

**Влияние параметров конструкции актюаторов
на чувствительность частотных микроакселерометров**

Аунг Тхура, Б.М. Симонов, С.П. Тимошенков

*Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,
г. Москва, Россия*

serborsel@mail.ru

Электростатический актюатор применяется в конструкциях микромеханических акселерометров, гироскопов, вибромоторов и других приборов. Изменение величины зазора между гребенками ротора и статора разных форм влияет на электростатическую силу. В микроэлектромеханических датчиках актюатор гребенчатой конструкции используется для возбуждения колебаний резонатора.

В работе получено уточненное уравнение для расчета электростатической силы актюатора гребенчатой и балочной конструкций. С помощью моделирования в программе ANSYS исследовано влияние величины перекрытия между зубцами гребенок на электростатическую силу и емкость, а также изменение частоты колебаний резонатора при воздействии силы. Аналогичные исследования выполнены для резонатора балочной конструкции.

Применение как балочной, так и гребенчатой конструкции с малым перекрытием зубцов гребенок позволяет уменьшить паразитные электростатические силы (по осям y , z) и повысить чувствительность частотного микроакселерометра за счет большего изменения частоты колебаний резонатора при воздействии силы.

Ключевые слова: актюаторы гребенчатой и балочной конструкций; резонатор; электростатическая сила; перекрытие между гребенками; чувствительность.

Для цитирования: Аунг Тхура, Симонов Б.М., Тимошенков С.П. Влияние параметров конструкции актюаторов на чувствительность частотных микроакселерометров // Изв. вузов. Электроника. – 2017. – Т. 22. – № 4. – С. 386–397. DOI: 10.24151/1561-5405-2017-22-4-386-397

Influence of Parameters of Actuators Constructions on Sensitivity of Frequency Microaccelerometers

Aung Thura, B.M. Simonov, S.P. Timoshenkov

National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

serborsel@mail.ru

In microelectromechanical (MEMS) sensors the construction of a comb actuator is used for excitation of the resonator.

In this article, we found a refined equation for the calculation of the electrostatic force of such an actuator. With the help of simulation in ANSYS program the effect of overlap amount between the teeth of the combs on the electrostatic force and the capacitance has been studied as well as the changes of the frequency of the resonator when it is exerted by the force.

Similar studies have been implemented for a bar construction of the resonator, the usage of which, as comb design with small overlap of teeth, allows to decrease the parasitic electrostatic forces (along axes y , z) and to increase the sensitivity of the frequency microaccelerometer due to a larger change in the frequency of the resonator oscillations when subjected to forces.

Keywords: actuators of a comb and bar construction, a resonator, an electrostatic force, the overlap between the combs, sensitivity.

For citation: Aung Thura, Simonov B.M., Timoshenkov S.P. Influence of Parameters of Actuators Constructions on Sensitivity of Frequency Microaccelerometers // Proc. of Universities. Electronics. – 2017. – Vol. 22. – No. 4. – P. 386–397. DOI: 10.214151/1561-5405-2017-22-4-386-397

Введение. В микроэлектромеханических приборах, изделиях микросистемной техники широко применяются различные актюаторы (микроприводы) [1] для возбуждения колебаний резонатора, RF-MEMS-фильтра, осциллятора, химических датчиков и др. [2]. Принципы их функционирования могут быть различными: электростатический, электротермический, электромагнитный, пьезоэлектрический. Каждый из них имеет свои преимущества и недостатки. Выбор того или иного способа возбуждения колебаний во многом зависит от требований технического задания к конструкции, а также от условий эксплуатации изделия [3, 4]. В микроэлектромеханических системах получил распространение так называемый «гребенчатый микропривод» – электростатический актюатор. Он применяется в конструкциях микромеханических акселерометров, гироскопов, вибромоторов и других приборов. Использование электростатического способа возбуждения колебаний требует большого напряжения, при этом амплитуда колебаний резонатора невелика [5, 6].

В работах [7, 8] исследованы разные формы гребенок и сделано заключение, что изменение зазора между гребенками разных форм влияет на электростатическую силу. При исследовании гребенки прямоугольной формы в работе [7] расчет электростатической силы дал результаты, не совпадающие с результатами, полученными авторами настоящей статьи с помощью моделирования в программе ANSYS.

В настоящей работе проанализирована работа актюаторов (микроприводов) гребенчатой и балочной конструкций и выполнены расчеты, результаты которых хорошо совпадают с результатами моделирования.

Возбуждение резонатора электростатическим способом. Существуют различные конструкции гребенчатого возбудителя, которые используются в акселерометрах, работающих на разных частотах. В некоторых из них применяются гребенчатые актюаторы, прямо связанные с инерционной массой акселерометра, в других гребенчатые актюаторы связаны с резонатором.

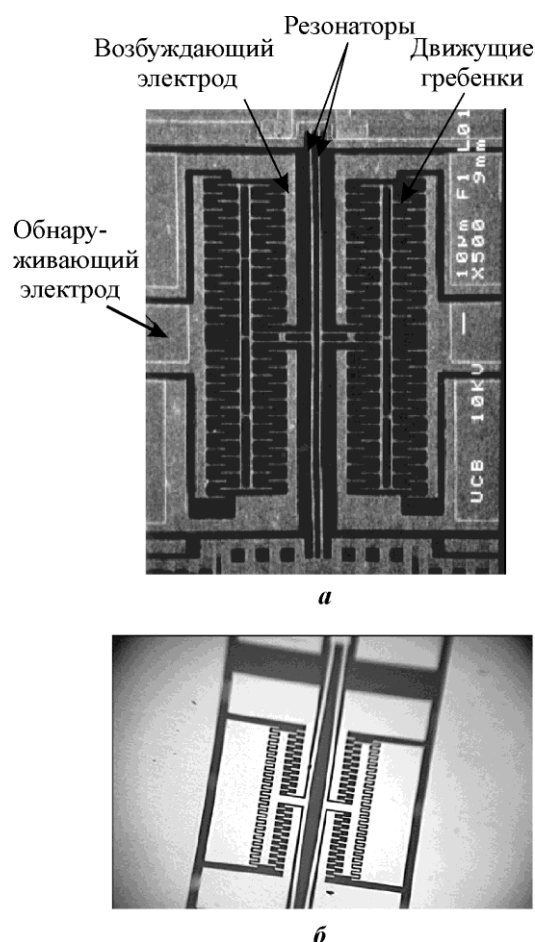


Рис. 1. Конструкции гребенчатых актюаторов с резонатором: а – [9]; б – [16]

Fig. 1. The designs of comb actuators with a resonator (photos): a – [9]; b – [16]

На рис.1 показаны конструкции гребенчатых актюаторов с резонатором. Когда гребенки возбуждаются, резонаторы колеблются на собственной резонансной частоте. При воздействии ускорения инерционная масса микроакселерометра, связанная с резонаторами, растягивает или сжимает их, при этом их резонансная частота меняется. С помощью детектора можно обнаруживать изменение резонансной частоты [9]. Колебание резонаторов зависит от его конструкции и электростатической силы. Если между гребенками возникает небольшая электростатическая сила, резонаторы колеблются с малой амплитудой. Если электростатическая сила велика, амплитуда колебаний резонатора увеличивается. Для обеспечения значительной электростатической силы нужен узкий зазор между гребенками, но при этом величина зазора ограничивает амплитуду колебаний [10].

Для нахождения оптимальной конструкции гребенчатого актюатора изучены ее разновидности [7, 8]. Для возникновения электростатического возбуждения требуются напряжение $\sim 10 \dots 150$ В и большая площадь поверхности взаимодействующих электродов. При электростатическом возбуждении обеспечивается небольшая амплитуда колебаний резонатора, но есть возможность точно контролировать отклонение

резонатора. В этом случае реакция на действие силы (ускорение) быстрая, потребляемая мощность мала. При возбуждении сила, воздействующая на резонатор, изменяется в диапазоне $10^{-6} \dots 10^{-3}$ Н, а отклонение достигает 200 мкм [11]. Рабочая частота колебания резонатора составляет 20–100 кГц [12].

Электростатическая сила, приложенная к статору. Взаимодействие гребенчатого возбудителя с резонатором схематически показано на рис.2.

Электростатическая сила типичного гребенчатого актюатора, приложенная между ротором и статором, определяется уравнением [13]

$$F_x = N\epsilon_0\epsilon_r \frac{hU^2}{x}, \quad (1)$$

где F_x – электростатическая сила, Н; N – число зубцов в одной гребенке; $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная; ϵ_r – относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика между гребенками ротора и статора; h – толщина гребенки, мкм; x – зазор между соседними зубцами гребенок, мкм; U – напряжение, В.

В работе [13] рассчитана электростатическая сила F_x по формуле (1) для актюатора с одинаковым числом зубцов в каждой из двух взаимодействующих гребенок. На рис.3,а, приведен фрагмент гребенчатого актюатора и показано место приложения силы F_x . Однако в действительности для гребенчатого актюатора количество мест приложения силы F_x будет в два раза больше при одинаковом числе зубцов в гребенках (рис.3,б).

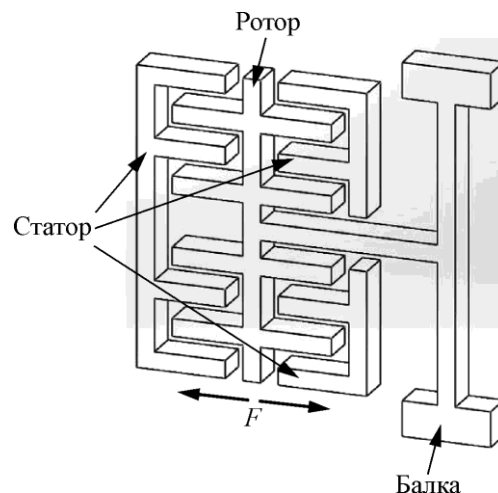


Рис.2. Схематическое изображение взаимодействия гребенчатого актюатора с резонатором
Fig.2. Schematic picture of the interconnection of a comb actuator with a resonator

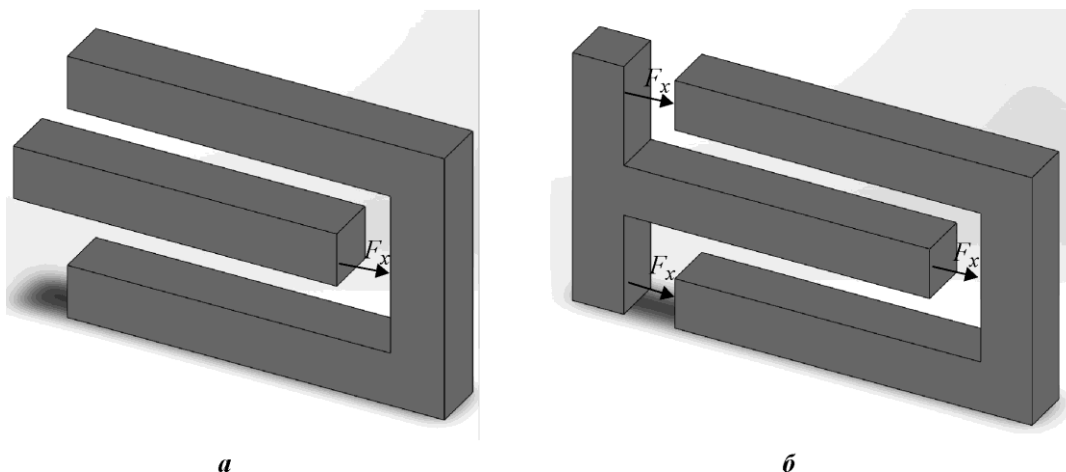


Рис.3. Геометрические модели для определения электростатической силы:
а – [15, 16]; б – разработанная авторами настоящей статьи
Fig.3. The geometric model for determining of the electrostatic force:
а – used in [15–16]; б – developed by us

Часто используют гребенки с разным числом зубцов, как правило, отличающимся на 1, тогда число мест взаимодействия увеличивается еще на 1. В результате применительно к двум взаимодействующим гребенкам формула (1) может быть уточнена и переписана следующим образом:

$$F_x = (2N + 1)\epsilon_0\epsilon_r \frac{hU^2}{x}. \quad (2)$$

При моделировании в программе ANSYS результаты не совпадают с результатами расчета F_x , полученными по уравнению (1) в работах [7, 9, 14, 15], но совпадают с результатами аналитического расчета по уравнению (2). Анализ показывает, что если от-

ношение h/x не равно 1, то уравнение (2) не дает точного результата, т.е. уравнение работает при одинаковых размерах толщины и зазора.

При моделировании в программе ANSYS для гребенок прямоугольной формы с числом зубцов в гребенках $N = 16$, $N + 1 = 17$, при $h = 5$ мкм, $y = 5$ мкм, длине всей гребенки 325 мкм получен результат для электростатической силы $F_x = 1,1681 \cdot 10^{-7}$ Н. При расчете с помощью уравнения (1) $F_x = 6,018 \cdot 10^{-8}$ Н, с помощью уравнения (2) $F_x = 1,1682 \cdot 10^{-7}$ Н.

Учет влияния длины перекрытия между зубцами гребенок на электростатическую силу. С целью изучения влияния изменения длины перекрытия между зубцами гребенок D на электростатическую силу между ними выполнено моделирование гребенчатого электростатического актюатора (см. рис.3,б). Результаты представлены в табл.1.

Таблица 1

Результаты моделирования влияния изменения длины перекрытия между зубцами гребенок на электростатическую силу

Table 1

The results of the investigation of the effect of the change in the overlap between the combs on the magnitude of the electrostatic force for one comb

Длина перекрытия между зубцами гребенок D , мкм	Зазор x , мкм	Электростатическая сила F , 10^{-9} , Н
20	5	9,028
15	5	8,943
10	5	8,939
5	5	8,933

Когда движущиеся гребенки перемещаются по отношению к статору, резонатор отклоняется, в результате чего изменяются зазоры: $x_0 + x_1$, $x_0 - x_1$ (рис.4). Например, изменение зазора может быть в пределах ± 1 мкм, при этом происходит изменение электростатической силы согласно формулам (1), (2). При возбуждении резонатора внешним источником зазоры между гребенками также меняются, что влияет на электростатическую силу и емкость между гребенками.

В табл.2 приведены результаты моделирования такого влияния. Для расчета выбрано 16 зубцов гребенки с толщиной гребенки 5 мкм, длина перекрытия между зубцами гребенок D , расположенных в одной плоскости, составляла 5 и 10 мкм, зазор между гребенками $x_0 = y_0 = 5$ мкм, между гребенками подано напряжение 20 В.

Вместо гребенок может использоваться ротор балочной конструкции (рис.5). В табл.3 приведены результаты моделирования влияния зазора между балками на электростатическую силу и емкость между левыми статором и ротором и между правыми статором и ротором до перемещения и после перемещения на 1 мкм по направлению к левому статору.

Сравнение полученных результатов (см. табл. 2 и 3) показывает, что для возбуждения колебаний резонатора балочная конструкция предпочтительнее. Электростатическая сила между параллельными балками действует в требуемом направлении (по оси x), при этом практически нет паразитной электростатической силы в других направлениях (по осям y и z), в результате стабильность колебаний резонатора возрастает.

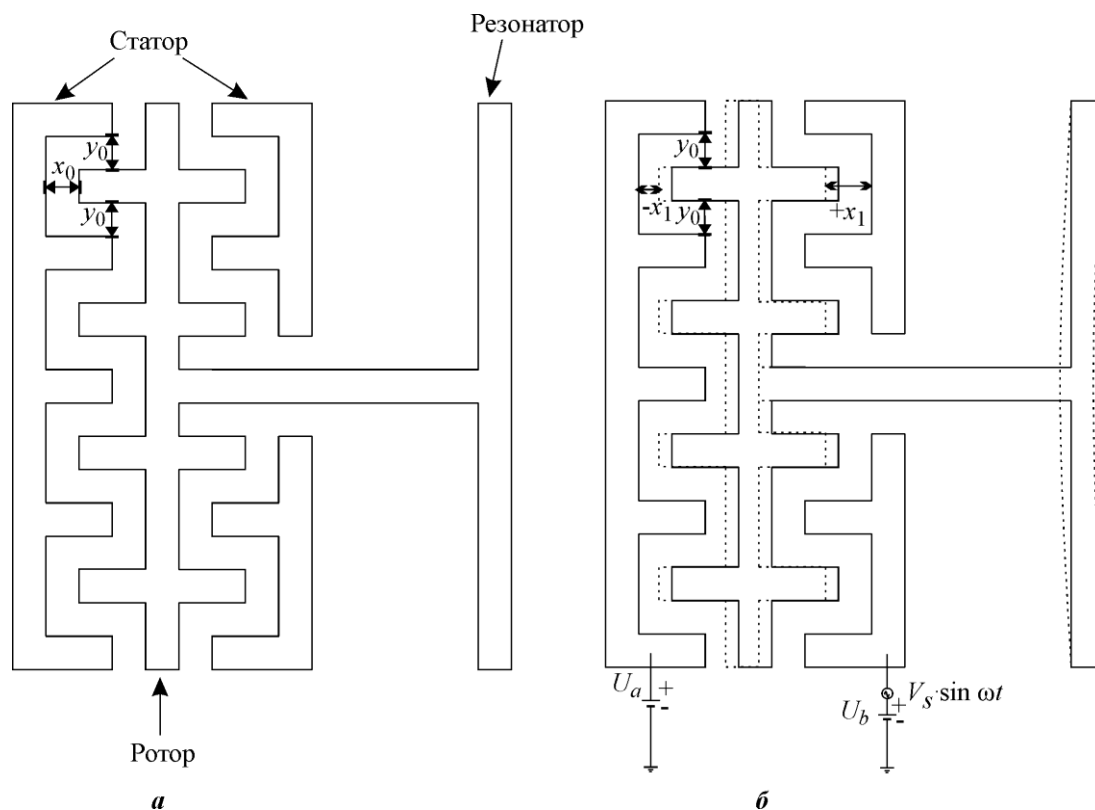


Рис.4. Изменение зазора между зубцами гребенок прямоугольной конструкции при движении ротора относительно статора: *a* – до перемещения; *б* – после перемещения

Fig.4. The changing of the gap between the combs of a rectangular structure when the rotor moves relative to the stator: before moving (*a*), after moving (*b*)

Таблица 2

Результаты моделирования влияния зазора между гребенками на параметры взаимодействия между ними

Table 2

The results of modeling the influence of the size of the gap between the combs on the parameters of the interaction between them

Параметр	Значение		
	до перемещения	после перемещения (–1 мкм)	после перемещения (+1 мкм)
<i>D</i> = 5 мкм			
Электростатическая сила, Н	1,1681·10 ^{–7} (по оси <i>x</i>) 5,1779·10 ^{–12} (по оси <i>y</i>) 2,0403·10 ^{–9} (по оси <i>z</i>)	1,6211·10 ^{–7} (по оси <i>x</i>) 1,4374·10 ^{–11} (по оси <i>y</i>) 1,9150·10 ^{–12} (по оси <i>z</i>)	9,2202·10 ^{–8} (по оси <i>x</i>) 4,5210·10 ^{–11} (по оси <i>y</i>) 1,6073·10 ^{–9} (по оси <i>z</i>)
Емкость, пФ	0,004661	0,0052522	0,004051
<i>D</i> = 10 мкм			
Электростатическая сила, Н	1,1833·10 ^{–7} (по оси <i>x</i>) 4,1071·10 ^{–10} (по оси <i>y</i>) 2,6527·10 ^{–9} (по оси <i>z</i>)	1,6545·10 ^{–7} (по оси <i>x</i>) 9,9506·10 ^{–11} (по оси <i>y</i>) 6,0141·10 ^{–12} (по оси <i>z</i>)	9,3502·10 ^{–8} (по оси <i>x</i>) 2,0819·10 ^{–10} (по оси <i>y</i>) 2,0027·10 ^{–9} (по оси <i>z</i>)
Емкость, пФ	0,0060032	0,0067233	0,005525

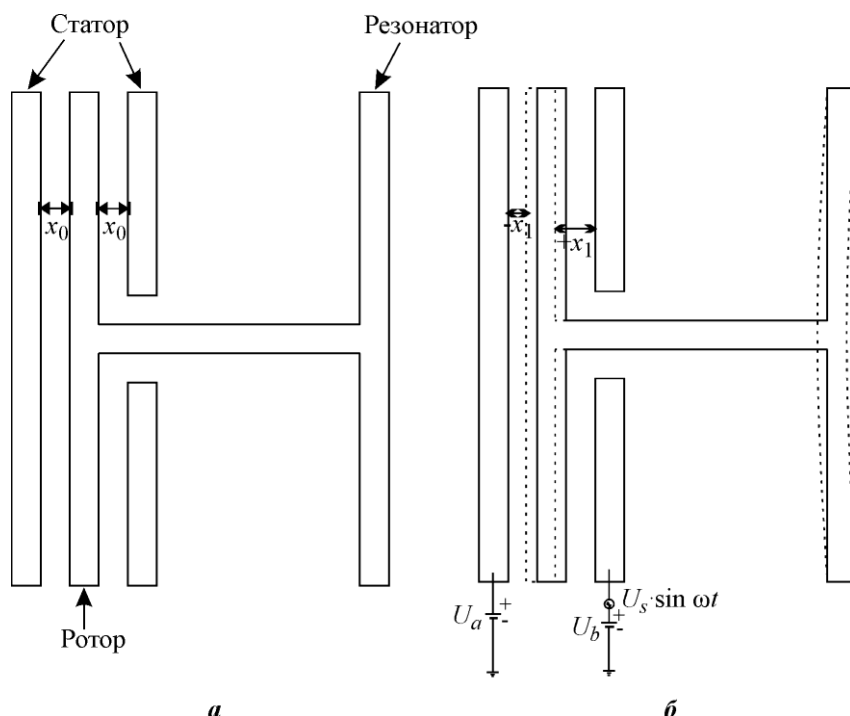


Рис.5. Изменение зазора между ротором балочной конструкции и статором при движении ротора относительно статора: *a* – до перемещения; *б* – после перемещения

Fig.5. The changing of the gap between the rotor of the beam structure and the stator when the rotor moves relative to the stator: before moving (*a*), after moving (*b*)

Таблица 3

Результаты моделирования влияния зазора между балками (ротором и статором) на параметры взаимодействия между ними

Table 3

The results of modeling the influence of the gap between the beams (rotor and stator) on the interaction parameters between them

Параметр	Значение		
	до перемещения	после перемещения	
		–1 мкм	+1 мкм
Электростатическая сила, Н	$1,1510 \cdot 10^{-7}$ (по оси x)	$1,7985 \cdot 10^{-7}$ (по оси x)	$7,9934 \cdot 10^{-8}$ (по оси x)
	$4,8827 \cdot 10^{-25}$ (по оси y)	$1,4092 \cdot 10^{-24}$ (по оси y)	$2,3311 \cdot 10^{-25}$ (по оси y)
	$5,1116 \cdot 10^{-25}$ (по оси z)	$2,8554 \cdot 10^{-24}$ (по оси z)	$3,6451 \cdot 10^{-24}$ (по оси z)
Емкость, пФ	0,0028776	0,003597	0,002398

Расчет собственных частот различных резонаторов с помощью программы ANSYS. В результате уменьшения перекрытия зубцов между гребенками электростатическая сила меняется незначительно, а емкость уменьшается примерно на 22 % до перемещения. Гребенчатые актюаторы используются в частотных микроакселерометрах, их чувствительность измеряется в Гц/g, здесь g – ускорение свободного падения. Поэтому изменением емкости гребенчатого актюатора можно пренебречь. При появлении ускорения резонатор акселерометра сжимается или растягивается в результате отклонения инерционной массы (по закону Ньютона $F = ma$). Когда резонатор сжимается, его частота уменьшается, когда растягивается – увеличивается.

В результате уменьшения перекрытия зубцов у гребенчатого резонатора (см. рис.1) инерционная масса микроакселерометра уменьшается. При этом его собственная частота увеличивается, в результате чего при появлении ускорения изменение частоты возрастает, т.е. чувствительность повышается. При воздействии ускорения на акселерометр возникает сила, действующая на резонатор. Расчет показывает, что изменение частоты резонатора определяется следующим выражением [16]:

$$f = f_0 \sqrt{1 \pm F \frac{0,295L^2}{Ehw^3}}, \quad (3)$$

здесь f – частота при воздействии ускорения (силы); f_0 – собственная частота до действия ускорения; «+» – при приложении растягивающей силы к резонатору; «-» – при приложении сжимающей силы; F – осевая сила, возникающая при воздействии ускорения (на рис.5 и 6 она направлена по оси x); L – длина резонатора; E – модуль Юнга; h – толщина резонатора; w – ширина резонатора.

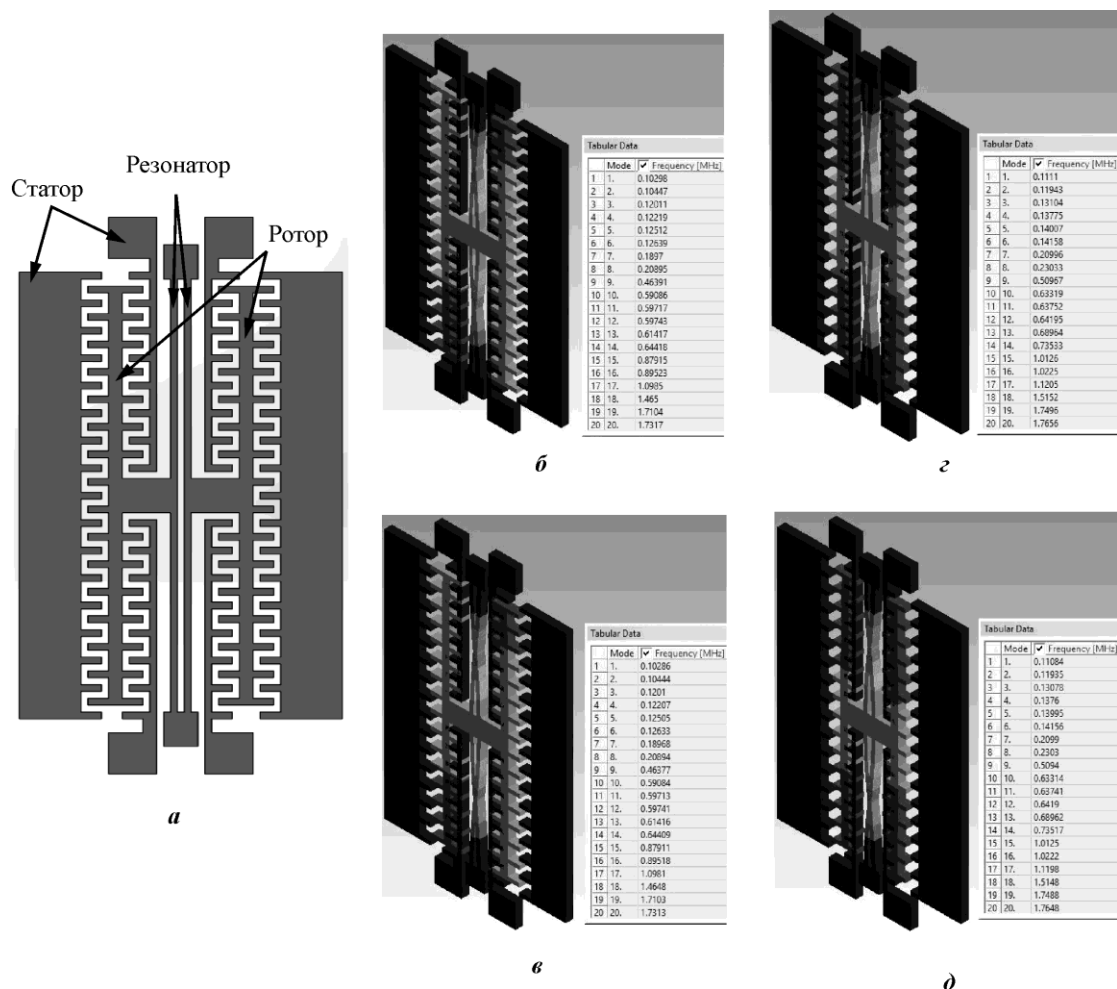


Рис.6. Вид гребенчатого резонатора (а) и результаты моделирования частот резонатора до подачи силы б, в, г и после подачи силы 50 мкН в, д. Перекрытие зубцов между гребенками: 10 мкм (б), (в); 5 мкм (г), (д)

Fig.6. The type of the comb resonator (a) and the simulation results of the resonator frequencies: before the force is applied (b), (d) and after the force is applied 50 μN (c), (e); Overlapping of the teeth between the combs: 10 μm (b), (c) and 5 μm (a), (e)

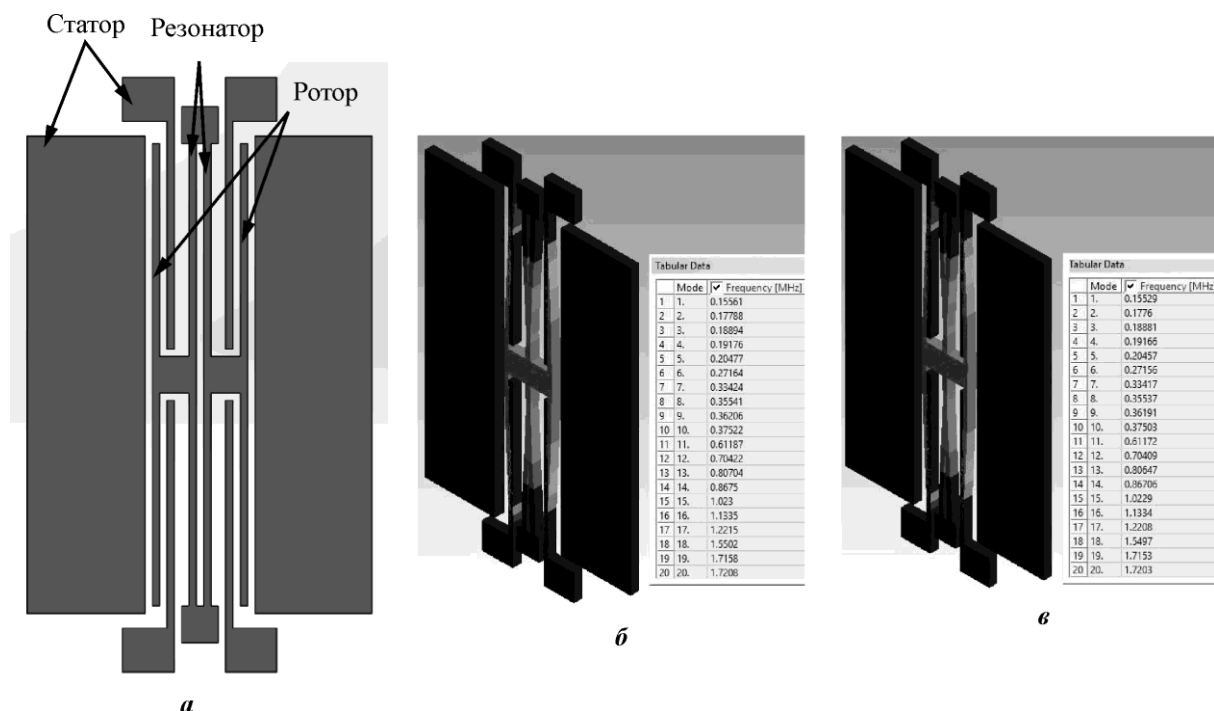


Рис. 7. Вид резонатора балочной конструкции (а) и результаты моделирования частот резонатора до подачи силы (б) и после подачи силы 50 мкН (в)
 Fig. 7. The type of the resonator of the beam structure (a) the result of simulation of the resonator frequencies before the force is applied (b) and after applying a force of 50 μN (c)

Таблица 4

Результаты моделирования собственных частот колебаний
на рабочих модах актюаторов

Table 4

The results of modeling the natural vibration frequencies on working modes of actuators

Конструкция резонатора	Собственная частота, кГц	Изменение собственной частоты при воздействии силы 50 мкН, кГц		Разница частоты, Гц
		Моделирование	Расчет по уравнению (3)	
Гребенчатая	122,19	122,07	121,64	120
Гребенчатая	131,04	130,78	130,45	260
Балочная	177,88	177,60	177,07	280

Сравним электрические параметры трех резонаторов, у которых длина $L = 315$ мкм, зазор между ротором и статором $x = 5$ мкм, толщина $h = 10$ мкм, ширина $w = 5$ мкм.

На рис. 6, а показан резонатор, соединенный с ротором, с перекрытием зубцов гребенок ротора и статора. С помощью моделирования в программе ANSYS, в которой используется метод конечных элементов, получены следующие результаты. При $D = 10$ мкм собственная частота на рабочей моде колебания (рис. 6, б) равна 122,19 кГц, и при воздействии силы 50 мкН (сжимающей), направленной к резонатору, эта частота уменьшилась до 122,07 кГц (рис. 6, в). Расчет по уравнению (3) дал результат $f = 121,63$ кГц. При $D = 5$ мкм собственная частота на рабочей моде колебаний в отсутствие воздействующей силы $f_0 = 131,04$ кГц (рис. 6, з), при воздействии сжимающей си-

лы 50 мкН частота уменьшилась до 130,78 кГц (рис.6,д). Расчет по уравнению (3) дал результат $f = 130,45$ кГц.

На рис.7,а показан резонатор балочной конструкции. Рассчитанная с помощью программы ANSYS собственная частота на рабочей моде (рис.7,б) равна 177,88 кГц, при воздействии силы 50 мкН она составила 177,60 кГц (рис.7,в). Результат расчета по уравнению (3) дает $f = 177,07$ кГц. В табл.4 показаны результаты моделирования изменения частот этих резонаторов на рабочих модах колебаний при воздействии сжимающей силы. Видно, что у актюатора балочной конструкции по сравнению с гребенчатой более высокая собственная частота колебаний и частота при приложении к резонатору сжимающей силы изменяется больше.

Заключение. Результаты расчета электростатической силы, действующей между зубцами гребенчатого актюатора, по предложенному уточненному уравнению практически совпали с результатами моделирования. Моделирование электростатической силы F , которая возникает в актюаторе гребенчатой конструкции при длине перекрытия между зубцами гребенок 5 и 10 мкм, и расчет электростатической силы взаимодействия между ротором и статором актюатора балочной конструкции показали, что величина перекрытия гребенок влияет на силу F незначительно. Балочная конструкция актюатора обеспечивает уменьшение паразитных электростатических сил (по осям y, z) по сравнению с гребенчатой конструкцией актюатора, а также массы резонатора.

В результате моделирования собственных (резонансных) частот гребенчатых и балочного резонаторов установлено, что с уменьшением перекрытия зубцов между гребенками частота колебаний резонатора увеличивается, а при воздействии силы частота изменяется на большую величину. В резонаторе балочной конструкции при воздействии силы частота колебаний резонатора выше, чем у резонаторов гребенчатой конструкции.

Удалось достигнуть повышения чувствительности частотного микроакселерометра в результате уменьшения массы резонатора при использовании резонаторов гребенчатой конструкции с меньшим перекрытием зубцов гребенок и резонаторов балочной конструкции. С этой точки зрения балочная конструкция актюатора предпочтительнее, чем гребенчатые конструкции.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 16-19-00177).

Литература

1. Микросистемная техника. Моделирование, технология, контроль: сб. научн. трудов / *Под ред. С.П. Тимошенкова*. – М.: МИЭТ, 2007. – 208 с.
2. *Shai S., Inbar H., David E.* An ideal MEMS parametric resonator using a tapered comb-drive, Eurosensors 2014, the XXVIII edition of the conference series, 2014 // *Procedia Engineering*. – 2014. – Vol. 87. – P. 1481–1484.
3. *Комченков В.И., Петров В.Ф., Симонов С.Б., Терентьев А.И.* Методика построения роботизированных безэкипажных объектов наземного базирования // *Изв. ЮФН. Технические науки*. – 2013. – № 3 (140). – С. 140–146.
4. Исследование влияния эксплуатационных факторов на функциональные параметры и характеристики микроэлектромеханических устройств / *С.П. Тимошенков, В.Ф. Шилов, А.Н. Бойко и др.* // *Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России*. – 2006. – № 2. – С. 7–12.
5. *Тимошенков С.П., Бойко А.Н., Симонов Б.М.* Методика оценки параметров чувствительных элементов микроакселерометров и микрозеркал // *Изв. вузов. Электроника*. – 2007. – № 5. – С. 23–29.
6. *Тимошенков С.П., Бойко А.Н., Симонов Б.М.* Чувствительные элементы МЭМС: технология определяет параметры // *Электроника: Наука. Технология. Бизнес*. – 2008. – № 1. – С. 80–82.

7. **Wenjing Y., Subrata M., Noel C.M.** Optimal shape design of an electrostatic comb drive in microelectromechanical systems. // J. of Microelectrical Systems. – 1998. – Vol. 7. – No.1. – P. 16–26.
8. **Brian D., Jensen., Katsuo K., James J.A.** Shaped comb fingers for tailored electromechanical restoring force // J. of Microelectrical Systems. – 2003. – Vol.12. – No.3. – P. 373–383.
9. **Xiao-Ping S.S.** Compliant leverage mechanism design for MEMS applications. – Berkeley. – 2001. – 246 p.
10. **Brian M., Reza G.** Vertically-shaped tunable MEMS resonators // J. of Microelectrical Systems. – 2008. – Vol. 17. – No.1. – P. 85–91.
11. **Bell D.J., Lu T.J., Fleck N.A., Spearing S.M.** MEMS actuators and sensors: observations on their performance and selection for purpose // J. of Micromechanics and Microengineering. – 2005. – J. Micromech. Microeng. 15. – P. 183–164.
12. **Brian P.T.** A survey and comparison of smart material linear actuators. – University of Michigan, 2001. – P. 1–18. – URL: http://www-personal.umich.edu/~btrease/share/Trease_Actuator_Report.pdf (дата обращения: 11.01.2017).
13. Optimizing the performance of MEMS electrostatic comb drive actuator with different flexure springs / **G. Shefali, P. Tanu, N. Rakesh et al.** // Proc. of the 2012 COMSOL Conference in Bangalore. – 2012. – P. 1–6.
14. **Chihchung C., Chengkuo L.** Design and modeling for comb drive actuator with enlarged static displacement // Sensors and Actuators A 115. – 2004. – P. 530–539.
15. **Rana I., Shakoar., Imran R., Chughtai., Shafaat A., Bazaz., Muhammad J. H.** Numerical simulations of MEMS comb-drive using coupled mechanical and electrostatic analyses // IEEE. – 2005. – P. 344–349.
16. Design and implementation of a micromechanical silicon resonator accelerometer / **H. Libin, Y. Hui, G. Yaung et al.** // Sensor. – 2013. – Vol. 13. – P. 15785–15804.

Поступила 12.01.2017 г.; принята к публикации 25.04.2017 г.

Аунг Тхура – аспирант кафедры микроэлектроники Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1), aungthura87@gmail.com

Симонов Борис Михайлович – кандидат технических наук, доцент кафедры микроэлектроники Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1), serborsel@mail.ru

Тимошенко Сергей Петрович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой микроэлектроники Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1), spt@mail.ru.

References

1. *Mikrosistemnaya tekhnika. Modelirovanie, tekhnologiya, kontrol': Sb. nauch. trudov* [Microsystem Technology, Modeling, technology, control: Sat. Scientific Proc.]. Pod red. S.P. Timoshenkova. Moscow, MIET, 2007. 208 p. (In Russian).
2. Shai S., Inbar H., David E. An ideal MEMS parametric resonator using a tapered comb-drive. *Proc. Engineering «Euroensors 2014, the XXVIII edition of the conference series»*, 2014, 87, pp. 1481–1484. (In Russian).
3. Komchenkov V.I., Petrov V.F., Simonov S.B., Terent'ev A.I. Metodika postroeniya robotizirovannykh bez ehkipazhnykh ob"ektov nazemnogo bazirovaniya [Method for constructing robotic systems without ground-based crew]. *Izvestiya YUFN. Tekhnicheskie nauki – News of SFU. Engineering science*, 2013, no. 3 (140). (In Russian).
4. Timoshenkov S.P., Shilov V.F., Bojko A.N., Simonov B.M., Kalugin V.V. Issledovanie vliyaniya ehkspluatatsionnykh faktorov na funktsional'nye parametry i kharakteristiki mikroehlektromekhanicheskikh ustroystv [Investigation of the influence of operational factors on the functional parameters and characteristics of microelectromechanical devices]. *Oboronnyj kompleks – nauchno-tekhnicheskomu progressu Rossii – Defense complex – scientific and technical progress of Russia*, 2006, no. 2, pp. 7–12. (In Russian).
5. Timoshenkov S.P., Bojko A.N., Siminov B.M., Metodika otsenki parametrov chuvstvitel'nykh ehlementov mikroakselerometrov i mikrozerkal [Method for Characterization of Micro-Accelerometers and Micro-mirrors Sensors]. *Izvestiya vuzov. Elektronika – Proceedings of Universities. Electronics*, 2007, no. 5, pp. 23–29. (In Russian).

6. Timoshenkov S., Bojko A., Simonov B. Chuvstvitel'nye ehlementy MEHMS: tekhnologiya opredelyaet parametry [Sensitive elements of MEMS: technology determines the parameters]. *Elektronika: Nauka, Tekhnologiya, Biznes – Electronics: Science, Technology, Business*, 2008, no. 1, pp. 80–82. (In Russian).
7. Wenjing Y., Subrata M., Noel C.M. Optimal Shape Design of an Electrostatic Comb Drive in Microelectromechanical Systems. *Journal of Microelectrical Systems*, 1998, vol. 7, no.1, pp. 16–26.
8. Brian D., Jensen., Katsuo K., James J. A. Shaped Comb Fingers For Tailored Electromechanical Restoring Force. *Journal of Microelectrical Systems*, 2003, vol. 12, no. 3, pp. 373–383.
9. Xiao-Ping S.S. *Compliant Leverage Mechanism Design for MEMS Applications*. University of California, Berkeley, 2001. 140 p.
10. Brian M., Reza G. Vertically-Shaped Tunable MEMS Resonators. *Journal of Microelectrical Systems*, 2008, vol. 17, no.1, pp. 85–91.
11. Bell D.J., Lu T.J., Fleck N.A., Spearing S.M. MEMS actuators and sensors: observations on their performance and selection for purpose. *Journal of Micromechanics and microengineering*, 2005, 15, pp. 183–164.
12. Brian P.T. *A survey and comparison of smart material linear actuators*. University of Michigan, 2001, pp. 1–18. Available at: http://www-personal.umich.edu/~btreise/share/Treise_Actuator_Report.pdf (accessed 11.01.2017).
13. Shefali G., Tanu P., Rakesh N., Prasad B., Dinesh K. Optimizing the Performance of MEMS Electrostatic Comb Drive Actuator with Different Flexure. *Proc. of the 2012 COMSOL Conference in Bangalore*, 2012, pp. 1–6.
14. Chihchung C., Chengkuo L. Design and modeling for comb drive actuator with enlarged static displacement. *Sensors and Actuators*, 2004, A 115, pp. 530–539.
15. Rana I., Shakoob, Imran R., Chughtai, Shafaat A., Bazaz, Muhammad J.H. Numerical Simulations of MEMS Comb-Drive Using Coupled Mechanical and Electrostatic Analyses. *IEEE*, 2005, pp. 344–349.
16. Libin H., Hui Y., Yaung G., Liye Z., Jinxing L. Design and Implementation of a Micromechanical Silicon Resonator Accelerometer. *Sensor*, 2013, 13, pp. 15785–15804.

Submitted 12.01.2017; accepted 25.04.2017.

Aung Thura – PhD student of the Microelectronics Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), aungthura87@gmail.com

Simonov Boris M. – candidate of technical sciences, associate professor of the Microelectronics Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), serborsel@mail.ru

Timoshenkov Sergey P. – doctor of technical sciences, professor, head of the Microelectronics Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), spt@mail.ru

Информация для читателей журнала

«Известия высших учебных заведений. Электроника»

Полные тексты статей журнала с 2009 по 2014 гг. доступны на сайте
Научной электронной библиотеки: www.elibrary.ru