

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Б.Н. Рыгалин.

Коноплев Борис Георгиевич

Технологический институт федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге.

E-mail: kbg@tti.sfedu.ru.

347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44.

Тел.: 88634371767.

Факультет электроники и приборостроения; декан; д.т.н.; профессор.

Винарьева Валерия Валерьевна

Магистрант.

Рындин Евгений Адальбертович

Южный научный центр Российской академии наук, г. Ростов-на-Дону.

E-mail: ryn@fep.tti.sfedu.ru.

344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41.

Тел.: 88634311584.

Ведущий научный сотрудник; д.т.н.; доцент.

Konoplev Boris Georgievich

Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”.

E-mail: kbg@fep.tsure.ru.

44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia.

Phone: +78634371767.

College of Electronics and Electronic Equipment Engineering; Dean; Dr. of Eng. Sc.; Professor.

Ryndin Eugeny Adalbertovich

Southern Scientific Center of Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don.

E-mail: ryn@fep.tti.sfedu.ru.

41, Chekhov Street, Rostov-on-Don, 344006, Russia.

Phone: +78634311584.

Senior Researcher; Dr. of Eng. Sc.; Associate Professor.

Vinaryeva Valeriya Valerevna

Undergraduate.

УДК 621.3.049.77

Б.Г. Коноплев, Е.А. Рындин, И.Е. Лысенко

**УСТРОЙСТВО ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ С ЕМКОСТНЫХ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ СЕНСОРОВ УГЛОВЫХ
СКОРОСТЕЙ***

Разработаны структурная и электрическая принципиальная схемы интегрального устройства обработки сигналов емкостных преобразователей микромеханического гироскопа на основе анализа частоты огибающей сигнала биений, формируемого генераторами гармонических колебаний, в частотоподающие цепи которых включены емкостные преобразователи микромеханического гироскопа, работающие в противофазе. Получены резуль-

* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг. (государственные контракты №П1224 от 27.08.2009г. и № 16.740.11.0425 от 03.12.2010, проект 2.1.2/10229).

таты схемотехнического моделирования. Показано, что предложенная схема в микроэлектронном исполнении обеспечивает измерение разности емкостей преобразователей менее 0,3 фФ и характеризуется линейной зависимостью частоты выходного сигнала от разности входных емкостей.

Устройство; обработка сигналов; микроэлектромеханические системы; сенсор; гироскоп.

B.G. Konoplev, E.A. Ryndin, I.E. Lysenko

THE PROCESSING DEVICE OF CAPACITOR CONVERTERS SIGNALS OF A MICROMECHANICAL GYROSCOPES

A processing integrated device structural and electric basic schemes of capacitor signals converters of a micromechanical gyroscope on the basis of the analysis of frequency bending around a differential signal, formed by generators of harmonious fluctuations are developed, which are included the capacitor converters of a micromechanical gyroscope working in an anti-phase. Results of modeling are received. It is shown that the offered scheme in microelectronic execution provides measurement of a difference of capacities of converters less than 0,3 fF and is characterized by linear dependence of frequency of an output signal on a difference of entrance capacities.

Device; processing signal; microelectromechanical systems; sensor; gyroscope.

Съем и обработка информации с емкостных преобразователей микромеханических сенсоров угловых скоростей требует разработки соответствующего интегрального устройства.

Основной особенностью емкостных преобразователей, используемых в разработанных коллективом НОЦ «Нанотехнологии» ЮФУ микромеханических сенсорах угловых скоростей [1, 2], является крайне незначительное изменение емкостей при наличии составляющих угловой скорости по соответствующим осям координат. Предварительные оценки, полученные с использованием пакета ANSYS, показывают, что емкости преобразователей в рабочем диапазоне измеряемых угловых скоростей изменяются в пределах (10 ± 1) фФ. При этом емкости каждой пары преобразователей изменяются в противофазе, что может быть использовано для повышения чувствительности разрабатываемой схемы.

Учитывая, что пределы изменения емкостей преобразователей в несколько раз меньше по величине паразитных емкостей субмикронных интегральных структур, обеспечение достаточно высокой чувствительности при использовании традиционных схем съема и обработки данных, описание которых приведено в [3–5], связано с необходимостью решения целого ряда проблем.

Одним из возможных путей решения данных проблем является использование частоты биений, полученных в результате смещения колебаний пар генераторов, в частотоподающие цепи которых включены соответствующие емкостные элементы преобразователей с противофазным изменением емкостей при воздействии угловой скорости.

Несмотря на то, что при указанных пределах изменений частотоподающих емкостей и с учетом паразитных емкостей активных и пассивных элементов и соединений схемы относительные изменения выходных частот генераторов будут крайне незначительны, даже небольшой относительный фазовый сдвиг выходных колебаний генераторов обеспечит существенное изменение частоты биений, что позволит значительно повысить чувствительность схемы съема и обработки по сравнению с аналогичными [3].

Структурная схема интегрального устройства съема и обработки информации с одной пары емкостных преобразователей микромеханического гироскопа, использующая частоту биений сигналов генераторов, приведена на рис. 1.

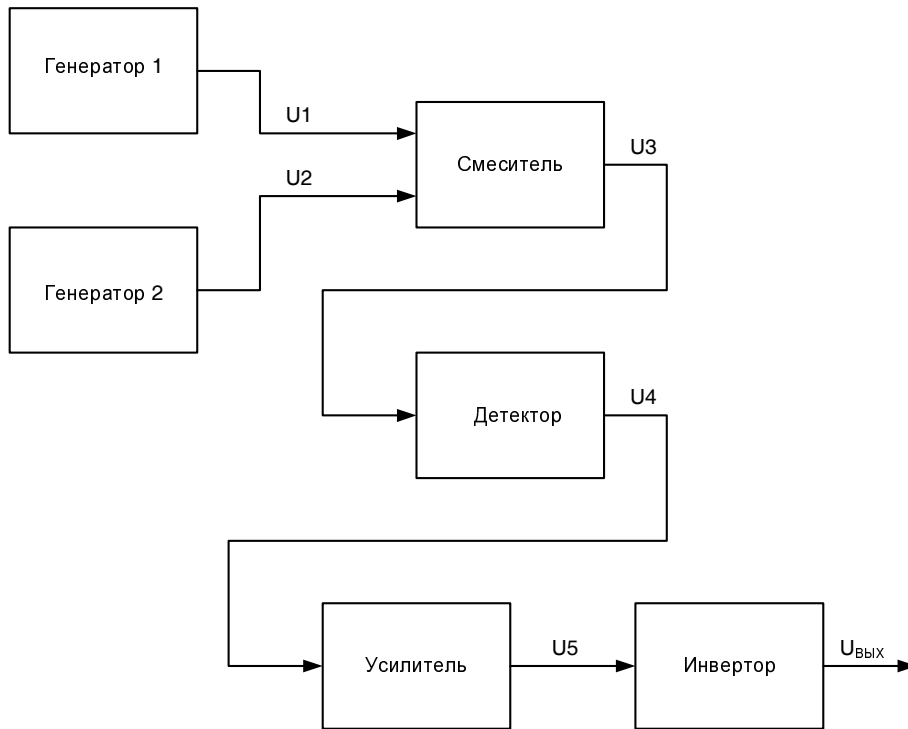


Рис. 1. Структурная схема интегрального устройства съема и обработки информации с одной пары емкостных преобразователей микромеханического сенсора угловых скоростей

В состав схемы входят: два генератора, в частотозадающие цепи которых включены соответствующие емкостные элементы преобразователей с противофазным изменением емкостей при воздействии угловой скорости; смеситель, обеспечивающий выделение биений U_3 сигналов U_1 и U_2 с близкими частотами; детектор, формирующий огибающую U_4 сигнала биений U_3 ; усилитель (U_5) огибающей сигнала биений U_4 ; инвертор, преобразующий усиленную огибающую сигнала биений U_5 в серию импульсов $U_{\text{ВЫХ}}$ для последующей цифровой обработки.

Таким образом, интегральное устройство, структурная схема которого приведена на рис. 1, обеспечивает преобразование «разность емкостей – разность фаз – частота».

Последующее устройство цифровой обработки будет содержать: эталонный кварцевый генератор, задающий интервал времени, в течение которого будет производиться подсчет выходных импульсов $U_{\text{ВЫХ}}$; счетчик выходных импульсов; счетчик импульсов кварцевого генератора, в течение которых будет определяться максимальная частота огибающей сигнала биений (по частоте выходных импульсов $U_{\text{ВЫХ}}$); блок регистровой памяти для записи и хранения максимальных частот выходных импульсов, определяемых измеряемыми угловыми скоростями; дешифратор максимальной частоты выходных импульсов в количественные характеристики угловой скорости; блок индикаторов для отображения измеренных угловых скоростей.

Схема электрическая принципиальная интегрального устройства съема и обработки информации с одной пары емкостных преобразователей микромеханического сенсора приведена на рис. 2.

Генератор 1 выполнен на элементах VT1, R1, R2, C1 – C4, L1 по схеме емкостной трехточки. Данная схема содержит малое число элементов за счет чего обеспечивает минимизацию паразитных емкостей в частотодающей цепи и, как следствие, увеличение чувствительности частоты генератора к изменению емкости частотодающего конденсатора C4, представляющего собой один из емкостных преобразователей микромеханического гироскопа.

Усилитель, выполненный на элементах VT3, C9, R5 – R7, обеспечивает увеличение амплитуды выходного сигнала генератора и повышение его нагрузочной способности. Разделительный конденсатор C9 устраняет постоянную составляющую выходного напряжения генератора (сток транзистора VT1), а делитель напряжения на резисторах R6, R7 задает рабочую точку усилителя для обеспечения его работы в линейном режиме.

Аналогичным образом выполнены схемы генератора 2 на элементах VT2, R3, R4, C5 – C8, L2 и усилителя на элементах VT4, C10, R8 – R10.

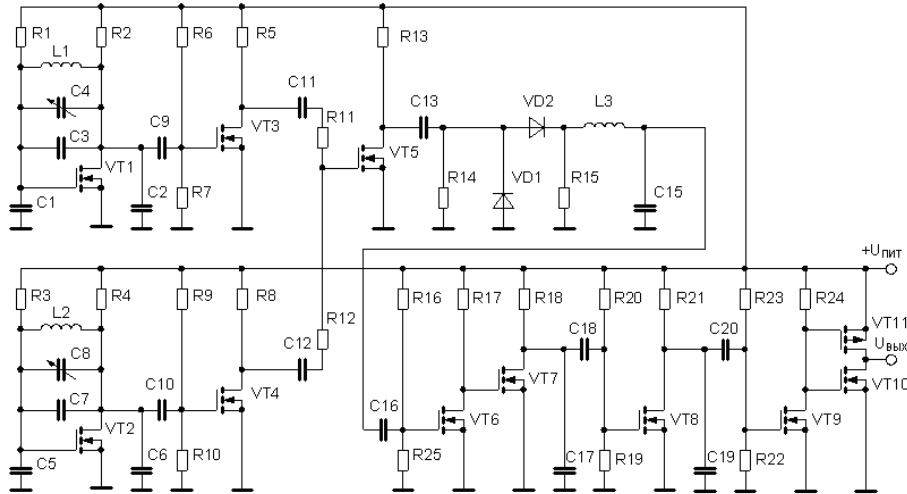


Рис. 2. Схема электрическая принципиальная интегрального устройства съема и обработки информации с одной пары емкостных преобразователей микромеханического гироскопа

Сигналы генераторов после усиления подаются на смеситель, выполненный на элементах C11, C12, R11 – R13, VT5. Ввиду отсутствия делителя напряжения на затворе транзистора VT5, рабочая точка каскада соответствует нулевому напряжению на затворе. Учитывая, что пороговое напряжение всех n-канальных транзисторов в данной схеме задается исходя из условия $U_{пор} = 0,1U_{пит}$, где $U_{пит}$ – напряжение питания, каскад на транзисторе VT5 работает в нелинейном режиме, осуществляя тем самым частичное детектирование сигнала биений.

Детектор выполнен на элементах C13, R14, VD1, VD2, R15, L3, C15. Конденсатор C13 устраняет постоянную составляющую выходного напряжения смесителя, диоды VD1, VD2 осуществляют срез отрицательных полупериодов детектируемого сигнала, контур L3, C15 сглаживает пульсации и выделяет огибающую сигнала биений.

Четырехкаскадный усиливающий сигнал биений выполнен на элементах VT6 – VT9, C16 – C20, R16 – R25.

Разделительные конденсаторы C16, C18, C20 устраняют постоянные составляющие сигналов на входах соответствующих каскадов усилителя, делители напряжения R16, R25, R19, R20, R22, R23 задают рабочие точки усилительных каскадов, конденсаторы C17 и C19 дополнительно сглаживают амплитуду пульсаций усиленного сигнала.

Выходной сигнал усилителя подается на вход инвертора, выполненного на комплементарной паре транзисторов VT10, VT11. На выходе инвертора формируются прямоугольные импульсы, амплитуда которых близка к напряжению питания, а частота следования соответствует частоте усиленной огибающей сигнала биений.

Схемотехническая модель устройства съема и обработки информации с одной пары емкостных преобразователей микромеханического гироскопа разработана для моделирования в подсистеме TSpice системы автоматизированного проектирования топологии интегральных схем и микросистем Tanner Pro.

На рис. 3–5 приведены результаты моделирования устройства при напряжении питания $U_{\text{пит}} = 5 \text{ В}$.

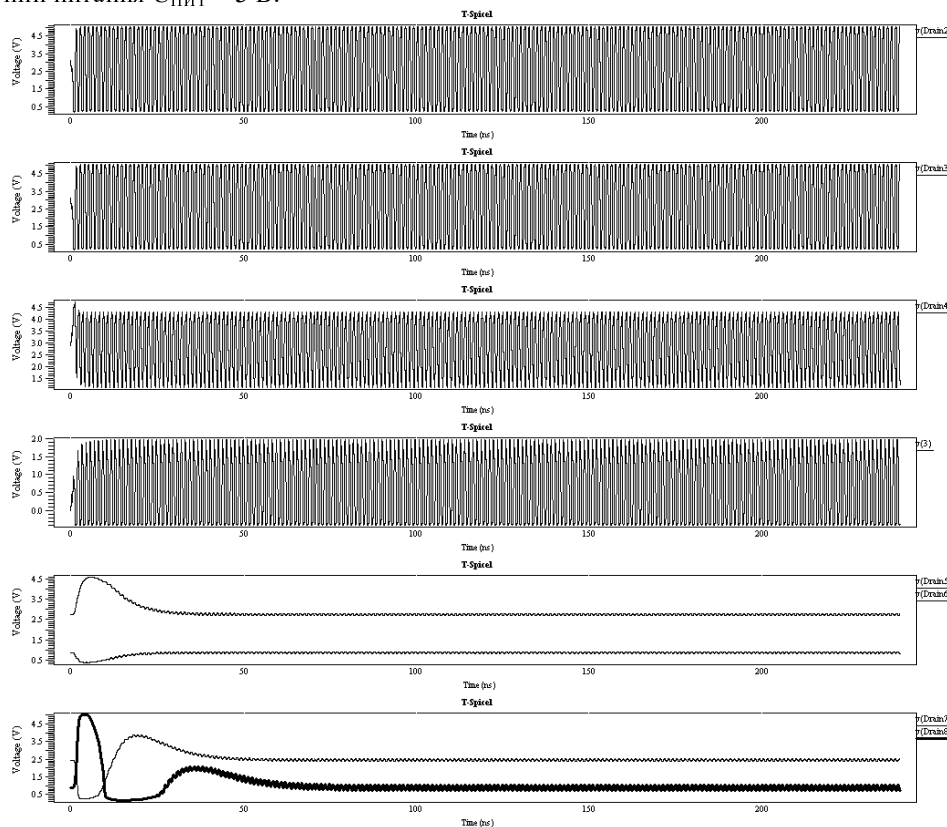


Рис. 3. Результаты моделирования устройства съема и обработки информации с одной пары емкостных преобразователей микромеханического гироскопа при $U_{\text{пит}} = 5 \text{ В}$

Из рис. 3 видно, что при равенстве емкостей преобразователей и, соответственно, при отсутствии угловой скорости частоты сигналов генераторов ($v(\text{Drain}2)$, $v(\text{Drain}3)$ на рисунках) равны, амплитуды сигналов на выходе смесителя ($v(\text{Drain}4)$) и на диодах детектора ($v(3)$) остаются неизменными во времени (значения амплитуд данных сигналов определяются начальным относительным сдвигом

фаз сигналов генераторов), в результате чего амплитуды огибающей и сигналов усилителя ($v(\text{Drain5})$, $v(\text{Drain6})$, $v(\text{Drain7})$) близки к нулю (за исключением начальных переходных процессов при включении питания) и выходные импульсы ($v(\text{Drain8})$) отсутствуют. Наблюдаются лишь незначительные высокочастотные осцилляции, амплитуда которых слишком мала, чтобы вызвать переключение последующих схем цифровой обработки.

При возникновении угловой скорости вдоль соответствующей координатной оси будут наблюдаться противофазные изменения емкостей преобразователей. В соответствии с рис. 4, при изменениях емкостей преобразователей в пределах $\pm 0,5$ фФ частоты сигналов генераторов ($v(\text{Drain2})$, $v(\text{Drain3})$) незначительно отличаются, что приводит к возникновению биений и периодической пульсации амплитуды сигналов на выходе смесителя ($v(\text{Drain4})$) и на диодах детектора ($v(3)$), в результате чего на выходе схемы ($v(\text{Drain8})$) наблюдаются импульсы, форма которых близка к прямоугольной, амплитуда практически соответствует напряжению питания, а частота равна частоте огибающей сигнала биений.

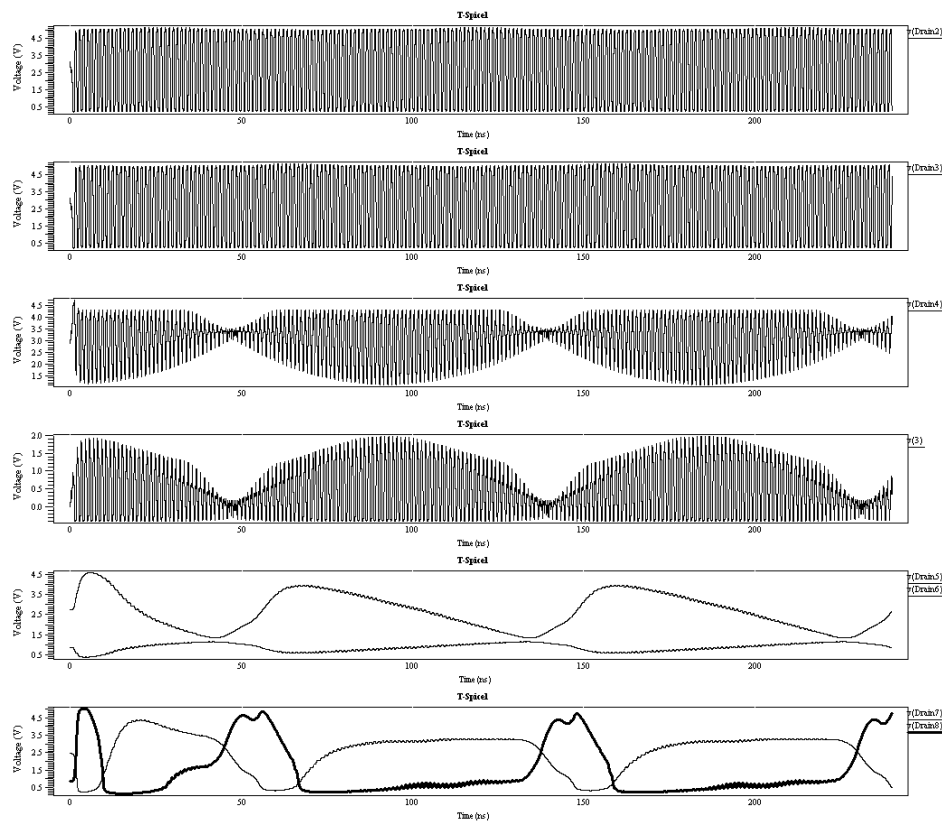


Рис. 4. Результаты моделирования устройства съема и обработки информации с одной пары емкостных преобразователей микромеханического гироскопа при $U_{пит} = 5$ В и при изменениях емкостей преобразователей в пределах $\pm 0,5$ фФ

Аналогичные результаты, полученные при изменениях емкостей преобразователей в пределах ± 1 фФ, приведены на рис. 5. Можно видеть, что увеличение амплитуды изменения емкостей преобразователей в два раза привело к удвоению частоты следования выходных импульсов.

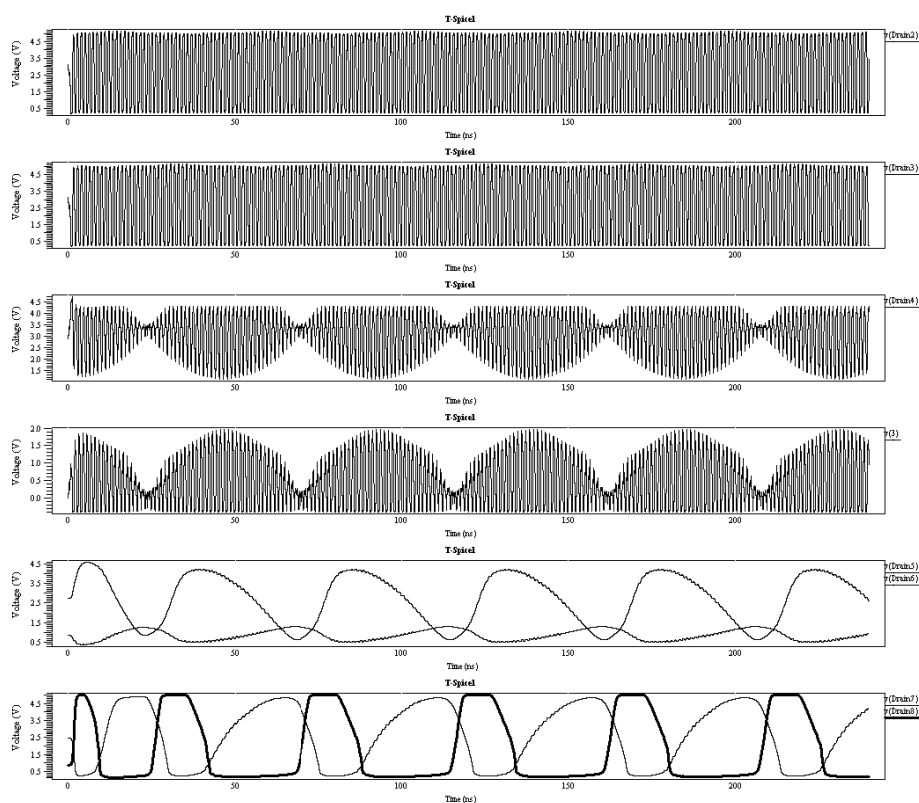


Рис. 5. Результаты моделирования устройства съема и обработки информации с одной пары емкостных преобразователей микромеханического гироскопа при $U_{пит} = 5 В$ и при изменениях емкостей преобразователей в пределах $\pm 1,0 фФ$

Из результатов моделирования, полученные в диапазоне (5–9) В, видно, что увеличение питающего напряжения приводит к улучшению формы выходных импульсов и увеличению чувствительности схемы к изменениям емкостей преобразователей, а, следовательно, и к повышению чувствительности микросистемы в целом. Кроме того, важным положительным качеством данной схемы является то, что частота выходных импульсов остается практически неизменной при изменении напряжения питания в широких пределах (5–9) В.

Полученные результаты исследований могут использоваться при проектировании интегральных микромеханических сенсоров угловых скоростей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Коноплев Б.Г., Лысенко И.Е. Интегральный микромеханический гироскоп // Патент России №2251077, 2005. Бюл. №12.
2. Коноплев Б.Г., Лысенко И.Е. Интегральный микромеханический гироскоп // Патент России №2300773, 2007. Бюл. №16.
3. Распопов В.Я. Микромеханические приборы. – М.: Машиностроение.– 2007. – 400 с.
4. Коноплев Б.Г., Лысенко И.Е. Интегральный микромеханический гироскоп с тремя осями чувствительности // Известия ТРТУ. – 2006. – № 9 (64). – С. 131-135.
5. Коноплев Б.Г., Рындиц Е.А., Приступчик Н.К. Автоэмиссионный акселерометр с тремя осями чувствительности // Нано- и микросистемная техника. – 2007. – № 3. – С. 36-39.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н., профессор Э.К. Алгазинов.

Коноплев Борис Георгиевич

Технологический институт федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге.

E-mail: kbg@tti.sfedu.ru.

347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44.

Тел.: 88634371767.

Факультет электроники и приборостроения; декан; д.т.н.; профессор.

Рындин Евгений Адальбертович

Южный научный центр Российской академии наук, г. Ростов-на-Дону.

E-mail: ryn@fep.tti.sfedu.ru.

344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41.

Тел.: 88634311584.

Ведущий научный сотрудник; д.т.н.; доцент.

Лысенко Игорь Евгеньевич

Общество с ограниченной ответственностью «Центр нанотехнологий».

E-mail: igor@fep.tit.sfedu.ru.

347922, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2.

Тел.: 88634311584.

Директор.

Konoplev Boris Georgievich

Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”.

E-mail: kbg@fep.tsure.ru.

44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia.

Phone: +78634371767.

College of Electronics and Electronic Equipment Engineering; Dean; Dr. of Eng. Sc.; Professor.

Ryndin Eugeny Adalbertovich

Southern Scientific Center of Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don.

E-mail: ryn@fep.tti.sfedu.ru.

41, Chekhov Street, Rostov-on-Don, 344006, Russia.

Phone: +78634311584.

Senior Researcher; Dr. of Eng. Sc.; Associate Professor.

Lysenko Igor Evgenievich

«Nanotechnology center».

E-mail: igor@fep.tit.sfedu.ru.

2, Shevchenko Street, Taganrog, 347922, Russia.

Phone: +78634311584.

Director.