

# Исследование нелинейных эффектов при моделировании чувствительного элемента МЭМС-вакуумметра

Е.И. Волкова<sup>1,2</sup>, С.А. Попков<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ННГУ им. Н.И. Лобачевского, г. Нижний Новгород

<sup>2</sup>Филиал РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИИС им. Ю.Е. Седакова», г. Нижний Новгород,  
kattykat@inbox.ru

**Аннотация** — В работе рассмотрена задача по нахождению добротности резонатора, входящего в конструкцию чувствительного элемента МЭМС-вакуумметра, с помощью численного моделирования и аналитических оценок с учетом вклада от нелинейных эффектов, в частности газодинамического демпфирования и pull-in эффекта.

**Ключевые слова** — МЭМС, вакуумметр, добротность, резонатор, демпфирование, SQFD, pull-in эффект.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Требование к миниатюризации датчиков измерения низких давлений неуклонно ужесточается, вследствие расширения областей их применения. Дизайн современных МЭМС-датчиков требует совершенно нового подхода для контроля уровня вакуума в микрополостях, образованных при герметизации на уровне пластины, или в корпусах при герметизации на уровне кристалла. Многим прецизионным и высокочувствительным инерциальным МЭМС-датчикам с резонансными чувствительными элементами (ЧЭ) необходимо поддержание высокого уровня вакуума для достижения высокой добротности, что позволяет обеспечить стабильность выходных характеристик. Наравне с этим, на надежность и долговечность работы таких устройств влияет герметизация ЧЭ от воздействия окружающей среды [1]. Поэтому отслеживание уровня вакуума в областях, где располагается ЧЭ, в процессе всего срока службы очень важно. Стандартный метод обнаружения утечек нечувствителен и не может быть использован ввиду чрезвычайно малых размеров вакуумных полостей. Предлагается в рабочий объем совместно с ЧЭ МЭМС-датчика интегрировать специализированный миниатюрный МЭМС-вакуумметр, описанный в работе.

Существующие решения микровакуумметров представляют из себя тепловые микродатчики типа Пирани [2]-[4] или ионизационные датчики [5]-[8], которые обладают либо невысокой чувствительностью и требуют сложных методик измерения, либо ограниченным сроком службы, к тому же зачастую требуют сложных и дорогостоящих технологических процессов, которые выходят за границы стандартной кремниевой технологии.

Концепция измерения добротности микрорезонаторов ЧЭ для определения необходимого уровня вакуума используется при производстве инерциальных МЭМС-датчиков. По значению добротности гироскопа судят о том, достаточно ли герметичен корпус гироскопа, поддерживается ли в нем необходимый уровень вакуума [1]. При этом нет возможности с достаточной степенью точности оценить уровень вакуума, необходима прецизионная калибровка для каждого чувствительного элемента, вариаций которого огромное множество. Описанный выше принцип контроля уровня вакуума по величине добротности может быть заложен в основу универсального прибора для измерения низкого давления [9].

Современная разработка МЭМС требует использования специализированных программных инструментов для построения точных моделей. Корректная модель должна правильно отражать воздействия как внешнего, так и внутреннего характера. Поэтому на передний план выходят проблемы, связанные с учетом различных нелинейных эффектов, таких как газодинамическое демпфирование, воздействие внешних возбуждающих сил электрической природы, изменение жесткости конструкции в результате нелинейности материалов [10]. Пренебрежение при моделировании теми или иными преобладающими факторами может свести на нет принципиальную модель разрабатываемого датчика. Однако, с другой стороны, использование, например, демпфирования в сжимаемых газовых пленках, как доминирующего механизма диссипации энергии, может быть заложено в основу работы МЭМС-вакуумметра.

## II. КОЛЕБАНИЯ РЕЗОНАТОРА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НЕЛИНЕЙНЫХ ЭФФЕКТОВ

Аналитически описать движение резонатора ЧЭ МЭМС-вакуумметра является непростой задачей, зависящей от сложности конструкции, однако, осуществив некоторые упрощения, это можно сделать на простом примере пластины, жестко закрепленной с обоих концов. Расчеты подобного типа необходимы, поскольку позволяют сделать оценки сверху, избежать ряда нежелательных эффектов или максимально их

контролировать. Эффект схлопывания за счет действия электростатического поля – pull-in эффект, частный случай газодинамического демпфирования – демпфирование в сжимаемых газовых пленках – SQFD (squeeze-film damping) могут приводить к срыву колебаний в момент резонанса. Соблюдение режима работы и учет вкладов от доминирующих эффектов, определяющих нелинейную систему – это поиск равновесия для корректного функционирования ЧЭ. Поскольку разработанный резонатор ЧЭ МЭМС-вакуумметра может работать в двух режимах, один из которых предполагает начальное преднапряженное состояние за счет смещения в электрическом поле, то необходимо определить пороговое напряжение  $V_{pull}$ .

Систему можно представить в виде плоского конденсатора (рис. 1) с одной подвижной обкладкой (балка жесткостью  $k$ ), расположенной на расстоянии  $d$  относительно основания, к которому приложено постоянное напряжение смещения  $V_{DC}$ .

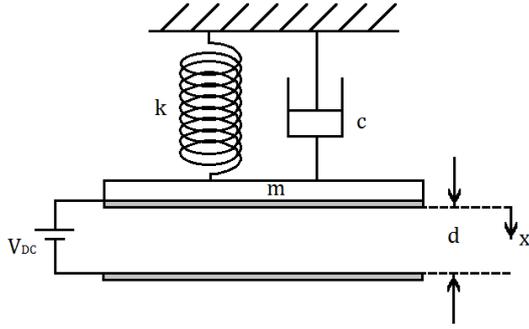


Рис. 1. Схематическое представление резонатора ЧЭ в виде плоского конденсатора с подвижной верхней обкладкой

Уравнение движения верхней обкладки можно записать как [10]:

$$m\ddot{x} + kx + c\dot{x} = \frac{\varepsilon AV^2}{2(d-x)^2} | V = V_{DC}, \quad (1)$$

где  $A$  – площадь нижней поверхности обкладки,  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость среды,  $c$  – коэффициент демпфирования. Выполняя замену  $x_1 = x$  и  $x_2 = \dot{x}$ , преобразуем выражение (1) к уравнению (2) следующим образом:

$$\dot{x}_2 = \frac{\varepsilon AV_{DC}^2}{2m(d-x_1)^2} - \frac{c}{m} x_2 - \frac{k}{m} x_1. \quad (2)$$

Найти положение равновесия в системе возможно при  $x_2 = 0$  и  $\dot{x}_2 = 0$ . Следовательно,

$$\frac{\varepsilon AV_{DC}^2}{2m(d-x_1)^2} - \frac{k}{m} x_1 = 0, \quad (3)$$

Уравнение (3) сводится к кубическому:

$$\left(\frac{x_1}{d}\right)^3 - 2\left(\frac{x_1}{d}\right)^2 + \left(\frac{x_1}{d}\right) - \frac{\alpha}{\gamma d^3} = 0, \quad (4)$$

где:

$$\gamma = \frac{k}{m},$$

$$\alpha = \frac{\varepsilon AV_{DC}^2}{2m}.$$

Колебания ограничены и происходят в пределах:

$$0 < \frac{x_1}{d} < 1. \quad (5)$$

Очевидно, удовлетворяющие условию (5) корни уравнения (4) существуют при:

$$0 < \frac{\alpha}{\gamma d^3} < \frac{4}{27}.$$

Причем таких корней в этом случае будет всегда два –  $x_1^{(1)}$  и  $x_1^{(2)}$ . Соответственно, система имеет два положения равновесия: устойчивое –  $x_1^{(1)}$  и неустойчивое –  $x_1^{(2)}$ . При  $V_{DC} = V_{pull}$  они сливаются, тем самым образуя точку бифуркации, которая является точкой максимума  $\xi_{max}$  функции:

$$f(\xi) = \xi^3 - 2\xi^2 + \xi - \frac{\alpha}{\gamma d^3},$$

при:

$$\xi = \frac{x_1}{d}.$$

$$f'(\xi) = 3\xi^2 - 4\xi + 1 = 0,$$

когда:

$$\xi_{max} = \frac{1}{3},$$

а  $x_1 = d/3$ .

Таким образом, чтобы реализовать возникновение точки бифуркации, необходимо, чтобы корни  $x_1^{(1)}$  и  $x_1^{(2)}$  уравнения (4) сошлись в один  $x_1^{(1)} = x_1^{(2)} = d/3$ , что возможно при:

$$\frac{\alpha}{\gamma d^3} = \frac{4}{27}.$$

Тогда пороговое напряжение  $V_{pull}$  определяется как:

$$V_{pull} = \sqrt{\frac{8kd^3}{27\varepsilon A}},$$

где для балки, жестко закрепленной с обоих концов, коэффициент жесткости вычисляется как:

$$k = \frac{384 EI}{L^3} + 8,32 \frac{N}{L},$$

где  $L$  – длина балки,  $E$  – модуль упругости,  $I$  – момент сечения инерции,  $N$  – аксиальная сила [10].

Для случая, когда  $V=V_{DC}+V_{AC}$ , т.е. помимо постоянного напряжения смещения  $V_{DC}$ , прикладывается переменное поле в виде  $V_{AC}$ , уравнение движения (1) примет вид уравнения Дюффинга [11] с гармонической возбуждающей силой:

$$\ddot{u} + 2\mu\dot{u} + \omega_n^2 u + \alpha_c u^3 = f \cos(\Omega t),$$

где  $\omega_n$  – собственная частота осциллятора,  $\mu$  – линейный коэффициент демпфирования,  $f$ ,  $\Omega$  – амплитуда и частота возбуждающей силы,  $\alpha_c$  – коэффициент кубической нелинейности, который может принимать значения  $\alpha_c > 0$  или  $\alpha_c < 0$ .

Для упрощенного описания динамики остаточного газа в областях между подвижными и неподвижными частями ЧЭ и принципа измерения давления в вакуумной полости по изменению добротности механической системы необходимо решить модифицированное уравнение Рейнольдса (6) [12]. Разработанная конструкция ЧЭ МЭМС-вакуумметра имеет сложную систему демпферов и подвесов. Поэтому выполнить аналитическое описание газодинамического демпфирования достаточно сложно. Подобный анализ даст неточный результат в оценках в связи с особенностями демпфирующих поверхностей резонатора. С этой целью использовалось численное моделирование с помощью метода конечных элементов в программной среде COMSOL Multiphysics.

При этом необходимо было вычислить добротность механической системы в неидеальных условиях разреженного газа с учетом затухания в сжимаемых газовых пленках. При моделировании производились вычисления на основе модифицированного уравнения Рейнольдса:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( H^3 P \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( H^3 P \frac{\partial P}{\partial y} \right) = 12 \mu P \left( H \frac{\partial P}{\partial t} + P \frac{\partial H}{\partial t} \right). \quad (6)$$

В нем  $x$  и  $y$  – пространственные координаты вдоль направления длины ( $l$ ) и ширины ( $b$ ) электрода (обкладки конденсатора),  $t$  – время,  $H$  – переменное расстояние между электродами,  $P$  – полное давление,  $\mu$  – коэффициент вязкости газа (рис. 2).

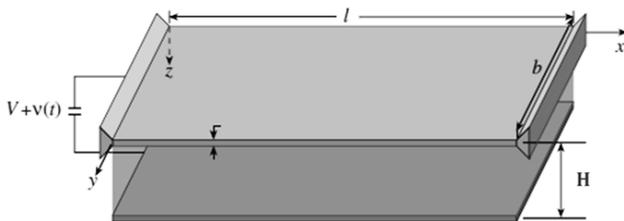


Рис. 2. Плоский параллельный конденсатор

Работа МЭМС-резонатора осуществляется при очень низком давлении с малыми зазорами между электродами, подложкой или другими частями ЧЭ. В этом случае газ невозможно рассматривать как непрерывную сплошную среду, поэтому вводят понятие эффективной вязкости:

$$\mu_{eff} = \frac{\mu}{1 + 9.638 K_n^{1.159}}. \quad (7)$$

Уравнение (7) получено, основываясь на уравнении Больцмана [11], где  $K_n$  – число Кнудсена (8), которое зависит от длины свободного пробега молекул газа и характерного размера системы, связанного с физической проблемой:

$$K_n = \frac{\lambda}{H}, \quad (8)$$

где  $\lambda$  – длина свободного пробега,  $H$  – характерный размер системы, в данном случае расстояние между электродами конденсатора. Длина свободного пробега зависит от давления, как:

$$\lambda = \frac{\lambda_0 P_0}{P}. \quad (9)$$

В (9)  $\lambda_0$  – длина свободного пробега при нормальных условиях,  $P_0$  – атмосферное давление,  $P$  – давление среды. Исходя из уравнений (7)–(9), можно определить эффективную вязкость в зависимости от давления.

Добротность колебательной системы можно определить, как:

$$Q = \frac{1}{2\zeta}, \quad (10)$$

где  $\zeta$  – коэффициент демпфирования:

$$\zeta = \frac{c}{2m\omega}, \quad (11)$$

где  $c$  – коэффициент вязкого демпфирования,  $m$  – эффективная масса,  $\omega$  – собственная частота колебаний. Коэффициент вязкого демпфирования вычисляется по формуле:

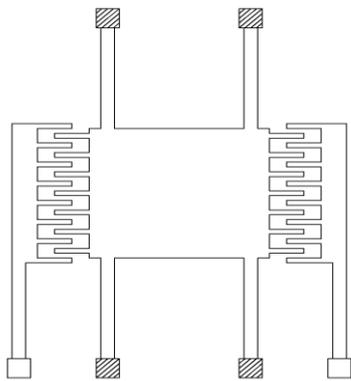
$$c = \frac{b^3 l \mu_{eff}}{H^3} \times 0.7. \quad (12)$$

Следовательно, коэффициент вязкого демпфирования зависит от давления газа. Принимая во внимание уравнения (7)–(12), можно найти выражение для расчета добротности колебательной системы в зависимости от давления газа.

### III. ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИИ И ПРИНЦИПА РАБОТЫ ЧЭ МЭМС-ВАКУУММЕТРА

Принцип действия ЧЭ МЭМС-вакуумметра основан на изменении добротности системы при изменении уровня вакуума. Для достижения большей чувствительности и разрешающей способности датчика вакуума был разработан ЧЭ, добротность которого значительно менялась при изменении давления за счет вязкого демпфирования в среде разреженного газа. Была создана модель, учитывающая SQFD и pull-in, как доминирующие эффекты. Помимо вышеописанных эффектов, разработка проводилась с учетом требований и ограничений, которые поэтапно разрешались в ходе проектирования. Так, исходя из технологических

возможностей оборудования, минимальный зазор между элементами резонатора был недостаточным для проявления в полной мере эффекта газодинамического демпфирования, поэтому авторами было предложено использовать эффект преднапряжения в подвижных частях ЧЭ. Добиться эффекта преднапряжения у подвижной части резонатора ЧЭ удалось благодаря отклонению резонатора в постоянном электростатическом поле. До момента осцилляций за счет подачи постоянного напряжения смещения часть конструкции резонатора максимально отклоняется, при этом эффективный зазор, в котором будет сжиматься газ и происходит SQFD эффект, между статорной частью ЧЭ и демпфирующими поверхностями уменьшается. Колебания резонатора осуществляются относительно точки равновесия, но в деформированном состоянии резонатора. Конструкция ЧЭ, разработанная авторами, подобна конструкции ЧЭ из [9, 13] с той разницей, что в резонаторе предусмотрена система дополнительных демпферов. Заделка подвесов, как и их форма, имеют характерные особенности.



**Рис. 3. Вид резонатора ЧЭ датчика давления разрежения [13]**

Как было упомянуто выше, конструкция резонатора ЧЭ должна быть сбалансирована, поскольку на резонатор оказывают влияние внешние нелинейные по своей природе электростатические силы. При определенном напряжении  $V > V_{pull}$  происходит их нарастание, следовательно, равновесие теряется, и силы электрической природы не могут уже быть скомпенсированы упругими механическими силами, происходит так называемое смягчение жесткости конструкции. При таком сценарии система переходит в нестабильное состояние, возросшая в момент резонанса амплитуда колебания приводит к pull-in эффекту и срыву колебаний.

С другой стороны, излишняя жесткость конструкции резонатора ЧЭ МЭМС-вакуумметра может приводить к слабой чувствительности измерения остаточных газов в микрообъеме. Задача такого рода нашла решение как в виде преднапряженного состояния резонатора, так и в виде подвесов, жесткость которых изменяется с изменением линейных размеров. Подобное техническое решение способствовало минимальному сокращению зазора между электродами резонатора, считывающими полезный сигнал, и

минимизации анкерных потерь. С целью увеличения максимальной площади взаимодействия элементов резонатора с молекулами газа и получения, таким образом, максимальной величины полезной составляющей сигнала на подвижной части резонатора были размещены упомянутые ранее дополнительные демпферы, которые оставались электрически нейтральными.

#### IV. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЧЭ МЭМС-ВАКУУММЕТРА

Как уже отмечалось ранее, моделирование резонатора ЧЭ проводилось в программной среде COMSOL Multiphysics. Для получения точных результатов моделирования учитывались различные диссипационные эффекты. Наряду со SQFD был выполнен расчет по учету slide-film damping эффекта [13], т.е. эффекта газодинамического демпфирования, связанного с трением рабочей поверхности о слой газа, расположенного вдоль плоскости колеблющегося тела. Поэтому были заданы дополнительные граничные условия в областях зазоров между неподвижными и подвижными электродами и дополнительными демпферами со статорной частью ЧЭ. В качестве входных данных задавались параметры: давление разреженного газа, динамическая вязкость и длина свободного пробега молекул при начальном давлении.

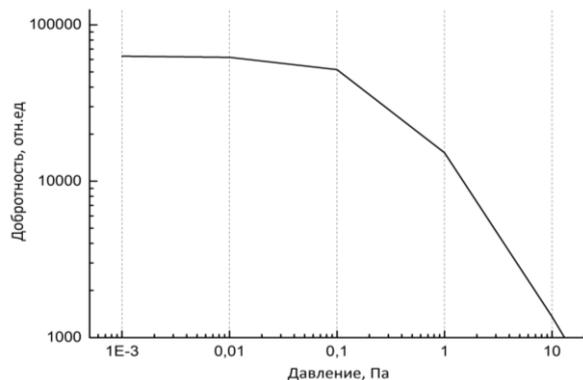
Помимо этого, решалась задача по учету потерь, связанных с термическими эффектами в высокочастотном микрорезонаторе, то есть моделирование термоупругого демпфирования.

К существующей модели резонатора ЧЭ, в которой уже выполнен расчет термоупругого и газодинамического демпфирования, был добавлен интерфейс для задания внешних возбуждающих электростатических сил, была произведена настройка сетки конечных элементов: добавлены области деформируемых доменов с подвижной сеткой, которая автоматически связана с расчетом деформаций в системе и позволяет корректировать расчет силы при изменении зазоров.

Таким образом, была создана и настроена модель ЧЭ МЭМС-вакуумметра, позволяющая учитывать одновременно несколько физических эффектов. Для расчета максимального смещения в электрическом поле проводился преднапряженный анализ при воздействии внешней гармонической возбуждающей силы. Для расчета добротности и частоты с учетом всех доминирующих эффектов внешних и внутренних механизмов диссипации энергии был проведен параметрический анализ, где в качестве параметра использовалось значение давления остаточных газов в диапазоне  $10^{-3}$ –100 Па. Полученная зависимость значений добротности от давления представлена на рис. 4.

Из представленного графика видно, что зависимости добротности от давления имеет резкий спад при увеличении давления, что говорит о сильном проявлении эффектов диссипации энергии. В области низких давлений добротность изменяется более чем на

1000 относительных единиц на декаду изменения величины давления, что дает возможность создания точного МЭМС-вакуумметра.

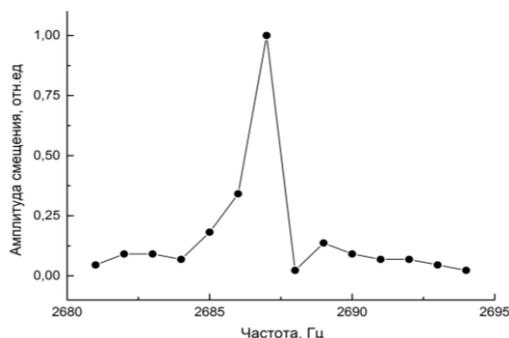


**Рис. 4. Зависимость добротности от давления для резонатора ЧЭ**

#### V. СРАВНЕНИЕ С ЭКСПЕРИМЕНТОМ

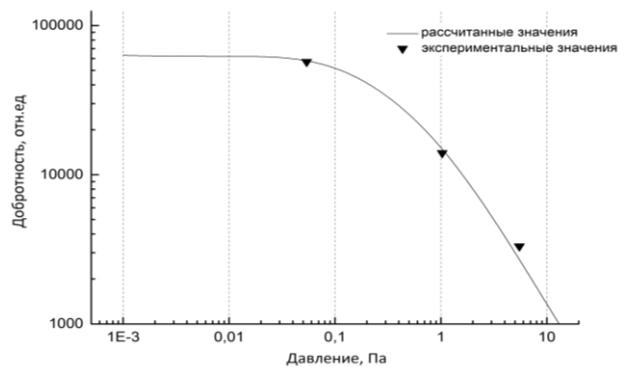
По рассчитанной модели были изготовлены экспериментальные образцы. С целью выявления основных характеристик ЧЭ МЭМС-вакуумметра, оценки точности изготовленной конструкции, а также проверки основного режима работы использовался анализатор микросистем MSA-500. Для измерения добротности, амплитудно- и фазочастотных характеристик на MSA-500 применялся режим стробоскопической видео микроскопии.

Измерения проводились в вакуумной камере с динамически изменяемым уровнем давления для дальнейшего сопоставления результатов математического моделирования добротности резонатора с экспериментальными значениями. АЧХ резонатора ЧЭ МЭМС-вакуумметра представлена на рис. 5.



**Рис. 5. АЧХ (при давлении 0,05 Па)**

Характерный завал АЧХ резонатора на правую сторону относительно резонансной частоты говорит о корректности расчетов конструкции ЧЭ, поскольку результирующим эффектом при колебаниях резонатора является именно SQFD эффект [13]. При этом завал резонансного пика не такой значительный, чтобы наблюдался гистерезис и, как следствие, срыв колебаний резонатора.



**Рис. 6. Экспериментальные значения добротности при разных уровнях вакуума в сравнении с результатами моделирования**

На представленной зависимости рис. 6 наблюдается хорошая корреляция между измеренными величинами и полученными при моделировании в Comsol Multiphysics. Ошибка расчетных значений относительно эксперимента составила не более 5%, что подтверждает корректность расчетов модели.

#### VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрено два наиболее значимых механизма, отвечающих за нелинейные эффекты, которые могут возникать при работе чувствительного элемента МЭМС-вакуумметра. Аналитические выражения, приведенные авторами, позволяют сделать оценки и избежать ряда нежелательных последствий от нелинейных эффектов в работе резонатора чувствительного элемента. Схлопывание за счет действия pull-in эффекта и демпфирование в сжимаемых газовых пленках были смоделированы и учтены при разработке. Проведенное исследование экспериментального образца доказало корректность расчетов модели при проектировании. Результаты выполненной работы можно использовать для построения целого семейства чувствительных элементов МЭМС-вакуумметра для охвата большего диапазона измеряемого давления.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Choa S.-H. Reliability of MEMS packaging: vacuum maintenance and packaging induced stress // *Microsyst. Technol.* 2005. 11: 1187-1196.
- [2] Wang X., Liu C., Zhang Z., Liu S., Luo X. A micromachined Pirani gauge for vacuum measurement of ultra-small sized vacuum packaging // *Sensor. Actuat. A-Phys.* 2010. 161. P. 108-113.
- [3] Extension of operating range towards lower pressures of MEMS-based thermal vacuum gauges by laser-induced heating / Dankovic T. [et. al] // *Procedia Engineer.* 2012. V. 47. P. 1243-1246.
- [4] Sun X., Xu D., Xiong B., Wu G., Wang Y. A wide measurement pressure range CMOS-MEMS based integrated thermopile vacuum gauge with an XeF2 dry etching process // *Actuat. A-Phys.* 2013. V. 201. P. 428-433.
- [5] Gorecka-Drzazga A. Miniature and MEMS-type vacuum sensors and pumps // *Vacuum.* 2009. V. 83. P. 1419-1426.
- [6] Wilfert S., Edelmann C. Field emitter-based vacuum sensors // *Vacuum.* 2012. V. 86. P. 556-571.

- [7] Wen W., Wang L., Gao J., Sun D. Studies on MEMS Vacuum Sensor Based on Field Emission of Silicon Tips Array // 2nd IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems. 2007. P. 199-202.
- [8] Giebel F.J., Köhle M., Stramm T., Kallis K.T., Fiedler H.L. Concept for a MEMS-type vacuum sensor based on electrical conductivity measurements // J. Sens. Sens. Syst. 2017. V. 6. P. 367-374.
- [9] Lee B., Seok S., Chun K. A study on wafer level vacuum packaging for MEMS devices // J. Micromech. Microeng. 2003. Vol. 13. P. 663-669.
- [10] Younis M.I. MEMS linear and nonlinear statics and dynamics. NY: Springer. 2011. 453 p.
- [11] Боголюбов Н.Н., Митропольский Ю.А. Асимптотические методы в теории нелинейных колебаний. М.: Наука, 1958. 408 с.
- [12] Veijola T., Kuisma H., Lahdenperä J., Ryhänen T. Equivalent-circuit model of the squeezed gas film in a silicon accelerometer // Sensors and Actuators. 1995. A. 48. P. 239-248.
- [13] Martin J.H., Kelley W.P. Micromechanical pressure gauge having extended sensor range. United States Patent № 5528939. 25 Jun. 1996.

## Research of Nonlinear Effects in Simulation of MEMS-Vacuum Sensor Elements

C.I. Volkova<sup>1,2</sup>, S.A. Popkov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, kattykat@inbox.ru

<sup>2</sup>Branch of FSUE «RFNC-VNIIEF» «NIIS named after Yu. Ye. Sedakov», Nizhny Novgorod, kattykat@inbox.ru

**Abstract** — The design of modern MEMS sensors requires new methods for monitoring the vacuum level in the micro volume where the sensor element is located. Many precision and highly sensitive inertial MEMS sensors with resonant sensor elements need to maintain a high vacuum level to achieve high quality factor, which ensures the stability of the output characteristics. Along with this, the reliability and durability of such devices is affected by the sealing of the sensitive element from the environment. Therefore, monitoring the vacuum level in the areas where the sensor element is located is very important during the entire product life. Due to the very small size of vacuum micro-cavities, standard leak detection methods become insensitive. The authors suggest the design of a MEMS vacuum gauge sensor element that can be integrated into the working volume of the MEMS sensor. The principle of operation of the vacuum gauge is based on measuring the quality factor of the sensor element resonator when the vacuum level changes. In this paper, we consider the problem of finding the quality factor of the MEMS-vacuum sensor element resonator using numerical modeling and analytical estimates. The two most significant mechanisms responsible for the nonlinear effects that may occur during the operation of the sensor element are considered, in particular, the collapse effect due to the action of the electrostatic field - the pull-in effect, a special case of gas-dynamic damping - squeeze film damping effect. These mechanisms were simulated and taken into account during development. The study of the experimental sample proved the correctness of the model calculations during design. The MEMS vacuum gauge sensor element developed by the authors allows to measure the vacuum in the range of measured pressures:  $10^{-3}$ -100 Pa.

**Keywords** — MEMS, vacuum gauge, quality factor, resonator, damping, SQFD, pull-in effect.

### REFERENCES

- [1] Choa S.-H. Reliability of MEMS packaging: vacuum maintenance and packaging induced stress // Microsyst. Technol. 2005. 11: 1187-1196.
- [2] Wang X., Liu C., Zhang Z., Liu S., Luo X. A micromachined Pirani gauge for vacuum measurement of ultra-small sized vacuum packaging // Sensor. Actuat. A-Phys. 2010. 161. P. 108-113.
- [3] Extension of operating range towards lower pressures of MEMS-based thermal vacuum gauges by laser-induced heating / Dankovic T. [et. al] // Procedia Engineer. 2012. V. 47. P. 1243-1246.
- [4] Sun X., Xu D., Xiong B., Wu G., Wang Y. A wide measurement pressure range CMOS-MEMS based integrated thermopile vacuum gauge with an XeF2 dry etching process // Actuat. A-Phys. 2013. V. 201. P. 428-433.
- [5] Gorecka-Drzazga A. Miniature and MEMS-type vacuum sensors and pumps // Vacuum. 2009. V. 83. P. 1419-1426.
- [6] Wilfert S., Edelmann C. Field emitter-based vacuum sensors // Vacuum. 2012. V. 86. P. 556-571.
- [7] Wen W., Wang L., Gao J., Sun D. Studies on MEMS Vacuum Sensor Based on Field Emission of Silicon Tips Array // 2nd IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems. 2007. P. 199-202.
- [8] Giebel F.J., Köhle M., Stramm T., Kallis K.T., Fiedler H.L. Concept for a MEMS-type vacuum sensor based on electrical conductivity measurements // J. Sens. Sens. Syst. 2017. V. 6. P. 367-374.
- [9] Lee B., Seok S., Chun K. A study on wafer level vacuum packaging for MEMS devices // J. Micromech. Microeng. 2003. Vol. 13. P. 663-669.
- [10] Younis M.I. MEMS linear and nonlinear statics and dynamics. NY: Springer. 2011. 453 p.
- [11] Bogolyubov N.N., Mitropolskiy Yu.A. Asimptoticheskie metody v teorii nelineynykh kolebaniy. M.: Nauka, 1958. 408 s.
- [12] Veijola T., Kuisma H., Lahdenperä J., Ryhänen T. Equivalent-circuit model of the squeezed gas film in a silicon accelerometer // Sensors and Actuators. 1995. A. 48. P. 239-248.
- [13] Martin J.H., Kelley W.P. Micromechanical pressure gauge having extended sensor range. United States Patent № 5528939. 25 Jun. 1996.