

**Ткаченко Алексей Вячеславович** – e-mail: msqk@mail.ru; кафедра конструирования электронных средств; студент.

**Lysenko Igor Eugenjevich** – Southern Federal University; e-mail: ielysenko@sfedu.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371603; the department of electronic apparatuses design; head of the department.

**Ezhova Olga Alexandrovna** – e-mail: ezhova.08.05@gmail.com; the department of electronic apparatuses design; postgraduate.

**Bondarev Philipp Mikhaylovich** – e-mail: dogrtr@mail.ru; the department of electronic apparatuses design; postgraduate.

**Tkachenko Aleksey Vyacheslavovich** – e-mail: msqk@mail.ru; the department of electronic apparatuses design; student.

УДК 621.3.049.77

**Е.А. Рындин**

### **ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ ГИРОСКОПОВ И АКСЕЛЕРОМЕТРОВ\***

*Рассмотрен метод построения устройств обработки сигналов емкостных преобразователей микромеханических гироскопов и акселерометров, предполагающий выполнение преобразования «емкость – частота» посредством выделения разностной частоты колебаний двух генераторов, в частотозадающие цепи которых включены емкости микромеханических преобразователей гироскопов или акселерометров. Рассмотрена схема преобразователя «емкость – частота», обеспечивающая высокую чувствительность, стабильность при изменениях температуры и напряжения питания и устойчивость к шумам благодаря разностному принципу формирования выходного сигнала. Выходные гармонические сигналы генераторов подаются на смеситель, на выходе которого формируется сигнал биений. Частота биений является разностной частотой измерительных генераторов и определяется разностью емкостей микромеханического преобразователя. Сигнал биений с выхода смесителя поступает на детектор, выделяющий огибающую данного сигнала, которая усиливается линейным усилителем и подается на формирователь выходных прямоугольных импульсов соответствующей частоты для последующей цифровой обработки. Частотный выход данной схемы позволяет оптимизировать устройство последующей цифровой обработки информации о регистрируемых значениях угловой скорости или линейного ускорения. Разностный принцип формирования выходного сигнала обеспечивает высокую чувствительность устройства без использования зарядовых усилителей, что позволяет повысить устойчивость схемы к шумам. Использование для формирования выходных импульсов двух идентичных генераторов обеспечивает частичную компенсацию температурных изменений выходной частоты, расширяя диапазон рабочих температур устройства. Для оценки эффективности предложенного метода построения устройств обработки сигналов емкостных преобразователей микромеханических гироскопов и акселерометров разработаны, изготовлены и исследованы макеты аналогового и цифрового вариантов устройств обработки сигналов емкостных микромеханических преобразователей.*

*Микромеханический гироскоп; акселерометр; обработка сигналов.*

\* Работа при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (проекты № 14.575.21.0045, № 213.01–11/2014–12).

Е.А. Ryndin

**HIGH-SENSITIVE SIGNAL PROCESSING DEVICES FOR  
MICROMECHANICAL GYROSCOPES AND ACCELEROMETERS**

*The method of design of the signal processing device which process the data from capacitive transducer of micromechanical gyroscope and accelerometer is described. The scheme of the "capacity – frequency" converter, providing high sensitivity, stability over temperature and supply voltage and noise immunity due to differential principle of forming the output signal. Outputs of the harmonic generators are fed to the mixer, the output of which is formed the signal of the beating. The beat frequency is a difference frequency of the generators, and is determined by the difference of the capacitances of micromechanical converter. The signal beats with the output of the mixer is fed to the detector, produce the envelope of the signal, which is amplified by a linear amplifier and fed to the driver of output rectangular pulses of the appropriate frequency for subsequent digital processing. Frequency output of this circuit allows to optimize the subsequent digital processing of the registered values of the angular velocity or linear acceleration. The differencing principle of forming the output signal provides high sensitivity without the use of charge amplifiers, which improves the immunity of the circuit to noise. Use for forming output pulses of the two identical generators provides a partial compensation for temperature changes in the output frequency, extending the operating temperature range of the device. To evaluate the effectiveness of the proposed method of creation of processing signal devices of capacitive converters of micromechanical gyroscopes and accelerometers prototypes of analog and digital variants of the signal processing devices for capacitive micromechanical transducers are designed, fabricated and tested.*

*Micromechanical gyroscope; accelerometer; signal processing.*

**Введение.** Микромеханические гироскопы и акселерометры находят все более широкое применение в современных технических устройствах самого различного назначения: от специализированных изделий аэрокосмической техники и оборонных систем до сотовых телефонов и игровых приставок [1–14].

Наиболее широкое распространение получили гироскопы и акселерометры с емкостными микромеханическими преобразователями [15–17]. Реализация микромеханических компонентов с использованием интегральных технологий приводит к минимизации емкостей преобразователей и изменений данных емкостей под действием угловых скоростей и линейных ускорений. В результате основным требованием, предъявляемым к устройствам обработки сигналов емкостных преобразователей, является высокая чувствительность, для обеспечения которой, как правило, используют схемы на основе зарядовых усилителей [18–20]. Однако усилители заряда характеризуются также высокой чувствительностью к шумам, что в значительной степени ограничивает характеристики устройств обработки на их основе.

В данной работе представлен метод построения устройств обработки сигналов емкостных микромеханических преобразователей, обеспечивающий комплексное решение проблемы повышения чувствительности и устойчивости к воздействию шумов.

**Метод построения устройств обработки сигналов емкостных преобразователей.** Разработанный метод построения устройств обработки сигналов емкостных микромеханических преобразователей иллюстрирует структурная схема, приведенная на рис. 1.

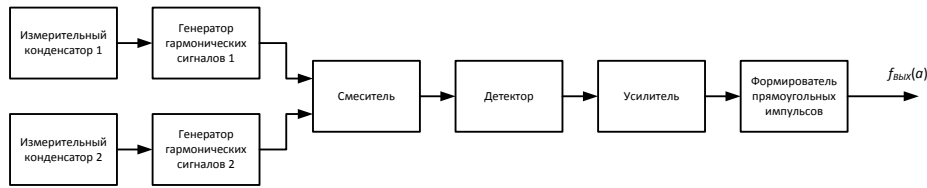


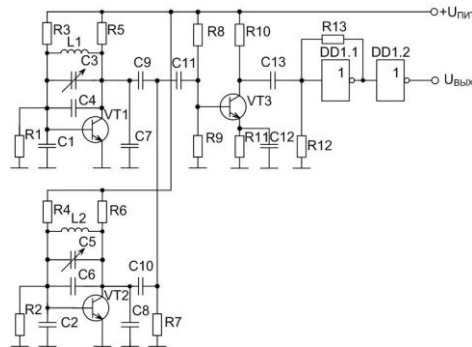
Рис. 1. Структурная схема устройства обработки сигналов емкостных микромеханических преобразователей

Основу метода составляет выделение разностной частоты сигналов, формируемых двумя идентичными генераторами, в частотозадающие цепи которых включены емкости микромеханических преобразователей (измерительные конденсаторы 1 и 2 на рис. 1), противофазно изменяющиеся под действием угловой скорости (в микрогироскопе) или линейного ускорения (в микроакселерометре).

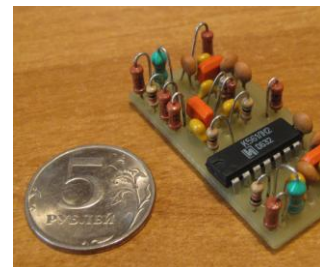
Выходные гармонические сигналы генераторов подаются на смеситель, на выходе которого формируется сигнал биений (рис. 1). Частота биений является разностной частотой измерительных генераторов и определяется разностью емкостей микромеханического преобразователя. Сигнал биений с выхода смесителя поступает на детектор, выделяющий огибающую данного сигнала, которая усиливается линейным усилителем и подается на формирователь выходных прямоугольных импульсов соответствующей частоты для последующей цифровой обработки.

#### Реализация устройств обработки сигналов емкостных преобразователей.

Для оценки эффективности предложенного метода разработан и изготовлен ряд макетов устройств обработки сигналов емкостных микромеханических преобразователей. Принципиальная схема и внешний вид одного из них приведены на рис. 2.



а



б

Рис. 2. Макет устройства обработки сигналов емкостных преобразователей микромеханических компонентов: а – принципиальная схема; б – внешний вид

Генераторы гармонических колебаний реализованы на элементах C1 – C8, R1 – R6, L1, L2, VT1, VT2. Смеситель и детектор выполнены на элементах C9 – C13, R7 – R11, VT3. Линейный усилитель выполнен на основе инвертора DD1.1 и резисторов отрицательной обратной связи R12, R13. Формирователь выходных прямоугольных импульсов реализован на основе инвертора DD1.2.

На рис. 3 представлены результаты исследований макета устройства обработки сигналов емкостных микромеханических преобразователей.

Разностный принцип формирования выходного сигнала обеспечивает высокую чувствительность устройства без использования зарядовых усилителей, что позволяет повысить устойчивость схемы к шумам. Использование для формирования выходных импульсов двух идентичных генераторов обеспечивает частичную компенсацию температурных изменений выходной частоты, расширяя диапазон рабочих температур устройства. Вместе с тем, использование LC-генераторов гармонических колебаний, аналоговых схем смесителя, детектора и усилителя создает определенные сложности для интегрального исполнения данного устройства на полупроводниковом кристалле микросистемы совместно с блоками последующей цифровой обработки.

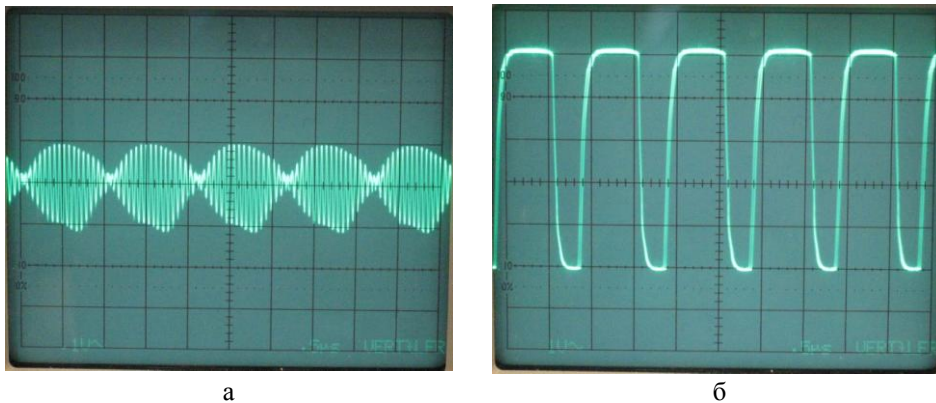


Рис. 3. Осциллограммы устройства обработки сигналов емкостных микромеханических преобразователей: а – выходной сигнал смесителя (сигнал биений); б – выходной сигнал формирователя прямоугольных импульсов

С целью решения этой проблемы при выполнении данного исследования разработан вариант реализации устройства обработки сигналов емкостных микромеханических преобразователей на основе цифровых элементов двухуровневой логики, структурная схема которого представлена на рис. 4.

В данной схеме используется два генератора прямоугольных импульсов с измерительными конденсаторами в частотоподающих цепях. Выходные импульсы генераторов подаются на входы логического элемента ИСКЛЮЧАЮЩЕ ИЛИ, в результате чего на выходе данного элемента формируется последовательность прямоугольных импульсов, скважность которых будет периодически изменяться во времени с частотой, равной разности частот генераторов прямоугольных импульсов  $f_x = f_2 - f_1$  и пропорциональной разности емкостей измерительных конденсаторов микромеханического преобразователя  $\Delta C$ :

$$f_x \approx f_0 \frac{\Delta C}{C_0}, \quad (1)$$

где  $f_0$ ,  $C_0$  – частота генератора прямоугольных импульсов и емкость измерительных конденсаторов, соответственно, в отсутствие угловой скорости (для гироскопа) или линейного ускорения (для акселерометра).

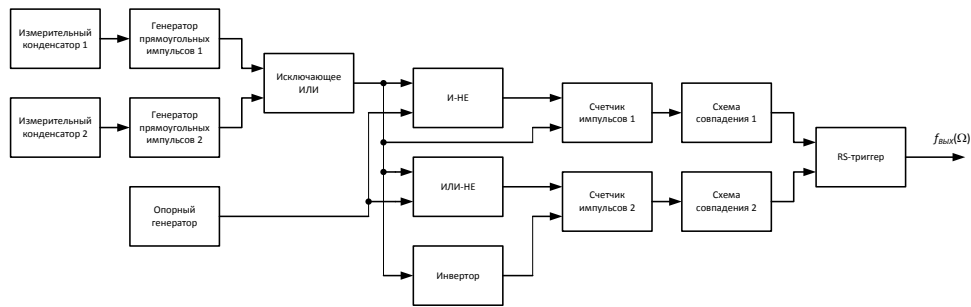


Рис. 4. Структурная схема цифрового устройства обработки сигналов емкостных микромеханических преобразователей

На основе генератора опорной частоты, логических элементов И-НЕ, ИЛИ-НЕ, инвертора, счетчиков импульсов, схем совпадения и RS-триггера реализован формирователь выходных прямоугольных импульсов с частотой следования  $f_{вых} = f_x$ , пропорциональной изменению  $\Delta C$  емкостей микромеханического преобразователя. Частота импульсов опорного генератора определяется выражением

$$f_{on} \approx 2^R f_0, \quad (2)$$

где  $R$  – разрядность счетчиков импульсов.

Чувствительность устройства определяется следующим образом:

$$\frac{df_x}{d(\Delta C)} = \frac{f_0}{C_0} \sim \frac{1}{C_0^2}. \quad (3)$$

**Заключение.** В результате использования разностного принципа формирования выходного сигнала уменьшение емкости конденсаторов микромеханического преобразователя обеспечивает квадратичное увеличение чувствительности устройства, а нечувствительность к шумам, обусловленная использованием только цифровых элементов двухуровневой логики, позволяет значительно уменьшить пороговое значение измеряемой емкости. Допустимый уровень шума определяется разностью между минимально допустимым уровнем напряжения логической единицы и максимально допустимым уровнем напряжения логического нуля.

Использование двух идентичных генераторов прямоугольных импульсов и разностный принцип формирования выходного сигнала обеспечивают высокую стабильность работы устройства при воздействии дестабилизирующих факторов. Например, коэффициент температурной нестабильности выходной разностной частоты  $K_{Tx}$  может быть выражен как

$$K_{Tx} \approx K_T \frac{\Delta C}{C_0}, \quad (4)$$

где  $K_T$  – коэффициент температурной нестабильности генераторов.

То есть нестабильность выходной частоты в  $\Delta C/C_0$  раз меньше нестабильности частот генераторов. Данная особенность обеспечит снижение погрешности преобразования емкости в частоту, обусловленную различными факторами нестабильности отдельных элементов устройства.

Результаты получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования и Научно-образовательного центра «Нанотехнологии» Института нанотехнологий, электроники и приборостроения Южного федерального университета (г. Таганрог).

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вернер В.Д., Мальцев П.П., Резнев А.А., Сауров А.Н., Чаплыгин Ю.А. Современные тенденции развития микросистемной техники // Нано- и микросистемная техника. – 2008. – № 8. – С. 2-6.
2. Иванов А.А., Мальцев П.П. Микросистемная техника – основа научно-технической революции в военном деле // Микросистемная техника. – 2004. – № 10. – С. 2-6.
3. Elwenspoek M., Wiegink R. Mechanical microsensors. – Springer, 2001. – 308 p.
4. Гольцова М.М., Юдинцев В.А. МЭМС: большие рынки малых устройств // Нано- и микросистемная техника. – 2008. – № 4. – С. 9-13.
5. Шелепин Н.А. Кремниевые микросенсоры и микросистемы: от бытовой техники до авиационных приборов // Микросистемная техника. – 2000. – № 1. – С. 40-43.
6. Прокофьев И.В., Тихонов Р.Д. Нано- и микросистемы для мониторинга параметров движения транспортных средств // Нано- и микросистемная техника. – 2011. – № 12. – С. 48-50.
7. Анчурин С.А., Максимов В.Н., Морозов Е.С., Головань А.С., Шилов В.Ф. Блок инерциальных датчиков // Нано- и микросистемная техника. – 2011. – № 1. – С. 50-53.
8. Тимошенко С.П. Элементы микроэлектромеханических систем, реализуемых на составных структурах // Микросистемная техника. – 2002. – № 4. – С. 3-6.
9. Мальцев П.П., Никифоров А.Ю., Телец В.А. Интегрированные технологии микросистемной техники // Микросистемная техника. – 2001. – № 11. – С. 22-24.
10. Тимошенко В.П., Тимошенко С.П., Миндеев А.А. Разработка конструкции микрогирроскопа на основе КНИ-технологии // Известия вузов. Электроника. – 1999. – № 6. – С. 46-50.
11. Лысенко И.Е. Проектирование сенсорных и актюаторных элементов микросистемной техники. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2005. – 103 с.
12. Королев М.А., Тихонов Р.Д., Чаплыгин Ю.А. Интегрированные микросистемы – перспективные элементы микросистемной техники // Микросистемная техника. – 2003. – № 7. – С. 6-7.
13. Xie H. Gyroscope and micromirror design using vertical-axis CMOS-MEMS actuation and sensing. – Carnegie Mellon university, 2002. – 246 p.
14. Распопов В.Я. Микромеханические приборы. – М.: Машиностроение, 2007. – 400 с.
15. Погалов А.И., Тимошенко В.П., Тимошенко С.П., Чаплыгин Ю.А. Разработка микрогирроскопов на основе многослойных структур кремния и стекла // Микросистемная техника. – 1999. – № 1. – С. 36-41.
16. Коноплев Б.Г., Лысенко И.Е., Полищук Е.В. Интегральный микромеханический гироскоп-акселерометр на основе углеродных нанотрубок. Патент РФ №2334237, 2008.
17. Лысенко И.Е. Интегральный микромеханический гироскоп-акселерометр. Патент РФ № 2293338, 2007.
18. Пейтон А.Дж., Воли В. Аналоговая электроника на операционных усилителях. – М.: БИНОМ, 1994. – 352 с.
19. Шаронов В.М., Мусиенко М.П., Шаранова Е.В. Пьезоэлектрические датчики. – М.: Техносфера, 2006. – 632 с.
20. Белоус А.И., Емельянов В.А., Дрозд С.Е., Коннов Е.В., Мухуров Н.И., Плебанович В.А. Схемотехническое конструирование БИС преобразователя емкость-напряжение для микроэлектромеханических датчиков // Нано- и микросистемная техника. – 2008. – № 8. – С. 15-19.

## REFERENCES

1. Verner V.D., Mal'tsev P.P., Reznev A.A., Saurov A.N., Chaplygin Yu.A. Sovremennye tendentsii razvitiya mikrosistemnoy tekhniki [Modern trends in the development of Microsystem technology], *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika* [Nano and Microsystem Technique], 2008, No. 8, pp. 2-6.
2. Ivanov A.A., Mal'tsev P.P. Mikrosistemnaya tekhnika – osnova nauchno-tekhnicheskoy revolyutsii v voennom dele [Microsystem technology is the basis of scientific-technical Revolution in military Affairs], *Mikrosistemnaya tekhnika* [Microsystem Technology], 2004, No. 10, pp. 2-6.
3. Elwenspoek M., Wiegink R. Mechanical microsensors. Springer, 2001, 308 p.

4. *Gol'tsova M.M., Yudintsev V.A.* MEMS: bol'shie rynki malykh ustroystv [MEMS: large markets, small devices], *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika* [Nano and Microsystem Technique], 2008, No. 4, pp. 9-13.
5. *Shelepin N.A.* Kremnievye mikrosensory i mikrosistemy: ot bytovoy tekhniki do aviatsionnykh priborov [Silicon microsensors and Microsystems: from household appliances to aircraft instruments], *Mikrosistemnaya tekhnika* [Microsystem Technology], 2000, No. 1, pp. 40-43.
6. *Prokofev I.V., Tikhonov R.D.* Nano- i mikrosistemy dlya monitoringa parametrov dvizheniya transportnykh sredstv [Nano- and Microsystems for monitoring of parameters of movement of vehicles], *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika* [Nano and Microsystem Technique], 2011, No. 12, pp. 48-50.
7. *Anchurin S.A., Maksimov V.N., Morozov E.S., Golovan' A.S., Shilov V.F.* Blok inertial'nykh datchikov [Unit inertial sensors], *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika* [Nano and Microsystem Technique], 2011, No. 1, pp. 50-53.
8. *Timoshenkov S.P.* Elementy mikroelektromekhanicheskikh sistem, realizuemykh na sostavnykh strukturakh [Elements of micro-Electromechanical systems realized with fixed structures], *Mikrosistemnaya tekhnika* [Microsystem Technology], 2002, No. 4, pp. 3-6.
9. *Mal'tsev P.P., Nikiforov A.Yu., Telets V.A.* Integrirovannye tekhnologii mikrosistemnoy tekhniki [Integrated technologies Microsystems technology], *Mikrosistemnaya tekhnika* [Microsystem Technology], 2001, No. 11, pp. 22-24.
10. *Timoshenkov V.P., Timoshenkov S.P., Mindeev A.A.* Razrabotka konstruksii mikrogiroskopa na osnove KNI-tekhnologii [The design microgyroscope based on SOI-technology], *Izvestiya vuzov. Elektronika* [Proceedings of universities. Electronics], 1999, No. 6, pp. 46-50.
11. *Lysenko I.E.* Proektirovanie sensorykh i aktuatorykh elementov mikrosistemnoy tekhniki [Designing sensory actuating elements and Microsystem technology]. Taganrog: Izd-vo TRTU, 2005, 103 p.
12. *Korolev M.A., Tikhonov R.D., Chaplygin Yu.A.* Integrirovannye mikrosistemy – perspektivnye elementy mikrosistemnoy tekhniki [Integrated Microsystems – a perspective elements of Microsystems technology], *Mikrosistemnaya tekhnika* [Microsystem Technology], 2003, No. 7, pp. 6-7.
13. *Xie H.* Gyroscope and micromirror design using vertical-axis CMOS-MEMS actuation and sensing. Carnegie Mellon university, 2002, 246 p.
14. *Raspopov V.Ya.* Mikromekhanicheskie pribory [Micromechanical devices]. Moscow: Mashinostroenie, 2007, 400 p.
15. *Pogalov A.I., Timoshenkov V.P., Timoshenkov S.P., Chaplygin Yu.A.* Razrabotka mikrogiroskopov na osnove mnogosloynnykh struktur kremniya i stekla [Development of microgyroscopes based on multilayer structures of silicon and glass], *Mikrosistemnaya tekhnika* [Microsystem Technology], 1999, No. 1, pp. 36-41.
16. *Konoplev B.G., Lysenko I.E., Polishchuk E.V.* Integral'nyy mikromekhanicheskiy giroskop-akselerometr na osnove uglerodnykh nanotrubok [Integrated micromechanical gyroscope-accelerometer based on carbon nanotubes]. Patent RF, No. 2334237, 2008.
17. *Lysenko I.E.* Integral'nyy mikromekhanicheskiy giroskop-akselerometr [Integrated micromechanical gyroscope-accelerometer]. Patent RF, No. 2293338, 2007.
18. *Peyton A.Dzh., Volsh V.* Analogovaya elektronika na operatsionnykh usilitelyakh [Analog electronics on operational amplifiers]. Moscow: BINOM, 1994, 352 p.
19. *Sharapov V.M., Musienko M.P., Sharapova E.V.* P'ezoelektricheskie datchiki [Piezoelectric sensors]. Moscow: Tekhnosfera, 2006, 632 p.
20. *Belous A.I., Emel'yanov V.A., Drozd S.E., Konnov E.V., Mukhurov N.I., Plebanovich V.A.* Skhemotekhnicheskoe konstruirovaniye BIS preobrazovatelya emkost'-napryazheniye dlya mikroelektromekhanicheskikh datchikov [Circuit designing of LSI Converter capacitance-voltage for MEMS sensors], *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika* [Nano and Microsystem Technique], 2008, No. 8, pp. 15-19.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н., профессор А.А. Лаврентьев.

**Рындин Евгений Адальбертович** – Южный федеральный университет; email: earyndin@sfnedu.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: +78634311584; кафедра конструирования электронных средств; д.т.н.; профессор.

**Ryndin Evgeniy Adalbertovich** – Southern Federal University; email: earyndin@sfnedu.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634311584; the department of electronic apparatuses design; professor.

УДК 621.3.049.77

**И.Е. Лысенко, Ф.М. Бондарев, О.А. Ежова, Р.И. Тарасов**

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ МИКРОМЕХАНИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА С ДВУМЯ ОСЯМИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ\***

*Компоненты микросистемной техники, такие как сенсоры угловых скоростей, находят широкое применение в различных областях: космическое приборостроение, медицинская техника, бытовые приборы, игры нового поколения, автомобилестроение и т.д. Для измерения необходимых параметров движения объекта в пространстве данные сенсорные элементы располагают по взаимно ортогональным осям, что, в свою очередь, приводит к увеличению габаритных размеров и массы микросистем, снижению надежности измерительного блока, увеличению уровня внутренних шумов. Решить данную проблему (улучшить массогабаритные характеристики данных микросистем и обеспечить возможность регистрации параметров по нескольким осям) можно применением интегральных гироскопов с двумя осями чувствительности. Таким образом, актуальной задачей является разработка конструкции микромеханических сенсоров угловых скоростей – микромеханических гироскопов с двумя осями чувствительности. Основными целями при разработке данных микромеханических сенсоров является улучшение основных рабочих характеристик (диапазона угловых скоростей, точности, погрешности, уход нуля и т.п.), уменьшение массогабаритных параметров (массы и объема), площади, занимаемой устройством на подложке, а также снижение стоимости проектируемого изделия. В данной работе освещены основные этапы разработки конструкции и создания математической модели микромеханического гироскопа (ММГ) с двумя осями чувствительности. В соответствии с предложенной методикой моделирования были выполнены расчеты собственных форм и собственных частот колебаний чувствительного элемента интегрального микромеханического гироскопа. Разработано параметризуемое описание конструкции на высокоуровневом языке проектирования аналого-цифровых устройств VHDL-AMS. Проведен анализ конструкции в САЕ-системе ANSYS. Результаты, полученные в ходе математического моделирования, удовлетворяют требованиям, предъявляемым к современным микромеханическим гироскопам, что очень важно, учитывая постоянный рост качества характеристик и снижение цен на иностранную продукцию в сегменте рынка. Полученные данные могут быть использованы в дальнейших разработках конструкций интегральных микромеханических гироскопов с учетом возможностей перебора параметров моделей.*

*Микросистемная техника; микроэлектромеханическая система; элементная база; микромеханический компонент; сенсор угловых скоростей; гироскоп; конструкция; модель; моделирование.*

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки России (проект №213.01–11/2014–12 в рамках базовой части государственного задания).