

ПРИМЕНЕНИЕ МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ В ИНТЕГРИРОВАННОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ НАЗЕМНОГО ТРАНСПОРТНОГО И СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО СРЕДСТВА

Новиков П.В., к.т.н. Герди В.Н., к.т.н. Новиков В.В.

Университет машиностроения

NovikoF_08@mail.ru

Рассмотрены вопросы оценки достижимых значений эксплуатационных характеристик интегрированной инерциально-спутниковой навигационной системы комплексированной с одометрическим датчиком и предназначенной для наземного транспортного и сельскохозяйственного технологического средства. Построение относительно дешевых современных навигационных систем для наземных транспортных и сельскохозяйственных технологических средств обеспечивается посредством интегрирования разнородных навигационных систем, к которым относят инерциально-спутниковые системы, объединяющие в единый аппаратный комплекс инерциальный и спутниковый модули. Достижимая точность выработки навигационных параметров обеспечивается применением специальных алгоритмов обработки измерительной информации в сочетании с комплексированием системы и стороннего источника дополнительной информации, к которому относится одометрический датчик. К числу наиболее перспективных датчиков относят чувствительные элементы, построенные с использованием технологии производства микроэлектромеханических систем – MEMS/MEMC (Micro-Electro Mechanical Systems). Навигационные системы построенные на базе MEMC датчиков обладают рядом преимуществ. К числу основных достоинств следует отнести малые массогабаритные характеристики (объем менее 1 см³ при весе менее 1 г), низкое энергопотребление, высокую надежность, невосприимчивость к виброударным нагрузкам (до 2000g), простоту интеграции датчиков и электронных модулей навигационной системы, низкую стоимость. Основным недостатком является необходимость синтеза сложных алгоритмов обработки измерительной информации для получения заданной точности оценки навигационных параметров. Рассмотрена навигационная система, в которой в качестве MEMC датчиков применялись гироскопы ADXRS-150 в сочетании с акселерометрами ADXL-210 производимыми компании Analog Devices. Представлены основные конструкторско-технологические характеристики датчиков, сформулированы критерии отбора датчиков, приводится оценка технико-экономического эффекта использования MEMC в навигационной системе. Практическую важность представляет оценка достижимых точностных характеристик системы в реальных условиях эксплуатации. В работе приводятся результаты натурных испытаний навигационной системы, построенной на базе MEMC датчиков и предназначенной для грузоподъемника, осуществляющего перевозки на территории морского порта. Результаты экспериментальных исследований подтвердили эффективность применения MEMC в качестве чувствительного элемента инерциально-спутниковой навигационной системы наземного транспортного и сельскохозяйственного технологического средства, что создает фундамент для новых высокотехнологичных разработок.

Ключевые слова: наземное транспортное и сельскохозяйственное технологическое средство, навигационная система, микроэлектромеханический датчик, акселерометр, гироскоп, точность, интегральная микросхема.

Введение

Современный этап развития навигационных технологий выдвигает в число актуальных задачу синтеза навигационной системы для наземного транспорта и сельскохозяйственных технологических средств, обеспечивающей высокоточное устойчивое решение навига-

онной задачи в сочетании с приемлемыми для широкого круга потребителей стоимостными показателями [1, 2].

Общим направлением в развитии навигационных систем для наземного транспорта и сельскохозяйственных технологических средств является создание интегрированных

инерциально-спутниковых навигационных систем комплексированных с датчиками дополнительной информации [3–5]. Особенности применения навигационных систем в автомобильных и сельскохозяйственных приложениях диктуют ряд специфических требований, предъявляемых к эксплуатационным характеристикам системы [3]. К числу основных требований следует отнести получение минимальных массогабаритных характеристик, низкое энергопотребление, обеспечение высокой надежности при достижении заданной точности решения навигационной задачи.

Прогнозируемая массовость применений оборудования средств транспортной и сельскохозяйственной навигационной системы диктует необходимость использования в качестве чувствительных элементов инерциального модуля системы навигации датчиков с низкой стоимостью.

К числу наиболее перспективных датчиков следует отнести микроэлектромеханические сенсоры (МЭМС) [1, 2, 6]. Датчики, выполненные по технологии МЭМС, обладают рядом неоспоримых преимуществ в сравнении с другими типами чувствительных элементов. К основным достоинствам МЭМС относят – малые массогабаритные характеристики (объем менее 1 см³ при массе менее 1 г), низкое энергопотребление, высокую надежность, невосприимчивость к виброударным нагрузкам (до 2000 g), низкую цену.

Основным недостатком МЭМС является крайне низкий уровень точностных характеристик, исключающий возможность автономного использования датчиков в составе навигационной системы без привлечения вычислительных процедур фильтрации измерительной информации.

Несмотря на интенсивные исследования в области создания недорогих инерциально-спутниковых навигационных систем, в настоящее время практически нет образцов интегрированной аппаратуры, предназначенной к применению для широкого класса подвижных наземных объектов.

С учетом перечисленных факторов практическую значимость представляет собой решение задачи построения инерциально-спутниковой системы для наземного транспорта и сельскохозяйственных технологических средств с использованием МЭМС датчиков. В контексте решаемой задачи актуальным во-

просом является оценка влияния точностных характеристик МЭМС на выходные параметры навигационной системы.

Для разработчиков транспортных и сельскохозяйственных технологических средств навигационных систем представляет интерес технико-экономическое обоснование выбора наиболее перспективных чувствительных элементов из всего многообразия датчиков, представленных для свободного потребления.

Перечисленные факторы в совокупности определяют актуальность заявленной темы исследования.

Цель исследования

Целью данной работы является оценка точностных возможностей интегрированной системы, анализ основных конструкторско-технологических особенностей используемых МЭМС датчиков, сравнительный анализ стоимости промышленно выпускаемых элементов, определение критериев отбора МЭМС датчиков из всего многообразия чувствительных элементов соответствующего класса.

Особенности построения инерциально-спутниковой системы. Конструкторско-технологические характеристики МЭМС

Общий анализ способов повышения качества навигационных систем позволяет сделать вывод о том, что для обеспечения высокой точности и непрерывности навигационных определений наиболее перспективным способом является интегрирование в единый комплекс приемника спутниковой навигации и автономных датчиков. При этом в качестве автономных датчиков предложено использование МЭМС сенсоры и одометрический датчик.

Создание интегрированной инерциально-спутниковой системы на основе объединения датчиков различной физической природы позволяют разработать систему, обладающую более высокими характеристиками точности, помехоустойчивости и непрерывности навигационных решений по сравнению с отдельными измерителями. Достоинствами использования МЭМС датчиков являются высокие эксплуатационные характеристики в сочетании с низкой стоимостью. Однако значительные ошибки датчиков требуют привлечения алгоритмов фильтрации выходных сигналов системы. Проанализируем основные конструкторско-техно-

логические характеристики MEMS датчиков точки зрения возможности и эффективности их использования в составе инерциально-спутниковой системы транспортного и сельскохозяйственного технологического средства.

Погрешности инерциальной навигационной системы всецело определяются точностью используемых чувствительных элементов. Выбор датчиков, как правило, предопределяется условием работы системы – в первую очередь, требуемой длительностью автономного (без использования коррекции от внешних устройств) счисления координат. Одним из ключевых параметров при этом оказывается нестабильность смещения нуля (дрейфов) гироскопов.

Сравнительный анализ характеристик серийно выпускаемых образцов приборов в зависимости от принципа их действия показал, что нестабильность нуля гироскопов составляет от 10^{-6} °/ч до 200 °/ч (рис. 1).

В рамках решения задачи по выработке навигационных параметров навигационной системой транспортного и сельскохозяйственного технологического средства предполагается, что источником информации о скорости движения машины служит одометр, поэтому точ-

ность гироскопов оказывается важна лишь в контексте определения углов ориентации, в первую очередь угла курса. Необходимость автономного вычисления параметров возникает только на протяжении тех кратких периодов времени, когда отсутствует прием сигналов навигационных спутников.

Все сказанное обуславливает выбор в пользу MEMS датчиков как наиболее дешевых и свободно доступных на рынке. На момент разработки аппаратной части инерциальной системы транспортного и сельскохозяйственного технологического средства наиболее широко рынок микромеханических гироскопов был представлен продукцией компании Analog Devices [7].

На сегодняшний день класс микромеханических гироскопов весьма широк и неоднороден и включает датчики с нестабильностью смещения нуля от 5 до 200 град/ч и стоимостью от 6 до 500 \$. График на рис. 2, построенный в логарифмическом масштабе, иллюстрирует соотношение между уровнем погрешностей и стоимостью нескольких распространенных образцов таких гироскопов, производимых компаниями Analog Devices, ST Microelectronics, Epson, Systron Donner.



Рис. 1. Типичная нестабильность смещения нуля (дрейфа) гироскопов разных типов

Как видно из рис. 2. условиям, накладываемым на точность и стоимость датчиков, наиболее полно удовлетворяет гироскоп ADXRS-300 фирмы Epson.

Датчик угловой скорости ADXRS-300, разработанный и производимый компанией Analog Devices, представляет собой вибрационный гироскоп, выполненный по микромеханической технологии iMEMS [5, 6]. Основным элементом гироскопа – закрепленная на упругих растяжках рамка, внутри которой совершает поступательные колебательные движения чувствительная масса. Колебания возбуждаются электростатическим способом. На внешней поверхности рамки и на подложке расположены выступы, образующие обкладки системы плоских конденсаторов. При колебаниях рамки относительно подложки расстояния между этими выступами изменяются, соответственно изменяется и электрическая емкость конденсаторов. Когда подложка неподвижна или движется прямолинейно и равномерно, рамка не колеблется. Если подложка вращается вокруг оси чувствительности, то под действием силы Кориолиса возникают вынужденные (вторичные) колебания рамки. Изменение емкости системы конденсаторов при этом несет информацию об угловой скорости прибора.

Конструктивно гироскоп ADXRS-300 представляет собой интегральную микросхему; он выполнен на одном кристалле кремния и включает в себя все необходимые электронные цепи формирования сигнала. Данный прибор имеет встроенную схему автотестирования с цифровым управлением. В составе микросхемы присутствует датчик температуры для осуществления калибровки устройства и компенсации погрешности, вызванной изменением температуры. Также на кристалле имеется прецизионный источник опорного напряжения.

Двухканальный датчик линейного ускорения – акселерометр ADXL-210 производства компании Analog Devices – выполнен по микромеханической технологии iMEMS [8]. Весь кристалл акселерометра размером 3,0543,05 мм занят главным образом схемами формирования сигнала, которые окружают миниатюрный датчик ускорения размером 141 мкм, расположенный в его центре. Датчик представляет собой дифференциальную конденсаторную структуру с воздушным диэлектриком, обкладки которого вырезаны (вытравлены) из плоского куска поликремниевой пленки толщиной 2 мкм. Неподвижные обкладки этого конденсатора представляют собой консольные стержни, расположенные на высоте 1 мкм от поверхности

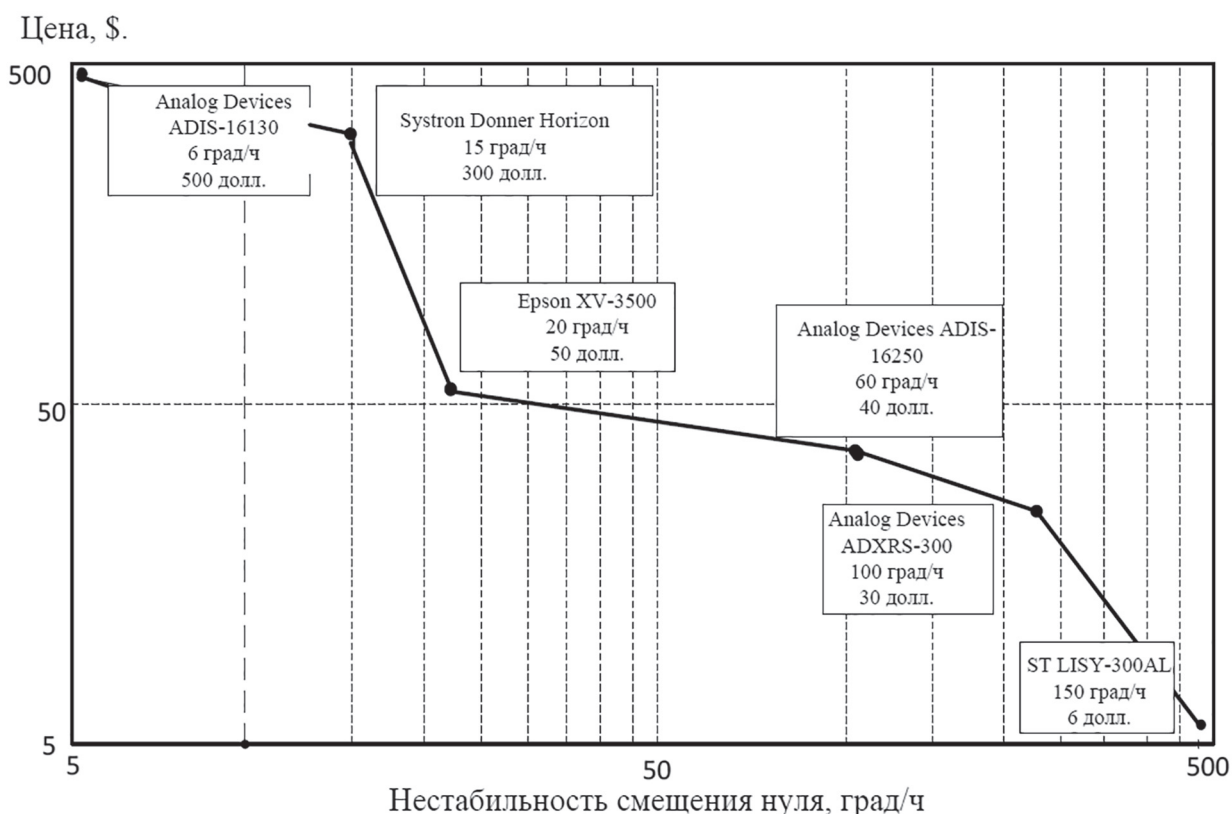


Рис. 2. Соотношение уровня погрешностей и цены микроэлектромеханических гироскопов

кристалла в воздухе на поликремниевых столбиках-анкерах, приваренных к кристаллу.

Датчик ADXL-210 изготавливается в плоском керамическом корпусе с планарными выводами, причем оси, по которым измеряется ускорение, направлены параллельно плоским выводам (то есть параллельно плоскости печатной платы). Вариант схемного выполнения ADXL-202E выпускается в миниатюрном безвыводном кристаллоносителе размером 54542 мм.

Для удобства сопряжения с микроконтроллерами выходные сигналы представляют собой

импульсы прямоугольной формы постоянной частоты.

Информация об ускорении отображается скважностью импульсов. Описанный способ обеспечивает высокую помехоустойчивость, для передачи сигнала достаточно одной линии и прием его любым микроконтроллером, у которого есть таймер.

Основные характеристики МЕМС датчиков навигационной системы транспортного и сельскохозяйственного технологического средства сведены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики гироскопа ADXRS-300 и акселерометра ADXL-210

Характеристики гироскопа ADXRS-300		Характеристики акселерометра ADXL-210	
Параметр	Значение	Параметр	Значение
Диапазон измерений, град / с	± 300	Диапазон измерений, g	± 10
Масштабный коэффициент, мВ / (°/с)	5,0	Масштабный коэффициент аналогового сигнала, мВ/g	100
Погрешность масштабного коэффициента, %	8,0	Погрешность масштабного коэффициента, %	20
Нелинейность масштабного коэффициента, %	0,1	Нелинейность выходной характеристики, %	0,2
Ширина полосы пропускания, Гц	40	Ширина полосы пропускания, Гц	5000
Среднеквадратичный уровень шума, град/с/ $\sqrt{\text{Гц}}$	0,1	Среднеквадратичный уровень шума, $10^{-6} \text{ g}/\sqrt{\text{Гц}}$	500
Чувствительность к линейным ускорениям, град / с / g	0,2	Время готовности	<5 с
Диапазон рабочих температур, °С	-40...+58	Диапазон рабочих температур, °С	-40... +85
Напряжение питания, В	5 $\pm$ 0,25	Напряжение питания, В	3,0...5,25
Потребляемый ток, мА	6	Потребляемый ток, мА	0,6

Таблица 2

Точностные показатели инерциально-спутниковой навигационной системы

Точностные характеристики	Режимы работы	
Величины (1 σ)	Режим коррекции от спутниковой системы (1 σ)	Автономный инерциальный режим с коррекцией от одометра (1 σ)
Горизонтальные координаты	5 м	0,25% от произведенного пути
Путевая скорость	0,1 м/с	0,3 м/с
Вертикальная скорость	0,3 м/с	0,3 ... 0,5 м/с
Высота	2 ... 4 м	6 ... 8 м
Углы ориентации (тангаж, крен)	—	—
Динамическая точность	0,01 ... 0,03°	0,05 ... 0,1°
Курс		
Динамическая точность	0,08 ... 0,1°	0,5 ... 0,7°
Горизонтальные координаты	0,125% от пройденного пути	

В качестве основного алгоритма комплексирования навигационных систем предлагается фильтрация, реализованная на базе оптимального фильтра Калмана. Выбор данного метода фильтрации обусловлен, в основном, простотой реализации дискретной формы фильтра в вычислителе и наилучшей теоретической сходимостью вычислительной процедуры в классе линейных оптимальных фильтров.

Результаты проведения натурных испытаний интегрированной инерциально-спутниковой системы транспортного и сельскохозяйственного технологического средства, построенной на базе МЕМС датчиков при использовании специализированных алгоритмов обработки информации, сведены в табл. 2.

Результаты натурных испытаний показали, что точность выработки навигационных параметров инерциально-спутниковой системы находится на уровне удовлетворяющем заданным требованиям. Данное обстоятельство указывает на целесообразность и эффективность использования МЕМС датчиков в качестве чувствительных элементов системы.

Выводы

Достоинствами использования микроэлектромеханических датчиков являются высокие эксплуатационные характеристики и низкая стоимость. Однако высокие погрешности датчиков не позволяют использовать их в качестве автономных навигационных систем, помимо этого микроэлектромеханические датчики являются датчиками интегрирующего типа и, следовательно, требуют привлечения алгоритмов фильтрации измерительной информации.

Результаты натурных испытаний показали, что интегрирование в единый навигационный комплекс приемника спутниковой навигации, инерциальных МЕМС датчиков и одометрического датчика обеспечивает:

- непрерывность навигационных определений на всех этапах движения транспортного и сельскохозяйственного технологического средства, в том числе для транспортных средств в условиях плотной городской застройки, когда наблюдается временная неработоспособность приемников спутниковой навигации;
- повышение точности определения навигационных параметров;
- высокоточное определение параметров пространственной ориентации.

Применение предложенного навигационного инструмента в сегменте оборудования для наземных транспортных и сельскохозяйственных технологических средств создает фундамент для новых высокотехнологичных и экономических проектов.

Литература

1. Salychev O.S. Applied Inertial Navigation: Problems and Solutions. M.: BMSTU Press, 2004. 302 p.
2. Salychev O.S. MEMS-based Inertial Navigation: Expectations and Reality. M.: BMSTU Press, 2012. 208 p.
3. Новиков П.В., Новиков В.В., Шейпак А.А. Интегрированная навигационная система наземного транспортного средства // Известия МГТУ «МАМИ». 2015. № 4(26). Т. 1. С. 70–77.
4. Sheipak Anatoly, Novikov Pavel The satellite-based algorithm for determining the location of hydraulic lift. Design of machines and structures. A publication of the university of Miskolc. Vol. 4, No 2 (2014). pp. 45–53.
5. Hemerly E.M. Schad V.R. Implementation of a GPS/INS/Odometer, ABCM Symposium Series in Mechatronics – 2008, Vol. 3. pp. 519–524.
6. Hong S. K., Park S. Minimal-drift Heading Measurement using a MEMS Gyro for Indoor Mobile Robots // Sensors. 2008. Vol. 8. pp 7287–7299.
7. ADXRS300. $\pm 300^\circ/\text{s}$ Single Chip Yaw Rate Gyro with Signal Conditioning. Data Sheet. Rev. B. [Electronic Resource]. Analog Devices, INC., 2004.

References

1. Salychev O.S. Applied Inertial Navigation: Problems and Solutions. Moscow. BMSTU Press, 2004. 302 p.
2. Salychev O.S. MEMS-based Inertial Navigation: Expectations and Reality. Moscow. BMSTU Press, 2012. 208 p.
3. Novikov P.V., Novikov V.V., Sheypak A.A. The integrated navigation system of ground vehicle. *Izvestiya MGTU «MAMI»*. 2015. No 4(26). Vol. 1. pp. 70–77 (In Russ.).
4. Sheipak Anatoly, Novikov Pavel The satellite-based algorithm for determining the location of hydraulic lift. Design of machines and structures. A publication of the university of Miskolc. Vol. 4, No 2 (2014). pp. 45–53.
5. Hemerly E.M. Schad V.R. Implementation of a GPS/INS/Odometer, ABCM Symposium Series in Mechatronics. 2008, Vol. 3. pp. 519–524.
6. Hong S. K., Park S. Minimal-drift Heading Measurement using a MEMS Gyro for Indoor Mobile Robots // Sensors. 2008. Vol.8. pp 7287–7299.
7. ADXRS300. $\pm 300^\circ/\text{s}$ Single Chip Yaw Rate Gyro with Signal Conditioning. Data Sheet. Rev. B. [Electronic Resource]. Analog Devices, INC., 2004.

APPLICATION OF MICROELECTROMECHANICAL SENSORS IN THE INTEGRATED NAVIGATION SYSTEM OF GROUND TRANSPORT AND AGRICULTURAL TECHNOLOGICAL VEHICLE

P.V. Novikov, Ph.D. V.N. Gerdi, Ph.D. V.V. Novikov
Moscow State University of Mechanical Engineering (MAMI)
NovikoF_08@mail.ru

The questions of assessment of achievable performance values of the integrated inertial-satellite navigation system complexed with odometer sensor and used for ground transport and agricultural technological vehicle are considered. Construction of relatively cheap modern navigation systems for ground transport and agricultural technological vehicles is provided by integrating diverse navigation systems, which include inertial-satellite systems that combine into a single hardware system the inertial and satellite modules. Achievable accuracy of gaining the navigation parameters is achieved by using special algorithms for processing of measurement information in combination with complexation of the system with an external source of additional information, where odometer sensor belongs. The most promising sensors are sensors, built using the technology of production of microelectromechanical systems - MEMS / MEMC (Micro-Electro Mechanical Systems). The navigation systems based on MEMS sensors have several advantages. The main advantages are small weight and size characteristics (volume less 1 sm³, and weighs less than 1 gram), low power consumption, high reliability, resistance to vibro-impact loads (up to 2000 g), easy integration of sensors and electronic modules of the navigation system, low cost. The main disadvantage is the need for the synthesis of complex algorithms of processing of measuring information to obtain the desired accuracy of the estimate of navigation parameters. The navigation system, where as MEMS sensors were used gyroscopes ADXRS-150 in conjunction with accelerometers ADXL-210 manufactured by Analog Devices, was considered. The main design and technological characteristics of sensors were shown, the selection criteria for sensors were formulated, technical and economic effect assessment of the use of MEMS in the navigation system is provided. The practical importance has the estimation of achievable accuracy characteristics of system under actual operating conditions. The paper presents the results of field tests of the navigation system based on MEMS sensors and designed for forklift carrying out transportation in the sea port. The results of experimental studies confirmed the effectiveness of the MEMS application as a sensing element of inertial-satellite navigation system of ground transport and agricultural technological vehicle that creates the foundation for the new high-tech developments.

Keywords: ground transport and agricultural technological vehicle, navigation system, MEMS sensor, accelerometer, gyroscope, accuracy, integrated circuit.