

# Использование сигнальных процессоров семейства TMS320 в гироскопической системе измерения угловых параметров железнодорожного пути



**ДЛЯ ПОДДЕРЖАНИЯ НЕОБХОДИМОГО УРОВНЯ БЕЗОПАСНОСТИ ДВИЖЕНИЯ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ ПЕРИОДИЧЕСКИ ПРОВОДИТСЯ КОМПЛЕКС МЕРОПРИЯТИЙ, ОДНОЙ ИЗ СОСТАВЛЯЮЩИХ КОТОРОГО ЯВЛЯЕТСЯ ОПРЕДЕЛЕНИЕ И РЕГИСТРАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИХ СОСТОЯНИЕ РЕЛЬСОВОЙ КОЛЕИ. ЭТИ РАБОТЫ ПРОВОДЯТСЯ С ПОМОЩЬЮ ОБОРУДОВАНИЯ, УСТАНОВЛЕННОГО НА ВАГОНЕ-ПУТЕИЗМЕРИТЕЛЕ. ОДНОЙ ИЗ ЗАДАЧ, РЕШАЕМЫХ С ПОМОЩЬЮ ЭТОГО ОБОРУДОВАНИЯ, ЯВЛЯЕТСЯ ОПРЕДЕЛЕНИЕ УГЛОВ НАКЛОНА ВАГОНА-ПУТЕИЗМЕРИТЕЛЯ ОТНОСИТЕЛЬНО КОЛЕСНОЙ ПАРЫ В ПРОДОЛЬНОМ И ПОПЕРЕЧНОМ НАПРАВЛЕНИЯХ, А ТАКЖЕ ИЗМЕРЕНИЕ КУРСОВОГО УГЛА ВАГОНА В ПРОЦЕССЕ ДВИЖЕНИЯ. В СОВОКУПНОСТИ С ИНФОРМАЦИЕЙ ОТ ДРУГИХ ДАТЧИКОВ, УГЛОВАЯ ИНФОРМАЦИЯ ПОЗВОЛЯЕТ ПРОИЗВОДИТЬ РАСЧЕТ НЕОБХОДИМЫХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РЕЛЬСОВОЙ КОЛЕИ.**

Современные требования точности оценки геометрических параметров колеи находятся в пределах 1...3 мм, что в свою очередь ограничивает допустимую погрешность угловых измерений величиной  $(1,7-2,8) \cdot 10^{-2}$  град. Реализация подобных требований к точности угловых измерений в процессе движения в условиях жёсткого реального времени представляет собой достаточно сложную в техническом плане задачу, требующую, как будет показано ниже, значительных вычислительных мощностей.

В целом упомянутая задача является типичной задачей цифровой обработки сигнальной информации, поступающей от гироскопических датчиков и акселерометров. Она состоит из нескольких блоков (этапов):

- приём информации от датчиков и её предварительная обработка;
- решение так называемой навигационной задачи;
- выдача рассчитанных угловых и навигационных параметров в выходные интерфейсные каналы.

Наибольший удельный вес в вычислениях приходится на долю навигационной задачи, что связано с массивным использованием при её решении матричных операций.

Задача измерения углов отклонения от плоскости горизонта в продольном и поперечном направлениях (тангаж  $\nu$  и крен  $\gamma$ , соответственно), а также отклонения от заданного направления движения (гироскопический курс  $\Psi_{г}$ ) заключается в реализации опорной системы координат (сопровождающий трёхгранник) и определении её начального и текущего положения относительно связанной системы координат. Известно, что универсальным средством для решения этой задачи как на неподвижном, так и на движущемся основании являются устройства, созданные на базе гироскопических приборов. Устройства типа морских гировертикалей, гигогоризонтов использовались уже в самых первых опытах по контролю состояния железнодорожного пути. Достаточно длительное время это были сложные электромеханические устройства, с точностью измерения углов в лучших образ-

цах порядка 0,5–1 град. В этих устройствах реализация опорной системы координат и определение углов Эйлера осуществлялись с помощью гиросtabilизированной платформы (ГСП) и датчиков углов, расположенных на ней.

С развитием лазерной гироскопии и средств вычислительной техники в 70–80-х годах прошлого века появилась возможность отказаться от ГСП и датчиков углов при создании систем подобного назначения. Эти системы получили название бесплатформенных инерциальных систем, либо бесплатформенных курсовертикалей, в зависимости от объёма вычисляемых параметров. В этих системах функция ГСП по реализации опорной системы координат и определению углов Эйлера выполняется в вычислителе при решении уравнений Пуассона для определения параметров ориентации (элементов матрицы  $A$ ):

$$\dot{A} = -\hat{\omega}_1,$$

где  $\hat{\omega}_1$  — кососимметрическая матрица, элементами которой являются проекции

абсолютной угловой скорости объекта на связанные оси, измеряемые гироскопами. Для решения этого уравнения требуется задание начальных условий  $A(0)$ , то есть определения начального положения осей чувствительности гироскопов относительно опорной системы координат. Известно, что определить взаимную ориентацию двух трёхгранников можно измеряя два неколлинеарных вектора в осях этих трёхгранников. Один вектор — угловую скорость вращения Земли —  $V_3$  измеряют гироскопы. Для измерения второго вектора — ускорения силы тяжести  $g$  необходимо иметь в системе три акселерометра. Процедура определения начальных значений углов Эйлера носит название начальной выставки. Кроме решения задачи начальной выставки, информация с акселерометров необходима для выполнения других функций, которые будут рассмотрены ниже.

Переходя непосредственно к рассмотрению структуры системы, отметим, что для измерения пространственной ориентации движущихся объектов возможно использование гироскопических систем двух типов:

- курсовертикали с “маятниковой” коррекцией;

инерциальной курсовертикали (ИКВ). Для определения углов крена и тангажа точность курсовертикали с “маятниковой” коррекцией обычно лежит в пределах 0,3...0,5 град., так как зависит от динамики движения объекта.

Погрешности инерциальной курсовертикали не зависят от движения объекта и определяются собственной точностью гироскопов и акселерометров, на базе которых строится система. Кроме того, в инерциальной курсовертикали имеется возможность определения начального курса системы (направления движения).

Для данной задачи наиболее целесообразным представляется решение в виде бесплатформенной инерциальной курсовертикали, интегрированной с приёмником сигналов спутниковой навигационной системы GPS-ГЛОНАСС и измерителем пройденного пути (одометром). Дело в том, что ошибки определения углов крена и тангажа зависят от величины собственного дрейфа гироскопов, а предлагаемая структура позволяет использовать лазерные гироскопы средней точности с дрейфом не хуже 0,05 град./час и решить проблему точного измерения углов за счёт периоди-

ческой коррекции ошибок инерциальной курсовертикали по сигналам СНС и одометра.

Инерциальная курсовертикаль (система) должна иметь в данной задаче два режима работы:

- начальная выставка, при которой на стоянке определяются начальные значения углов курса  $\Psi_0$ , крена  $\gamma_0$  и тангажа  $\nu_0$ ;
- навигация, где происходит формирование текущих значений этих углов и в качестве вспомогательных параметров для режима коррекции вычисляются текущие географические координаты объекта и составляющие скорости движения относительно Земли.

Для реализации вышеперечисленных функций в состав системы входят в качестве чувствительных элементов три акселерометра типа АЛ-1 и три лазерных гироскопа (ЛГ) типа КМ-11-1.

Структурная схема системы в виде набора функциональных алгоритмов представлена на рис. 1.

Основные выходные параметры системы — углы Эйлера вычисляются через элементы  $a[i,j]$  матрицы  $A$  перехода

**MicroLAB Systems**  
127591, Москва, Россия,  
Дубнинская ул., д. 83, оф. 612  
WEB: www.mlabsys.com  
E-mail: info@mlabsys.com  
тел./факс: (095)-900-6208

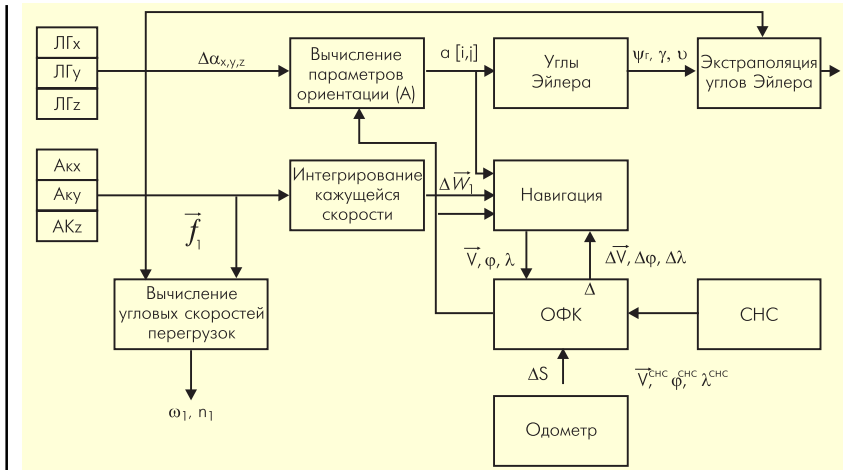
**Комплексные решения ЦОС для процессоров TMS320**

**TORNADO СИСТЕМЫ ЦОС**  
**MIRAGE ЭМУЛЯТОРЫ!**  
**АЦП/ЦАП, СОПРОЦЕССОРЫ**

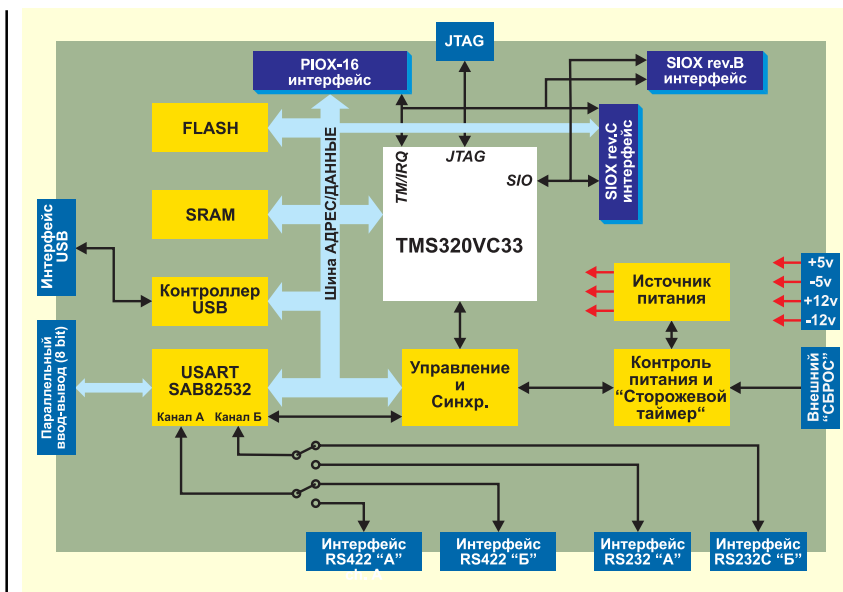
**TORNADO**  
системы ЦОС для ПК и автономных приложений на базе TMS320C3x/5000/6000  
**\$540+**  
дочерние модули АЦП/ЦАП, сопроцессоры ЦОС  
**\$215+**

**MIRAGE**  
эмуляторы JTAG/MPSD для TMS320  
**\$1000+**  
**TI Code Composer**  
**\$1300** (C3x/C4x)  
**\$1995** (Studio)

**Hypersignal**  
САПР алгоритмов и систем ЦОС  
**\$1995+**  
**QEDesign**  
САПР цифровых фильтров  
**\$1095+**  
**Nucleus PLUS, 3L Diamond**  
ОСРБ



**Рисунок 1** Структурная схема системы



**Рисунок 2** Структура вычислителя TORNADO-E33

от связанной системы координат к опорной системе координат.

Для вычисления матрицы  $A$  используется информация от трёх ЛГ, представляющая собой приращения углов поворота связанной системы координат в абсолютном пространстве  $\Delta\alpha_x$ ,  $\Delta\alpha_y$ ,  $\Delta\alpha_z$  за такт съёма информации. Частота съёма информации с ЛГ зависит от их конструкции и составляет 160 Гц.

С точки зрения вычислительных погрешностей, для реализации большинства алгоритмов, за исключением алгоритма вычисления матрицы  $A$ , достаточно иметь 32-разрядный процессор с плавающей точкой.

В то же время, эксперименты показали, что для обеспечения необходимой точности вычисления матрицы  $A$  ряд операций в этом алгоритме надо выполнять с удвоенной разрядностью.

## РЕАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ

Для реализации вышеописанных алгоритмов Навигационной системы использован встраиваемый вычислитель "TORNADO-E33" в промышленном исполнении (диапазон рабочих температур  $-40...+85^\circ\text{C}$ ) производства фирмы "MicroLAB Systems" ([www.mlabsys.com](http://www.mlabsys.com)). Структура вычислителя TORNADO-E33 (рис. 2) реализована на базе 32-разрядного цифрового сигнального процессора TMS320VC33 (DSP) фирмы TEXAS INSTRUMENTS, который обладает производительностью 150 MFLOPS и содержит на кристалле внутреннюю оперативную память ёмкостью 34Kx32. На плате TORNADO-E33 имеются микросхемы статического ОЗУ (SRAM) ёмкостью до 512Kx32 и FLASH-памяти ёмкостью до 512Kx8. На плате имеется

двухканальный универсальный синхронно/асинхронный приёмопередатчик (10 Мбит/с) USART (SAB 82532) с двумя двухканальными интерфейсами RS422 I/F (10 Мбит/с) и RS232 (115 Кбит/с), а также USB-контроллер, для подключения по шине USB управляющего компьютера. Для установки дочерних модулей ввода/вывода аналоговых и цифровых сигналов на плате TORNADO-E33 имеются разъёмы параллельного (PIOX-16) и последовательного SIOX интерфейсов расширения ввода/вывода. Параллельный интерфейс расширения (PIOX-16) содержит сигналы адреса/данных (A/D) процессора, сигналы таймера (TM) и прерываний (IRQ), а также напряжения питания и используется для стыковки "TORNADO" с датчиковым оборудованием навигационной системы (рис. 2).

Разработка и отладка штатного алгоритма и модели производилась в системе проектирования "Code Composer 4.10", обновлённой до Service Pack 2 с использованием скан-эмулятора "MIRAGE-P510" производства той же "MicroLAB Systems".

Головной алгоритм навигационной системы, решающий задачу ориентации навигации и коррекции, жёстко привязан к моментам съёма информации с гироскопов и акселерометров. Его работа инициируется по прерываниям от периферийного оборудования и не может быть прервана другими потоками и задачами. Алгоритм занимает 7–10% времени такта съёма информации.

В "фоне" решаются задачи приёма информации от спутниковой навигационной системы, задача встроенного контроля процессора и устройств памяти вычислителя, задача проверки корректности исполнения алгоритма и интерактивного взаимодействия с оператором (если подключен технологический канал RS-232).

Для производства коррекции вертикали и списания дрейфов датчиков в алгоритм вводится корректирующая информация от спутниковой навигационной системы фирмы TRIMBLE (протокол обмена информацией NMEA). Информация от спутниковой системы принимается и оценивается в "фоне" и передаётся в головной алгоритм.

Контроль ЦПУ вычислителя производится по алгоритмам, рекомендованным TEXAS INSTRUMENTS для своих процессоров. Контроль целостности кода программы производится периодическим расчётом контрольной суммы области памяти, содержащей программу и данные. Контроль ОЗУ осуществ-



ляется разрушающим методом с последующим восстановлением.

Корректность исполнения алгоритма осуществляется посредством сбора и обработки статистической информации о ходе исполнения программы: сбор информации о вычислительной нагрузке, создаваемой частными алгоритмами, проход контрольных точек алгоритма и т.п.

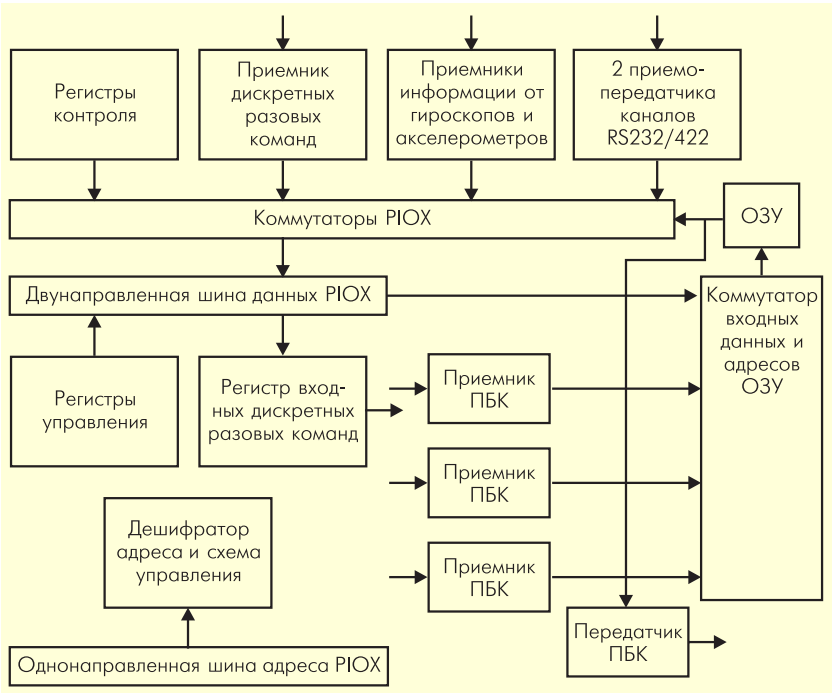
В процессе эксплуатации взаимодействие оператора с системой не требуется, однако в программе предусмотрен несложный командный процессор, взаимодействующий с оператором через технологический канал RS-232 и позволяющий посредством директив выдать статистические данные о работе системы и изменить некоторые её параметры.

Для обеспечения равномерности и независимости работы алгоритмов, работающих в "фоне", используется ядро реального времени "Nucleus RTX". Выбор пал на ядро Nucleus по причине его крайней простоты, удобства, высокой степени отработанности и минимума усилий по адаптации к конкретной системе.

Специфика головного алгоритма не требует интенсивных оптимизированных вычислений, однако реализация численных методов, требует их повышенной точности. Поэтому они реализованы в виде программных библиотек, содержащих арифметические операции двойной (64 бит) разрядности. Совокупность всех требований к системе, а также рыночная конъюнктура сигнальных процессоров, качество средств проектирования и развитая инфраструктура написания программного обеспечения для процессоров Texas Instruments предопределили выбор центрального процессорного устройства и марки встроенного вычислителя.

Стык вычислителя "TORNADO-E33" с периферийным оборудованием системы производится через параллельный интерфейс PIOX-16. Для обеспечения обмена информацией между вычислителем, датчиками и периферийными устройствами используется устройство ввода/вывода (УВВ), которое решает следующие основные задачи:

- обмен контрольной и управляющей информацией между датчиками и вычислителем;
- обмен информацией с потребителем последовательным биполярным кодом (ПБК) по ГОСТ 18977-79 (ARINC 429);



**Рисунок 3** Реализация структуры системы на ПЛИС

- обмен информацией по последовательному каналу RS-232/422 с приёмником спутниковой навигационной системы.

Ядро устройства реализовано на ПЛИС EPF10K30AQC208-3 фирмы ALTERA. При проектировании использовалось стандартное ПО САПР MAX+plusII 10.0 и стандартный язык описания схем VHDL. Обобщённая структурная схема, реализованная с помощью ПЛИС, приведена на рис. 3.

Общая логика функционирования УВВ была выстроена таким образом, чтобы минимизировать затраты времени центрального процессора (ТМС) при вводе/выводе информации. Для этого периодический (с периодом 160 Гц) ввод информации от акселерометров и гироскопов (6 каналов в совокупности) осуществляется аппаратно, и введённая информация помещается в ячейки ОЗУ по адресам, индивидуальным для каждого датчика. Таким образом, происходит прямое отображение текущего состояния всех датчиков в ячейки оперативной памяти процессора. После завершения очередного цикла опроса всех датчиков генерируется 30-нс импульс аппаратного прерывания для процессора, что может быть использовано при необходимости для индикации факта обновления информации от датчиков. При необходимости получения информации от какого-либо датчика процес-

сор просто читает ячейку ОЗУ с известным адресом, не занимаясь обычным в таких случаях анализом готовности информации от датчика.

Аналогично происходит процесс обмена информацией с внешними по отношению к гироскопической системе устройствами по каналам последовательного биполярного кода. В соответствии со стандартом ARINC429, обмен осуществляется 32-разрядными словами со скоростью 100 или 12 Кбит/с. При этом передаваемое или принимаемое слово логически подразделяется на младшие 8 бит (иногда называемые адресом), используемые для идентификации типа информации (крен, курс, тангаж и т.п.) и старшие 24 бита, используемые для передачи значения того или иного па-

## ИЗГОТОВЛЕНИЕ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

103460 Москва,  
Зеленоград, а/я 31  
(095) 777-8080

г. Санкт-Петербург,  
ул. Маяковского,  
д. 45, оф. 211  
(812) 278-0236

г. Екатеринбург,  
ул. Фрунзе, 50, оф. 10  
(3432) 22-5739

order@rezonit.ru  
www.rezonit.ru



Торговая марка фирмы  
**РЕЗОНИТ** «РЕМКОМ-ПЕЧАТНЫЕ ПЛАТЫ»