



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования "Южный федеральный университет"

У П Р А В Л Е Н И Е

- ◆ Применение робототехнических комплексов наземного, морского базирования и комплексов с БЛА
- ◆ Перспективы группового применения РТК военного назначения, в т.ч. при взаимодействии с традиционными средствами ВВСТ
- ◆ Перспективы применения РТК в интересах решения народно-хозяйственных задач
- ◆ Системы управления и моделирования РТК
- ◆ Системы энергетики и приводной техники РТК
- ◆ Техническое зрение и бортовые вычислители РТК
- ◆ Связь, навигация и наведение РТК

Сборник материалов
XVII Всероссийской научно-практической
конференции
"Перспективные системы
и задачи управления"

2022

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«ЮЖНЫЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Научно-исследовательский институт робототехники
и процессов управления

Перспективные системы и задачи управления

Материалы
XVII Всероссийской
научно-практической конференции

и XIII молодёжной школы-семинара
«УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ
В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ»

Таганрог
2022

Заключение. Разработанное четырехтактное струйно-мембранное устройство обеспечивает возможность управления исполнительными механизмами робототехнических комплексов в условиях воздействия высоких уровней электромагнитного и корпускулярного излучений. Устройство формирует последовательность импульсов с отдельной регулировкой длительности и одинаковой амплитудой, что позволяет осуществлять управление унифицированными пневматическими исполнительными механизмами по заданному временному циклу.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Балабанов А.В., Касимов А.М. Экспериментальное исследование статических характеристик микроструйного триггера / Устойчивость и колебания нелинейных систем управления: Материалы XV Международной конференции (3–5 июня 2020 г., Москва) / ред. В.Н. Тхай. – М.: ИПУ РАН, 2020. – С. 59-62.
2. Балабанов А.В., Касимов А.М. Разработка устройств струйной техники на основе многомерных сетей // Устойчивость и колебания нелинейных систем управления: Материалы XV Международной конференции (3–5 июня 2020 г., Москва) / ред. В. Н. Тхай. – М.: ИПУ РАН, 2020. – С. 62-65.
3. Касимов А.М., Балабанов А.В. Анализ и синтез устройств струйной техники на основе многомерных сетей / Тр. 13-го Всероссийского совещания по проблемам управления (ВСПУ XIII, Москва, 2019). – М.: ИПУ РАН, 2019. – С. 2730-2734.
4. Касимов А.М., Балабанов А.В. Метод разработки микроструйных функциональных узлов робастных резервных систем управления критическими объектами // Матер. 26-й Международной конференции «Проблемы управления безопасностью сложных систем» (ПУБСС'2018, Москва). – М.: ИПУ РАН, 2018. – С. 284-288.
5. Балабанов А.В., Касимов А.М. Разработка и исследование рабочих характеристик микроструйного генератора // Датчики и системы. – 2019. – № 7-8. – С. 34-40.

УДК 621.3.049.779

**Е.С. Кочурина, А.С. Тимошенко, С.А. Анчутин, А.С. Мусаткин, Л.Р. Боев,
С.П. Тимошенко**

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МЭМС-ДАТЧИКОВ РАЗЛИЧНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

В статье приведены результаты разработки МЭМС-датчиков различного назначения. Среди разработок компании МЭМС-акселерометры предназначенные для измерения кажущегося ускорения (МА-10/МА-20), МЭМС-датчики угловых скоростей, предназначенные для измерения угловых скоростей (ТГ-100); микромеханический датчики удара (КМГ-1/КМГ-2), предназначенные для регистрации воздействующего ударного воздействия. В статье описан состав каждого из датчиков и указано описание принципа работы, даны фото изготовленных экспериментальных образцов. Приведены основные характеристики полученных МЭМС-датчиков. Для МЭМС-акселерометров МА-10 приведены результаты статических испытаний, при которых в рабочем диапазоне задают постоянное ускорение и выдерживают указанное время и записывают выходной сигнал датчика. На основании полученных данных оценивают основные параметры: смещение нуля, масштабный коэффициент, нелинейность статической характеристики. Для МЭМС-акселерометров МА-20 приведена запись выходного сигнала, оцифрованная при помощи платы сбора данных. На основании полученных данных рассчитан шум в полосе датчика (не менее 250 Гц). В статье приведены результаты исследования МЭМС-ДУС, построена диаграмма Аллана, на основе которой рассчитана нестабильность смещения нуля в запуске и случайное угловое блуждание. Приведены результаты разработки датчиков удара, которые изготовлены при помощи технологии объемной микрообработки кремния на основе КНИ-структуры. Разработанный технологический процесс позволяет изготовить дат-

чики удара с уровнем срабатывания 200 g с разбросом 10%. В тексте приведены результаты измерения уровня срабатывания. Для проведения исследований изготовленных экспериментальных образцов МЭМС-датчиков был собран автоматизированный стенд и разработано программное обеспечение. Стенд позволяет определить основные параметры каждого из разработанных МЭМС-датчиков. Разработанное программное обеспечение позволяет визуализировать и обработать выходной сигнал. В программном обеспечении реализовано управление поворотным столом и камерой тепла-холода для обеспечения автоматического процесса проведения испытаний.

Чувствительный элемент; МЭМС-датчик; МЭМС-акселерометр; МЭМС-датчик угловой скорости; датчик удара; автоматизированный стенд; программное обеспечение; результаты экспериментальных исследований.

**E.S. Kochurina, A.S. Timoshenkov, S.A. Anchutin, A.S. Musatkin, L.R. Boev,
S.P. Timoshenkov**

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF MEMS SENSORS FOR VARIOUS PURPOSES

The article presents the results of the development of MEMS sensors for various purposes. Among the company's developments are MEMS accelerometers designed to measure apparent acceleration (MA-10/MA-20), MEMS angular velocity sensors designed to measure angular velocities (TG-100); micromechanical impact sensors (KMG-1/KMG-2) designed to register hit impact. The article describes the composition of each of the sensors and a description of the principle of operation, photos of the manufactured experimental samples are given. The main characteristics of the obtained MEMS sensors are presented. For MA-10 MEMS accelerometers, the results of static tests are given, in which a constant acceleration is set in the operating range and the specified time is maintained, and the sensor output signal is recorded. Based on the data obtained, the main parameters are evaluated: zero offset, scale factor, non-linearity of the static characteristic. For MA-20 MEMS accelerometers, the record of the output signal is given, digitized using the data acquisition board. Based on the obtained data, the noise in the sensor band (not less than 250 Hz) was calculated. The article presents the results of the study of MEMS-gyroscope, the Allan diagram is constructed, on the basis of which the instability of the zero shift at the start and the random angular walk are calculated. The results of the development of impact sensors, which are made using the technology of volumetric micromachining of silicon-based on the SOI structure, are presented. The developed technological process makes it possible to produce shock sensors with a response level of 200 g with a spread of 10%. The text shows the results of measuring the response level. To conduct research on the manufactured experimental samples of MEMS sensors, an automated stand was assembled and software was developed. The stand allows determining the main parameters of each of the developed MEMS sensors. The developed software allows you to visualize and process the output signal. The software implements the control of a turntable and a heat-cold chamber to ensure an automatic testing process.

Sensitive element; MEMS sensor; MEMS accelerometer; MEMS gyroscope; shock sensor; automated stand; software; results of experimental studies.

ООО «Лаборатория Микроприборов» (ООО «ЛМП») занимается разработкой, производством и реализацией научно-технической продукции в области инерциальной микромеханики. Основная сфера деятельности предприятия – разработка и изготовление инерциальных датчиков и систем. Однако развиваются и сопутствующие компетенции в области программного обеспечения и методологии калибровки и проведения испытаний. Продукция компании ориентирована на рынки гражданских и специальных применений. Особенностью является то, что она занимает нишу на стыке недорогих систем широкого потребления и высокоточных дорогих систем на основе волоконно-оптических, лазерных и других гироскопов, формируя конкурентно привлекательный продукт с хорошим соотношением «цена-качество» [1–5].

ООО «ЛМП» разрабатывает и изготавливает МЭМС-датчики угловой скорости, МЭМС-акселерометры и датчики удара с чувствительными элементами собственного производства. Это позволяет гибко модернизировать устройство для максимально полного удовлетворения потребностей заказчиков. Кроме того, такой подход позволяет в значительной мере снизить негативный эффект зависимости от импортных инерциальных датчиков.

Для определения параметров, разработанных МЭМС-датчиков и проведения исследований собран автоматизированный стенд и разработано программное обеспечение (ПО). Стенд позволяет определить основные параметры МЭМС-датчиков: масштабный коэффициент, смещение нуля, нелинейность и диапазон измеряемых ускорений. Кроме того, эти параметры могут быть определены в диапазоне рабочих температур. Разработанное программное обеспечение позволяет визуализировать и обработать выходной сигнал. В ПО реализовано управление поворотным столом и камерой тепла-холода для обеспечения автоматического процесса проведения испытаний.

МЭМС-акселерометры. МЭМС-акселерометр предназначен для измерения проекции кажущегося линейного ускорения на измерительную ось. Чувствительный элемент (ЧЭ), который входит в состав разработанных МЭМС-акселерометров, разработан ООО «Лаборатории микроприборов» совместно с МИЭТ. ЧЭ представляет собой конструкцию маятникового типа: инерционная масса, подвешенная к основанию при помощи упругих элементов (торсионов), воспринимает действующее ускорение и является одной из обкладок емкостной системы съема сигнала. В качестве неподвижной обкладки используется стеклянная пластина с напыленными электродами [6–7].



*Рис. 1. Разработанный чувствительный элемент МЭМС-акселерометра:
1 – инерционная масса, 2 – стеклянная пластина с напыленными электродами*

В состав МЭМС-акселерометра кроме ЧЭ входит плата преобразования сформированных емкостей в выходной сигнал датчика. Плата преобразования датчиков типа MA-10 позволяет получить выходной сигнал датчика в цифровом виде (интерфейс UART). Наличие 32-х разрядного микроконтроллера позволяет реализовать температурную компенсацию. МЭМС-акселерометр MA-20 формирует выходной сигнал в виде напряжения, пропорционального проекции кажущегося ускорения на измерительную ось (рис. 2).

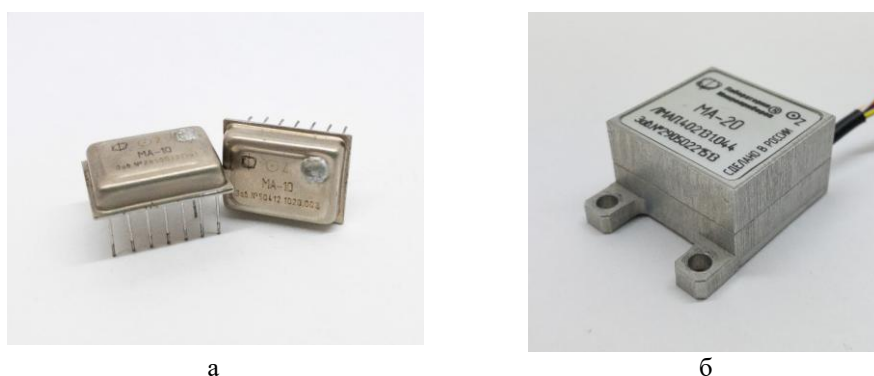


Рис. 2. Экспериментальные образцы МЭМС-акселерометров:
а – тип MA-10; б – тип MA-20.

На рис. 3 приведены результаты проведенных исследований экспериментального образца МЭМС-акселерометра MA-10 (зав.№05002063003).

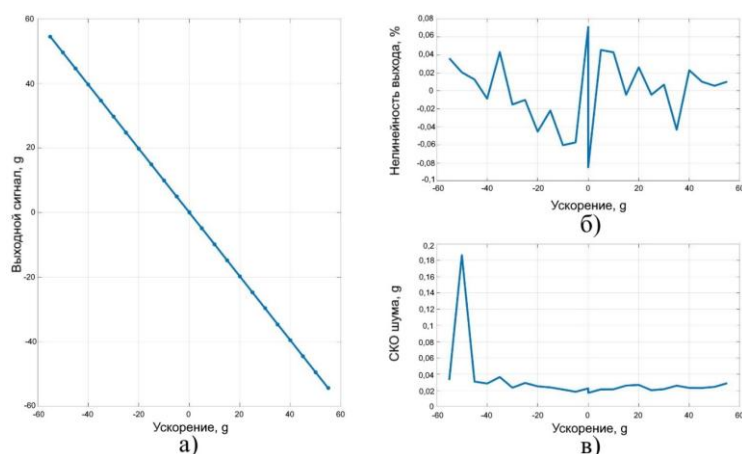


Рис. 3. Результаты проведенных исследований типового МЭМС-акселерометра MA-10: а – статическая характеристика, б – величина нелинейности при заданном ускорении; в – СКО шума в диапазоне измеряемых ускорений

Для данного экспериментального образца МЭМС-акселерометра MA-10 получены следующие характеристики:

- ◆ диапазон измеряемых ускорений ± 50 g;
- ◆ смещение нуля 80,79 mg;
- ◆ масштабный коэффициент 1/g;
- ◆ нелинейность статической характеристики 0,085%.

Потенциально датчики данной серии могут использоваться для охранных комплексов, построения инклинометров, систем ориентации.

На рис. 4 приведена запись выходного сигнала экспериментального образца МЭМС-акселерометра MA-20.

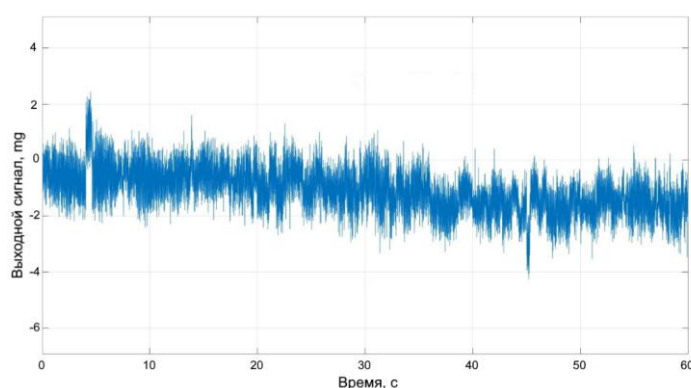


Рис. 4. Выходной сигнал типового МЭМС-акселерометра МА-20

Схема обработки сигнала датчика формирует опорное напряжение, относительно которого проводится съем выходного сигнала датчика. Запись выходного сигнала МА-20 была сделана в течение 1 мин, с частотой 1 кГц при помощи платы сбора данных National Instruments.

Далее приведены полученные характеристики МЭМС-акселерометра МА-20 (зав.№29050221511):

- ◆ диапазон измеряемых ускорений ± 5 g;
- ◆ полоса пропускания не менее 250 Гц (по уровню -3 дБ);
- ◆ масштабный коэффициент 448,91 мВ/g;
- ◆ нелинейность статической характеристики 0,02 %;
- ◆ шум в полосе 780 мкg (1σ).

Датчики данной серии потенциально могут применяться в системах навигации, ориентации, стабилизации, управления движением и наведения различных объектов [8].

МЭМС-Датчик угловой скорости. Чувствительный элемент МЭМС-датчика угловых скоростей (МЭМС-ДУС) представляет собой кольцевой резонатор из монокристаллического кремния с упругим подвесом, размещенный в постоянном магнитном поле (рис. 5).

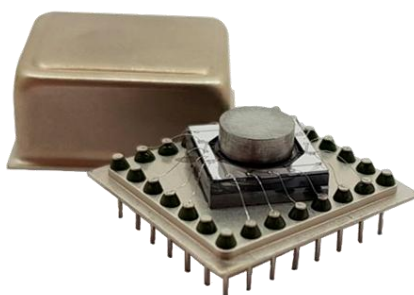


Рис. 5. Чувствительный элемент МЭМС-ДУС

Методом анодного сращивания кристалл соединен со стеклянной подложкой таким образом, чтобы кольцо кремниевого резонатора было расположено в однородном постоянном магнитном поле. Магнитное поле образует магнитная система, состоящая из кобальто-самариевого магнита, верхнего и нижнего магнитопроводов, изготовленных из магнитомягкого материала. Магнитная цепь разработана

таким образом, чтобы образовать максимальное магнитное поле в зоне расположения резонатора (следовательно, и проводников, расположенных на поверхности резонатора), и таким образом повысить его чувствительность. Магнитная система с кристаллом со стеклянной подложкой зафиксированы в корпусе, который состоит из основания и крышки. Для повышения добротности кольцевого резонатора внутренний объем корпуса вакуумируется [9–13].

В состав МЭМС-ДУС кроме ЧЭ входит схема управлениями колебаниями резонатора и обработки его выходного сигнала [14–17].

На рис. 6 показана диаграмма Аллана для МЭМС-ДУС ТГ-100.

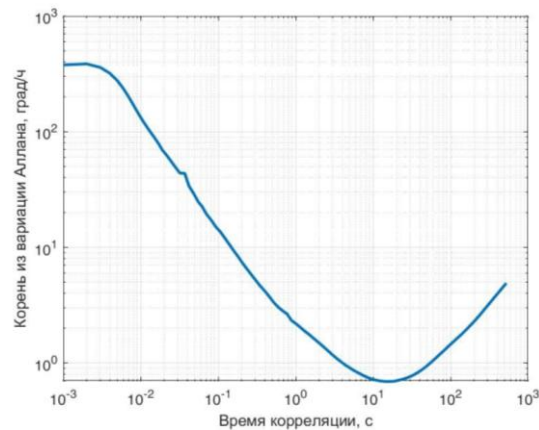


Рис. 6. Диаграмма Аллана для МЭМС-ДУС ТГ-100

Ниже приведены полученные характеристики МЭМС-ДУС ТГ-100 (зав.№ 24014920006):

- ◆ нестабильность смещения нуля в запуске составила (σ_{bias}) 1,057 °/ч,
- ◆ случайное угловое блуждание по диаграмме Алана (σ_{ARW}) 0,037 °/√ч,
- ◆ диапазон измеряемых угловых скоростей ±100 °/с;
- ◆ масштабный коэффициент 19,51 мВ/(°/с);
- ◆ нелинейность статической характеристики 0,065 %;

МЭМС-ДУС могут использоваться для построения систем стабилизации, ориентации и навигации, систем управления в робототехнике и в беспилотных летательных аппаратах.

Датчик удара. Разработанные микромеханические датчики удара применяются для фиксации ударного воздействия, превышающего определенное значение. Датчик удара представляет собой нормально разомкнутый инерциальный ключ, обеспечивающий замыкание контактов при воздействии удара вдоль оси чувствительности. Изготовлен датчик удара на основе технологии объемной микрообработки кремния на основе КНИ-структуры. Состоит датчик из основания, крышки и центральной части, включающей инерционную массу, которая подвешена при помощи упругих элементов (торсионов). При достижении номинального значения ударного воздействия инерционная масса приводит к замыканию металлизированных контактов, расположенных на крышке и инерционной массе. Таким образом замыкается электрическая цепь и датчик срабатывает.

В результате проведенных расчетов, моделирования [18–20], разработанного технологического маршрута изготовления получен микромеханический датчик с габаритными размерами: 3,2×3,2×1,4 мм. (рис. 7).



Рис. 7. Фотография микромеханических датчиков удара

Исследования изготовленных микромеханических датчиков удара проводили на поворотном столе. При помощи разработанной специализированной оснастки образцы фиксируются на поворотном столе, величина воздействия определялась скоростью вращения поворотный стола. На рис. 8 приведены результаты проведенных исследований. По оси абсцисс указан порядковый номер датчика, по оси ординат – значение уровня срабатывания.

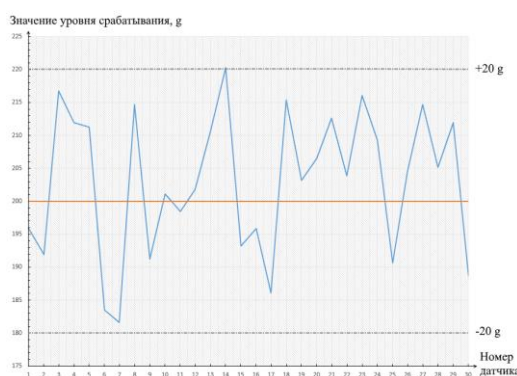


Рис. 8. Результаты измерения уровня срабатывания датчиков удара

Проведенный анализ результатов испытаний показал, что, из 30 изготовленных датчиков удара:

- ◆ 9 штук (30 % от общего количества испытываемых датчиков) имеют уровень срабатывания в диапазоне от 194 до 206 g (что составляет 1–3 % от расчетного уровня 200 g);

- ◆ 12 штук (40 % от общего количества испытываемых датчиков) имеют уровень срабатывания в диапазоне от 186 до 214 g (что составляет 3–7 % от расчетного уровня 200 g);

- ◆ 9 штук (30 % от общего количества испытываемых датчиков) имеют уровень срабатывания в диапазоне от 180 до 220 g (что составляет 7–10 % от расчетного уровня 200 g).

По результатам проведенных испытаний видно, что разработанный технологический маршрут обеспечивает изготовление датчиков с разбросом 10 % (рис. 8).

Вывод. Специалистами компании освоены и осуществляются полные циклы производства кремниевых чувствительных элементов различных конструкций. Чувствительные элементы могут быть изготовлены на базе монокристаллических кремниевых пластин или КНИ-структур или комбинации нескольких разнородных пластин. В статье приведено описание разработанных и изготовленных изделий МЭМС-акселерометров МА-10/МА-20, МЭМС-датчиков угловых скоростей ТГ-100, микромеханических датчиков удара КМГ-1/КМГ-2. Собранный автоматизированный стенд и разработанное программное обеспечение позволяют проводить исследования и определять основные параметры изготовленных МЭМС-датчиков в короткие временные сроки и с высокой точностью, что позволит выпускать изделия серийно.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Fountain R.* Characteristics and Overview of a Silicon Vibrating Structure Gyroscope. RTO-EN-SET-064. – P. 8-1÷8-14.
2. *Сысова С.* Тенденции рынка High-end МЭМС-датчиков инерции. Новые уровни характеристик и исполнения // Компоненты и технологии. – 2014. – № 6. – С. 40-46.
3. *Лебсак Г., Евстафьев С., Вертянов Д.* Фундаментальное значение датчиков для новых интеллектуальных систем // Компоненты и технологии. – 2020. – № 9. – С. 10-12.
4. *Матвеев В.В., Распопов В.Я.* Приборы и системы ориентации, стабилизации, и навигации на МЭМС-датчиках. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2017. – 225 с.
5. *Асмолов Г.И., Рожков В.М., Соколов В.Г.* Виды информации и датчики в системах транспортной телематики: учеб. пособие. – М.: МАДИ, 2008. – 74 с.
6. *Тимошенков А.С., Анчутин С.А., Кочурина Е.С., Мусаткин А.С., Головинский М.С., Калугин В.В., Пузиков В.В., Тимошенков С.П.* Разработка и исследование микромеханического акселерометра // Международный форум «Микроэлектроника-2019» 5-я Международная научная конференция «Электронная компонентная база и микроэлектронные модули». Сборник тезисов. Республка Крым, г. Алушта, 30 сентября – 05 октября 2019 г. Техносфера, Москва. – С. 435-437.
7. *Шерстобитова А.С.* Датчики физических величин: учеб. пособие. – СПб.: НИУ ИТМО, 2017. – 57 с.
8. *Анчутин С.А.* О проектировании функциональных узлов микромеханических датчиков // Авиакосмическое приборостроение. – 2007. – № 6. – С. 5-9.
9. *Лысенко И.Е.* Проектирование сенсорных и актюаторных элементов микросистемной техники. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2005. – 103 с.
10. *Алексеев О.В., Головкин А.А., Пивоваров И.Ю.* Автоматизация проектирования радиоэлектронных средств. Учебное пособие. – М.: Высшая школа, 2000. – 479 с.
11. *Ковалев А.А., Яковлев О.Ю., Зуев В.И. [и др.]* Конструктивно-технологические особенности изготовления микромеханических систем инерциальных МЭМС-датчиков // Наноиндустрия. – 2019. – № 5 (89). – С. 484-490.
12. *Антипенский Р.В., Фадин А.Г.* Схемотехническое проектирование и моделирование радиоэлектронных устройств. – М.: Техносфера, 2007. – 128 с.
13. *Журбенко С.В.* Технологии изготовления микро-электро-механических систем // Наука в современном обществе. – 2018. – С. 40-43.
14. *Тимошенков С.П., Плеханов В.Е., Анчутин С.А., Максимов В.Н., Головань А.С., Кочурина Е.С.* Анализ влияния анизотропии свойств кремния на параметры резонатора // Датчики и системы. – 2012. – № 5. – С. 29-33.
15. Патент России №2453812, 2011. Интегральный чувствительный элемент вибрационного гироскопа / Тимошенков А.С., Чаплыгин Ю.А., Тимошенков С.П. и др.
16. *Плеханов В.Е., Анчутин С.А.* Применение метода конечных элементов для анализа параметров кольцевого резонатора микромеханического твердотельного волнового гироскопа // Авиакосмическое приборостроение. – 2007. – № 6. – С. 25-29.
17. *Тимошенков С.П., Плеханов В.Е., Анчутин С.А., Зарянкин Н.М., Рубчиц В.Г., Дернов И.С., Шилов В.Ф., Кочурина Е.С.* Балансировка резонатора кольцевого микромеханического гироскопа // Нано- и микросистемная техника. – 2011. – № 11. – С. 37-44.
18. *Плеханов В.Е., Анчутин С.А.* К оценке предельных погрешностей микромеханических гироскопов и акселерометров // Проектирование и технологии в авиакосмическом приборостроении. – 2006. – № 1. – С. 7-12.
19. *Сыромятин В.И.* Информационные устройства и системы в робототехнике и мехатронике: учеб. пособие. – Томск, 2016. – 524 с.
20. *Амеличев В.В., Григорьев Д.М., Резнев А.А.* Конечно-элементное моделирование мембранного модуля // Известия Вузов. Электроника. – 2018. – № 3. – С. 277-284.