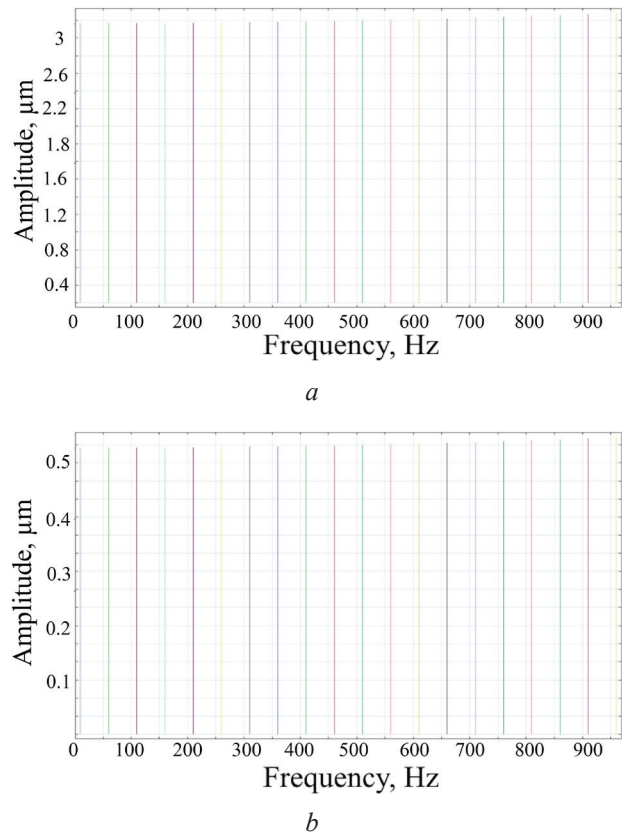


Рисунок 7 – Фрагменты амплитудно-частотных характеристик мембран в диапазоне частот 100–1000 Гц при гармоническом нагружении силой $4,25 \cdot 10^{-6}$ Н: *a* – золото; *b* – вольфрам

Figure 7 – Fragments of amplitude-frequency characteristics of membranes in the frequency range of 100–1000 Hz under harmonic loading with a force of $4.25 \cdot 10^{-6}$ N: *a* – gold; *b* – tungsten

Амплитуды колебаний на первой собственной частоте при усилиях $1 \cdot 10^{-6}$ Н и $4,25 \cdot 10^{-6}$ Н составляют соответственно 24,5 мкм и 104 мкм (рисунки 4*b* и 6*b*), что в обоих случаях кратно величине статического прогиба в 182 раза.

Анализ результатов моделирования

Для обоих материалов мембраны увеличение возмущающей силы от $1 \cdot 10^{-6}$ Н до $4,25 \cdot 10^{-6}$ Н приводит к кратному увеличению как статического прогиба, так и амплитуд колебаний во всём диапазоне частот. Форма амплитудно-частотной характеристики при изменении приложенной силы не изменяется.

Соотношение амплитуд колебаний для золотой и вольфрамовой мембран A_{Au}/A_W в диапазоне частот от 100 Гц до 10000 Гц показано на рисунке 8.

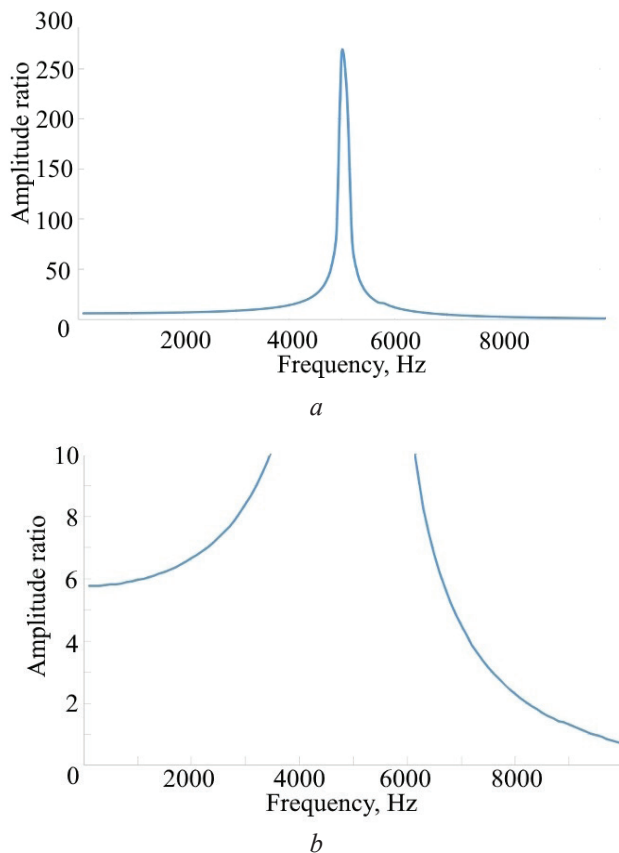


Рисунок 8 – Соотношения амплитуд колебаний мембраны из золота и вольфрама (A_{Au}/A_W): *a* – во всём диапазоне исследованных частот; *b* – в дорезонансной и зарезонансной областях относительно первой собственной частоты золотой мембраны

Figure 8 – The ratio of oscillation amplitudes of the gold and tungsten membrane (A_{Au}/A_W): *a* – in the entire range of the studied frequencies; *b* – in the pre-resonant and trans-resonant regions relative to the first natural frequency of the gold membrane

Оно одинаково для обоих значений сил, но возрастает с увеличением частоты: 5,07 для статических прогибов, 5,77 на частоте 100 Гц и 5,95 на частоте 1000 Гц. Для дорезонансной и зарезонансной областей относительно первой собственной частоты золотой мембраны соответствующая кривая в целом соответствует амплитудно-частотной характеристике на рисунках 4а и 6а). На первой собственной частоте золотой мембраны 5115 Гц превышение соотношения амплитуд превышает 200 крат.

В исследуемом диапазоне частот 100–1000 Гц рассматриваемое соотношение амплитуд постоянно возрастает с увеличением частоты. Следует заметить, что показанное соотношение амплитуд становится меньше единицы только после частоты 9500 Гц, приближающейся к первой собственной частоте вольфрамовой мембраны, и достаточно удалённой от собственной частоты золотой.

Заключение

На основании проведённого моделирования установлено, что в рабочем диапазоне частот микромеханического переключателя ёмкостного типа амплитуды колебаний мембраны превышают величины статического прогиба при одинаковой величине как постоянной, так и гармонически изменяющейся силы. Для мембраны из вольфрама это превышение незначительно и составляет 2,2–3,2 %, в то время как для золотой мембраны оно составляет 16–21 % и может оказать значимое влияние на работу переключателя. Такое различие в колебательном поведении мембран объясняется более высокой жёсткостью вольфрама (соотношение модулей Юнга – более 4 раз). Повышенная жёсткость мембраны обеспечивает не только увеличение сопротивлению деформации, но и сдвиг значений первой собственной частоты колебаний в сторону больших значений (для вольфрама в 2,4 раза выше, чем для золота). Увеличение амплитуды приложенной силы приводит к кратному увеличению амплитуд колебаний мембраны на соответствующих частотах при полном совпадении формы амплитудно-частотной характеристики. Это также доказывает, что жёсткость является определяющим фактором колебаний мембраны. Таким образом, с целью обеспечения стабильности электрических сигналов следует рекомендовать для изготовления мембран вольфрам, как материал с более высокой жёсткостью.

Однако при использовании технологичного и более химически стабильного золота существуют широкие возможности для управления жесткостью мембран за счёт варьирования конструктивных параметров. Для рассмотренной в проведённых исследованиях конструкции мембран в качестве варьируемых геометрических параметров могут быть выбраны: соотношение ширины пластины

к её длине (B/L), отношение ширины опорного электрода к длине пластины (W/L), радиусы скругления пластины R , степень перфорации и толщина мембраны. Значимым фактором управления амплитудой колебаний мембран может быть положение и количество опорных электродов, что позволит изменить динамику изгиба мембраны за счёт того, что её изгиб будет начинаться одновременно в нескольких точках. Влияние всех указанных геометрических параметров на колебания мембран МЭМС-систем будет являться предметом дальнейших исследований.

Полученные результаты и использованный при проведении исследований подход представляются актуальными для оптимизации конструкций МЭМС-систем с элементами, совершающими колебательные движения. Изменение размеров мембран будет приводить к существенному сдвигу значений собственных частот их колебаний. Однако, для любых конструктивных решений целесообразна оценка изменения амплитуды колебаний при частотном воздействии даже с частотой далекой от резонансной.

Список использованных источников

1. Anagnostou, D.E., Zheng G., Papapolymerou J., Christodoulou C.G. Reconfigurable multifrequency antenna with RF MEMS switches. U.S. Patent 7,589,674, Sept. 15, 2009.
2. Tagliapietra, G. A comprehensive overview of recent developments in RF-MEMS technology-based high-performance passive components for applications in the 5G and future telecommunications scenarios / G. Tagliapietra, J. Iannacci // *Facta Universitatis. Series: Electronics and Energetics*. – 2021. – Vol. 34, No 3. – P. 333–366. DOI: 10.2298/FUEE2103333T
3. Варадан, В. ВЧ МЭМС и их применение / В. Варадан, К. Виной, К.Джозе. Москва: Техносфера, 2004. – 528 с.
4. Блехман, И.И. Вибрационная механика и вибрационная реология (теория и приложения) / И.И. Блехман. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2018. – 752 с.
5. Авсиевич, А.М. Влияние геометрии кремниевое чувствительного элемента МЭМС на собственные колебания / А.М. Авсиевич, И.А. Таратын, А.Ф. Смалюк, П.С. Кириллов // *Математические методы в технологиях и технике*. Научный журнал, № 11, – СПб.: ООО «Сарлен-Алекс», 2021. – С. 71–75. DOI: 10.52348/2712-8873_MMTT_2021_11_71

6. Rebeiz, Gabriel. RF MEMS: Theory, Design, and Technology / Gabriel M. Rebeiz. USA: John Wiley, 2003. – 512 p.

7. Кочемасов, В. Майстренко, А. СВЧ-переключатели на основе МЭМС / Виктор Кочемасов, Александр Майстренко // *СВЧ-электроника*. М.: ООО «ИД Электроника», 2016. – № 1. – С. 36–42.

8. Сысоева, С. Высокочастотные МЭМС-ключи. Технологии и применения / С. Сысоева // *Компоненты и технологии*. СПб.: Файнстрит, 2011. – № 11. – С. 29–36.

9. Introduction to COMSOL Multiphysics 5.2 Reference Guide. Comsol Inc, 2015. – 184 p.

10. Stein, E. Encyclopedia of Computational Mechanics. Vol. 1: Fundamentals. / E. Stein, R. de Borst, T.J. Hughes // USA: John Wiley, 2004. – 798 p.

11. Шукевич, Я.И. Моделирование динамики работы МЭМС-переключателя / Я.И. Шукевич, В.В. Баркалин, И.А. Таратын, О.Г. Реутская // *Нано- и Микросистемная техника*. – Т. 18. – № 11. – 2016. – С. 666–671.

12. Вавилов, В.Д. Микроэлектромеханические системы: монография / В.Д. Вавилов // Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева. – Н. Новгород, 2014. – 631 с.

13. François Cardarelli. Materials Handbook: A Concise Desktop Reference, 2nd edition. London: Springer-Verlag, 2008. – P. 1188–1192.

DOI: 10.1007/978-1-84628-669-8

References

1. Anagnostou, D.E., Zheng G., Papapolymerou J., Christodoulou C.G. Reconfigurable multifrequency antenna with RF MEMS switches. U.S. Patent 7,589,674, Sept. 15, 2009.
2. Tagliapietra G, Iannacci J. A comprehensive overview of recent developments in RF-MEMS technology-based high-performance passive components for applications in the 5G and future telecommunications scenarios. *Facta Universitatis. Series: Electronics and Energetics*. 2021;34(3):333-366. DOI: 10.2298/FUEE2103333T
3. Varadan V, Vinoy K, Jose K. RF MEMS and Their Applications. John Wiley, 2003 / Moscow: Technosphera, 2004. 528 p.
4. Blekhman I. Vibrational mechanics and vibrational rheology (theory and applications). Moscow: PHYS-MATLIT, 2018. 752 p.
5. Ausiyevich A, Taratyn I, Smaliuk A, Kiryllau P. Influence of the MEMS silicon sensing element geometry on its natural oscillations. *Mathematical methods at technologies and technics*. Scientific Journal.

2021;(11):71-75. (In Russ.).

DOI: 10.52348/2712-8873_MMTT_2021_11_71

6. Rebeiz Gabriel. RF MEMS: Theory, Design, and Technology. USA: John Wiley. 2003. 512 p.

7. Kochemasov V, Maistrenko A. Microwave switches based on MEMS. Microwave Electronics. Moscow: Publishing House Electronics. 2016;(1):36-42. (In Russ.).

8. Sysoeva S. High-frequency MEMS switches. Technologies and applications. Components and Technologies. St. Petersburg: Finestreet. 2011;(11):29–36. (In Russ.).

9. Introduction to COMSOL Multiphysics 5.2 Reference Guide. Comsol Inc. 2015. 184 p.

10. Stein ER. de Borst, Hughes TJ. Encyclopedia of Computational Mechanics. Vol. 1: Fundamentals. USA: John Wiley, 2004. 798 p.

11. Shukevich Ya, Barkalin V, Taratyn I, Reutskaya O. Simulation of the Dynamics of Operation of RF MEMS Switch. Nano- and Microsystem Technics. 2016;18(11):666-671. (In Russ.).

12. Vavilov V. Microelectromechanical systems: monograph. Nizhny Novgorod State Technical University after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, 2014. 631 p.

13. François Cardarelli. Materials Handbook: A Concise Desktop Reference, 2nd edition. London: Springer-Verlag, 2008. 1188-1192 p.

DOI: 10.1007/978-1-84628-669-8