

ЛИТЕРАТУРА

1. **Бранец, В.Н.** Введение в теорию бесплатформенных инерциальных навигационных систем / В.Н. Бранец, И.П. Шмыглевский. – М.:Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1992.
2. **Анучин, О.Н.** Интегрированные системы ориентации и навигации для морских подвижных объектов О.Н. Анучин, Г.И. Емельянец. - СПб.: ЦНИИ «Электроприбор», 2003.
3. **Ишлинский, А.Ю.** Ориентация, гироскопы и инерциальная навигация. – М.:Наука, 1976.

Материал поступил 15.10.09

УДК 621.398.694

В. М. АГАФОНОВ, Е. В. ЕГОРОВ, Д. Л. ЗАЙЦЕВ

МОЛЕКУЛЯРНО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ИЗМЕРИТЕЛИ ЛИНЕЙНЫХ УСКОРЕНИЙ. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследованы точностные характеристики измерителей параметров линейного движения, основанные на принципах молекулярной электроники. Для датчиков линейного ускорения экспериментально определена величина стабильности нуля в терминах аллановской вариации и спектральной плотности мощности. Измерены гармонические искажения в зависимости от амплитуды входного воздействия.

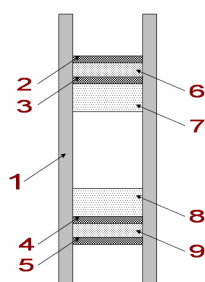


Рис. 1. Электродная ячейка МЭП: 1 – керамический корпус, 2, 3 – анод и катод 1-й электродной пары соответственно, 3, 4 – анод и катод 2-й электродной пары соответственно, 6, 7, 8, 9 – пронизаемые диэлектрические прокладки

В настоящее время актуальной задачей инерциальной навигации является разработка малогабаритных систем определения параметров движения. Традиционные технологии не способны удовлетворить требованиям рынка в отношении стоимости подобных измерительных комплексов в сочетании с их массогабаритными, потребляющими, динамическими и, главное, точностными характеристиками, определяемыми спецификой решаемых задач. В этой связи встает вопрос поиска новой элементной базы – сенсоров с необходимыми значениями указанных характеристик. Новым шагом в развитии миниатюрных устройств измерения параметров движения является использование достижений молекулярной электроники.

Традиционно приборы на основе молекулярно-электронной технологии применяются в разнообразных областях прикладной сейсмологии. Это обусловлено исключительно высокой чувствительностью и низким уровнем собственных шумов молекулярно-электронных преобразователей (МЭП). Возможность использования молекулярно-электронной

Агафонов Вадим Михайлович. Кандидат физико-математических наук, доцент, руководитель Центра молекулярной электроники Московского физико-технического института.

Егоров Егор Владимирович. Аспирант Московского физико-технического института.

Зайцев Дмитрий Леонидович. Младший научный сотрудник Центра молекулярной электроники Московского физико-технического института.

технологии для создания миниатюрных измерителей линейного движения применительно к решению прикладных задач инерциальной навигации и определения параметров движения и является целью настоящего исследования.

Чувствительный элемент МЭП состоит из преобразующей электродной ячейки (рис. 1), помещенной в диэлектрический корпус, заполненный концентрированным раствором электролита. Обычно для этих целей используется йод-йодидный электролит [1]. К помещенным в раствор электродам прикладывается небольшая разность потенциалов ($<0,9$ В), и на электродах начинают протекать обратимые электрохимические реакции. При этом в системе устанавливается распределение концентрации активного компонента. Процесс переноса заряда между анодом и катодом в отсутствии внешнего воздействия происходит путем диффузии электроактивных ионов в растворе электролита, а на самих электродах осуществляется только электронный обмен: на катоде электрон забирается, а на аноде отдается во внешнюю цепь. Ток, текущий через электроды, полностью определяется диффузионной составляющей: $j = -n \cdot e \cdot D \cdot \nabla C|_{\text{electrode}}$, где C – концентрация активных ионов, e – заряд электрона, D – коэффициент диффузии активных ионов, n – число электронов, участвующих в единичном акте реакции на электродах. При наличии гидродинамических потоков к диффузионному добавляется конвективный перенос, что приводит, в зависимости от направления течения жидкости, к увеличению или уменьшению тока в системе. Вариации электрического тока, обусловленные возникающими гидродинамическими потоками, и являются выходным сигналом МЭП.

Если на концах канала установить упругие мембраны, то можно получить устройство для измерения инерциальных движений вдоль оси канала, описанное, например, в [2–5]. Недостатком такого устройства является невозможность измерять постоянно действующее ускорение.

Преодолеть указанную проблему можно используя конструкцию МЭП, показанную на рис. 2, которая и являлась объектом исследования. Преобразователь представлял собой керамический корпус 1 с рабочим 2 и расширительным 3 объемами, заполненными электролитом 4. В рабочий объем помещена преобразующая электродная ячейка 5 (см. рис. 1). В качестве электролита использовался высококонцентрированный раствор йодида калия KI (фоновый электролит) и йода I_2 . В избытке йодида йод переходит в хорошо растворимое комплексное соединение — трийодид (электроактивные ионы) — по следующей схеме: $I_2 + I^- \rightarrow I_3^-$. В используемой здесь электродной ячейке расстояние между электродными парами (между катодами) достаточно велико по сравнению с анод-катодным расстоянием.

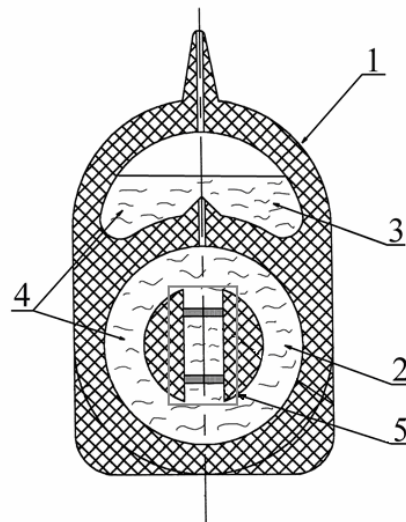


Рис. 2. Структурная схема линейного молекулярно-электронного акселерометра

Нетрудно заметить, что в данной конструкции поток жидкости через преобразующие ячейки возникает и при постоянно действующем ускорении, что обеспечивает сохранение высокой чувствительности данного акселерометра вплоть до 0 Гц. Как упоминалось выше, рабочие характеристики линейного ак-

селерометра могут быть достаточно легко оптимизированы для решения конкретных технических задач варьированием геометрических размеров акселерометра и гидродинамического сопротивления преобразующего элемента. Также стоит отметить, что чувствительность такого сенсора не зависит от направления оси чувствительности в пространстве.

Одной из первых теоретических моделей, описывающих принцип действия диффузионных преобразователей, является одномерная модель Ларкама [1, 2]. В дальнейших теоретических работах [3, 4, 5] моделировались различные трехмерные конфигурации молекулярно-электронной ячейки, что позволило достаточно подробно описать механизмы и основные особенности преобразования сигнала в различных частотных диапазонах. В то же время в этих работах анализировались потоки только для электроактивных ионов, что недостаточно для адекватного описания рассматриваемого преобразователя, поскольку в последнем за изменение плотности в преобразующем канале отвечают как активные ионы, так и фоновый электролит.

В связи с вышеизложенным стало понятно, что необходимо не только последовательно учитывать геометрию преобразующей ячейки, в общем случае представляющей собой достаточно сложную трехмерную структуру, но и рассматривать потоки всех видов ионов, представленных в растворе.

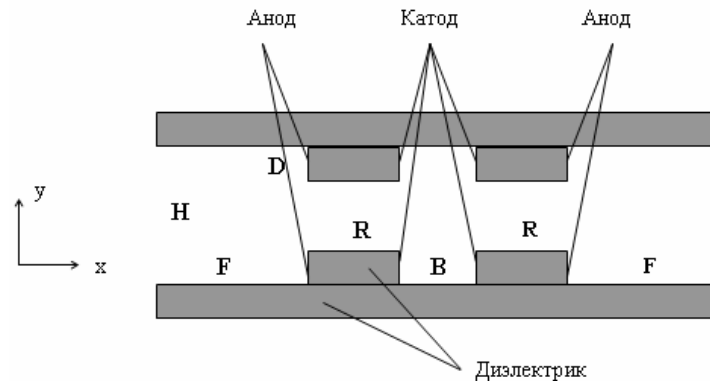


Рис. 3. Модель чувствительного элемента линейного МЭ акселерометра;
 H – высота канала, D – высота электродов, F – расстояние от конца канала до анода,
 R – толщина диэлектрической ступеньки, B – расстояние между катодами

Для теоретического описания подобного МЭП была предложена и рассмотрена модель, в которой геометрия упрощена до прямоугольного единственного канала, где электроды помещены на диэлектрических ступеньках (рис. 3). Предполагается, что электролит электронейтрален и его объем не зависит от концентрации ионов.

Уравнения Навье – Стокса и конвективной диффузии, описывающие поведение такой системы, решались численно с использованием значений физических величин, характеризующих электролит и геометрические размеры ячейки, соответствующие реальным значениям для преобразующей ячейки экспериментального образца.

Главным результатом явилось распределение плотности электролита и концентрации всех видов ионов (рис. 4 и 5).

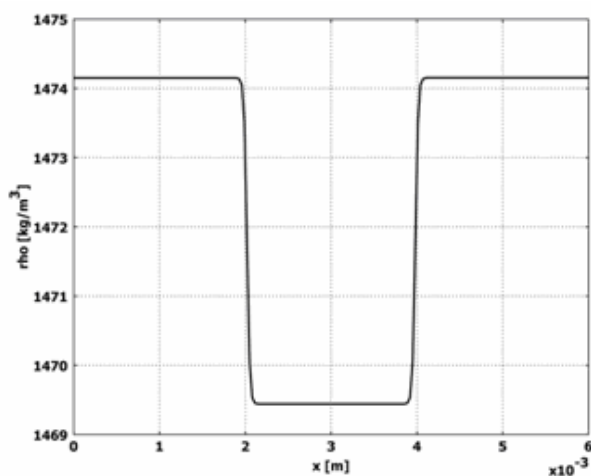


Рис. 4. Распределения плотности электролита при постоянном ускорении $a=1 \text{ м/с}^2$

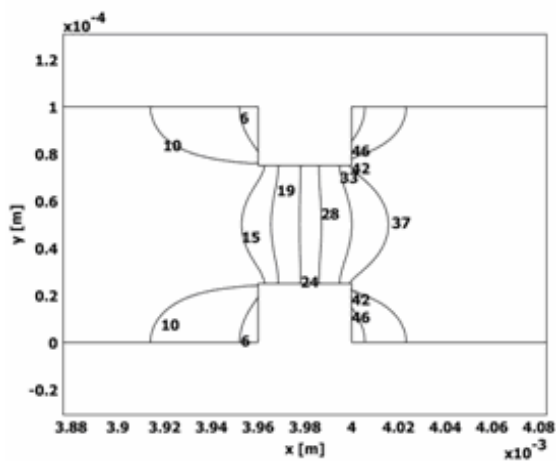
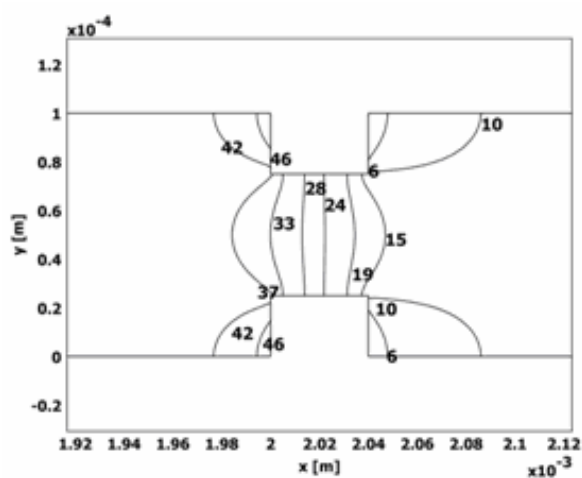


Рис. 5. Распределение концентрации активных ионов I_3^- на левой и правой парах электродов при воздействии ускорения $a = 0.1 \sin(2\pi ft) \text{ м/с}^2$ при $t=12 \text{ с}$

Расчеты показывают, что основное падение плотности электролита происходит между анодом и катодом соответствующей пары как в стационарном случае, так и при воздействии внешнего ускорения, в то время как плотность элек-

тролита в межкатодном пространстве отличается от плотности электролита вне преобразователя на 0,3 %.

Предложенная теоретическая модель учитывает влияние электрического поля на проходящие в молекулярно-электронной ячейке процессы, а численное решение систем уравнений качественно совпадает с результатами экспериментов.

С точки зрения сопоставления приборов исследуемого типа с другими устройствами аналогичного назначения важными параметрами, определяющими точность получаемой информации, являются величина гармонических искажений, собственный шум и дрейф нулевого смещения: эти ошибки не могут быть устранены методами калибровки параметров математических моделей навигационных систем. Настоящая работа посвящена изучению именно этих характеристик молекулярно-электронных измерителей, а также сравнению полученных значений шумовых характеристик с образцами ведущих мировых производителей систем определения навигационных параметров.

Существует несколько методов стохастического описания различных шумовых процессов, определяющих неточность получаемой навигационной информации. Среди них – анализ шумовых характеристик в терминах спектральной плотности мощности в частотной области и метод анализа временной последовательности для определения внутреннего шума системы как функции времени усреднения. В настоящее время принято определять стабильность нулевого смещения приборов с помощью анализа временной последовательности – метода аллановской вариации [6]. Этот алгоритм был специально разработан для исследования стабильности и шума систем синхронизации. Однако он с легкостью может быть адаптирован для изучения систем с любым другим выходным параметром, помимо времени [7]. Для подсчета аллановской функции запись шумового сигнала разбивается на различное количество частей, характеризующихся одинаковым временем усреднения T . Вариация для каждого конкретного времени усреднения определяется формулой

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

где $\sigma(T)$ – функция Аллана, $y(T)$ – усредненное значение записанного сигнала на i -й части разбиения, n – количество частей. После вычислений, в двойном логарифмическом масштабе строится зависимость функции Аллана от времени усреднения.

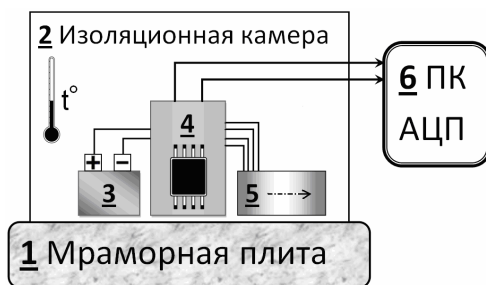


Рис. 6. Экспериментальная установка для изучения шумовых характеристик молекулярно-электронных измерителей параметров движения

Поскольку стабильность нулевого смещения определяется в отсутствии внешнего возмущающего сигнала в термостабильных условиях, то для изучения

шумовых характеристик и величины нестабильности нулевого смещения молекулярно-электронных измерителей использовалась следующая экспериментальная установка (рис. 6). Изучаемые приборы 5 помещались под купол изоляционной камеры 2, поддерживающей постоянную температуру в течение эксперимента. Ось чувствительности датчика лежала в горизонтальной плоскости. Также под куполом изоляционной камеры располагались корректирующая электроника 4 и элемент питания 3. Камера помещалась в изолированное от внешних сейсмических воздействий помещение. Внешняя система сбора данных 6 преобразовывала аналоговый сигнал сенсора в цифровой с частотой дискретизации 80 Гц. Для анализа шумовых характеристик сигнал исследуемого датчика записывался в течение длительного времени (~ 10 ч) в отсутствие внешних воздействий и при постоянной температуре. Далее, с использованием приведенного выше выражения, вычислялась аллановская вариация как функция времени усреднения T .

Результат обработки эксперимента для молекулярно-электронного миниатюрного измерителя линейного ускорения представлен на рис. 7. Под величиной нестабильности нулевого смещения принимается значение, соответствующее минимуму функции Аллана от времени усреднения и выражается в единицах ускорения (μg). Приведенные данные показывают, что лучшей стабильности нулевого смещения удастся достичь при времени усреднения порядка 500 с. Нестабильность нулевого смещения составляет $\sim 2,5 \mu g$ ($2,5 \cdot 10^{-5} \text{ м/с}^2$).

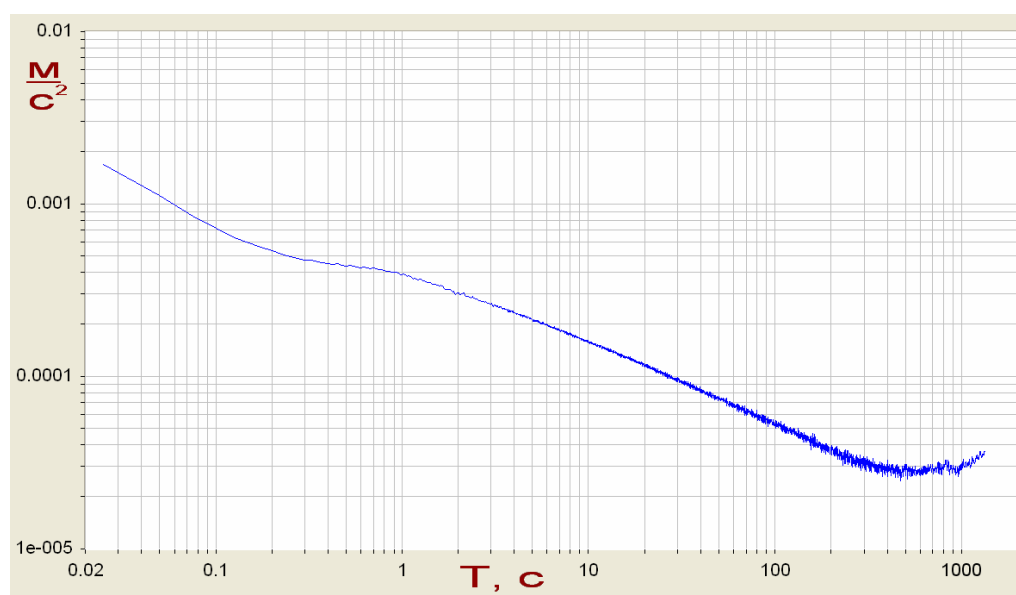


Рис. 7. Вариация Аллана для молекулярно-электронного линейного акселерометра

В зависимости от значения нулевого смещения измерителей параметров движения их применяют в системах навигации различного назначения (см. таблицу) [8]. Таким образом, возможно применение миниатюрных молекулярно-электронных линейных акселерометров во всех системах навигации, вплоть до стратегических.

**Назначение акселерометров
в зависимости от значения их нулевого смещения**

Назначение	Нулевое смещение
Стратегическое	$<1 \mu g$
Навигационное	$10-50 \mu g$
Тактическое	$0,1-1 mg$
Промышленное	$10-100 mg$

Другим общепризнанным методом стохастического описания шумовых характеристик прибора является метод спектральной плотности мощности $S_{\Omega}(f)$ (Power Spectral Density), которая связана с аллановской вариацией $\sigma(T)$ соотношением $\sigma^2(T) = 4 \int_0^{\infty} df \cdot S_{\Omega}(f) \cdot \frac{\sin^4(\pi f T)}{(\pi f T)^2}$, где T – время усреднения, f – частота.

Аллановская вариация пропорциональна полной мощности шумового сигнала, прошедшего через фильтр, имеющий передаточную функцию вида $\sin^4(x)/(x)^2$. Очевидно, что ширина фильтра зависит от времени усреднения T . Таким образом, метод аллановской вариации как функции времени усреднения T обеспечивает средства для идентификации и численной оценки вклада различных механизмов шумов, присутствующих в получаемых от сенсоров данных. Однако вычисление PSD является более универсальным методом анализа шума устройств.

На рис. 8 представлены результаты эксперимента в терминах спектральной плотности мощности для молекулярно-электронного измерителя линейных ускорений, которая составляет $35 \mu g/\sqrt{Гц}$.

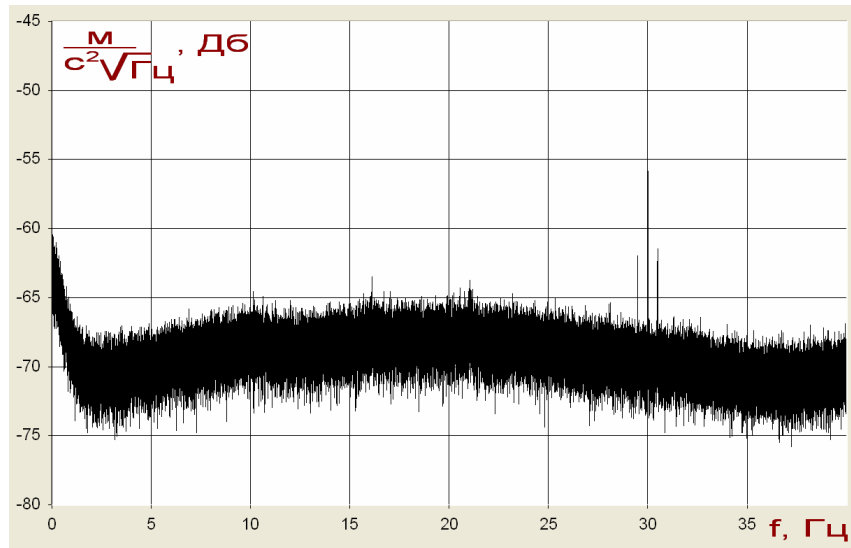


Рис. 8. Спектральная плотность мощности молекулярно-электронного измерителя линейного ускорения

Следующая часть статьи посвящена изучению нелинейных искажений в сигналах молекулярно-электронных датчиков. Величина гармонических искажений определяется по амплитуде паразитных гармоник, возникающих в спектре сигнала датчика, подвергающегося синусоидальному воздействию.

Исследование нелинейностей линейных акселерометров проводилось по следующей методике. С помощью калибровочного стенда, способного производить гармонические колебания на определенной частоте, создавался синусоидальный сигнал с амплитудой от $0,8 \text{ мм/с}^2$ до 3 мм/с^2 на частоте 10 Гц и снимались амплитуды первой, второй и третьей гармоник выходного сигнала. В ходе эксперимента была получена зависимость величины гармонических искажений в спектре сигнала исследуемых измерителей от амплитуды воздействия. Результаты измерений представлены на рис. 9.

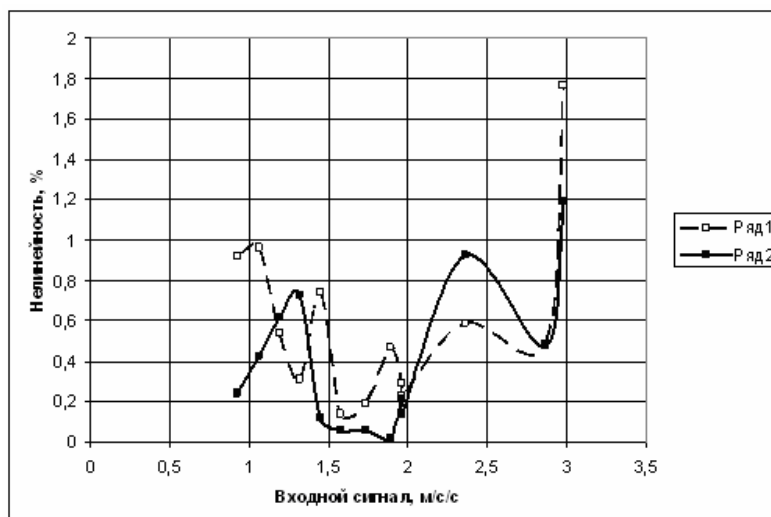


Рис. 9. Зависимости величин 2-й (ряд 1) и 3-й (ряд 2) гармоник относительно 1-й от амплитуды воздействия

Эксперимент показал, что уровень нелинейных искажений приборов достаточно низок. Относительная величина паразитных гармоник в сигнале миниатюрного измерителя линейного ускорения не превышает 1% при ускорениях до $2,8 \text{ м/с}^2$. При дальнейшем росте амплитуды внешнего воздействия возрастают как вторая, так и третья гармоники. Это связано с нелинейной работой калибровочного стенда, при амплитудах внешнего воздействия более 3 м/с^2 .

Для сравнения приведем значения нулевого смещения для MEMS акселерометров и значение собственного шума, которые позиционируются компаниями-производителями как высокоточные измерители параметров движения для использования их в IMU's (Inertial Measurement Units):

- A35 Accel (пр-во Gladiator Technologies, Inc., USA) – $\sim 0,25 \text{ мг}$, $25 \text{ мкг}/\sqrt{\text{Гц}}$;
- 7290A (пр-во Endevco Corporation, USA) – $\sim 10 \text{ мг}$, $5 \text{ мг}/\sqrt{\text{Гц}}$;
- CLX02TG3 (пр-во Crossbow Technology, Inc., USA) – $\sim 10 \text{ мг}$, $20 \text{ мкг}/\sqrt{\text{Гц}}$;
- QA-3000 (пр-во Honeywell International Inc., USA) – $\sim 4 \text{ мг}$, $10 \text{ мкг}/\sqrt{\text{Гц}}$.

Анализ результатов и характеристик приборов производителей, выбранных для сравнения, показывает, что молекулярно-электронные измерители линей-

ных ускорений в исследуемой частотной полосе (0 – 100 Гц) опережают лучшие из микромеханических аналогов и успешно конкурируют с другими типами измерителей по таким характеристикам, как уровень собственных шумов, стабильность нулевого смещения и уровень гармонических искажений.

Важнейшими, выгодными с точки зрения серийного производства, отличиями молекулярно-электронных датчиков от инерционных измерителей параметров движения других типов являются два факта: роль инерционной массы играет жидкость (раствор электролита, протекающий через преобразователь) и отсутствие движущихся элементов точной механики, подверженных износу или возможной поломке, что увеличивает надежность в эксплуатации. Именно применение жидкостной инерционной массы вместе с соответствующим образом выбранными параметрами преобразующего элемента (электродного узла) определяют высокую чувствительность и низкий уровень собственных шумов приборов такого типа в области низких и сверхнизких частот.

Представленные в статье данные свидетельствуют о том, что приемлемой для широкого класса применений точности определения навигационных параметров с использованием недорогих технических средств можно будет достичь используя новые типы недорогих малогабаритных измерителей инерциального движения, основанных на принципах молекулярной электроники.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ,
гранты № 09-07-00507-а, № 08-07-00475-а.*

ЛИТЕРАТУРА

1. **Larcam C. W.** Acoust. Soc. Amer. 1965, Vol. 37 № 4. - P. 664.
2. **Введение** в молекулярную электронику / Под ред. Лидоренко Н.С. М.: Энергоатомиздат, 1984.
3. **Козлов В.А.** Исследование частотных характеристик пространственно ограниченной электрохимической ячейки в условиях конвективной диффузии / В.А. Козлов, Д.А. Терентьев. // Электрохимия. – 2002. – Т. 38, № 9. - С. 1104–1112.
4. **Егоров Е. В.** Фазочастотная характеристика передаточной функции пространственно ограниченной электрохимической ячейки / Е. В. Егоров, В. А. Козлов, А. В. Яшкин // Электрохимия. – 2007. - Т 43, № 12. - С. 1-7
5. **Агафонов В. М.** Исследование АЧХ Молекулярно-электронного преобразователя с новой геометрией / В. М. Агафонов, В. Г. Криштоп // Микросистемная техника. – 2004. - № 9. - С. 40-45.
6. **IEEE Std. 952-1997**, “Guide and Test for Single Axis Interferometric Fiber Optic Gyros,” IEEE, 1997, p.63
7. **Stockwell, W.** (2004), “Bias Stability Measurement: Allan Variance”, Crossbow Technology, Inc. Visited February 26, 2004.
8. **M. R. Daily**, Defense Manufacturing Conference, DMC’99, Nov. 1999.
9. **Козлов В. А.** Собственные шумы молекулярно-электронных преобразователей диффузионного типа / В. А. Козлов, К.А. Сахаров // Физические основы жидкостных и твердотельных измерительных систем и устройств обработки информации. - М.: Изд. МФТИ: 1994. - С. 43-49.
10. **Электрохимические системы.** Дж. Ньюмен. - М.: Мир, 1977.

Материал поступил 15.10.09