

Д. Л. ЗАЙЦЕВ, В. М. АГАФОНОВ, А. С. ШАБАЛИНА

## ШУМОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МОЛЕКУЛЯРНО-ЭЛЕКТРОННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ УГЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ

Экспериментально определена стабильность смещения нуля при постоянной температуре миниатюрных сенсоров для систем инерциальной навигации. На основе анализа аллановской вариации получена теоретическая оценка ухода скорости молекулярно-электронного микрогироскопа, произведено сравнение шумовых характеристик приборов ведущих мировых производителей для систем инерциальной навигации с данными для молекулярно-электронных сенсоров в терминах вариации Аллана.

**Ключевые слова:** молекулярная электроника, акселерометр, гироскоп, вариация Аллана.

Новым шагом в развитии миниатюрных устройств измерения параметров инерциального движения является использование достижений молекулярной электроники. Основным элементом молекулярно-электронного преобразователя (МЭП) — электродная ячейка (рис. 1), помещенная в концентрированный раствор электролита. Обычно используется водный раствор на основе KI (калий — йод) с относительно небольшой добавкой молекулярного йода I<sub>2</sub>. При этом в растворе происходит почти полная диссоциация KI на отрицательно заряженные ионы I<sup>-</sup> и положительные ионы K<sup>+</sup>, а молекулярный йод вступает в реакцию с ионами I<sup>-</sup> с образованием трийодида: I<sub>2</sub> + I<sup>-</sup> = I<sub>3</sub><sup>-</sup> [1]. Таким образом, на фоне высококонцентрированного раствора KI (фоновый электролит) в системе присутствует сравнительно небольшое количество ионов трийодида (активный компонент). Состав раствора подбирается так, чтобы обеспечить возможность протекания на электродах обратимой электрохимической окислительно-восстановительной реакции. Между анодом и катодом МЭП прикладывается разность потенциалов (менее 0,9 В), обеспечивающая установление градиента концентрации активных носителей заряда в пространстве между электродами. При этом разность потенциалов выбирается такой, чтобы все

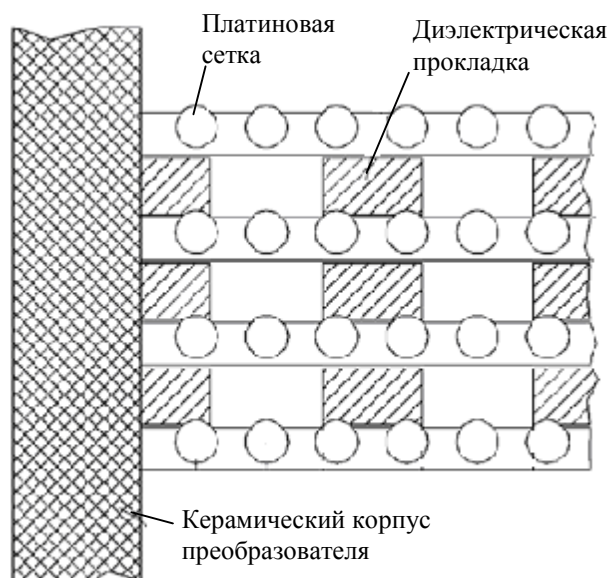


Рис. 1

ионы, достигшие катода, вступали в реакцию, а значение тока ограничивалось только скоростью достижения активным компонентом катода. В неподвижном электролите эта скорость определяется скоростью диффузии активных ионов. Под воздействием внешнего возмущающего сигнала (скорости или ускорения) происходит перенос носителей тока гидродинамическим потоком жидкости, и к диффузии добавляется конвективный перенос, что приводит к вариациям тока в системе и во внешней цепи. Эти вариации тока и являются сигналом МЭП.

Описанный общий принцип работы молекулярно-электронных преобразователей нашел свое практическое применение при производстве различных приборов измерения параметров механического движения, в том числе при определении угловых скоростей и ускорений движущихся объектов.

Исключительно важным фактором для достижения необходимых выходных параметров МЭП является возможность путем изменения параметров электронной схемы добиться того, чтобы выходной сигнал был в широком диапазоне частот пропорционален либо угловому ускорению, либо угловой скорости объекта. Точность получаемой информации определяется рядом основных технических характеристик гироскопов и угловых акселерометров, таких как: линейность в рабочем диапазоне, температурная чувствительность, чувствительность к линейным ускорениям, нестабильность масштабного коэффициента и скорость дрейфа нуля (стабильность нулевого смещения). Скорость дрейфа нуля — один из основных параметров, определяющих точность угловых координат. Влияние дрейфа нуля не может быть устранено методами калибровки параметров математических моделей гироскопа и углового акселерометра. Стабильность нулевого смещения определяется при отсутствии внешнего возмущающего сигнала в термостабильных условиях, выражается в единицах угловой скорости, рад/ч, или углового ускорения, рад/с<sup>2</sup>, в зависимости от типа прибора (гироскоп или акселерометр).

Настоящая статья посвящена измерению стабильности нулевого смещения молекулярно-электронных измерителей угловой скорости и ускорения, теоретической интерпретации полученных экспериментальных результатов, а также сравнению полученных значений дрейфа нуля с параметрами приборов ведущих мировых производителей.

Существуют несколько методов стохастического описания различных шумовых процессов, задающих неточность определения навигационных параметров. В настоящее время принято определять стабильность нулевого смещения приборов на основе использования метода анализа временной последовательности — метода аллановской вариации [2]. Этот метод был разработан для исследования стабильности и шума систем синхронизации и, тем не менее, может быть адаптирован для изучения систем с любым другим выходным параметром, помимо времени [3]. Для вычисления аллановской функции шумовой сигнал разбивается на различное количество фрагментов, характеризующихся одинаковым временем усреднения  $T$ , вариация для каждого конкретного времени усреднения определяется формулой

$$\sigma^2(T) = \frac{1}{2(n-1)} \sum (y(T)_{i+1} - y(T)_i)^2,$$

где  $\sigma(T)$  — функция от времени усреднения  $T$  — функция Аллана;  $y(T)$  — усредненное значение шумового сигнала в  $i$ -м фрагменте разбиения;  $n$  — количество фрагментов.

После вычислений строится зависимость функции Аллана от времени усреднения, обычно в двойном логарифмическом масштабе.

В качестве объекта исследования использовался макет молекулярно-электронного микроакселерометра (МА) угловых движений (рис. 2, вид сверху). Корпус прибора представляет собой керамический тороид 1 с каналом 2, заполненным электролитом, в котором

расположена электродная ячейка 3 (3' — фрагмент электродного узла, представленного на рис. 1) с платиновыми электродами 4, 4' (аноды) и 5 (катоды). В силу высокой однородности плотности жидкости в канале тороида линейные ускорения не создают потока жидкости через ячейку, а измеряемым сигналом является угловое ускорение в направлении, перпендикулярном плоскости тороида.

В ходе эксперимента были исследованы образцы молекулярно-электронных микроакселерометров с плоской передаточной функцией по ускорению в полосе частот 0—50 Гц с коэффициентом преобразования  $0,5 \text{ В} \cdot \text{с}^2/\text{рад}$ .

Для оценки нестабильности нулевого смещения молекулярно-электронного МА использовалась специальная установка. Приборы помещались под купол изоляционной камеры, сохраняющей постоянную температуру в ходе эксперимента, таким образом, чтобы ось чувствительности микроакселерометра к угловому ускорению была параллельна ускорению свободного падения Земли. Также под куполом термокамеры размещались сопутствующая электронная аппаратура и элемент питания. Камера находилась на специальном постаменте в отдельном помещении, что позволяло избежать влияния внешних паразитных сигналов.

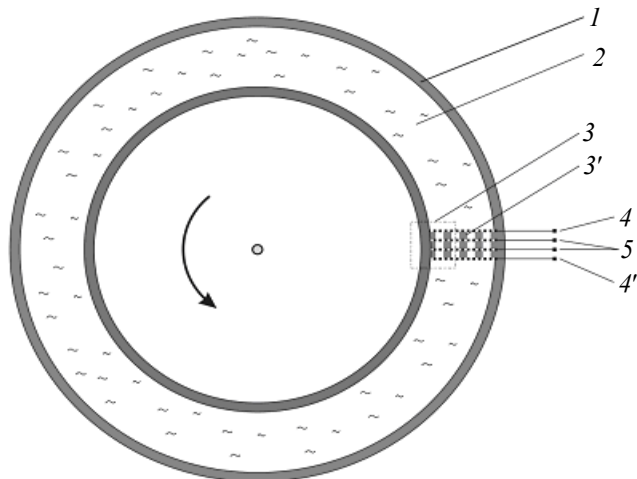


Рис. 2

С помощью внешней системы сбора данных аналоговый сигнал сенсора преобразовывался в цифровой вид с частотой дискретизации 40 Гц с сохранением данных в компьютере. Для последующего анализа была произведена запись шумового сигнала МА при отсутствии внешнего углового ускорения и при постоянной температуре на протяжении всего времени измерения. Затем с использованием приведенного выше выражения была вычислена вариация Аллана как функция времени усреднения  $T$ .

Полученные результаты аллановской вариации для исследуемых образцов молекулярно-электронных МА представлены на рис. 3. Под нестабильностью нулевого смещения понимается значение, соответствующее минимуму функции Аллана от времени усреднения ( $\sigma(T)$ ).

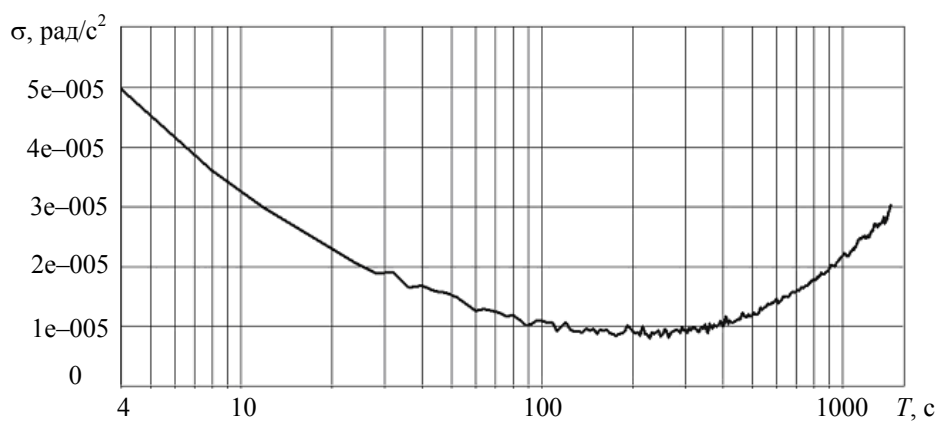


Рис. 3

Как показывают проведенные расчеты, наилучшее значение  $\sigma(T)$  достигается при  $T \approx 200$  с. Учитывая, что выходной сигнал сенсора в рабочей полосе частот пропорционален действующему на систему ускорению, экспериментальное значение  $\sigma(T) \approx 10^{-5} \text{ рад}/\text{с}^2$ .

Полученные результаты демонстрируют превышение мирового уровня для значений исследуемого параметра, что открывает широкие перспективы использования молекулярно-

электронных микроакселерометров как приборов с низким уровнем собственного шума. Таким образом, согласно полученным экспериментальным данным уже разработанные акселерометры вращательных движений могут с успехом заменить при решении задач навигации и управления подвижными объектами системы с жидкостным ротором.

Существенно более интересным для решения задач навигации является изучение исследуемой характеристики молекулярно-электронного микрогироскопа (МГ). Для теоретического анализа стабильности нулевого смещения молекулярно-электронных МГ проинтегрируем данные, полученные угловым акселерометром, в диапазоне частот 0,02—50 Гц с помощью программного математического пакета Dadisp 2002a и произведем анализ аллановской вариации этих данных. На рис. 4 показана аллановская функция проинтегрированного в полосе пропускания 0,02—50 Гц сигнала углового микрогироскопа (кривая 1). Анализ рисунка показывает, что шум, обусловленный произвольным уходом скорости, подавляет другие механизмы шума микрогироскопа в обозначенной полосе частот. Сглаживание функции Аллана при  $T \approx 10$  с обусловлено влиянием фильтра высоких частот, имеющего частоту среза 0,02 Гц. Согласно стандартам IEEE [2, 4] участок (аллановской) кривой 1, имеющей указанную зависимость от частоты, принято считать шумом, называемым Rate Random Walk (или произвольным уходом скорости). Характерный вид аллановской функции, например для волоконно-оптического гироскопа, представлен в работе [5].

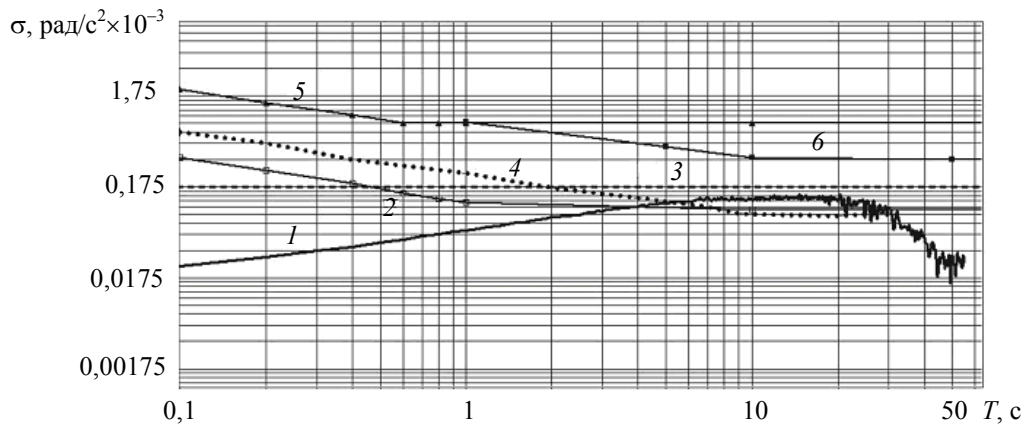


Рис. 4

На рис. 4 для сравнения также представлены шумовые характеристики приборов, производимых такими фирмами, как “Systron Donner” (QRS 11 — кривая 3), “Analog Devices” (ADISI 6120, ADXRS 150 — кривые 4 и 6 соответственно) и “Crossbow” (VG 700, VG 400 — кривые 2 и 5 соответственно) [6—8].

Анализ приведенных результатов и характеристик моделей гироскопов, созданных ведущими мировыми производителями, показывает, что молекулярно-электронные измерители угловых скоростей в полосе частот 0,02—50 Гц и ускорений в полосе 0—50 Гц по своим шумовым характеристикам в настоящее время намного опережают лучшие из микромеханических аналогов и успешно конкурируют с другими типами измерителей.

Таким образом, представленные в настоящей статье данные свидетельствуют о том, что приемлемой точности определения навигационных параметров можно достичь, используя новые типы малогабаритных измерителей параметров инерциального движения, основанных на принципах молекулярной электроники.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 08-07-00475а, грант № 09-07-00507-а) и Федерального агентства по науке и инновациям (государственный контракт № 02.512.11.2316).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Введение в молекулярную электронику / Под ред. *Н. С. Лидоренко*. М.: Энергоатомиздат, 1984.
2. IEEE Std. 952-1997. "Guide and Test for Single Axis Interferometric Fiber Optic Gyros". IEEE, 1997. P. 63.
3. *Stockwell W.* Bias Stability Measurement: Allan Variance // Crossbow Technology Inc. Visited Febr. 26, 2004 [Электронный ресурс]: <[http://www.xbow.com/Support/Support\\_pdf\\_files/Bias\\_Stability\\_Measurement.pdf](http://www.xbow.com/Support/Support_pdf_files/Bias_Stability_Measurement.pdf)>.
4. IEEE Std 1293—1998. IEEE Standard Specification Format Guide and Test Procedure for Linear, Single-Axis, Non-Gyroscopic Accelerometers.
5. *Hou H., El-Sheimy N.* Inertial Sensors Errors Modeling Using AllanVariance: Best Presentation Winning Paper // GPS/GNSS 2003 Proc. The US Institute of Navigation. Sept. 9—12, 2003, Portland. P. 2860—2867.
6. [Электронный ресурс]: <[http://www.systron.com/pro\\_QRS11.asp](http://www.systron.com/pro_QRS11.asp)>.
7. [Электронный ресурс]: <[http://www.analog.com/UploadedFiles/Data\\_Sheets/ADIS16120.pdf](http://www.analog.com/UploadedFiles/Data_Sheets/ADIS16120.pdf)>.
8. [Электронный ресурс]: <<http://www.xbow.com/Products/productdetails.aspx?sid=198>>.

**Сведения об авторах**

- Дмитрий Леонидович Зайцев** — аспирант; Московский физико-технический институт (государственный университет), кафедра экологически чистых источников энергии и молекулярной электроники; E-mail: [Dmitry\\_Zaytsev@mail.ru](mailto:Dmitry_Zaytsev@mail.ru)
- Вадим Михайлович Агафонов** — канд. физ.-мат. наук, доцент; Московский физико-технический институт (государственный университет), кафедра экологически чистых источников энергии и молекулярной электроники; E-mail: [agafonov@cme.ffke.mipt.ru](mailto:agafonov@cme.ffke.mipt.ru)
- Анна Сергеевна Шабалина** — Московский физико-технический институт (государственный университет), кафедра экологически чистых источников энергии и молекулярной электроники; мл. науч. сотрудник; E-mail: [anya@cme.ffke.mipt.ru](mailto:anya@cme.ffke.mipt.ru)

Рекомендована кафедрой  
экологически чистых источников  
энергии и молекулярной электроники

Поступила в редакцию  
12.12.08 г.