

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ

В.А. СОЛДАТЕНКОВ, *ген. директор ОАО «НПО Геофизика-НВ», д-р техн. наук,*
 Ю.К. ГРУЗЕВИЧ, *зам. ген. директора по науке ОАО «НПО Геофизика-НВ», канд. техн. наук,*
 В.М. АЧИЛЬДИЕВ, *гл. конструктор МНЭМС ОАО «НПО Геофизика-НВ», канд. техн. наук,*
 А.Д. ЛЕВКОВИЧ, *нач. отдела МЭМС ОАО «НПО Геофизика-НВ»,*
 И.А. РОДНОВА, *вед. специалист отдела МЭМС ОАО «НПО Геофизика-НВ»,*
 Ю.Н. ЕВСЕЕВА, *инж. отдела МЭМС ОАО «НПО Геофизика-НВ»*

geomnems@gmail.com, levzver@gmail.com, rodnovairina@mail.ru, sun51188@gmail.com
 ОАО «Научно-производственное объединение Геофизика-НВ»
 107076, Москва, улица Матросская Тишина, 23, стр. 2

Рассматриваются различные приборы, построенные на основе микромеханических гироскопов и акселерометров, а именно: наклонеры для различных областей применения, система весоизмерения для грузового транспорта, а также бортовая измерительная система контроля параметров движения транспортного средства. Приводятся блок-схемы описанных приборов, а также их внешний вид и математические модели, лежащие в их основе. Приводятся формулы для расчета углов наклона исходя из измеренных акселерометрами значений проекций вектора ускорения свободного падения на их оси чувствительности, а также технические характеристики разработанных наклонеров. Система измерения веса в кузове транспортного средства состоит из трех наклонеров – наклонера периферийного переднего, наклонера периферийного заднего и наклонера базового, блока сопряжения и бортового блока вычислительного терминала системы. Наклонеры по информационной шине сети CAN через блок сопряжения соединены с бортовым блоком. Наклонер периферийный передний установлен на раме транспортного средства в точке переднего максимального прогиба рамы, а наклонер периферийный задний – в точке заднего максимального прогиба рамы. Наклонер базовый устанавливается в точке минимального прогиба рамы. Бортовая измерительная система контроля параметров движения транспортного средства предназначена для измерения параметров движущегося транспортного средства: линейных ускорений, угловых скоростей, скорости движения, координат, циклического накопления измеренных параметров и передачи на удаленный централизованный пульт контроля или внешний накопитель, для последующей обработки. Измеренные значения предназначены для восстановления пространственной траектории по зафиксированным данным для анализа причин автодорожного происшествия, определения текущего местоположения транспортного средства на маршруте движения или в случае угона ТС. Кроме этого, БИС позволяет по измеренным значениям проекций линейных ускорений и угловых скоростей определить геометрические параметры дороги (уклоны, радиусы кривизны дорожного полотна) и качество дорожного покрытия (ровность, ямы, коэффициент сцепления).

Ключевые слова: микромеханический гироскоп, акселерометр, наклонер

В настоящее время микромеханические датчики линейного ускорения и угловой скорости нашли широкое применение в различных областях техники, промышленности и товаров народного потребления [1, 8–10]. Появление микромеханических акселерометров (ММА) позволило начать разработки целого ряда устройств и изделий, в том числе различных наклонеров (инклинометров). Основой наклонера является ММА, выходное напряжение которого пропорционально действующей величине проекции ускорения силы тяжести на его оси чувствительности. Величина этой проекции зависит от положения оси чувствительности ММА относительно горизонта и определяется углом его наклона к плоскости местного горизонта. В состав наклонера входят последовательно соединенные ММА

и электронная схема преобразования сигнала, включающая операционные усилители и микроконтроллер [2]. При определенных допущениях, вне зависимости от схемы построения ММА и наклонера, углы крена и тангажа для двухосного акселерометра определяются выражениями

$$\nu = \arcsin \frac{U_x}{K_x g}; \quad \gamma = \arcsin \frac{U_y}{K_y g \cos(\nu)};$$

$$U_x = K_x g \sin(\nu); \quad U_y = K_y g \sin(\gamma) \cos(\nu)$$

где U_x , U_y – напряжения на выходе акселерометров по продольной и поперечной осям;

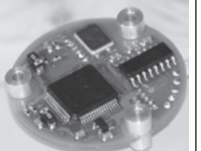
K_x , K_y – коэффициенты преобразования по осям X и Y ;

ν , γ – углы тангажа и крена соответственно;

g – ускорение свободного падения.

Т а б л и ц а

Наклономеры для информационно-измерительных систем
Inclinometers for information and measuring systems

Наименование	Датчик критических углов с индикатором	Наклономер для медицинских кроватей, и хирургических столов	Наклономер для робототехнических комплексов	Квадрант электронный для монтажа ступельной оснастки	Наклономер для системы измерения веса
Фото					
Диапазоны измерения углов по осям X и Y, °	90	70	90	30	30
Погрешность измерения углов, °	0,5	0,3	0,02	0,01	0,01
Цена младшего разряда, "	7,7	7,7	7,7	3,8	3,8
Габариты, мм	Ø 32×25	Ø 49×25	Ø 32×25	140×140×25	48×14
Напряжения питания, В	7–15	7–15	7–15	5±0,3	7–15
Диапазон рабочих температур, °С	–40 + 85	–10 + 50	–40 + 85	0 + 40	–40 + 85
Интерфейс	RS232	RS232	RS232	USB	CAN

В результате работ, проведенных в 2009–2013 гг., были разработаны, изготовлены и проведены предварительные испытания и сертифицированы различные типы наклономеров. Технические характеристики разработанных наклономеров приведены в таблице.

Как видно из таблицы, наклономеры с интерфейсом RS232 предназначены для использования в составе медицинских кроватей и хирургических столов для контроля положения тела больного при лечении и проведения операции, а также для различных робототехнических комплексов специального применения.

На основе этих наклономеров были созданы датчик критических углов с индикатором [3] и устройство для измерения уклонов при монтаже ступельной оснастки [4].

Датчик критических углов с индикатором предназначен для измерения и индикации информации об углах наклона изделия, в том числе критических, относительно плоскости горизонта не менее чем по двум осям. В дат-

чике критических углов используется наклонномер на основе ММА, дистанционно соединенный с блоком индикации, выполненным в виде отдельного блока, на лицевой панели которого размещены символьный индикатор, микроконтроллер, преобразователь интерфейса, разъемы для подключения наклономера и питания. На верхней панели корпуса размещены индикатор, светодиоды, звуковой сигнализатор и кнопки управления (элементы включения). При включении устройства на индикаторе отображаются данные об углах наклона рабочей поверхности наклономера в символьном виде.

Устройство для измерения уклонов при монтаже ступельной оснастки [4] содержит сменное основание и наклонномер с интерфейсом USB. Наклонномер жестко закрепляется на сменном основании, которое может быть выполнено в виде различных конфигураций. Сменное основание устанавливается на ступельную оснастку, при этом его масса достаточна, чтобы нижняя рабочая поверх-

ность сменного основания была прижата к stapельной оснастке. Данные об углах наклона относительно плоскости местного горизонта, формируемые наклономером, передаются по шине USB и отображаются на экране ноутбука. Питание накломера осуществляется от USB шины компьютера, при этом преобразование интерфейса осуществляется сразу из UART в USB. Такая схема позволяет уменьшить количество соединений и улучшить эксплуатационные характеристики.

На основе накломера с интерфейсом CAN была разработана система измерения веса (СИБ) в кузове транспортного средства (ТС) [5], имеющая следующие характеристики:

- погрешность измерения веса в кузове ТС – не более 10 %;
- интерфейс передачи данных – CAN;
- частота выдачи информации о весе груза – 6 Гц;
- напряжение питания – (9-36) В;

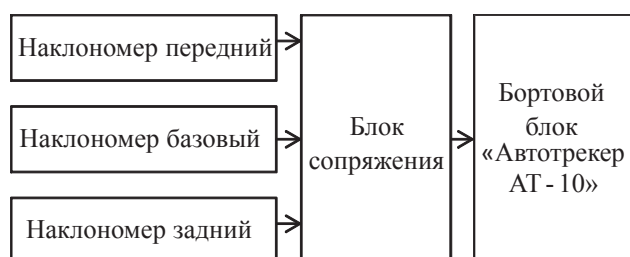


Рис. 1. Блок-схема бортовой системы измерения веса в кузове транспортного средства

Fig. 1. A block diagram of the onboard weight measurement system in the vehicle body

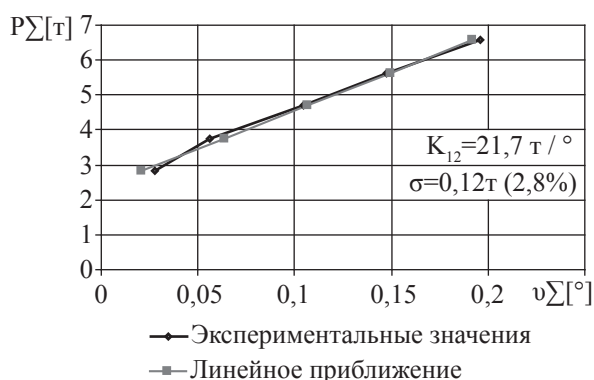


Рис. 2. Результаты измерения веса груза в составе транспортного средства. —♦— — экспериментальные значения, —■— — линейное приближение

Fig. 2. The results of measuring the weight of the cargo as a part of the vehicle. —♦— — the experimental values, —■— — linear approximation

– расположение рамы ТС относительно плоскости горизонта – до 10°.

Блок-схема СИБ в кузове ТС приведена на рис. 1.

Как видно из рисунка, система измерения веса в кузове транспортного средства состоит из трех наклономеров – накломера периферийного переднего (НПП), накломера периферийного заднего (НПЗ) и накломера базового (НБ), блока сопряжения и бортового блока вычислительного терминала системы «Автотрекер»[6]. Накломеры через информационную шину сети CAN через блок сопряжения соединены с бортовым блоком. Накломер периферийный передний установлен на раме транспортного средства в точке переднего максимального прогиба рамы, а накломер периферийный задний – в точке заднего максимального прогиба рамы. Накломер базовый устанавливается в точке минимального прогиба рамы. Положение рамы относительно полотна дороги определяется передней и задней подвеской автомобиля. Бортовой блок располагается в кабине автомобиля. Там же может располагаться и блок сопряжения. При помещении груза в кузове транспортного средства вес груза распределится между передней и задней опорой кузова. Давление распределенного веса груза приведет к прогибу рамы автомобиля относительно передней и задней подвесок. При этом значения углов, измеряемые относительно плоскости местного горизонта, изменятся и поступят через сеть CAN и блок сопряжения в бортовой блок. Вычисление веса груза в кузове транспортного средства по показаниям наклономеров вычисляется как сумма произведений жесткости рамы на разницу измеренных углов между точками минимального прогиба рамы и точками максимального прогиба рамы согласно выражениям

$$P_{\Sigma} = P_1 + P_2; \quad P_1 = \frac{K_1(v_{02} - v_{01})}{\cos v_{21} \cos \gamma_{11}};$$

$$P_2 = \frac{K_2(v_{03} - v_{01})}{\cos v_{21} \cos \gamma_{11}}; \quad v_{01} = v_{11} - v_{10};$$

$$v_{02} = v_{21} - v_{20}; \quad v_{03} = v_{31} - v_{30};$$

где P_{Σ} – суммарный вес груза в кузове транспортного средства;



Рис. 3. Фотография комплекта системы измерения веса груза в таре для установки на транспортное средство
Fig. 3. A photo of a set of cargo weight measuring in containers to be mounted on a vehicle

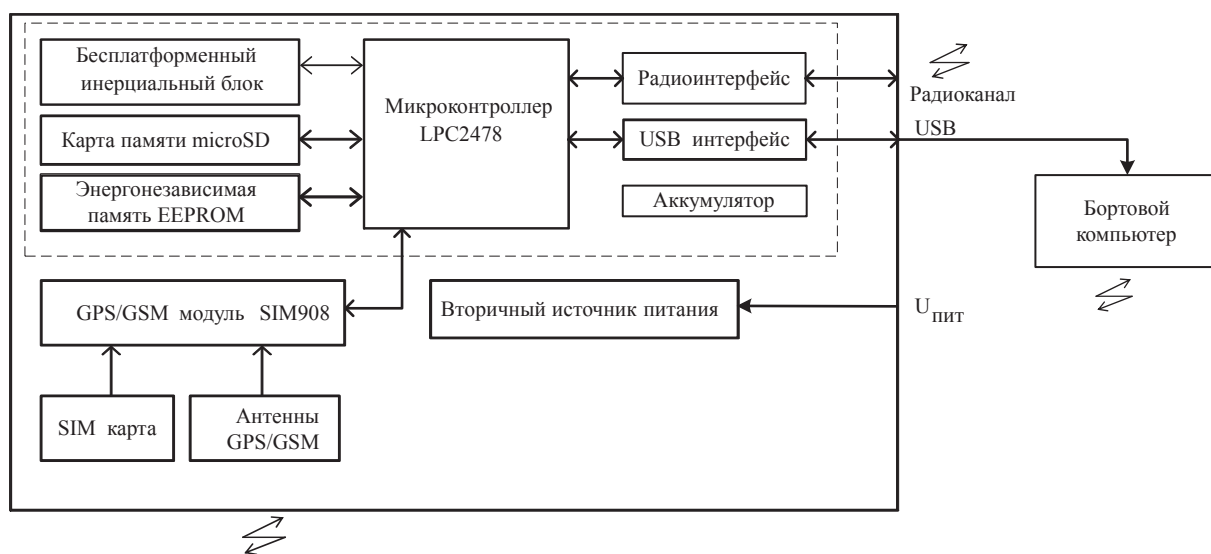


Рис. 4. Блок-схема бортовой измерительной системы контроля параметров движения транспортного средства
Fig. 4. A block diagram of the onboard measuring system of control parameters of the vehicle

P_1, P_2 – вес груза, приходящийся на переднюю и заднюю опоры кузова соответственно;

v_{10}, v_{20}, v_{30} – значение углов тангажа относительно плоскости горизонта, измеренные наклономерами НБ, НПП и НПЗ соответственно;

v_{11}, v_{21}, v_{31} – значение углов тангажа относительно плоскости горизонта, измеренные наклономерами НБ, НПП

и НПЗ после загрузки ТС соответственно;

γ_{11} – значение угла крена, измеренное наклономером НБ после загрузки ТС;

K_1 – коэффициент жесткости рамы вдоль продольной оси между НБ и НПП;

K_2 – коэффициент жесткости рамы вдоль продольной оси между НБ и НПЗ.

Предварительные совместные испытания проводились с ОАО «Русские навига-

ционные технологии» на самосвале КАМАЗ 55111. Во время испытаний в кузове самосвала последовательно размещались блоки массой 0,94 т. На рис. 2 приведена экспериментальная зависимость измеренного веса груза в составе транспортного средства.

Проведенные испытания показали, что при использовании наклономеров с чувствительностью 0,01 град относительная погрешность измерения веса составила 2,8 %.

Система измерения веса поставляется в транспортной таре. На рис. 3 приведена фотография комплекта системы измерения веса груза в транспортировочной таре для установки на транспортное средство.

На ТС наклонометры крепятся на внутреннюю поверхность шпангоутов методом холодной сварки с использованием компаунда COLD WELD и соединяются кабелями, проложенными вдоль стрингера рамы с блоком сопряжения и бортовым блоком.

На основе ММА и ММГ была разработана бортовая измерительная система (БИС) контроля параметров движения (КПД) транспортного средства (ТС) в реальном масштабе времени [7]. БИС КПД ТС предназначена для измерения параметров движущегося транспортного средства: линейных ускорений, угловых скоростей, скорости движения, координат, циклического накопления измеренных параметров и передачи на удаленный цент-

рализованный пульт контроля или внешний накопитель, для последующей обработки. Данные измеренные значения предназначены для восстановления пространственной траектории по зафиксированным данным для анализа причин автодорожного происшествия, определения текущего местоположения транспортного средства на маршруте движения или в случае угона ТС. Кроме этого, БИС позволяет по измеренным значениям проекций линейных ускорений и угловых скоростей определить геометрические параметры дороги (уклоны, радиусы кривизны дорожного полотна) и качество дорожного покрытия (ровность, ямы, коэффициент сцепления). Математическое описание определения этих параметров изложено в работе [1]. Кроме этого, по результатам измеренных параметров определяются направление и сила удара в момент столкновения и вычисляется траектория движения ТС от момента начала происшествия до полной остановки. На рис. 4 представлена блок-схема бортовой измерительной системы контроля параметров движения транспортного средства.

В состав БИС КПД ТС входят бесплатформенный инерциальный блок на основе трех ММА и трех ММГ, с измерительными осями, направленными параллельно строительным осям ТС, обеспечивающие измерение проекций линейных ускорений и угловых скоростей в связанной системе координат, GPS/GSM-модуль с антеннами, карта памяти, SIM карта, микроконтроллер, вторичный источник питания, резервный аккумулятор со стабилизатором напряжения и USB интерфейс. На рис. 4 пунктиром выделена структура упрощенного варианта БИС типа «черный ящик». На рис. 5 приведена фотография бортовой измерительной системы контроля параметров движения транспортного средства.

Отработка программного математического обеспечения работы БИС КПД ТС проводилась на радиоуправляемой модели автомобиля и легковом автомобиле в процессе движения по улицам г. Москвы. На рис. 6 приведен пример кадра измеренных проекций линейных ускорений на оси ТС при наезде модели на препятствие типа «лежачий



Рис. 5. Фотография бортовой измерительной системы контроля параметров движения транспортного средства

Fig. 5. A photo on an onboard measuring system for controlling the parameters of the vehicle movements

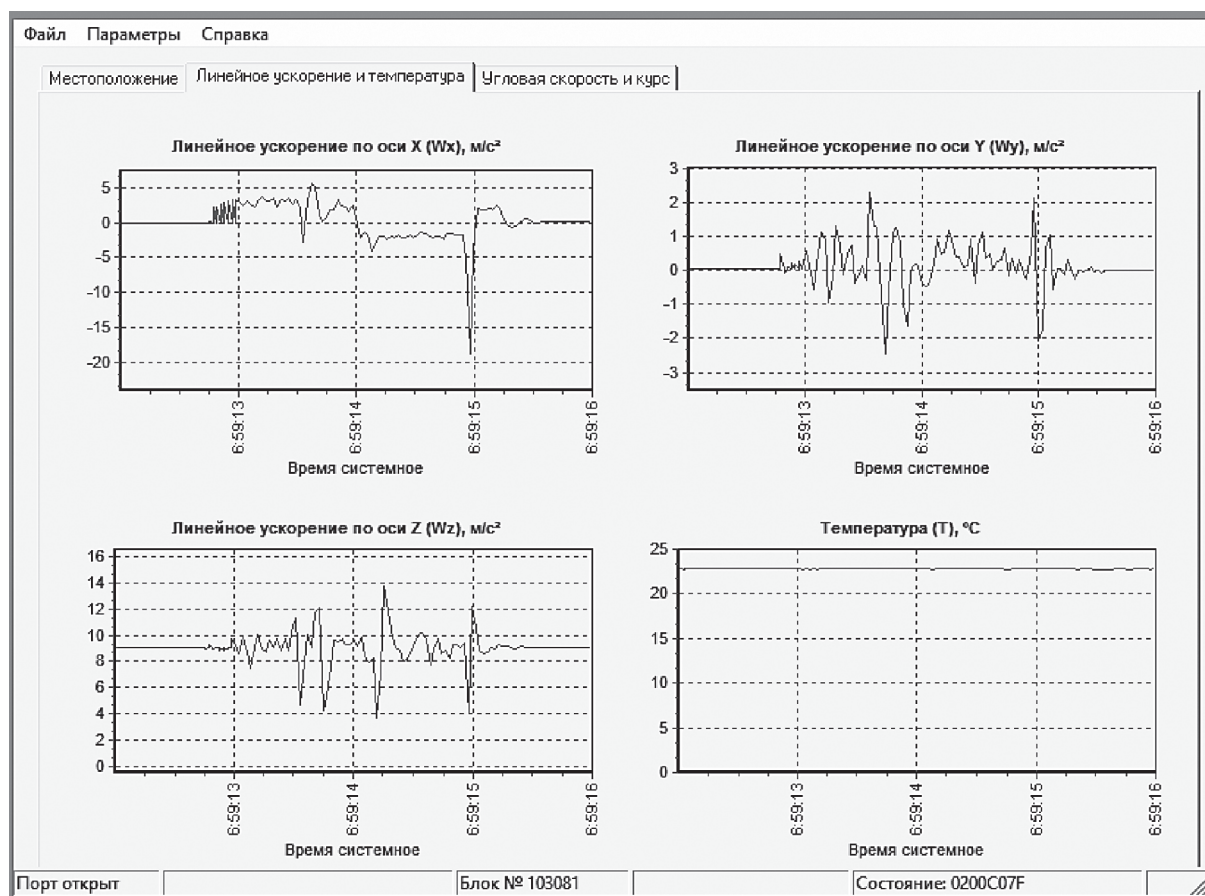


Рис. 6. Пример кадра измеренных линейных ускорений в процессе движения ТС
Fig. 6. An example of the measured frame linear accelerations while driving the vehicle

полицейский» и удар в стенку. Обработка результатов измерения показала, что удар произошел в 6 час 59 мин 59 с и сила удара составила примерно 2,5 g, направление действия удара составило 57° к продольной оси модели. Проведенные отработочные испытания подтвердили правильность заложенных схемно-конструктивных решений и алгоритмов работы БИС КПД ТС.

Библиографический список

1. Ачильдиев, В.М. Бесплатформенные инерциальные блоки на основе микромеханических датчиков угловой скорости и линейного ускорения / В.М. Ачильдиев / – М.: МГУЛ, 2007, С. 162–175.
2. Патент РФ № 2382986 Способ и система измерения уклонов для позиционирования объектов / В.А. Солдатенков, Ю.К. Грузевич, В.М. Ачильдиев, В.Н. Беликова, М.А. Лисов, С.С. Рязанов – опубл. 27.02.2010, Б.И. № 6.
3. Патент РФ на полезную модель № 130691 Датчик критических углов с индикатором / В.А. Солдатенков, Ю.К. Грузевич, В.М. Ачильдиев, А.Д. Левкович, А.А. Недодаев, В.С. Трифонов, С.А. Никитина. – опубл. 27.07.2013, Б.И. № 21.
4. Патент РФ на полезную модель № 130692 Устройство для измерения уклонов при монтаже ступенчатой оснастки. / В.А. Солдатенков, Ю.К. Грузевич, В.М. Ачильдиев, А.Д. Левкович, А.А. Недодаев, В.С. Трифонов, С.А. Никитина – опубл. 27.07.2013, Б.И. № 21.
5. Патент РФ № 2445586 Способ измерения веса груза и загрузки транспортного средства и бортовая измерительная система для его осуществления. / В.А. Солдатенков, Ю.К. Грузевич, В.М. Ачильдиев. – опубл. 23.03.2012, Б.И. № 8.
6. Патент РФ № 2480834 Бортовое устройство и способ контроля параметров движения транспортного средства при дорожном транспортном происшествии. / В.А. Солдатенков, Ю.К. Грузевич, В.М. Ачильдиев, И.А. Роднова, Л.В. Грызлова. – опубл. 27.04.2013, Б.И. № 12.
7. ОАО «Русские Навигационные Технологии» Бортовой блок AT10 http://www.autotracker.ru/upload/iblock/658/Technicheskie_charakt_AT-10.pdf.
8. N. Borbour, J. Connely, J. Gilmore, P. Greif, A. Kourpenis, M. Weinberg. Microelectromechanical Instruments And Systems Development At Draper Laboratory. 3-rd Saint-Petersburg International Conference On Integrated Navigation Systems. May 28-29, 1991.
9. Harvey Weinberg, Accelerometers – FANTASY and REALITY, Analog Dialogue, v.33, 1999.
10. Mark Pedley Tilt Sensing Using a Three-Axis Accelerometer. Application Note: http://www.freescale.com/files/sensors/doc/app_note/AN3461.pdf.

MEASURING INFORMATION SYSTEMS BASED ON MICROMECHANICAL SENSORS

Soldatenkov V.A., SPA Geofizika-NV, Dr. Sci. (Tech.); **Gruzevich U.K.**, SPA Geofizika-NV, Ph.D (Tech.); **Achildev V.M.**, SPA Geofizika-NV, Ph.D (Tech.); **Levkovich A.D.**, SPA Geofizika-NV; **Rodnova I.A.**, SPA Geofizika-NV; **Evsheva U.N.**, SPA Geofizika-NV

geomnems@gmail.com, levzver@gmail.com, rodnovairina@mail.ru, sun51188@gmail.com
Scientific-Production Association Geofizika-NV 107076, Moscow, Matrosskaya Tishina Street, 23, p. 2

Various MEMS gyroscopes and accelerometer based devices, namely inclinometers for different applications, the system for weighing the load of the trucks and on-board measuring system for controlling the motion parameters of the vehicle have been researched. The flowcharts of the described devices are provided, as well as their appearance and mathematical models. The expressions for calculation of the slope angles while the measured values of the acceleration vector of free fall on sensitivity axis are given, the technical characteristics of the developed inclinometers are provided. The cargo measurement system in the body of the vehicle consists of three inclinometers – a front peripheral inclinometer, a rear peripheral inclinometer and a base inclinometer, the connection unit and an onboard computing unit of the system. The CAN inclinometers are connected to the bus network through the connection unit which is linked to the onboard computing unit. A peripheral inclinometer is installed on the frame of the vehicle at a point forward of the maximum front deflection of the frame, and rear peripheral inclinometer is installed at a point forward of the maximum back deflection of the frame. A base inclinometer is installed at the point of the minimum deflection of the frame. An onboard measuring system for controlling the motion parameters of the vehicle is intended for measuring the parameters of the moving vehicle: linear acceleration, angular velocity, speed, coordinates, cyclic recording of the measured parameters and transmission to the remote control or external drive for subsequent processing. The recorded data is used to recover the spatial trajectory and for the analysis of the causes of road accidents, determining the current vehicle location on the route or in case of theft of the vehicle. In addition, the system allows to determine the geometric parameters of the road (slope, the radii of curvature of the roadway and the pavement quality (evenness, pits, grip) by processing the measured values of the projections of the linear accelerations and angular velocities.

Keywords: micromechanical gyroscope, accelerometer, inclinometer

References

1. Achildev V.M. *Besplatformennye inertial'nye bloki na osnove mikromekhanicheskikh datchikov uglovy skorosti i lineynogo uskoreniya* [Strapdown inertial blocks based on the micromechanical sensor of angular velocity and linear acceleration]. Moscow: MSFU, 2007, p. 162-175.
2. *Patent RF № 2382986 Sposob i sistema izmereniya uklonov dlya pozitsionirovaniya ob"ektov* [Patent RU № 2382986 Method and system for measurement of slopes for positioning of objects] Soldatenkov V.A., Gruzevich Y.K., Achildev V.M., Belikova V.N., Ryazanov S.S. Publ. 27.02.2010, B. I. No. 6.
3. *Patent RF na poleznuyu model' № 130691 Datchik kriticheskikh uglov s indikatorom* [Patent RU for useful model № 130691 Sensor of critical angles with the indicator] Soldatenkov V.A., Gruzevich Y.K., Achildev V.M., Levkovich A.D., Nedodaev A.A., Trifonov V.S., Nikitina, S.A. Publ. 27.07.2013, B. I. No. 21.
4. *Patent RF na poleznuyu model' № 130692 Ustroystvo dlya izmereniya uklonov pri montazhe stapel'noy osnastki* [Patent RU for useful model № 130692 Device for measuring gradients at the mounting pile of snap] Soldatenkov V.A., Gruzevich Y.K., Achildev V.M., Levkovich A.D., Nedodaev A.A., Trifonov V.S., Nikitina S.A. Publ. 27.07.2013, B. I. No. 21.
5. *Patent RF № 2445586 Sposob izmereniya vesa gruzha i zagruzki transportnogo sredstva i bortovaya izmeritel'naya sistema dlya ego osushchestvleniya* [Patent RU № 2445586 Method of measurement of the weight and load of the vehicle and on-Board measuring system for its implementation] Soldatenkov V.A., Gruzevich Y.K., Achildev V.M. Publ. 23.03.2012, B. I. No. 8.
6. *Patent RF № 2480834 Bortovoe ustroystvo i sposob kontrolya parametrov dvizheniya transportnogo sredstva pri dorozhnom transportnom proisshestvii* [Patent RU № 2480834 Onboard device and method for control over vehicle parameters in accidents] Soldatenkov V.A., Gruzevich Y.K., Achildev V.M., Rodnova I.A., Gryzlova L.V. Publ. 27.04.2013, B. I. No. 12.
7. *OAO «Russkie Navigatsionnye Tekhnologii» Bortovoy blok AT10* [JSC «Russian Navigation Technologies» on-Board unit AT10] http://www.autotracker.ru/upload/iblock/658/Technicheskie_charakt_AT-10.pdf
8. N. Borbour, J. Connely, J. Gilmore, P. Greif, A. Kourpenis, M. Weinberg. Microelectromechanical Instruments And Systems Development At Draper Laboratory. 3-rd-Saint-Petersburg International Conference On Integrated Navigation Systems. May 28-29, 1991.
9. Harvey Weinberg, Accelerometers – FANTASY and REALITY, Analog Dialogue, v.33, 1999.
10. Mark Pedley Tilt Sensing Using a Three-Axis Accelerometer. Application Note: http://www.freescale.com/files/sensors/doc/app_note/AN3461.pdf