

УДК 621.363

## Экспериментальное исследование и оценка изгибной жесткости вибрационного элемента модулятора электростатического поля

Р. Ю. Дорوفеев, Д. В. Козлов<sup>1</sup>, А. С. Корпухин<sup>2</sup>, И. П. Смирнов, А. А. Жуков<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup>к. т. н., <sup>3</sup>д. т. н.

АО «Российские космические системы»

e-mail: rdorof@yandex.ru

**Аннотация.** В работе рассмотрены системные исследования характеристик вибрационного модулятора электрических полей, экспериментально получены зависимости нагрузок, возникающих на экранирующем электроде вибрационного модулятора электрического поля, от угла деформации этого электрода. Проведена расчетная оценка зависимости частотных показателей различных геометрических вариантов электродов вибрационного модулятора электрических полей от силовых характеристик, в частности, от толщины и геометрической формы.

**Ключевые слова:** вибрационный модулятор электростатических полей, экранирующий электрод, изгибная жесткость, резонансная частота, амплитуда колебания, угол деформации

## Experimental Study and Evaluation of Bending Rigidity of the Vibration Sensor Modulator electric Field

R. Yu. Dorofeev, D. V. Kozlov<sup>1</sup>, A. S. Korpuhin<sup>2</sup>, I. P. Smirnov, A. A. Zhukov<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup>candidate of engineering science, <sup>3</sup>doctor of engineering science

Joint Stock Company "Russian Space Systems"

e-mail: rdorof@yandex.ru

**Abstract.** The paper discusses the characteristics of the vibration system studies modulator electric fields, experimentally obtained dependence loads, generated by the screening electrode vibration modulator of the electric field, the angle of deformation of the electrode. Score calculation performed depending frequency indicators of different geometrical embodiments of vibrating electrodes modulator of the electric field strength characteristics, in particular, on the thickness and geometric shape.

**Key words:** vibrating electric field modulator, shielding electrode, flexural stiffness, resonant frequency, the amplitude of the oscillation, angle deformation

## Введение

При эксплуатации отечественной ракетно-космической техники в последнее время наблюдается устойчивая тенденция, указывающая на уменьшение надежности спутников и снижение сроков их активного существования.

Основная причина отказа функционирования спутников нового поколения, выпускаемых российскими производителями, заключается в недостатках электронной компонентной базы (ЭКБ) космической техники. Обширная номенклатура ЭКБ позволяет проектировать сложную аппаратуру различного назначения. Вместе с тем достаточно сложно осуществить эффективную защиту бортовой аппаратуры (БРА) от внешних воздействий, особенно от такого деструктивного влияния, как электростатический разряд [1].

Одно из направлений решения проблемы защиты БРА от ЭСР — создание эффективной датчиковой аппаратуры для контроля электростатических полей, одним из основных элементов которой является вибрационный модулятор. Наиболее перспективные устройства в современной сенсорной технике — вибрационные датчики — это устройства, в которых измерительный или экранирующий электрод совершает возвратно-поступательное движение и колеблется в области неоднородного поля под действием электромагнитного возбудителя.

В основе работы вибрационного модулятора электрического поля (ВМЭП) для миниатюрных измерителей параметров электризации КА на основе микромеханических резонансных систем лежит получение необходимой резонансной частоты и соответствующей ей амплитуды колебаний экранирующего электрода. Вибрационные модуляторы в целом ряде случаев имеют недостаточную чувствительность вследствие того, что размеры электродов в них достаточно малы и не позволяют получить необходимую амплитуду перемещения экранирующего электрода (микробалки) на резонансной частоте.

Основными задачами, которые необходимо решать на этапе его проектирования, в интересах получения максимальной амплитуды колебаний экранирующего электрода ВМЭП, соответствующей резонансной частоте, являются:

- оценка влияния изгибной жесткости микробалки на амплитуду перемещения ее хвостовика;
- оценка влияния материала и геометрии микробалки на резонансную частоту.

В работе представлена методика измерения силовых характеристик экранирующего электрода вибрационного модулятора (рис. 1), выполненного в виде микробалки. Вибрационный модулятор включает в себя экранирующий электрод 3, выполненный из пермаллоевой фольги и жестко закрепленный за один конец и чувствительный электрод 2. Экранирующий электрод расположен между двумя соосно закрепленными катушками 1, которые подключены к генератору переменного напряжения.

Принцип действия ВМЭП основан на возбуждении механических колебаний. Катушки индуктивности, подключенные к генератору, вырабатывающему сигнал синусоидальной формы с определенной частотой, приводящий в колебательное движение электрод 3 на частоте механического резонанса. Так как обмотки катушек включены в противофазе и создают неоднородные магнитные поля, вызывающие магнитные взаимодействия между катушками и экранирующим электродом, то магнитные потоки, создаваемые ими, складываются, благодаря чему вдоль оси между катушками создается магнитное поле, амплитуда которого изменяется по синусоидальному закону. Это поле взаимодействует с экранирующим электродом, выполненным из ферромагнитного материала, заставляя перемещаться электрод с частотой колебаний. При колебаниях экранирующего электрода 3 углубляется по оси чувствительного электрода (экспонирование) или выдвигается над ним (экранирование). При наличии электрического поля это приводит к изменению потенциала чувствительного электрода 2. После усиления и синхронного детектирования на выходе получается напряжение, пропорциональное напряженности электрического поля, имеющее соответствующий знак.

Движение экранирующего электрода с максимальной амплитудой для придания высокой чувствительности устройств детектирования электростатических полей вызывает наибольшие технические трудности и является предметом исследования данной работы.

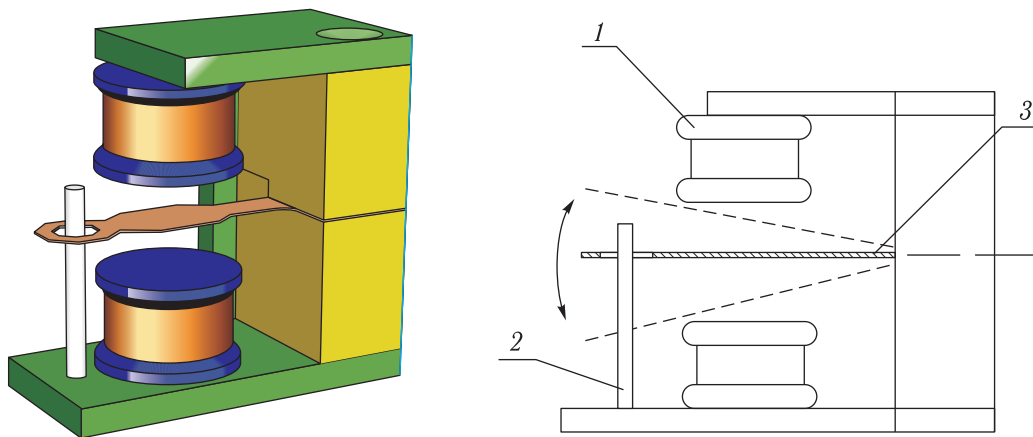


Рис. 1. Конструкция вибрационного модулятора электрических полей

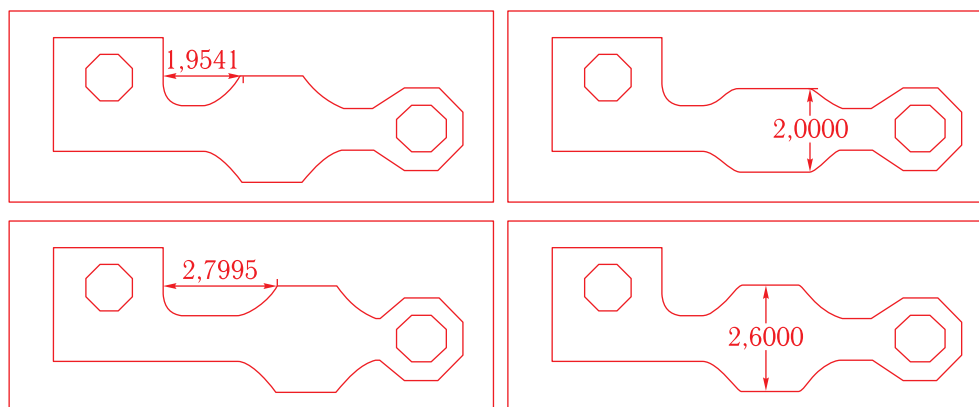


Рис. 2. Примеры 4 из 10 вариантов образцов экранирующего электрода

Для производства реальных образцов экранирующих электродов из фольги магнитомягкой стали 79НМ (толщиной 20 и 50 мкм) были вырезаны заготовки, а затем методами двухсторонней фотолитографии и электрохимического травления из них изготовлены образцы — десять вариантов подвижных пластин различных геометрических конфигураций (рис. 2). На этих образцах были проведены исследования амплитуды перемещения хвостовиков экранирующих электродов, их резонансных частот и изгибной жесткости.

## Методика проведения эксперимента

В основе методики измерения жесткостных характеристик экранирующего электрода ВМЭП лежит применение цифровых высокоточных

прецизионных весов, а также элементарной кинематической системы, связывающей образец ВМЭП и предметный столик весов. Благодаря высокой точности измерительного инструмента, которым являются весы, возможно измерение очень малых по величине нагрузок. Максимальный угол отклонения хвостовика микробалки для данной конструкции — угол со значением в  $27^\circ$  (соответствует перемещению 1,7 мм), что удовлетворяет задаче по обеспечению устройства необходимой амплитудой перемещения хвостовика экранирующего электрода с целью обеспечения высокой чувствительности датчика электростатических полей. На максимальном угле отклонения хвостовика диапазон жесткости составлял от 1,63 до 33,94 мН для образцов с различной геометрической формой.

При измерении резонансных частот применялся гониометр и синусоидальный генератор сигналов.

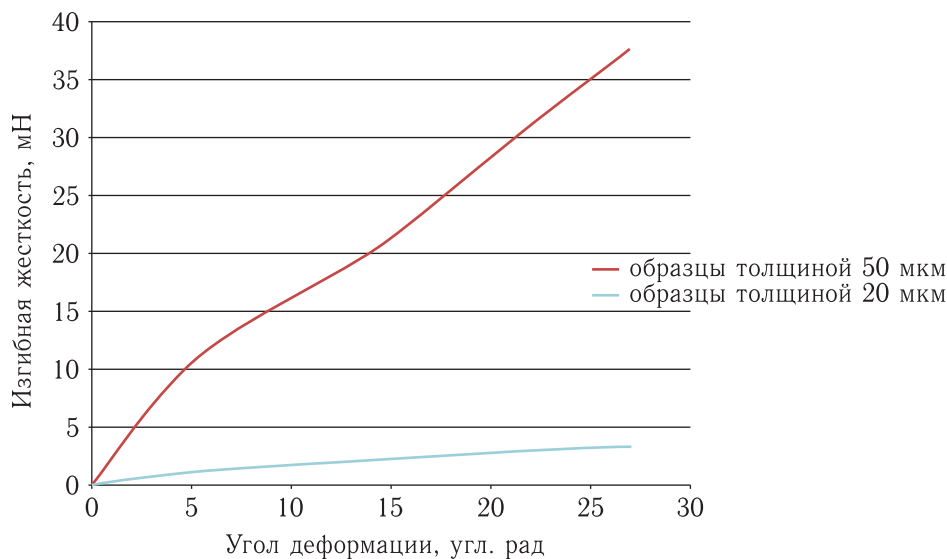


Рис. 3. Силовая характеристика параметров экранирующих электродов толщиной 20 мкм и 50мкм

Путем варьирования частоты колебания микробалки с помощью гониометра осуществлялся поиск наибольшей амплитуды перемещений хвостовика микробалки. Частота, при которой достигалась наибольшая амплитуда перемещений хвостовика в данной конструкции, считалась резонансной для каждого из образцов. При наибольшей амплитуде, составляющей 3,5 мм колебаний хвостовика, диапазон частот составлял от 208 до 752 Гц.

## Результаты

Для вариации геометрии образцов экранирующего электрода было создано десять вариантов подвижных пластин различных конфигураций (рис. 2). В ходе эксперимента подтвердилось, что образцы, имеющие наименьшую изгибную жесткость при фиксированной амплитуде перемещения, имели также наименьшую резонансную частоту собственных колебаний микробалки.

Эксперимент по определению зависимости силовых характеристик экранирующих электродов от толщины образца выявил следующее.

Величина нагрузки на хвостовике экранирующих электродов линейно зависит от толщины. Таким образом, при увеличении толщины образца с 20 до 50 мкм происходит увеличение изгибной жесткости экранирующего электрода вибрационного

модулятора, что приводит к увеличению резонансной частоты в среднем в 2,4 раза для геометрически одинаковых образцов. На рис. 3 представлена полученная силовая характеристика в виде зависимости нагрузки, воздействующей на экранирующий электрод, от изгибной жесткости.

Наряду с испытаниями, были проведены расчеты коэффициента формы, чтобы определить зависимость резонансной частоты от геометрической формы экранирующего электрода [5]. При варьировании геометрической формы экранирующего электрода использовались два основных подхода. В первом подходе варьировалось расстояние между эллипсовидным утолщением и основанием крепления электрода. Во-втором — изменялась вертикальная полуось эллипсовидного утолщения экранирующего электрода. Расчет коэффициента формы электрода проводился путем разбиения сложной формы электрода на простейшие геометрические фигуры (прямоугольники, треугольник и др.), ниже приведены формулы расчета геометрической формы прямоугольного треугольника и прямоугольника:

$$K_f = 2ctg^2\left(\frac{\alpha}{2}\right)ctg\left(\frac{\gamma}{2}\right) = 1 + 2\frac{1 + ctg(\alpha/2)}{1 - tg(\alpha/2)}, \quad (1)$$

где  $\alpha$  и  $\gamma$  — углы прямоугольного треугольника.

$$K_f = 2\left(\frac{a}{b} + \frac{b}{a}\right) = 4\left(k + \frac{1}{k}\right), \quad (2)$$

где  $a$  и  $b$  — стороны прямоугольника,  $k = a/b$ .

Методика расчета коэффициента формы простейших геометрических фигур изложена в [4].

В большинстве вибрационных устройств имеются встроенные генераторы для возбуждения механических колебаний электрода, что накладывает необходимость обладания экранирующим электродом с резонансной частотой, соответствующей частоте генератора, в нашем случае генератор возбуждения механических колебаний работает на частоте 300 Гц. Рассчитанный коэффициент формы образцов экранирующих электродов, согласно формулам (1), (2), определил диапазон значений коэффициента формы, который составил от 48,15 до 62,39. Расчет образцов экранирующих электродов дал линейную зависимость значения коэффициента формы от значения изгибающей жесткости. Зависимость резонансной частоты от коэффициента геометрической представлена на рис. 4. Расчет показал, что при определенном изменении геометрической формы экранирующих электродов в месте крепления возможно моделировать резонансную частоту экранирующих электродов  $275 \pm 40$  Гц.

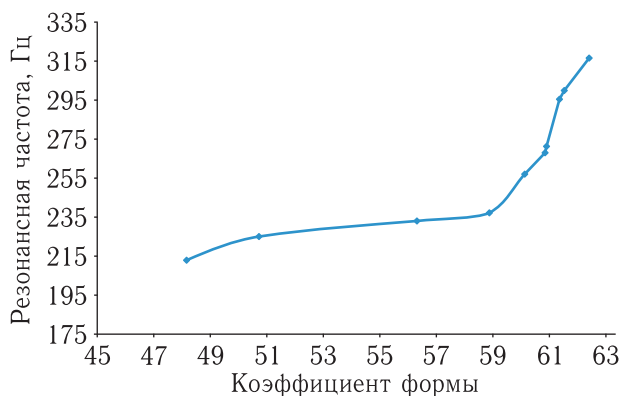


Рис. 4. Зависимость резонансной частоты экранирующего электрода от их геометрической формы

В ходе эксперимента выяснилось, что все образцы имеют достаточно широкую полосу резонансных частот. Ширина полосы составляет порядка 5–6 Гц при максимальной амплитуде колебания экранирующего электрода (рис. 5). Наличие широкой полосы резонансных частот позволяет допускать некую погрешность в точности проектирования геометрической формы экранирующего электрода вибрационного модулятора.

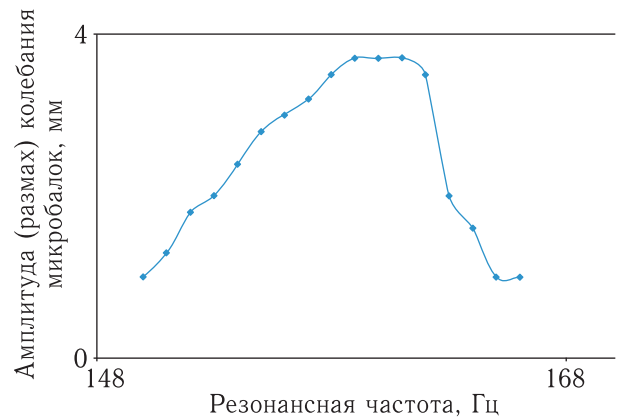


Рис. 5. Амплитудно-частотная характеристика экранирующего электрода

## Заключение

Проведенные испытания и расчет позволяют оценить диапазон возможностей ВМЭП, акцентируя при этом внимание на высокой стабильности силовых характеристик подвижных экранирующих электродов и возможности изменения силовых характеристик микроактюаторов геометрическими методами.

Измерения силовых характеристик балок ВМЭП позволили экспериментально получить зависимости нагрузок, возникающих на хвостовике балки модулятора, от угла деформации этой балки. Полученные результаты позволяют судить о линейности силовой характеристики относительно угла перемещения балки электростатического актюатора.

Таким образом, предложена и реализована методика измерения силовых характеристик экранирующих электродов вибрационных модуляторов электростатических полей, подвергнутых воздействию контролируемой нагрузки.

Полученные данные принципиально важны и необходимы для проектирования устройств вибрационного типа, так как дают возможность создавать микроактюаторы с заранее заданными зависимостями нагрузок от амплитуды колебаний, что, кроме того, может позволить расширить спектр применения таких устройств.

## Список литературы

1. *Дорофеев Р.Ю., Жуков А.А.* Особенности защиты бортовой аппаратуры космических аппаратов

- от электростатического разряда на этапе ее схемотехнического проектирования. Труды II Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий». 2–4 июня 2009 года. М.: Радиотехника, 2010. С. 140–149.
2. Козлов Д. В., Жуков А. А., Смирнов И. П., Шахнов В. А. Экспериментальное исследование силовых характеристик рабочего элемента тепловых микроактюаторов // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Серия Приборостроение. №2/2011(РИНЦ), с. 84–94.
  3. Королева В. А., Жуков А. А., Гоголинский К. В., Усеинов А. С. Оценка изгибной жесткости и деформации микроразмерных элементов устройств микросистемной техники // Нано- и микросистемная техника, 2011, № 1, с. 39–42.
  4. Фетисова М. А. Коэффициент формы как геометрическая характеристика [Текст] / М. А. Фетисова, С. С. Володин // Молодой ученый, 2011, т. 1, № 5, с. 105–107.
  5. Коробко А. В. Геометрическое моделирование формы области в двумерных задачах теории упругости. М.: Изд-во АСВ, 1999. 320 с.
  6. Фетисова М. А. Развитие и применение метода интерполяции по коэффициенту формы к решению задач поперечного изгиба пластинок с комбинированными граничными условиями. Дисс. . . . канд. техн. наук: 05.23.17. Орел, 2010. 162 с.