

## **Интегрированная навигационная система наземного транспортного средства**

Новиков П.В., к.т.н. доц. Новиков В.В., д.т.н. проф. Шейпак А.А.  
Университет машиностроения  
NovikoF\_08@mail.ru.

*Аннотация.* В данной статье рассматривается пример практической реализации интегрированной навигационной системы, предназначенной для определения местоположения автопогрузчика в рамках решения проблемы оптимизации грузоперевозок. Описывается принцип работы, конструктивные особенности и характеристики аппаратных компонентов навигационной системы. Приводятся результаты натурных испытаний системы, установленной на наземном транспортном средстве.

*Ключевые слова:* транспортное средство, навигационная система, одометр, микромеханика, приемник Глонасс.

### **Введение**

Стремительное развитие техники и технологий в последние десятилетия открыло возможности для успешного решения широкого круга задач навигации подвижных объектов - определения их местоположения и параметров движения при помощи разнообразных устройств, располагаемых как на борту самих объектов, так и вовне их. Задачи такого рода возникают не только в авиации, ракетостроении и флоте, но и в наземном транспорте.

В течение долгого времени расширение области применения навигационных систем сдерживалось их высокой стоимостью, а так же сложностью глобального развертывания внешних сегментов этих систем, в том числе орбитальных группировок навигационных спутников. Однако освоение новых и совершенствование существующих методов навигации сделали навигационные устройства доступным для повсеместного использования.

Особого внимания заслуживают комплексированные системы инерциальной и спутниковой навигации. Комплексирование спутниковых навигационных систем (СНС) второго поколения (GLONASS, GPS) с инерциальными средствами является эффективным способом построения поколения систем высокоточной навигации. Многообразие возможных областей применения таких систем обуславливает неоднозначность критериев выбора их элементов, типа и режима работы аппаратуры потребителя СНС, набора инерциальных датчиков и устройств для построения полномасштабной инерциальной навигационной системы, а также вычислительных средств, реализующих алгоритмы комплексирования.

Несмотря на успехи, достигнутые в области создания интегрированных навигационных систем, проблема построения универсальной системы, характеристики которой были бы в равной мере приемлемыми для любых объектов-носителей, на данный момент остается нерешенной.

Внедрению комплексированных навигационных систем в серийное и массовое производство препятствуют, как правило, малая точность определения координат в условиях городской среды, высокая стоимость и зачастую неприемлемые для практического применения значения массогабаритных параметров системы. Жесткие требования к стоимости, массе и габаритам навигационного комплекса транспортного средства определяют выбор в пользу инерциальной системы, построенной на основе микромеханических гироскопов и акселерометров. Однако, чувствительные элементы такого класса обладают настолько высоким уровнем собственных погрешностей, что применение классических алгоритмов коррекции показаний инерциальной части на основе информации, поступающей от приемника спутниковой навигационной системы, становятся затруднительными, поэтому встает задача синтеза специализированного алгоритма интегрированной навигационной системы транспортного

средства [4, 5, 6].

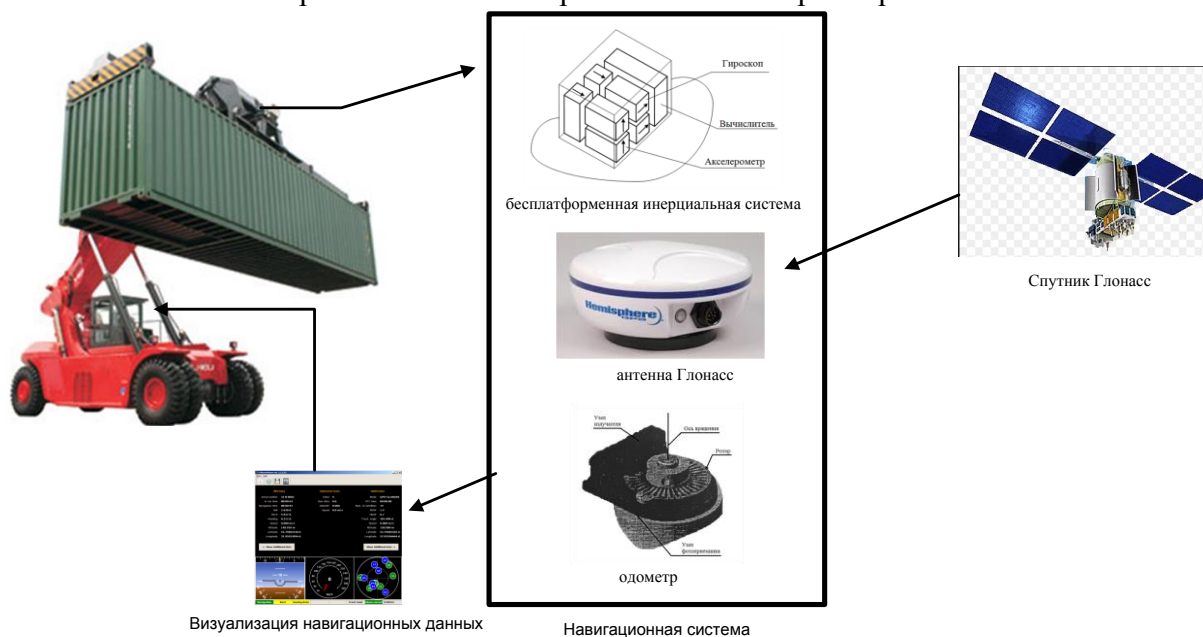
К классу специфических транспортных средств относится автопогрузчик, работающий в сложных навигационных условиях, например на территории морского порта. Перемещение транспорта по территории морского порта проходит в узких пространствах - «каньонах», ограниченных грузовыми контейнерами, установленными один на один, что приводит к частым перебоям в работе приемника Глонасс.

В рамках проблемы оптимизации грузоперевозок на территории морского порта возникает потребность в определении местоположения автопогрузчиков, транспортирующих контейнеры с грузом. При этом погрешность навигации в среднеквадратическом смысле должна быть сопоставима с габаритами стандартного контейнера (12х2,4х2,6) м.

В данной статье рассматриваются принципы формирования и комплексирования элементной базы системы, конструктивные черты и характеристики отдельных аппаратных составляющих навигационного комплекса, предназначенного для определения местоположения автопогрузчиков, транспортирующих контейнеры с грузом на территории морского порта и позволяющего обеспечить заданную точность решения навигационной задачи.

### Состав комплексной инерциально-спутниковой навигационной системы автопогрузчика

В состав комплексной инерциально-спутниковой навигационной системы (рисунок 1) входят отдельно и непрерывно функционирующие автономная бесплатформенная инерциальная навигационная система (БИНС), высокоточный приемник GPS, одометр, многоканальное вычислительное устройство, реализованное на микропроцессорах. Элементную базу БИНС составляют микромеханические гироскопы и акселерометры.

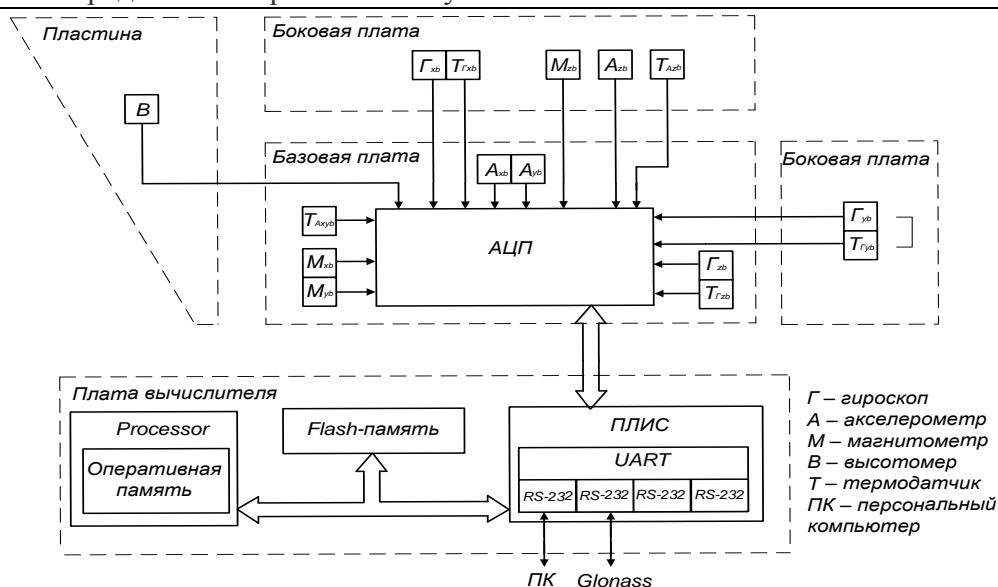


**Рисунок 1. Автопогрузчик, оснащенный комплексированной навигационной системой**

В состав системы в целом входят следующие основные устройства:

- три датчика угловой скорости – вибрационных гироскопа Analog Devices ADXRS-300;
- два двухканальных датчика линейного ускорения – акселерометра Analog Devices ADXL-210, Магнитометр;
- барометрический высотомер;
- аналого-цифровые преобразователи сигналов (АЦП);
- цифровой вычислитель на основе сигнального процессора Analog Devices ADSP-2188M и программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС) семейства Altera Cyclone EP1C3.

Структурная схема предлагаемой инерциальной системы приведена на рисунке 2.



**Рисунок 2. Структурная схема интегрированной инерциальной системы**

На базовой плате расположены схема ввода-вывода информации; датчик-гироскоп вертикальной оси; датчик-акселерометр продольной и поперечной осей; датчик-магнитометр продольной и поперечной осей; датчик температуры акселерометров продольной и поперечной осей; микросхемы АЦП сигналов датчиков. На боковых платах расположены датчики-гироскопы продольной и поперечной осей; датчик-акселерометр вертикальной оси; датчик-магнитометр вертикальной оси; датчик температуры акселерометра вертикальной оси. На плате вычислителя находятся микросхемы процессора, ПЛИС и вспомогательные микросхемы. На треугольной пластине установлен датчик высоты. Информация с датчиков в аналоговом виде поступает в АЦП на базовой плате и после перевода в цифровой код передается в вычислитель. В вычислителе сигналы датчиков преобразуются с учетом их калибровочных параметров и параметров температурной коррекции, а затем в соответствии с любым выбранным и введенным в память вычислителя алгоритмом обрабатываются совместно с данными спутниковой навигационной системы и других внешних источников информации, поступающих в вычислитель через схему ввода-вывода на базовой плате.

Принцип инерциальной навигации [1, 2] сводится к решению задачи счисления пройденного пути при помощи двукратного интегрирования ускорения объекта, измеренного установленными на нем чувствительными элементами – акселерометрами. Обобщенную схему построения комплексированной системы поясняет рисунок.

Категория точности применяемых чувствительных элементов накладывает существенные ограничения на выбор возможных способов интеграции инерциального и спутникового компонентов навигационной системы, а архитектура микропроцессора, на основе которого построен вычислитель системы, оказывает прямое влияние на структуру программного обеспечения.

При решении задач навигации наземных транспортных средств в целях повышения точности определения скорости и координат в качестве дополнительного источника данных может применяться одометр – устройство, измеряющее путь, пройденный транспортным средством, или его приращение за некоторый интервал времени [2]. Принцип действия одометра заключается в измерении угла поворота колеса или вала трансмиссии транспортного средства и преобразования этого числа в величину пройденного пути. На сегодняшний день создан ряд автомобильных навигационных систем, включающих одометр наряду с инерциальным измерительным блоком и приемником системы спутниковой навигации [3]. Тем не менее, большинство таких систем существует лишь в виде моделей. Внедрению этих систем в серийное и массовое производство препятствуют, как правило, малая точность определения координат в условиях городской среды и высокая стоимость.

Построение интегрированных навигационных систем на базе элементов, выполненных

с использованием микромеханических элементов, в сочетании с синтезом специализированного алгоритмического и программного обеспечения, позволит решить задачу обеспечения грузоперевозок специфическими транспортными средствами, к числу которых относится автопогрузчик. Приведем технические и эксплуатационные характеристики элементов БИНС, а также поясним принципы и структуру построения вычислительного устройства предлагаемой системы.

**Гироскопы ADXRS-300.** Датчик угловой скорости ADXRS-300, разработанный и производимый компанией Analog Devices, представляет собой вибрационный гироскоп, выполненный по микромеханической технологии iMEMS [4]. Основным элемент 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.

**Акселерометры ADXL-210.** Двухканальный датчик линейного ускорения – акселерометр ADXL-210 производства компании Analog Devices – выполнен по микромеханической технологии iMEMS [4]. Весь кристалл акселерометра размером (3,05×3,05) мм занят главным образом схемами формирования сигнала, которые окружают миниатюрный датчик ускорения размером (1×1) мм, 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 кристалла в воздухе на поликремниевых столбиках-анкерах, приваренных к кристаллу.

В действительности датчик имеет 54 элементарных ячейки для измерения ускорения, но для простоты рисунок показывает только одну ячейку. Чувствительная масса датчика ускорения при изменении скорости движения кристалла смещается относительно остальной части кристалла. Ее пальцеобразные выступы образуют подвижную обкладку конденсатора переменной емкости. С каждого конца эта структура опирается на столбики-анкеры, аналогичные по конструкции держателям неподвижных обкладок. Растяжки у краев чувствительной массы служат ее подвесом, ограничивающим перемещение массы и обеспечивающим ее возврат в исходное положение. При наличии ускорения сила инерции уравнивается силой упругости подвеса.

У акселерометра ADXL-210 есть система автотестирования. Из 54 элементарных ячеек датчика всего 42 ячейки используются в схеме измерения ускорения. Оставшиеся 12 ячеек служат для автотестирования. Автотестирование реализуется подачей высокого логического уровня на соответствующий вывод микросхемы. Вариант ADXL-202E выпускается в миниатюрном безвыводном кристаллоносителе размером (5×5×2) мм.

Для удобства сопряжения с микроконтроллерами выходные сигналы представляют собой импульсы прямоугольной формы постоянной частоты. Информация об ускорении отображается скважностью импульсов.

**Сигнальный микропроцессор ADSP-2188.** Процессоры группы ADSP, которые разработала фирма Analog Devices, – это 16-разрядные процессоры цифровой обработки сигналов, необходимые для использования в системах связи, измерительных приборах, системах

автоматизации промышленного производства, в военной и медицинской технике. Процессор ADSP-2188M [8] реализован на принципах расширенной гарвардской архитектуры и состоит из высокопроизводительного ядра и шины: памяти программы (Program Memory, PM), памяти данных (Data Memory, DM), прямого доступа к памяти (Direct Memory Access, DMA). Все машинные команды выполняются в ядре за один цикл. Шины необходимы для передачи необходимого потока данных для поддержания требуемой производительности.

Функциональная схема процессора, включает следующие составляющие: вычислительное устройство – умножитель-аккумулятор, арифметико-логическое устройство, устройство сдвига; программный автомат и связанные с ним генераторы адреса данных DAG1 и DAG2; запоминающее устройство; внешние порты, необходимые для обеспечения интерфейса с внешней памятью и периферийными устройствами; синхронные последовательные порты SPORT0 и SPORT1.

На кристалле ADSP-2188M располагаются шины памяти программы, используя которую можно получить доступ как к данным, так и к командам. Процессор может выполнять действия над двумя операндами используя эти шины (один операнд – из памяти программы, второй – из памяти данных) по команде, подготовленной программным автоматом.

Шины процессора соединены с его внешним портом, который реализует интерфейс с устройствами ввода-вывода, отображаемыми в адресное пространство, внешней памятью и памятью начальной загрузки

Элемент ADSP-2188M удовлетворяет основным требованиям, которые предъявляются к сигнальным процессорам – высокая скорость арифметических вычислений, организация постоянного потока данных в вычислительные устройства и из них; высокая точность устройств, производящих вычисления; наличие двух генераторов адреса и поддержка циклических буферов, эффективная работа программного автомата.

Гибкая архитектура и полный набор команд процессора ADSP-2188M позволяют одновременно выполнять несколько команд.

Процессор состоит из трех вычислительных модулей: умножитель-аккумулятор, арифметико-логический модуль, устройство сдвига. Все вычислительные модули работают с 16-разрядными данными и имеют возможность обеспечения вычислений с высокой точностью. Арифметико-логический модуль поддерживает стандартный набор арифметических и логических операций. В умножителе за один цикл выполняются операции умножения, умножения со сложением, умножения с вычитанием. Он имеет два 40-разрядных аккумулятора, позволяющих сохранить данные при переполнении результата. В модуле сдвига выполняются операции логического и арифметического сдвигов, нормировки и денормировки, а также операция определения порядка. Устройство сдвига способно обрабатывать различные числовые форматы, включая многословные представления чисел.

Два генератора адреса данных обеспечивают адресацию для одновременной выработки двух операндов (из памяти данных и памяти программы). Каждый генератор хранит и обновляет четыре 16-разрядных адресных указателя. Любой из этих указателей может быть до или после выполнения команды модифицирован значением, хранящимся в одном из четырех регистров модификации. Значения, хранящиеся в регистрах длины и базового адреса, могут быть связаны с произвольным указателем, что создает условия для выполнения автоматической адресации по модулю, необходимой для реализации циклического буфера.

Процессор обрабатывает 16-разрядные данные в целом и дробном форматах, в дополнительном коде и беззнаковые. Между внутренними вычислительными устройствами ядра процессор перемещает 40-разрядные данные повышенной точности, ограничивая тем самым ошибку округления промежуточных результатов.

На кристалле процессора ADSP-2188M помещена оперативная память объемом 2 Мбит, которая включает 49150 24-разрядных слова памяти программы и 57344 16-разрядных слова памяти данных. Особенностью логической организации оперативной памяти является ее разделение на страницы (оверлеи). Все страницы проецируются в один и тот же фрагмент адресного пространства памяти программы при памяти данных. Переключение страниц осу-

ществляется записью номера страницы в специальные регистры процессора PMOVLAY и DMOVLAY.

В вычислителе комплексированной инерциальной системы в качестве внешнего запоминающего устройства используется микросхема твердотельной полупроводниковой энергозависимой перезаписываемой памяти (flash-памяти) Am29LV03C, которую разработала компания AMD. Схема выполнена по технологии «комплементарный металл – оксид - полупроводник» (КМОП), имеет емкость 32 Мбит и разделена на 64 сектора по 512 кбит.

Два последовательных порта процессора обеспечивают синхронный полнодуплексный последовательный интерфейс. Интерфейс поддерживает большое количество режимов приема и передачи данных с синхронизацией и без нее.

**Приемники спутниковой системы GPS Crescent A-100 и Smart-VI.** В состав интегрированной навигационной системы входит высокоточный приемник системы GPS Crescent A-100 разработанный компанией Hemisphere GPS, либо Smart-VI производства компании NovAtel.

**Одометр.** Для определения приращения пути, пройденного транспортным средством, применяется одометр – устройство, для которого измеряемой величиной служит угол поворота колеса или вала трансмиссии. Основой цифрового одометра, входящего в состав интегрированной навигационной системы, служит оптический кодовый датчик положения, содержащий ротор – прозрачный диск с нанесенными на нем в радиальном направлении непрозрачными полосами (или непрозрачный диск с радиальными прорезями), а также пару из излучателя и фотоприемника, размещенных по противоположные сиороны от ротора.

Электронная схема, смоделированная на основе ПЛИС в составе вычислителя инерциальной системы, и специальный алгоритм обработки выходного сигнала ПЛИС позволяют получить длительность интервала времени, отделяющего фронты двух подряд идущих импульсов кодового датчика одометра. Величина, обратная этой длительности, служит мерой частоты вращения колес и, следовательно, скорости транспортного средства.

При вращении ротора последовательности импульсов напряжения на выходах двух фотоприемников будут идентичными, но смещенными во времени одна относительно другой на величину знак которой несет информацию о направлении вращения.

### Эксперимент

Приводятся результаты наземных испытания комплексированной навигационной системы, установленной на автомобиле Renault Scenic 2. Навигационная система испытывалась на территории России в период со 2-го по 21-е марта 2013 года.

### Используемое оборудование

Оборудование для испытаний состояло из следующих компонентов: комплексированная навигационная система с приемником Navis-08 GNSS (GLONAS + NAVSTAR), встроенная в корпус навигационной системы, навигационная система «БИНС-Тек», построенная на базе волоконнооптических гироскопов, которая использовалась в качестве опорной системы, автомобильный диагностический адаптер Bluetooth OBD EML 327, подключенный к диагностическому порту автомобиля таким образом, что все навигационное решение рассчитывалось в вычислителе комплексированной навигационной системы в режиме реального времени, а также ноутбук с программным обеспечением для приема скорости от Bluetooth OBD EML 327 и передачей в дополнительный порт навигационной системы, оснащенный программным обеспечением для приема, отображения и сохранения данных с навигационной системы.

Комплексированная навигационная система была установлена в салоне автомобиля вблизи от его центра масс. Автомобильный диагностический адаптер был подключен в диагностический порт автомобиля. Антенна приемника Navis-08, установленного в навигационную систему была размещена в верхней части атомобиля, непосредственно под панорамным люком. Навигационная система «БИНС-Тек» работала в режиме коррекции своих показания от информации встроенного GNSS приемника Navis-08.

Для получения текущей скорости автомобиля компанией было разработано специальное программное обеспечение, способное отсылать специально сформированный пакет данных в диагностический адаптер Bluetooth OBD EML 327 и получать в ответ пакет данных с текущим значением скорости автомобиля. На текущий момент программным обеспечением микроконтроллера поддерживаются все основные стандарты взаимодействия: ISO 15765-4, SAE J1939, ISO 9141-2, ISO 14230-4, SAE J1850 PWM/VPW.

После получения информации о скорости, программное обеспечение отправляло данное значение в дополнительный порт RS-232 комплексированной навигационной системы. Частота поступления данных о скорости автомобиля в условиях проводимого эксперимента составляла порядка 10 Гц.

Для отображения навигационных данных с комплексированной навигационной системы использовалось бесплатное программное обеспечение CNDataViewer. Программное обеспечение CNDataViewer отображает основные параметры навигационной системы, а также позволяет производить запись всех поступающих от навигационной системы данных в бинарный файл для последующего анализа.

### Условия проведения экспериментов

Для проверки точности комплексированной навигационной системы в общей сложности было выполнено 3 заезда - первый заезд из г. Балашиха в д. Полтево (Раменский район) и обратно в г. Балашиха (общая длина пройденного пути составила 47500 м), Второй заезд из г. Балашиха в д. Хрипань (Раменский район). и обратно в г. Балашиха (общая длина пройденного пути составила 71500 м), третий заезд из г. Балашиха в д. Пласкинино (Раменский район) и обратно в г. Балашиха (общая длина пройденного пути составила 121800 м). Скорость движения в каждом из заездов не превышала 110 км/час.

### Результаты экспериментов

Статистическая обработка результатов испытаний комплексированной навигационной системы (таблица 1), позволяют сделать вывод о том, что достигнутые точностные показатели следует признать высокими для данного класса приборов. Ошибки координат навигационной системы возникают в условиях длительного отсутствия сигнала СНС.

Таблица 1

№	Время движения без коррекции, с	Ошибка по координатам, м	Пройденный путь, м	Ошибка пройденного пути, %
1	682 (11 минут 22 секунды)	400	12930	3,09
2	658 (10 минут 58 секунд)	500	12250	4,08
3	674 (11 минут 14 секунд)	280	9470	2,95
4	740 (12 минут 20 секунд)	390	6200	6,29
5	693 (11 минут 33 секунды)	100	9950	1,00
Мат. ожидание				3,48

### Заключение

В статье представлены результаты разработки недорогой навигационной системы, способной определять местоположение определенного класса транспортных средств с заданной точностью; предложена аппаратная реализация системы, способной реализовать разработанный навигационный алгоритм. Испытания интегрированной навигационной системы продемонстрировали ее высокие точностные характеристики, подтвердив тем самым справедливость заложенных в ее основу концепций.

Дальнейшее совершенствование системы может вестись по следующим направлениям: переход к использованию более точных датчиков угловой скорости с разработкой варианта системы усеченного состава (гироскоп вертикальной оси, приемник системы Глонасс,

одометр, вычислитель); поиск более надежных алгоритмических критериев качества спутникового навигационного решения, на основе которых осуществляется коррекция показаний системы; освоение технологий крупносерийного и мелкосерийного производства.

Решение этих задач позволит создать интегрированную наземную навигационную систему, отвечающую требованиям широкого круга потенциальных заказчиков и обладающую значительными конкурентными преимуществами в сегменте рынка навигационной техники для специальных транспортных средств.

### Литература

1. Salychev O.S. Applied Inertial Navigation: Problems and Solutions – М.: BMSTU Press, 2004
2. Salychev O.S. MEMS-based Inertial Navigation: Expectation And Reality – М.: BMSTU Press, 2012
3. Hemerly E.M. Schad V.R. Implementation of a GPS/INS/Odometer, 2008
4. Novikov V.V., Novikov P.V. & Gerdy V.N. The hardware structure of the navigation system. Proceeding of the 13<sup>th</sup> International Conference on Advanced Engineering, Computer Aided Design and Manufacturing CADAM 2015, Croatia, September 15<sup>th</sup> – 19<sup>th</sup>, 2015, pp. 39 – 43.
5. Sheypak A.A. & Novikov P.V. Specialized alternative algorithm for determining the location of hydraulic lift. Proceeding of the 13<sup>th</sup> International Conference on Advanced Engineering, Computer Aided Design and Manufacturing CADAM 2014, Croatia, September 16<sup>th</sup> – 20<sup>th</sup>, 2015, pp. 59 – 63.
6. Sheypak A.A. & Novikov P.V. Determining the location of hydraulic lift by specialized alternative. International journal Advanced Engineering, 8<sup>th</sup> Year (2014), ISSN 1846-5900, pp. 97 – 105.

### **Влияние конструктивных решений на повышение пассивной безопасности кузовов автобусов**

д.т.н. проф. Орлов Л.Н., Рогов П.С., к.т.н. доц. Тумасов А.В.  
*Нижегородский Государственный Технический Университет им. Р.Е. Алексеева,*  
 (831) 436-73-63, *anton.tumasov@gmail.com*

*Аннотация.* В статье проводится анализ влияния отдельных типов силовых элементов кузова автобуса на эффективность поглощения энергии удара в условиях опрокидывания в соответствии с Правилами ЕЭК ООН №66. Отмечаются способы соединения не несущих элементов с кузовом, которые способствуют повышению пассивной безопасности автобуса. Приводятся результаты экспериментального исследования влияния панелей обшивки на энергоемкость кузова вахтового автобуса.

*Ключевые слова:* пассивная безопасность, автобус, энергоемкость, эксперимент, кузов.

Пассивная безопасность автобусов во многом обеспечивается конструкцией кузова и особенностями его силовой схемы. В каркасных конструкциях силовая схема включает в себя элементы каркаса и обшивки, двери, поручни и их стойки, перегородки салона, каркасы сидений, колёсные арки, надстройку пола и в определённой мере – оконные стёкла. Поэтому при проектировании автобуса важно знать степень влияния перечисленных элементов и способов их крепления на повышение его безопасности [1, 2].

Каркасу кузова принадлежит важная роль в восприятии аварийной нагрузки. Им поглощается основная часть энергии удара в условиях опрокидывания автобуса с уступа [3, 4], регламентированных Правилами ЕЭК ООН №66. Конкретное значение этой энергии зависит от его силовой схемы, соотношения жесткостей отдельных элементов и способов их соединения. Рациональной с точки зрения безопасности является силовая схема, состоящая из поперечных силовых сечений кузова, замыкающихся на основании и соединённых между собой отдельными промежуточными продольными элементами боковин и крыши, подобная той, которая показана на рисунке 1.