

**Lashkov Andrey Vitalyevich** – Yuri Gagarin State Technical University of Saratov; e-mail: 19lashkov88@rambler.ru; 77, Polytechnicheskaya street, Saratov, 410054, Russia; phone: +78452998624; the department of physics; postgraduate student.

**Sysoev Victor Vladimirovich** – e-mail: vsysoev@sstu.ru; the department of physics; dr. of eng. sc.; professor.

**Dobrokhoto Vladimir Vladimirovich** – Western Kentucky University (USA); e-mail: vladimir.dobrokhoto@wku.edu; 42101, Kentucky, Bowling Green, Blvd. College Heights, 1906; phone: +12707456201; Applied Physics Institute; director of institute; dr. of eng. sc.; professor.

УДК 621.3.049.77

**И.Е. Лысенко, О.А. Ежова, И.В. Куликова, Н.К. Приступчик**

**МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ КОМПОНЕНТОВ НА ОСНОВЕ БИБЛИОТЕКИ МИКРОФРАГМЕНТОВ\***

*Настоящая работа посвящена разработке методики проектирования микромеханических сенсоров угловых скоростей и линейных ускорений. Предлагаемая методика основана на использовании унифицированных структурно-топологических примитивов, разработанных авторами. Компоненты микроэлектромеханических систем характеризуются высокой сложностью проектирования, поскольку при их необходимо учитывать разнообразные физические эффекты, лежащие в основе их функционирования. Учитывая функциональную сложность компонентов данных микромеханических систем, для обеспечения сокращения времени проектирования используются различные методы автоматизации при проектировании, опирающихся на вычислительную базу. Предлагается данные микромеханические компоненты разбивать на элементы по функциональному признаку. Основное внимание обращено на методологию проектирования микромеханических сенсоров угловых скоростей и линейных ускорений на основе библиотеки микрофрагментов, разработанных под редактор топологии L-Edit системы автоматизированного проектирования Tanner EDA. Разработка структурно-топологических примитивов микрофрагментов выполнена с учетом технологических норм изготовления процесса поверхностной микрообработки MUMPs.*

*Микроэлектромеханическая система; гироскоп; акселерометр; конструкция; модель.*

**I.E. Lysenko, O.A. Ezhova, I.V. Kulikova, N.K. Pristupchik**

**DESIGN METHOD OF MICROMECHANICAL COMPONENTS BASED ON THE MACROS LIBRARY**

*This paper is devoted the development of a technique of designing micromechanical sensors of angular velocities and linear accelerations. The offered technique is based on the use of unified structural topological primitives developed by the authors. The components of microelectromechanical systems are characterized by high complexity of the design since when they must take into account various physical effects underlying their functioning. Taking into account complexity functional components of these micromechanical systems for reducing engineering time various methods of automation in the design are used, based on the computational basis. It is offered to broke data micromechanical components down into elements on a functional basis. The focus is on design methodology of micromechanical sensors of angular velocities and linear accelerations on the librarymicrofragments basis developed under the topology editor L-Edit CAD system Tanner EDA. Development of structural topological primitives microfragments is performed taking into account the technology specific rules of manufacturing process surface micromachining MUMPs.*

*Microelectromechanical system; gyroscope; accelerometer; design model.*

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (проекты: № 213.01-11/2014-12, 14.575.21.0045), а также поддержана грантом РФФИ (№ 13-07-00274).

**Введение.** На сегодняшний день в мире большое внимание уделяется микромеханическим системам и устройствам на их основе. Разработка датчиков угловых скоростей (гироскопов) и датчиков линейных ускорений (акселерометров) является на сегодняшний день одним из приоритетных направлений развития микросистемной техники [1–3].

Проработка методов и методик проектирования подобных датчиков является актуальной проблемой на данный момент. Микромеханические гироскопы и акселерометры используются в качестве резервных инерциальных навигационных систем наряду с системами спутниковой навигации ГЛОНАСС и GPS, что позволяет сохранить точность и непрерывность навигации при потере приема сигнала [1–4].

При разработке микромеханических сенсоров угловых скоростей и линейных ускорений необходимо стремиться к сокращению площади подложки, занимаемой сенсорным компонентом, обеспечению линейности отклика сенсора на полных диапазонах угловых скоростей и линейных ускорений, снижению энергопотребления [1–4].

Учитывая функциональную сложность компонентов микроэлектромеханических систем (МЭМС), обеспечение сокращения времени проектирования возможно лишь посредством использования различных методов автоматизации в системах автоматизированного проектирования (САПР), опирающихся на вычислительную базу [3–6].

Наиболее целесообразной для реализации большинства задач является проектирование с использованием стандартных конструкторско-технологических решений [1, 2].

Компоненты МЭМС характеризуются высокой сложностью проектирования, поскольку при их моделировании необходимо учитывать разнообразные физические эффекты. В связи с этим компоненты разбиваются на элементы по функциональному признаку. Например, на актюаторы, состоящие из подвижных и неподвижных электродов, чувствительные элементы, представляющие собой системы упругих подвесов, состоящие из якорей, последовательно-параллельного соединения упругих балок, инерционных масс и т.д.

Для ускорения и облегчения процесса проектирования и разработки топологии компонентов МЭМС в редакторе топологии L-Edit существует возможность создания библиотек микрофрагментов – макросов. Макрос представляет собой файл с расширением «.c» или «.dll», написанный на языке C/C++ с учетом встроенных функций редактора L-Edit.

Основное внимание обращено на методологию проектирования микромеханических гироскопов-акселерометров (ММГА) на основе библиотеки микрофрагментов, разработанных под редактор топологии L-Edit САПР Tanner EDA.

Топологическое представление микрофрагментов осуществляется на основе структурно-топологических примитивов (СТП). Разработка СТП микрофрагментов выполнена с учетом технологических норм изготовления процесса поверхностной микрообработки MUMPs. В качестве входных параметров предложенного метода проектирования ММГА используются: толщина структурного слоя, толщина жертвенного слоя, определяющая расстояния между инерционными массами и неподвижными электродами емкостных преобразователей перемещений, минимальный топологический зазор, минимальная ширина элементов конструкций.

**Методика исследования.** Разработанная методика проектирования интегральных микромеханических сенсоров угловых скоростей и линейных ускорений содержит следующие этапы:

1<sup>0</sup>. Ввод исходных данных: технологические нормы изготовления: материалы, толщины структурного и жертвенного слоев, минимальный топологический размер; циклическая частота колебания инерционной массы чувствительного элемента сенсора угловых скоростей и линейных ускорений; длина и ширина инерционной массы.

2<sup>0</sup>. На основе технологических норм изготовления задается толщина структурного слоя микромеханического компонента и жертвенного слоя, определяющего зазоры планарных емкостных преобразователей перемещений, образованных инерционными массами и неподвижными электродами, расположенными под ними.

3<sup>0</sup>. На основе критериев согласованности собственных частот колебаний упругого подвеса чувствительных элементов ММГА в различных режимах рассчитываются длины и ширины упругих балок и торсионов [7, 8].

4<sup>0</sup>. Рассчитывается коэффициент жесткости упругого подвеса чувствительных элементов ММГА по осям движения и чувствительности.

5<sup>0</sup>. Рассчитываются массы инерционных масс.

6<sup>0</sup>. При неудовлетворении одного из параметров техническому заданию необходимо вернуться к пункту 2<sup>0</sup>.

7<sup>0</sup>. Дефрагментация выделенного конструкторско-технологического решения. Микрофрагмент разделяется на топологические примитивы.

8<sup>0</sup>. Расчет параметров геометрических примитивов, на основании ранее посчитанных параметров для каждого вида конструкторско-технологического решения.

9<sup>0</sup>. Автоматизированный синтез топологии микромеханических сенсоров угловых скоростей и линейных ускорений на основе библиотеки унифицированных микрофрагментов.

При автоматизированном синтезе топологии микромеханических сенсоров угловых скоростей и линейных ускорений на основе микрофрагментов используются топологические примитивы прямоугольного вида.

Информационное обеспечение СТП микрофрагментов позволяет в автоматическом режиме проводить экстракцию параметров проектируемых микросистем в программу схемотехнического моделирования T-Spice САПР Tanner Pro и/или геометрической модели устройства в программу численного моделирования ANSYS.

На рис. 1 представлены различные варианты топологии микромеханических компонентов МЭМС, разработанные на основе предлагаемой методики проектирования на основе библиотеки микрофрагментов.

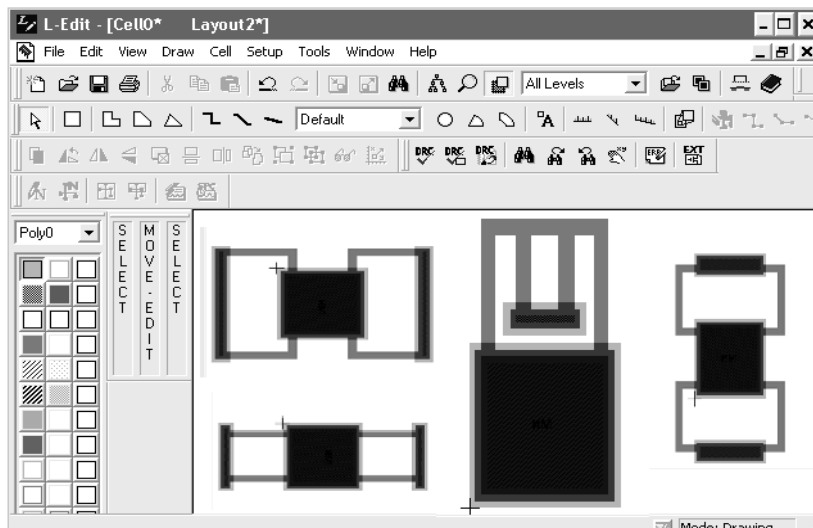


Рис. 1. Варианты топологии микромеханических компонентов

**Заключение.** Микромеханические датчики угловых скоростей и линейных ускорений имеют ряд одинаковых конструктивных элементов. Таким образом, для проектирования подобных устройств, вне зависимости от вида перемещений инерционных масс (линейное или вращательное), может быть предложен обобщенный метод проектирования микромеханических сенсоров угловых скоростей и линейных ускорений. Разработанная методика и библиотека микрофрагментов может быть использована для проектирования подобных датчиков.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Распопов В.Я.* Микромеханические приборы. – Тула: Тульский государственный университет, 2007. – 400 с.
2. *Тимошенко С.П., Кульчицкий А.П.* Применение МЭМС-сенсоров в системах навигации и ориентации подвижных объектов // *Нано- и микросистемная техника*. – 2012. – № 6. – С. 51-56.
3. *Лысенко И.Е.* Интегральные микромеханические сенсоры угловых скоростей и линейных ускорений. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2013. – 180 с.
4. *Лысенко И.Е.* Функционально интегрированные микро- и наномеханические сенсоры угловых скоростей и линейных ускорений. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2013. – 167 с.
5. *Lysenko I.E.* Modeling of the micromachined angular rate and linear acceleration sensors LL-type with redirect of drive and sense axis // *World Applied Sciences Journal*. – 2013. – № 27 (6). – P. 759-762.
6. *Лысенко И.Е.* Метод проектирования двухосевых микромеханических сенсоров угловых скоростей и линейных ускорений RR-типа // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2011. – № 4 (117). – С. 234-236.
7. *Лысенко И.Е., Ежова О.А.* Критерии равенства собственных частот колебаний чувствительных элементов микромеханических гироскопов-акселерометров // *Инженерный вестник Дона*. – 2014. – № 2. – <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2475> (доступ свободный).
8. *Lysenko I.E.* Modeling of two-axis micromechanical gyroscope-accelerometer // *Proceeding of the International Conference "Micro- and nanoelectronics – 2012" (ICMNE-2012)*. – Moscow-Zvenigorod, Russia, 2012. – P. 3-31.

## REFERENCES

1. *Raspopov V.Ya.* Mikromekhanicheskie pribory [Micromechanical devices]. Tula: Tul'skiy gosudarstvennyy universitet, 2007, 400 p.
2. *Timoshenkov S.P., Kul'chitskiy A.P.* Primenenie MEMS-sensurov v sistemakh navigatsii i orientatsii podvizhnykh ob"ektov [The use of MEMS sensors in navigation systems and orientation of moving objects], *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika* [Nano- and Microsystem technology], 2012, No. 6, pp. 51-56.
3. *Lysenko I.E.* Integral'nye mikromekhanicheskie sensory uglovykh skorostey i lineynykh uskoreniy [Integrated micromechanical sensor of angular velocities and linear accelerations]. Taganrog: Izd-vo YuFU, 2013, 180 p.
4. *Lysenko I.E.* Funktsional'no integrirovannye mikro- i nanomekhanicheskie sensory uglovykh skorostey i lineynykh uskoreniy [Functionally integrated micro- and nanomechanical sensors of angular velocities and linear accelerations]. Taganrog: Izd-vo YuFU, 2013, 167 p.
5. *Lysenko I.E.* Modeling of the micromachined angular rate and linear acceleration sensors LL-type with redirect of drive and sense axis, *World Applied Sciences Journal*, 2013, No. 27 (6), pp. 759-762.
6. *Lysenko I.E.* Metod proektirovaniya dvukhosevykh mikromekhanicheskikh sensorov uglovykh skorostey i lineynykh uskoreniy RR-tipa, *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2011, No. 4 (117), pp. 234-236.
7. *Lysenko I.E., Ezhova O.A.* Kriterii ravenstva sobstvennykh chastot kolebaniy chuvstvitel'nykh elementov mikromekhanicheskikh giroskopov-akselerometrov, *Inzhenernyy vestnik Dona*, 2014, No. 2. Available at: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2475> (dostup svobodnyy).

8. *Lysenko I.E.* Modeling of two-axis micromechanical gyroscope-accelerometer, *Proceeding of the International Conference "Micro- and nanoelectronics – 2012" (ICMNE-2012)*. Moscow-Zvenigorod, Russia, 2012, pp. 3-31.

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

**Лысенко Игорь Евгеньевич** – Южный федеральный университет; e-mail: ielysenko@sfedu.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371603; кафедра конструирования электронных средств; д.т.н.; зав. кафедрой.

**Ежова Ольга Александровна** – e-mail: ezhova.08.05@gmail.com; кафедра конструирования электронных средств; аспирант.

**Куликова Ирина Владимировна** – e-mail: cuttlefish99@mail.ru; кафедра конструирования электронных средств; к.т.н.; доцент.

**Приступчик Никита Константинович** – e-mail: nkpristupchik@sfedu.ru; кафедра конструирования электронных средств; к.т.н.; доцент.

**Lysenko Igor Evgenievich** – Southern Federal University; e-mail: ielysenko@sfedu.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +7634371603; the department of electronic apparatuses design; dr. of eng. sc.; head of department.

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

**Kulikova Irina Vladimirovna** – e-mail: cuttlefish99@mail.ru; the department of electronic apparatuses design; cand. of eng. sc.; associate professor.

**Pristupchik Nikita Konstantinovich** – e-mail: nkpristupchik@sfedu.ru; the department of electronic apparatuses design; cand. of eng. sc.; associate professor.