

УДК 621.317.39.084.2

Разработка алгоритмов обработки информационного сигнала и реализация комбини-рованного датчика удара, наклона и движения на основе 3-осевого MEMS- акселерометра

Васюков С. А.^{1,*}

[*sa_vasyukov@mail.ru](mailto:sa_vasyukov@mail.ru)

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

В статье приведены, разработанные автором алгоритмы обработки сигнала MEMS-акселерометра ADXL-345, применяющиеся в комбинированных датчиках удара, наклона и движения автосигнализации Excellent. Рассмотрены алгоритмы цифровой фильтрации сигнала, выбора пороговых значений, при которых происходит срабатывание датчиков, вопросы обеспечения температурной стабильности характеристик и алгоритм, исключающий «ложные срабатывания» по зоне тревоги. Приведены рекомендации по технической реализации алгоритмов на PIC-микроконтроллерах. Рассмотрены варианты размещения акселерометра на электронных платах главного модуля и трансивера сигнализации Excellent, а также особенности монтажа датчиков в автомобиле.

Ключевые слова: датчик удара, датчик наклона, датчик движения, автосигнализация, MEMS-акселерометр

Введение

Охранные комплексы, устанавливаемые в качестве дополнительного оборудования на современные автомобили, ввиду большого объема решаемых задач являются сложными микропроцессорными устройствами [1,2]. Очень редко такие устройства строятся по однопроцессорному принципу, когда на единственный процессор главного модуля сигнализации возлагаются алгоритмы обработки сигналов радиоканала, информации с датчиков, CAN-шины автомобиля, GSM и GPS устройств. Чаще всего построение идет по модульному принципу, когда основу комплекса составляет микропроцессорный главный модуль, к которому по цифровой шине подключаются микропроцессорные периферийные устройства: датчик удара, микроволновый датчик, модуль дистанционного запуска, приемопередатчик (трансивер), GSM-пейджер, CAN-модуль.... Модульная структура позволя-

ет построить гибкий охранный комплекс, возможности которого наращиваются в соответствии с пожеланиями пользователя.

Среди проектировщиков охранных систем считается негласным стандартом наличие в составе сигнализации микропроцессорного датчика удара. До недавнего времени датчики удара выполнялись в виде отдельного устройства, помещенного в пластиковый корпус и обменивающегося информацией с главным модулем или по отдельным линиям [3], или по цифровым шинам [4,5]. Эти устройства имели чувствительные элементы пьезоэлектрического, микрофонного или электромагнитного типа и, как показано в [5], обладали рядом существенных недостатков. Перспективным в этом плане считается применение в качестве ЧЭ датчиков трехосевых акселерометров, выполненных по MEMS-технологии [7,8,9]. Это позволяет реализовать на одном ЧЭ кроме датчика удара, еще и датчики наклона и движения.

Проектированием датчиков с MEMS-акселерометрами занимались фирмы Mobile Electronics (датчик Spider-TMS2), Magic Systems (датчик MS-TL4s), Полярный Волк (датчик КРЕН-2), фирмы Starline, Alarm Trade и некоторые другие. Анализ публикаций, посвященных таким датчикам, показал их исключительно рекламный характер. Это объясняется секретами производства и нежеланием раскрывать алгоритмы работы. В публикациях не сформулированы требования к характеристикам применяемых MEMS-акселерометров. Нет достаточной ясности, что представляет собой информационный сигнал. Каков диапазон измеряемых ускорений, воздействующих на датчик, установленный в автомобиле, частотный спектр сигналов при ударе, наклоне и движении.

В связи с этим, автор статьи провел ряд экспериментов по исследованию информационного сигнала трехосевого акселерометра при различных воздействиях на автомобиль. Эти исследования приведены в работе [6] и содержат как результаты анализа информационного сигнала, так и общие рекомендации по его обработке и выбору акселерометра.

Опыт эксплуатации автомобильных сигнализаций с датчиками на MEMS-акселерометрах показал приемлемость основных заявленных характеристик:

- регистрация перемещений автомобиля в любом направлении;
- регистрация медленного наклона кузова;
- автоматическая адаптация к начальному наклону автомобиля;
- игнорирование вибраций от работающего двигателя, проезжающего транспорта, порывов ветра и других внешних воздействий, кроме перемещения и наклона.

Однако были выявлены и недостатки, основным из которых является наличие «ложных срабатываний» по зоне тревоги датчика. Для пользователя сигнализации это заключалось в том, что с интервалом в две-три недели, без видимых причин, чаще всего в ранние утренние часы происходило срабатывание сигнализации с включением sireны и оповещения на автомобильный пейджер.

Исходя из сказанного выше, для реализации комбинированного датчика удара, наклона и движения необходимо решить ряд актуальных задач:

- разработать алгоритмы фильтрации и логической обработки информационного сигнала, позволяющие реализовать на одном акселерометре функции датчиков удара, наклона и движения;
- разработать и реализовать алгоритм обработки информационного сигнала по зоне тревоги (внутренней зоне) датчика удара, исключающий «ложные срабатывания»;
- предложить принципиальную электрическую схему комбинированного датчика и варианты технической реализации в составе охранного комплекса Excellent (торговая марка ООО Мэджик Ринг).

1. Обоснование алгоритмов фильтрации и обработки сигнала

1.1. Общие требования к комбинированному датчику и выбор MEMS-акселерометра

Так как датчик работает не самостоятельно, а в составе охранного комплекса Excellent, то к нему предъявляется ряд дополнительных требований кроме способности измерять удар, наклон и движение. Сигнализация Excellent строится по модульному принципу. Ее основу составляет главный модуль, к которому по цифровой шине подключаются периферийные устройства: датчик удара, микроволновый датчик, модуль дистанционного запуска, приемопередатчик (трансивер), GSM-пейджер, CAN-модуль.... Исходя из требований по преемственности структуры Excellent, а также с учетом желаемых технических характеристик, комбинированный датчик должен обеспечивать:

- отсутствие ложных срабатываний в условиях атмосферных и электромагнитных помех и самоадаптацию к повторяющимся воздействиям;
- независимость характеристик от ориентации датчика;
- температурную стабильность в диапазоне - 40 +70 С;
- измерение приращений угла наклона относительно установившегося положения кузова автомобиля с точностью не хуже 0,2 градуса и реализация на основе полученных измерений однозонового датчика наклона с цифровыми градациями настройки;
- измерение ударов по кузову (слабых и средней силы) и реализация на основе полученных измерений двухзонового датчика удара с цифровыми градациями настройки по зонам предупреждения и тревоги;
- фиксацию сильных ударов по кузову (авария автомобиля) и выдачу информации в шину;
- измерение скорости движения автомобиля и выдачу информации в шину при превышении установленного порога;
- взаимодействие с главным модулем Excellent по цифровой шине;
- низкую себестоимость при серийном производстве.

В настоящее время зарубежными производителями предлагается несколько десятков MEMS-акселерометров, позволяющих решить поставленные задачи. Приоритетом при выборе конкретного типа акселерометра является его доступность и низкая стоимость при

приемлемых для реализации поставленных задач технических характеристиках. В работе [6] по итогам экспериментальных исследований был предложен акселерометр ADXL345 [10]. Несмотря на то, что имеется несколько типов акселерометров с лучшими техническими характеристиками, стоимость этого акселерометра (порядка 0,9\$ при партии более 2000 шт.) имела в данном случае приоритетное значение.

ADXL345 имеет настраиваемый диапазон измеряемых ускорений от $\pm 2g$ до $\pm 16g$, чувствительность во всем диапазоне измерений не хуже $4 mg/LSB$, настраиваемую полосу пропускания до 1,6 кГц (предельная частота опроса 3200 Гц), цифровой выход (шины SPI и I²C), температурный диапазон от -40 до +85 С, габариты 3x5x1 мм. Предложено сконфигурировать следующие параметры акселерометра, обеспечивающие выполнение технического задания:

- диапазон измеряемых ускорений $\pm 16g$ (выбор диапазона определяется необходимостью измерений аварийных ударов);
- 13 разрядную сетку, обеспечивающую точность $4 mg/LSB$ во всем диапазоне ускорений (данная точность достаточна для измерения слабых ударов по кузову автомобиля и приращений наклона с точностью в 0,2 градуса);
- полосу пропускания 100 Гц (частота опроса ускорения 200 Гц); выбор определяется максимальной (порядка 50 Гц) частотой колебания кузова при ударе по автомобилю.

1.2. Алгоритмы обработки информационного сигнала при наклоне автомобиля

Датчик наклона опрашивается главным модулем в режиме полной охраны (вибрации кузова автомобиля отсутствуют). Ориентация осей акселерометра после установки сигнализации в автомобиль может быть любой. В невозмущенном состоянии по каждой оси акселерометра будут наблюдаться некоторые установившиеся углы наклона $\gamma_{x\text{ уст}}, \gamma_{y\text{ уст}}, \gamma_{z\text{ уст}}$, а акселерометр зафиксирует ускорения $a_{x\text{ уст}}(\gamma_{x\text{ уст}}), a_{y\text{ уст}}(\gamma_{y\text{ уст}}), a_{z\text{ уст}}(\gamma_{z\text{ уст}})$, пропорциональные этим углам, причем

$$g \leq a_{x\text{ уст}} \leq g, g \leq a_{y\text{ уст}} \leq g, g \leq a_{z\text{ уст}} \leq g; \sqrt{a_{x\text{ уст}}^2 + a_{y\text{ уст}}^2 + a_{z\text{ уст}}^2} = g, \quad (1)$$

где g – ускорение свободного падения.

Датчик наклона является сенсором, фиксирующим наклон охраняемого автомобиля при попытке кражи колес или эвакуации. При поддомкрачивании автомобиля углы наклона по любой оси относительно установившегося состояния изменяются не более чем на 3-4 градуса [6]. Следовательно, датчик должен срабатывать при немного меньших приращении углов наклона, например, в диапазоне 1-2 градусов (желательно, чтобы этот диапазон был регулируемым). Обработка информации ведется по каждой оси независимо, и датчик считается сработавшим, если по любой из осей произошло превышение предусмотренного порога. При этом в шину выдается информация о срабатывании датчика.

Наклон автомобиля до порогового значения (1-2 градуса) происходит десятки секунд, то есть полезный сигнал имеет частоту в сотые доли герца. С другой стороны, датчик наклона не должен реагировать на наклоны автомобиля от порыва ветра (естественные или от проезжающего мимо транспорта), частота которых составляет десятые доли – единицы герц.

Датчик не должен реагировать на изменение внешней температуры, приводящей к медленной флюктуации выходного сигнала акселерометра. Частота такого сигнала определяется скоростью нагрева (остывания) салона автомобиля и составляет тысячные доли герца.

Исходя из вышеперечисленных требований, разработан следующий алгоритм обработки информационного сигнала по оси x (рис. 1):

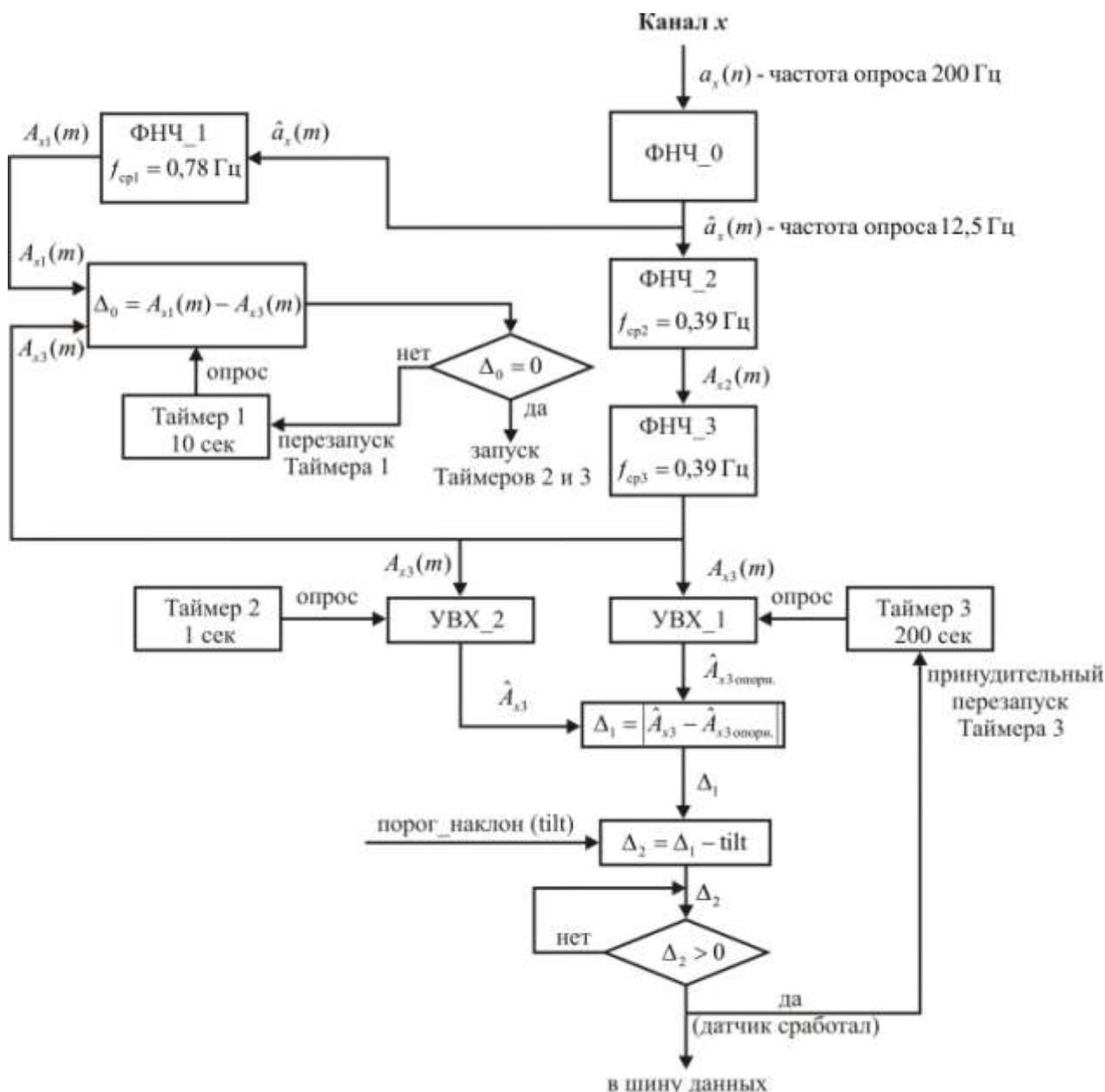


Рис. 1. Блок схема алгоритма обработки информационного сигнала при наклоне.

По осям y и z обработка происходит аналогичным образом.

Акселерометр выдает сигнал ускорения по трем осям $a_x(n), a_y(n), a_z(n)$ на шину SPI с частотой 200 Гц. Такая частота опроса необходима для измерения интенсивности удара. Для измерения наклона, где полезный сигнал изменяется с частотой в сотые – тысячные доли герца, достаточно полосы в единицы герц. Кроме того, входной сигнал содержит нежелательную шумовую составляющую. Для ограничения полосы пропускания и уменьшения шумов необходимо провести фильтрацию входного сигнала – ограничить полосу пропускания как снизу, для нечувствительности к медленным температурным флюктуациям, так и сверху, для исключения ложных срабатываний от порывов ветра. Другими словами, реализовать цифровой полосовой фильтр.

Вопросы линейной цифровой фильтрации хорошо изучены, и применить разработанные алгоритмы фильтрации к данной задаче больших проблем не составляет. На практике же следует учесть ряд моментов, налагающих ограничения на реализацию алгоритма обработки сигнала.

Из-за повышения себестоимости охранного комплекса не представляется целесообразным реализация комбинированного датчика, как отдельного устройства. Это требует затрат на изготовления корпуса и соединительного кабеля. Хотя необходимо отметить, что для датчика в виде небольшого отдельного модуля, гораздо легче найти место в салоне автомобиля, на которое адекватно передается удар по кузову. Снижение себестоимости требует объединения датчика с другими периферийными модулями сигнализации. Совмещение акселерометра с GSM-пейджером проблематично из-за высокого уровня помех в режиме передачи-приема GSM-сигнала. Установка акселерометра на плату главного модуля, как показал опыт эксплуатации, наименее удачный вариант, так как главный модуль чаще всего крепится к проводке автомобиля пластиковыми стяжками и сигнал удара плохо передается с кузова на главный модуль. Хорошим вариантом является помещение акселерометра на плату выносного приемо-передатчика (трансивера). Такой выносной модуль крепится на «липучке» к внутренней стороне лобового стекла, может совмещать в себе также светодиод и кнопку ввода персонального кода. Но в этом случае на процессор трансивера возлагается много задач, требующих обработки сигнала в реальном времени. Кроме сигнала ускорения с акселерометра это и организация радиоканала, предполагающая шифрование-дешифрование радиосигнала, и взаимодействие по шине с процессором главного модуля сигнализации, организация режима микро энергопотребления и другие задачи. Все это, в совокупности с основным требованием по низкой стоимости процессора, требует оптимизации ресурсов и приводит к необходимости написания программы на языке низкого уровня – ассемблере. Реализация на низко ресурсном процессоре на языке ассемблера цифровых фильтров высокого порядка, обеспечивающих на одном фильтре необходимую полосу пропускания и фильтрацию помех затруднительна ввиду сложности и накапливающихся (при вычислениях с фиксированной запятой) ошибок. Использование более дорогих процессоров позволило бы использовать стандартные программы цифровой

фильтрации на языке “С”, но это неприемлемо в данном случае, когда высокая конкуренция на рынке сигнализаций выдвигает требование наименьшей себестоимости.

С учетом рассмотренных ограничений целесообразно вместо цифрового полосового фильтра высокого порядка, обеспечивающего необходимую частотную характеристику, использовать набор последовательно включенных фильтров первого порядка. Каждый из таких фильтров реализуется в виде простого рекурсивного уравнения, когда отсчет выходного сигнала вычисляется как сумма входного сигнала и предыдущего выходного отсчета с соответствующими весовыми коэффициентами.

В представленном алгоритме входной сигнал проходит через несколько цифровых фильтров первого порядка.

Предварительная фильтрация

Фильтр ФНЧ_0 производит суммирование и осреднение 16 последовательно идущих отсчетов ускорения

$$\hat{a}_x(m) = \sum_{n=16m}^{16m+15} a_x(n). \quad (2)$$

Такую операцию нельзя отнести к классическому ФНЧ, но за счет осреднения снижается уровень шума, а частота отсчетов уменьшается до $200/16=12,5$ Гц. Полосу пропускания этого фильтра можно оценить примерно в 6 Гц. Дальнейшее ограничение полосы пропускания реализуется двумя одинаковыми последовательно включенными цифровыми фильтрами первого порядка ФНЧ_2 и ФНЧ_3, имеющими частоты среза 0,39 Гц. Рекурсивные уравнения фильтров имеют вид

$$\begin{aligned} A_{x2}(m) &= \alpha_2 \cdot A_{x2}(m-1) + (1 - \alpha_2) \cdot \hat{a}_x(m-1); \\ A_{x3}(m) &= \alpha_3 \cdot A_{x3}(m-1) + (1 - \alpha_2) \cdot A_{x2}(m-1); \\ \alpha_2 &= \alpha_3 = 0,96875. \end{aligned} \quad (3)$$

Выходной сигнал $A_{x3}(m)$ как раз и является низкочастотным, свободным от шумов сигналом, несущим информацию о приращении угла наклона автомобиля по оси x .

Условие неподвижности автомобиля

После постановки сигнализации в охрану необходима пауза в несколько десятков секунд для успокоения колебаний кузова и вычисления опорных уровней, относительно которых и будет вычисляться приращение угла наклона. Определение момента, когда кузов принял неподвижное угловое положение можно реализовать различными способами. Все они сводятся к тому, что за определенный промежуток времени, например, за 10 секунд, акселерометр не фиксирует никаких угловых воздействий на кузов (наклонов при оседании снега под колесами припаркованного автомобиля, наклонов от порывов ветра и др.) В самом простейшем случае можно взять несколько последовательных отсчетов сигнала $A_{x3}(m)$, и если они неизменны – считать угловое положение неподвижным и принять эти отсчеты за опорный уровень. Это, пожалуй, самый легкий по реализации способ изме-

рения. Недостаток заключается в том, что при наличии температурного дрейфа есть вероятность, что за промежуток измерения (10 секунд или 125 отсчетов) первый и последний отсчеты не совпадут, хотя автомобиль и будет неподвижным.

Для устранения этого недостатка предложено усложнить алгоритм определения неподвижности. Сигнал пропускается через фильтр ФНЧ_1 с частотой среза 0,78 Гц. Рекурсивное уравнение фильтра аналогично уравнениям, приведенным в (3)

$$A_{x1}(m) = \alpha_1 \cdot A_{x1}(m-1) + (1 - \alpha_1) \cdot \hat{a}_x(m-1); \alpha_1 = 0,9375. \quad (4)$$

Далее, в течение 10 секунд (время отсчитывается Таймером 1) происходит сравнение (рис. 1) сигналов $A_{x1}(m)$ и $A_{x3}(m)$. И если они за этот промежуток совпадают, то автомобиль считается неподвижным и происходит запуск Таймеров 2 и 3, обеспечивающих работу основной ветви алгоритма. Этот способ измерения исключает влияние температурных флюктуаций, так как сигналы $A_{x1}(m)$ и $A_{x3}(m)$ изменяются от температуры одинаково, а также гарантирует, что за время измерения (10 сек) не было наклонов от порывов ветра (эта составляющая содержалась бы в сигнале $A_{x1}(m)$, но отсутствовала в $A_{x3}(m)$).

Определение наклона

После определения факта неподвижности автомобиля запускается Таймер 3. При запуске этого таймера производится опрос устройства выборки-хранения УВХ_1 и опорное значение $\hat{A}_{x3 \text{ опорн.}}$ запоминается в УВХ до последующего опроса. Одновременно с этим запускается Таймер 2, который каждую секунду производит с помощью УВХ_2 выборку текущего значения наклона $A_{x3}(m)$. Текущее значение раз в секунду сравнивается с опорным

$$\Delta_1 = \left| \hat{A}_{x3} - \hat{A}_{x3 \text{ опорн.}} \right|$$

и если эта разность превышает предустановленный порог tilt

$$\Delta_2 = \Delta_1 - \text{tilt} \geq 0,$$

то фиксируется срабатывание датчика и информация передается по шине в главный модуль сигнализации.

Если произошло срабатывание, или если истек 200-секундный промежуток времени, Таймер 3 перезапускается и в УВХ_1 формируется новый опорный уровень. Периодический перезапуск Таймера 3 гарантирует обновление опорного уровня при медленных температурных флюктуациях или медленном (менее чем tilt) наклоне за время 200 сек.

1.3. Обработка информационного сигнала при ударе

Датчик удара опрашивается главным модулем в режиме полной охраны (вибрации отсутствуют). В режиме снято с охраны и при включенном зажигании (вибрации присутствуют) в шину выдается информация об аварии, когда датчик фиксирует превышение заданного порога.

Блок схема алгоритма обработки сигнала приведена на рис. 2.

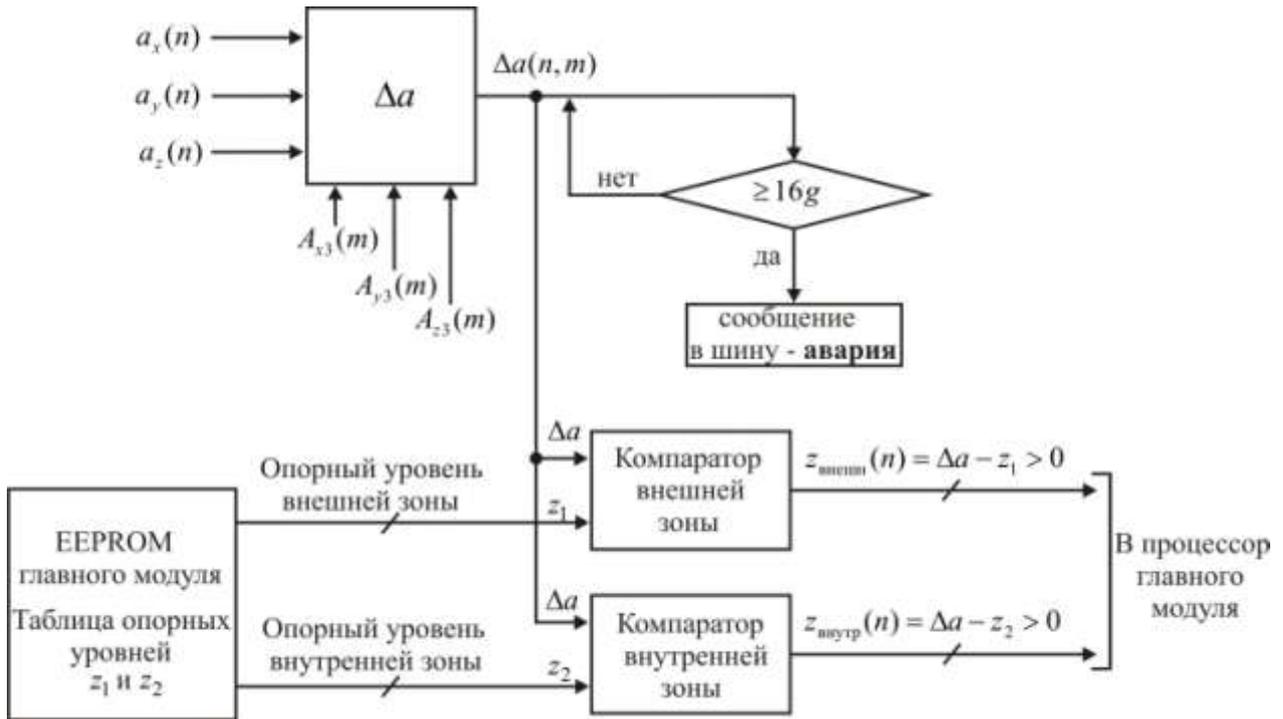


Рис. 2. Алгоритм обработки сигнала при ударе.

В невозмущенном состоянии ускорения, действующие по осям акселерометра, связаны соотношением (1). Если в качестве установившегося сигнала принять сигнал на выходе ФНЧ_3, то можно записать

$$\sqrt{A_{x3\text{уст}}^2 + A_{y3\text{уст}}^2 + A_{z3\text{уст}}^2} = g. \quad (5)$$

В возмущенном состоянии

$$\sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} = g + \Delta a, \quad (6)$$

где Δa - приращение ускорения.

С учетом направлений векторов \vec{g} и $\vec{g} + \Delta \vec{a}$, текущее значение модуля их векторной разности Δa может быть вычислено, с учетом (5) и (6), как

$$\Delta a(n, m) = \sqrt{(a_x(n) - A_{x3}(m))^2 + (a_y(n) - A_{y3}(m))^2 + (a_z(n) - A_{z3}(m))^2}. \quad (7)$$

Если текущее значение приращения ускорения $\Delta a(n, m)$, произошедшего в результате удара, превышает (рис. 2) предельный диапазон измерения акселерометра $\pm 16g$, то в шину выдается сообщение об аварии. Алгоритм более корректной обработки сигнала об аварийном ударе предложен в работе [11], однако он требует применения акселерометров со значительно большим, чем $\pm 16g$ диапазоном.

Обработка ударов слабой и средней силы, а также алгоритм адаптации датчика к повторяющимся воздействиям по внешней зоне подробно описан в работах [4,5]. Приращение ускорения $\Delta a(n, m)$ сравнивается в компараторах внутренней и внешней зоны датчика

удара с опорными уровнями внешней z_1 и внутренней z_2 зон. Опорные уровни хранятся в EEPROM главного модуля и при каждой постановке в охрану по шине передаются в EEPROM трансивера. При превышении уровня сигнал срабатывания по шине передается в процессор главного модуля для последующей обработки.

1.4. Алгоритмическая обработка, исключая «ложные срабатывания»

«Ложные срабатывания», как показал опыт эксплуатации датчиков, происходят через несколько часов после постановки сигнализации в охрану и отсутствии реального силового воздействия на кузов. Причина этих срабатываний может заключаться:

- в деформации («потрескивании») пластика, на котором установлен датчик, при остывании автомобиля;
- в накоплении вычислительной ошибки.

Наиболее часто «ложные срабатывания» наблюдались в холодное время года, когда остывание салона автомобиля происходит за несколько часов. И поэтому версия о деформации пластика представляется предпочтительной.

Для исключения «ложных срабатываний» нужно понять отличия в информационном сигнале акселерометра при реальном ударе по кузову и при локальной деформации пластика.

Удар средней силы по кузову автомобиля (в результате которого сигнализация переходит в режим тревоги) приводит к колебаниям кузова. Именно вторичные (после удара) колебания массивного кузова, а не фронт ударного сигнала должен измерять датчик удара.

На рис. 3 приведена типовая осциллограмма ускорений, действующих на акселерометр, при ударе средней силы. Анализ осциллограмм, проведенный автором при ударах по разным частям кузова, показал, что частота вторичных колебаний кузова при реальном ударном воздействии находится в диапазоне 10-30 Гц. Период таких колебаний составляет от 30 до 100 мс. В этом случае время, в течение которого ускорение при ударе превышает опорный уровень компаратора внутренней зоны, соизмеримо с половиной периода колебаний и составляет, таким образом от 15 до 50 мс. При частоте информационной выборки в 200 Гц (период выборки 5 мс) за это время производится от 3 до 10 отсчетов ускорения, причем каждый отсчет превышает опорный уровень.

С другой стороны, потрескивание пластика не вызывает вторичные колебания кузова и за время превышения опорного уровня проходит всего 1-2 отсчета. Это различие в спектрах сигнала и предлагается использовать, введя логическую обработку сигнала внутренней зоны.

Сигнал о срабатывании по внутренней зоне выдается в шину, если условие $z_{\text{внутр}}(n) = \Delta a - z_2 > 0$ (рис. 2) выполняется для $3 < N < 10$ последовательных отсчетов. Число N хранится в EEPROM главного модуля и заносится в него после настройки датчика на конкретном автомобиле. Очевидно, что чем меньше N , тем больше чувствительность датчика по зоне тревоги, а увеличение N снижает вероятность «ложных срабатываний». При

настройке датчика на автомобиле (выборе N) приходится достигать разумного компромисса.

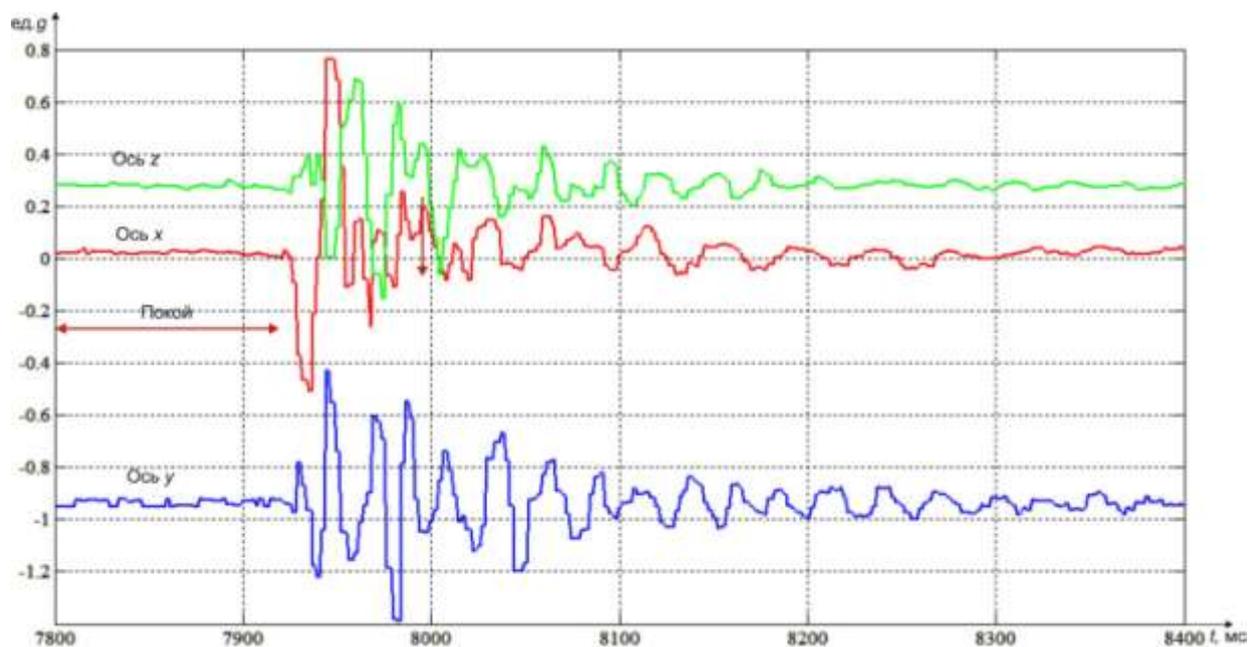


Рис. 3. Оциллограмма ускорений по осям акселерометра при ударе средней силы.

1.5. Обработка информационного сигнала при движении автомобиля.

Датчик движения опрашивается как в режиме охраны (вибрации отсутствуют), так и в режиме снято с охраны при включенном зажигании. В последнем случае присутствуют вибрации от работающего двигателя и воздействия от неровностей дороги при движении автомобиля.

Блок схема алгоритма обработки сигнала приведена на рис. 4.

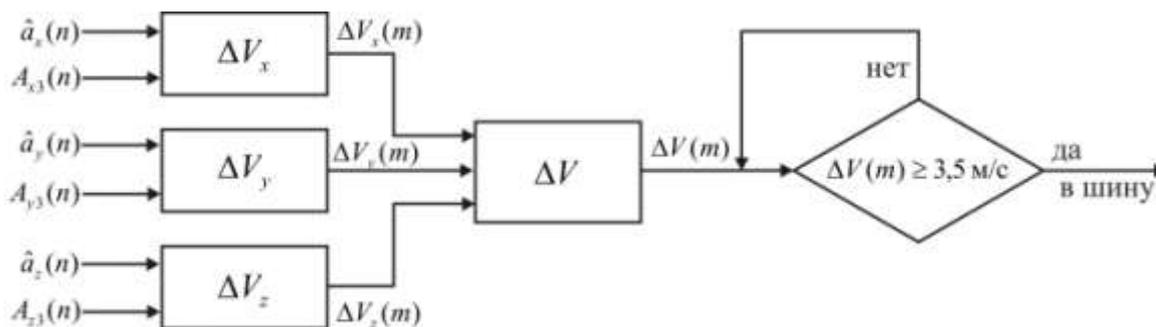


Рис. 4. Алгоритм обработки сигнала о движении автомобиля.

Так как датчик движения работает, в том числе и при движении автомобиля (в условиях вибраций), то в качестве входного ускорения берутся отсчеты $\hat{a}_x(n)$, $\hat{a}_y(n)$, $\hat{a}_z(n)$ (частота опроса 12,5 Гц) после фильтра ФНЧ_0, который сглаживает вибрации. Набор скорости до порогового значения длится единицы секунд и использование отсчетов $a_x(n)$, $a_y(n)$, $a_z(n)$ и избыточно, и нецелесообразно.

По каждой оси формируется скользящая сумма из 64 значений разности текущего ускорения и его сглаженного значения

$$\Delta V_x(m) = \sum_{n=m}^{m+63} [\hat{a}_x(n) - A_{x3}(n)]; \Delta V_y(m) = \sum_{n=m}^{m+63} [\hat{a}_y(n) - A_{y3}(n)]; \Delta V_z(m) = \sum_{n=m}^{m+63} [\hat{a}_z(n) - A_{z3}(n)] \quad (8)$$

По существу, в (8) по каждой оси вычисляется приращение скорости на 5-секундном интервале. Далее вычисляется абсолютное приращение скорости

$$\Delta V(m) = \sqrt{\Delta V_x^2(m) + \Delta V_y^2(m) + \Delta V_z^2(m)}, \quad (9)$$

и если приращение превышает порог в 3,5 м/с (12 км/час), то сигнал о достижении пороговой скорости выдается в шину.

Такой алгоритм обработки сигнала тривиален, но большего в сигнализациях и не требуется. Здесь достаточно лишь зафиксировать сам факт движения.

2. Реализация комбинированного датчика удара, наклона и движения

Предложенные автором алгоритмы обработки информационного сигнала реализованы в серийных образцах автосигнализаций Excellent Evolution3, Excellent R'evolution3, Excellent R'evolution5.

Автосигнализация Excellent является многопроцессорным устройством. Здесь можно выделить процессор главного модуля, процессора приемопередатчика (трансивера), датчика объема, микроиммобилайзеров, модуля запуска, GSM пейджера и др. Так как микропроцессор является относительно дорогостоящим устройством, для удешевления сигнализации на каждый из используемых процессоров стремятся возложить как можно больше задач. В сигнализации Excellent обработку данных с акселерометра выполняет процессор трансивера, а акселерометр расположен на плате приемопередатчика.

Место монтажа трансивера в автомобиле не регламентировано. С полной уверенностью можно утверждать, что трансивер (а, следовательно, и акселерометр) не монтируется в моторном отсеке автомобиля по соображениям нежелательного ослабления радиосигнала из-за экранирования, высоких температур и вибраций, достигающих 10 – 12 g. Монтаж в салоне автомобиля значительно снижает уровень вибраций, действующих на закрепленный датчик. В зависимости от конфигурации охранного комплекса Excellent возможны три варианта (рис. 5).

Вариант №1. Этот вариант применяется в сигнализациях Excellent R'evolution3. Плата трансивера жестко смонтирована над платой главного модуля. Достоинство варианта – компактность, отсутствие соединительного кабеля между платой главного модуля и трансивера. Недостаток (с точки зрения работы акселерометра) заключается в том, что при креплении корпуса главного модуля в салоне (под панелью приборов, обшивкой салона и пр.) не всегда удается найти место, где колебания кузова адекватно передаются на акселерометр.

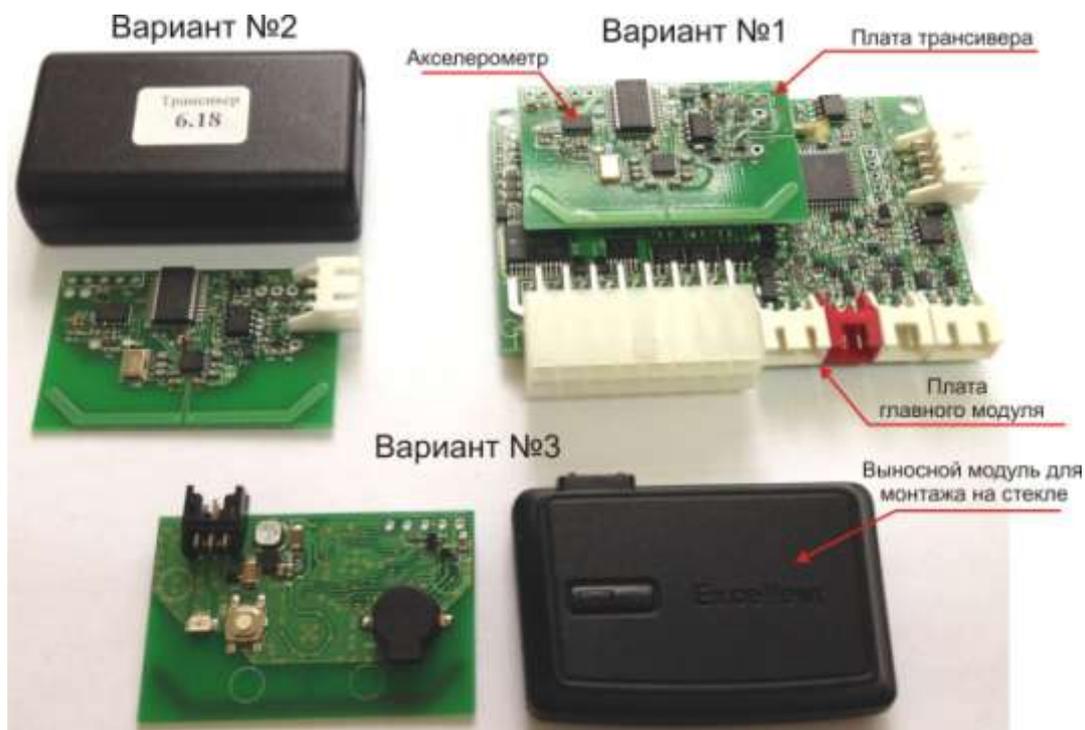


Рис. 5. Варианты размещения акселерометра на платах автосигнализации Excellent.

Вариант №2. Применяется в сигнализациях Excellent Evolution3. Плата выносного трансивера с акселерометром помещается в отдельный пластиковый корпус и кабелем соединяется с главным модулем. Достоинство варианта – место крепление трансивера может варьироваться и выбираться так, чтобы адекватно передать колебания кузова. Недостаток – необходимость дополнительного корпуса и кабеля. Другой момент связан с тем, что трансивер, во избежание значительного ослабления радиосигнала нельзя прятать слишком глубоко под приборной панелью и крепить на металл кузова. Закрепление трансивера (вариант №2) на стекле или пластиковой панели в салоне не эстетично.

Вариант №3. Применяется в сигнализациях Excellent R'evolution5. Этот вариант в чем-то похож на вариант №2. Но здесь на плате выносного модуля дополнительно расположена кнопка ввода персонального идентификационного номера владельца (кнопка ввода ПИН-кода, иногда ее называют кнопкой “Валет”) и зуммер, предупреждающий владельца о смене режимов сигнализации. Для удобства ввода ПИН-кода выносной модуль располагается на лобовом стекле автомобиля вверху слева или в районе зеркала заднего вида. Плата помещена в небольшой корпус и достаточно гармонично вписывается в интерьер салона. Модуль закрепляется на стекле двухсторонним 3-М скотчем и при ударах по кузову колебания адекватно передаются на акселерометр. Кроме этого, такой монтаж оптимален с точки зрения работы трансивера.

Принципиальная электрическая схема трансивера с акселерометром (вариант исполнения №2) приведена на рис. 6. Она включает процессор DD1 - PIC18F26K20-SS, акселерометр DA2 – ADXL345, трансивер DD2 – CC2500, стабилизатор DA1 – LP2951CM33 и элементы обвязки. Обмен данными между процессором и акселерометром осуществляется

2. Найман В.С., Тихеев В.Ю. Самоучитель по установке систем защиты автомобиля от угона. – Москва: Изд.-во Наука и техника, 2009.– 384 с.
3. Андрианов В.И., Соколов А.В. Охранные устройства для автомобилей. Справочное пособие. – СПб.: Издательство Лань, 1997. – 320 с.
4. Противоугонные устройства. Под редакцией Мальцева В.М., Минск: Краснопринт, 1996. – 265 с.
5. Васюков С.А., Красовский А.Б., Остапенко Д.Г., Федин В.И. Разработка методов и средств повышения чувствительности и стабильности характеристик микроволновых датчиков // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2014. № 4. Режим доступа: <http://technomag.bmstu.ru/doc/704976.html> (дата обращения 01.05.2014). DOI: [10.7463/0414.0704976](https://doi.org/10.7463/0414.0704976)
6. Васюков С.А., Красовский А.Б., Остапенко Д.Г., Федин В.И. Разработка методов и средств улучшения характеристик микропроцессорных датчиков удара для автомобильных сигнализаций // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2014. № 5. Режим доступа: <http://technomag.bmstu.ru/doc/709342.html> (дата обращения 01.06.2014). DOI: [10.7463/0514.0709342](https://doi.org/10.7463/0514.0709342)
7. Васюков С.А., Остапенко Д.Г., Федин В.И. Экспериментальные исследования и анализ информационного сигнала комбинированного датчика удара, наклона и движения на основе 3-осевого MEMS-акселерометра // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2014. № 9. Режим доступа: <http://technomag.bmstu.ru/doc/730675.html> (дата обращения 01.05.2014).
8. Юдин А. Новые акселерометры компании STMicroelectronics // Компоненты и технологии. 2009. №2.
9. Сыроева С. Ключевые сегменты рынка МЭМС-компонентов. Акселерометры // Компоненты и технологии. 2010. № 3.
10. Еманов А. Инерциальные датчики STMicroelectronics // Новости электроники. 2007. № 18.
11. 3-Axis Digital Accelerometer ADXL 345, Analog Devices inc., Datasheet, Rev.0, 2009.
12. Воронов А.С., Калигин Н.Н. Определение момента аварии и оценка вероятности получения опасных для жизни травм // Ползуновский альманах. 2013. №1, с. 83-86.

Data Signal Processing Algorithms and Combined Shock, Tilt, and Motion Sensor Implementation Based on the 3-Axis MEMS -Accelerometer

S.A. Vasyukov^{1,*}

[*sa_vasyukov@mail.ru](mailto:sa_vasyukov@mail.ru)

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: shock sensor, tilt sensor, motion sensor, car alarm system, MEMS-accelerometer

In modern times of security systems, sensors are, usually, microprocessor-based devices using digital signal processing. Shock sensor, volume sensors (ultrasonic, microwave), tilt, and motion sensors belong to the smart ones. Shock sensors with sensitive elements (SE) of piezo-electric, microphone, and electromagnetic types have a number of essential drawbacks and therefore the most promising, at the moment, is the use of three-axis MEMS accelerometers as the SE. In this case, a combined shock, tilt, and motion sensor can be implemented on a single SE. Publications describing combined shock, tilt, and motion sensors do not formulate requirements for characteristics of accelerometers to be used. It is not clear enough, what a data signal is. And what the range of the measured accelerations acting on the sensor and the frequency spectrum of the signals under shock, tilt, and motion are. In this regard, a number of experiments to investigate data signal obtained from the three-axis accelerometer with different actions on the car have been conducted. Based on the experimental data the author has developed and presented the signal processing algorithms of MEMS-accelerometer ADXL-345. This accelerometer has been used in the combined shock, tilt, and motion sensor implemented for the car alarm 'Excellent'. The paper considers algorithms of signal filtering, selecting the thresholds at which actuation of sensors occur, temperature stability of characteristics, and the algorithm to eliminate sensor "false positives" across the alarm zone. Gives recommendation for the technical implementation of algorithms on the PIC-microcontrollers.

References

1. Koriakin-Cherniak S.L., Mukomol E.A. Spravochnik po sovremennym avtosignalizatsiiam. *Izdatel'stvo Nauka i tekhnika = Science and Technology Publisher*. Moscow, 2009. Vol. 2. 320 p.
2. Naiman V.S., Tikheev V.Iu. Samouchitel' po ustanovke sistem zashchity avtomobilia ot ugona. *Izdatel'stvo Nauka i tekhnika = Science and Technology Publisher*. Moscow, 2009. 384 p.

3. Andrianov V.I., Sokolov A.V. Okhrannye ustroistva dlia avtomobilei. Spravochnoe posobie. Izdatel'stvo Lan' = *Publisher*. Saint Petersburg, 1997. 320 p.
4. Protivougonnnye ustroistva [Anti-hijack devices]. Under the editorship of V.M. Mal'tsev. *Krasnoprint*. Minsk, 1996. 265 p.
5. Vasiukov S.A., Krasovskii A.B., Ostapenko D.G., Fedin V.I. Razrabotka metodov i sredstv povysheniia chuvstvitel'nosti i stabil'nosti kharakteristik mikrovolnovykh datchikov. *Nauka i obrazovanie = Science and education*. Electronic scientific and technical publication. 2014. No. 4. Available at: <http://technomag.bmstu.ru/doc/704976.html>, accessed 01.05.2014. DOI: [10.7463/0414.0704976](https://doi.org/10.7463/0414.0704976)
6. Vasiukov S.A., Krasovskii A.B., Ostapenko D.G., Fedin V.I. Razrabotka metodov i sredstv uluchsheniia kharakteristik mikroprotsessornykh datchikov udara dlia avtomobil'nykh signalizatsii. *Nauka i obrazovanie = Science and education*. Electronic scientific and technical publication. 2014. No. 5. Available at: <http://technomag.bmstu.ru/doc/709342.html>, accessed 01.06.2014). DOI: [10.7463/0514.0709342](https://doi.org/10.7463/0514.0709342)
7. Vasiukov S.A., Ostapenko D.G., Fedin V.I. Eksperimental'nye issledovaniia i analiz informatsionnogo signala kombinirovannogo datchika udara, naklona i dvizheniia na osnove 3-osevogo MEMS-akselerometra. *Nauka i obrazovanie = Science and education*. Electronic scientific and technical publication. 2014. No. 9. Available at: <http://technomag.bmstu.ru/doc/730675.html>, accessed 01.05.2014.
8. Iudin A. Nove akselerometry kompanii STMicroelectronics. *Komponenty i tekhnologii = Components & Technologies*. 2009. No. 2.
9. Sysoeva S. Kliuchevye segmenty rynka MEMS-komponentov. Akselerometry. *Komponenty i tekhnologii = Components & Technologies*. 2010. No. 3.
10. Emanov A. Inertsial'nye datchiki STMicroelectronics. *Novosti elektroniki = Electronics News*. 2007. No. 18.
11. 3-Axis Digital Accelerometer ADXL 345, *Analog Devices inc.*, Datasheet, Rev. 0, 2009.
12. Voronov A.S., Kaligin N.N. Opredelenie momenta avarii i otsenka veroiatnosti polucheniia opasnykh dlia zhizni travm. *Polzunovskii al'manakh = Polzunovsky almanac*. 2013. No. 1, p. 83-86.