

# РАЗРАБОТКА ВОЛНОВОГО ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ГИРОСКОПА ДЛЯ НИЗКОДИНАМИЧНЫХ И ВЫСОКОДИНАМИЧНЫХ ОБЪЕКТОВ

**Б.П. Бодунов**

*АО «Научно-производственное предприятие «МЕДИКОН»*  
Россия, 456320, Челябинская обл., Миасс г., Менделеева ул.,31  
E-mail: [mdcn@medicon-miass.ru](mailto:mdcn@medicon-miass.ru)

## 1. Введение

Развитие современных систем навигации в значительной мере зависит от прогресса в части создания гироскопических приборов на новых физических принципах, к которым, относится и волновой твердотельный гироскоп (ВТГ) [1]. Настоящий доклад посвящен опыту разработки данного гироскопа для различных объектов.

## 2. Описание ВТГ

Чувствительный элемент волнового твердотельного гироскопа представляет собой резонатор, имеющий форму тонкостенной полусферической оболочки из высококачественного плавленного кварца с цилиндрической ножкой в вершине полусферы. На поверхность оболочки нанесен тонкий слой золота или платины. Такое покрытие позволяет контролировать форму упругой деформации кромки оболочки с помощью специальной системы емкостных датчиков и управлять формой ее упругих колебаний, изменяя электрические потенциалы на управляющих электродах. Колебания оболочки в пределах упругих деформаций кромки полусферы не связаны с износом и деградацией материала, поэтому практически не ограничивают долговечности прибора.

Функционально ВТГ является интегрирующим прибором: величина угла поворота волны за время измерения равна интегралу проекции угловой скорости на ось чувствительности прибора, поэтому диапазон измеряемых углов скоростей практически неограничен, что делает прибор особенно удобным для использования в перспективных бесплатформенных инерциальных навигационных системах (БИНС) различного назначения.

В основе работы любого ВТГ лежит явление инертности стоячих упругих волн колебаний, впервые реализованное в 1982 г. американским физиком Д. Линчем [2]. Данный эффект инертности упругих волн для резонатора любой формы был строго теоретически обоснован в 1983 г. российскими учеными, механиками В. Ф. Журавлевым и Д. М. Климовым [3]. Такой уникальный физический принцип работы дает новому гироскопу целый ряд преимуществ: полное отсутствие вращающихся частей, малое время готовности, малые габаритно-массовые характеристики, весьма длительный рабочий ресурс прибора; высокая температурная стабильность основного конструкционного материала полусферы (плавленного кварца); высокая точность и малая случайная погреш-

ность; устойчивость к тяжелым условиям окружающей среды (температура, удары, вибрации, гамма излучение); небольшая потребляемая мощность; сохранение инерциальной информации при полном кратковременном отключении электропитания. Все перечисленное выше делает ВТГ одним из наиболее перспективных гироскопических приборов.

Для ВТГ космического применения с относительно малой входной угловой скоростью вращения основания был разработан двухдетальный ВТГ с 8-ю электродами [4-6]. Благодаря специально разработанным алгоритмам реализовано широтно-импульсное управление, повышающее линейность преобразования ВТГ. При этом первоначальное формирование информации о колебаниях рабочей зоны резонатора осуществляется с помощью пачек импульсов (амплитудой 15 В), подаваемых на электроды оси X и Y резонатора поочередно с последующим усилением. При этом часть периода колебаний резонатора электроды используются для формирования начальной информации как электроды съема, а вторая часть периода колебаний они используются как электроды управления. Схемы, поясняющие работу блока управления ВТГ, приведены на рис. 1-7.

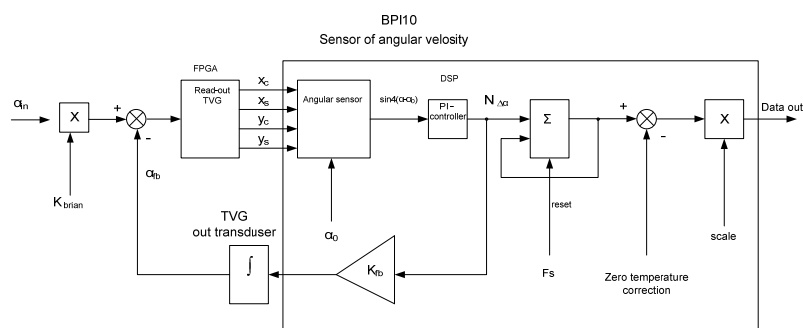


Рис. 1. Функциональная схема датчика угловой скорости.

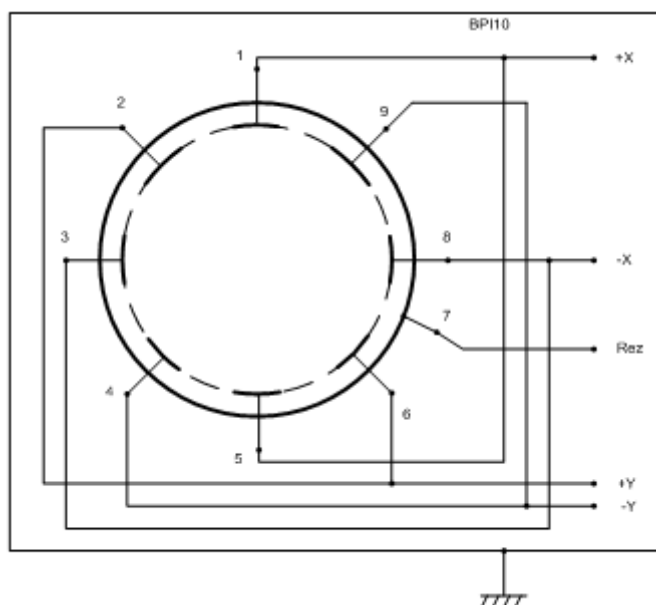


Рис. 2. Схема электродов ВТГ.

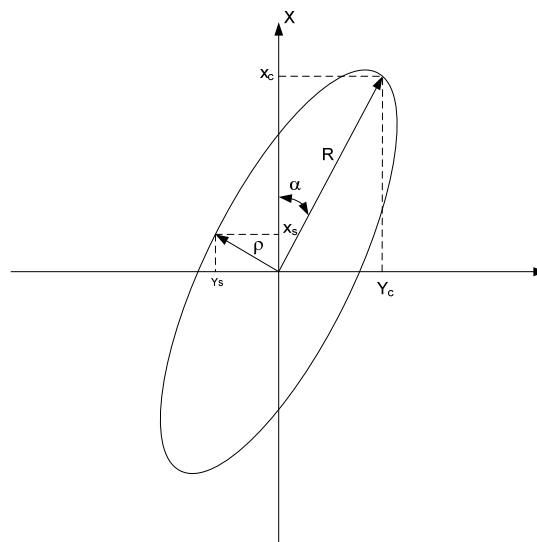


Рис. 3.  $R$  – синфазная составляющая колебаний резонатора,  $\rho$  – квадратурная составляющая колебаний резонатора

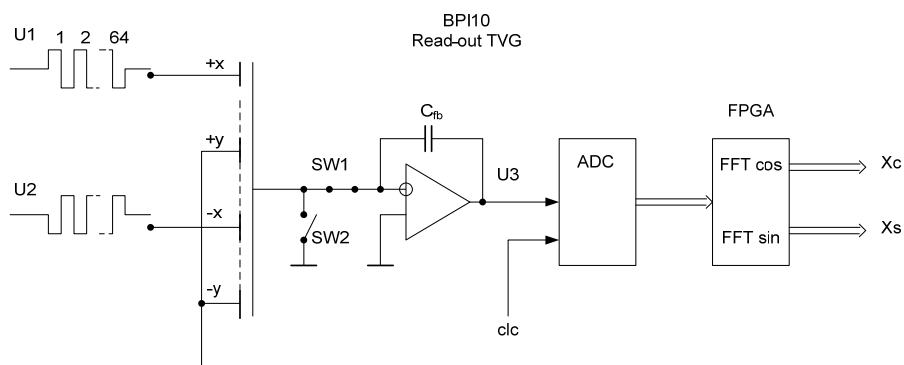


Рис. 4. Считывание по оси X.

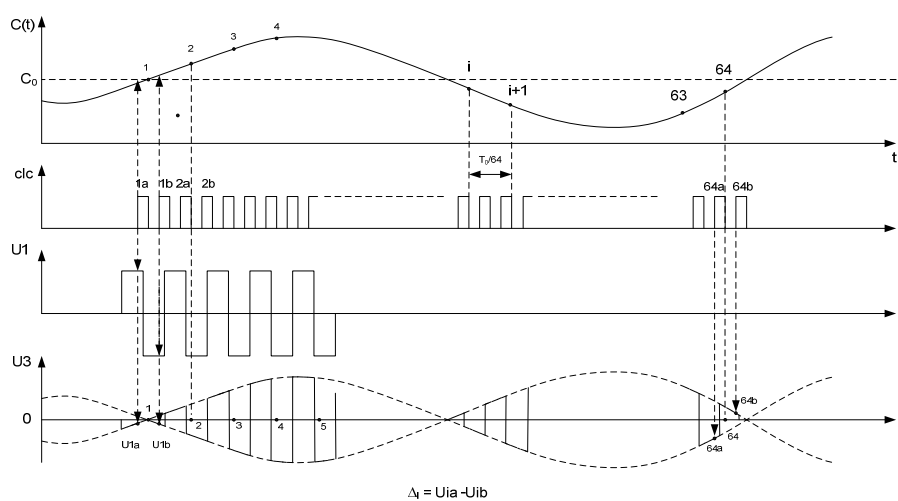


Рис. 5. Временные диаграммы считывания данных по оси X или Y.

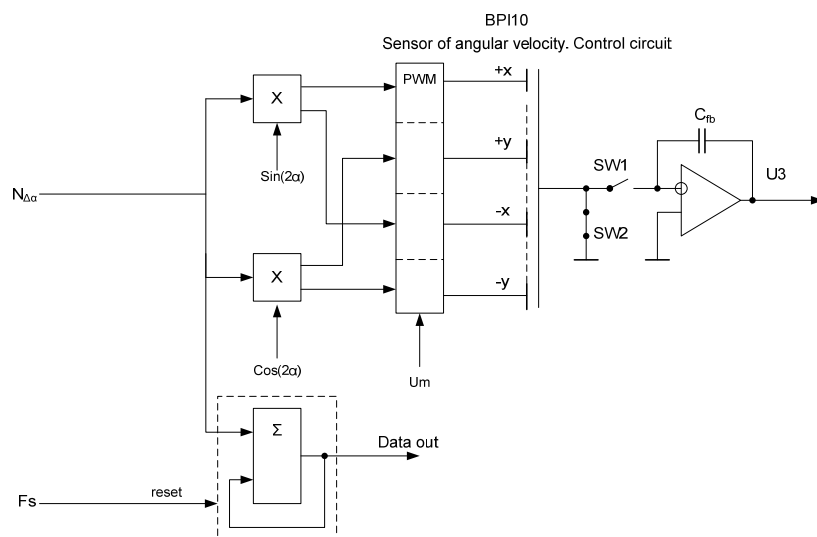
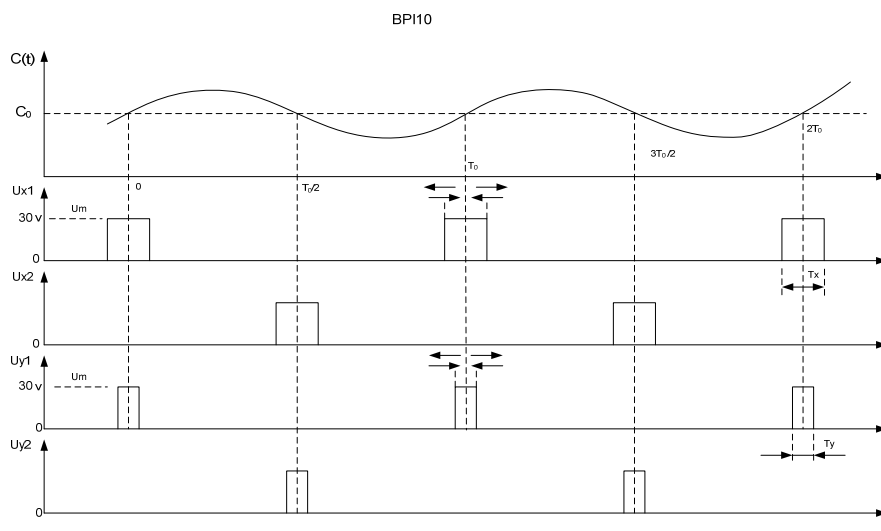


Рис. 6. Управление поворотом волны в датчике угловой скорости с широтно-импульсной модуляцией управляющих импульсов.



**Рис. 7.** Временные диаграммы управления поворотом волны в датчике угловой скорости.

Гироскоп для высокودинамичных объектов имеет цифровой выход и многоканальную «пушпульную» схему управления по алгоритму [7], разработанному академиком РАН В.Ф. Журавлевым. Цифровая часть электронного модуля управления содержит процессор обработки сигналов, буферы аналого-цифровых преобразователей (АЦП), синтезатор частот, асинхронный микроконтроллер последовательного интерфейса. Цифровой процессор по специальным алгоритмам обработки определяет углы ориентации волны, амплитуду и квадратную составляющую колебаний резонатора и, используя эту информацию, вычисляет соответствующие весовые коэффициенты для управления стоячей волной прибора. Программная реализация алгоритма обработки информационных и формирования управляющих сигналов производится параллельно в отдельном процессоре быстродействующей программируемой логической интегральной схемы нового поколения. Каждый из каналов формирователей сигналов управления содержит ряд цифроаналоговых преобразователей (ЦАП), на вход которых в цифровом виде поступает информация о весовых коэффициентах управления, и как опорные, сигналы синусов и косинусов и их производные с электродов информационных сигналов, т.е. с выходов аналого-цифровых преобразователей (АЦП). Алгоритм управления и приема данных от каждого АЦП реализован в ПЛИС (FPGA) типа «ARTIX-7» с помощью отдельного «конечного автомата» (finite state machine). Результаты преобразования каждого АЦП преобразуются «конечным автоматом» в параллельный 16-битный код, сопровождаемый признаком готовности. Данная информация поступает на входы быстродействующего процессора (ЦП) реального времени. В этом ЦП по синтезированному алгоритму формируются специальные законы прямого цифрового управления, которые в виде напряжений с выходов ЦАП подаются на управляющие электроды гироскопа, расположенные на плате кварцевого узла возбуждения, съема и управления (ВСУ) прибора.

Новый полностью цифровой модуль электроники – модуль контроллеров гироскопов (МКГ-1) включает трех/процессорную структуру обработки выходных аналоговых сигналов трех гироскопов, реализован на базе современной системы на кристалле (FPGA) типа «ARTIX-7» с одиннадцатью встроенными контроллерами, последовательным интерфейсом и главным 64-битным процессором. Программа, реализующая алгоритм обработки информационных и управляющих сигналов каждого из трех каналов, выполняется параллельно в отдельном процессоре («Micro-Blaze»). Такая параллельная

многопроцессорная структура обеспечивает одновременный опрос всех трех гироскопов. Контроллер последовательной линии связи опрашивает выходные устройства каждого процессора, преобразует информацию в последовательные пакеты и выдает их в линию связи RS-422.

### 3. Результаты испытаний

Демонстрационный образец инерциального датчика тестировался на прецизионном трехосном динамическом стенде “ACUTRONIC” (Швейцария). Совместно с заказчиком были выполнены многочисленные эксперименты, которые подтвердили основные характеристики точного ВТГ-30 нового поколения и позволили получить динамический диапазон измерения прибора  $\pm 600$  град/с при сохранении навигационного класса точности ( $СКО \leq 0.010$  град/ч) функционирования гироскопа.

Контрольные запуски ВТГ-30 на двухосном наклонно-поворотном динамическом стенде типа “ACTIDYN” (Франция) подтверждают, что новый волновой гироскоп функционирует в режиме свободной волны, имеет практически неограниченный диапазон измерения максимальной угловой скорости (ограничения связаны только с быстродействием основного процессора цифрового модуля) и прибор соответствует требованиям навигационного класса точности ( $СКО \leq 0.010$  град/ч).

Разработанные научным консультантом В.Ф.Журавлевым способы компенсации влияния разночастотности, диссипации и разнодобротности, а также других технологических погрешностей прибора ВТГ-30 и синтезированные новые алгоритмы управления и обработки первичной информации волновых гироскопических датчиков, позволяют компенсировать систематические приборные погрешности и существенно повысить точность измерений инерциального датчика.

### 4. Точностные характеристики прибора

Результаты испытаний нового инерциального датчика ВТГ-30иг в лаборатории НПП «Медикон» при комнатной температуре окружающего воздуха подтвердили высокую стабильность смещения нуля гироскопа в запуске. Стандартное среднее квадратичное отклонение (СКО) в запуске прибора ТВГ-01.2 №59 не превысило значение  $СКО = 0,005$ град/ч, а случайный уход по углу (ARW) менее  $0,003$ град/ч.

В результате доработки функциональной схемы блока управления ВТГ для высокодинамичных объектов и увеличения частоты опроса до 200 Гц уменьшен угловой шум до  $\sigma_a = 0,11''$  и  $\varepsilon_a = 0,009'' / \sqrt{Гц}$ .

Для повышения точностных характеристик нового гироскопа разработан способ самокалибровки прибора. Применение процедуры автокалибровки конкретного инерциального датчика при его динамических и тепловых испытаниях, позволяет говорить об исключительно положительных результатах нового способа компенсации инструментальных и технологических погрешностей.

Для минимизации времени запуска и сокращения готовности датчика ВТГ-30 реализован алгоритм ускоренного запуска кварцевого резонатора прибора на необходимую резонансную частоту. Одновременно синтезирован алгоритм минимизации точностной готовности гироскопа, который значительно снизил время выхода амплитуды стоячей волны кромки резонатора на заданное рабочее значение и обеспечил ускорен-

ное подавление ее квадратурной составляющей. Все это позволило реально минимизировать время разгона волнового гироскопа до величины не превышающей  $T=3\tau$

Диапазон измеряемых при тестовых испытаниях прибора максимальных угловых скоростей ( $\pm 600$  град/с) достигнут при заданных разработчиком возможностях системы управления ВТГ-30 модуля функциональной электроники макетного образца промышленного (не специального) применения, а не потенциальными возможностями измерений самого нового волнового гироскопа.

Малое время готовности, за которое гироскоп достигает заданной точности, показывает способность прибора обеспечивать измерение угловой скорости вращения Земли и заданную точность автономной ориентации и навигации БИНС-ВТГ в течение длительного (более 1 ч) времени без коррекции от глобальных спутниковых систем.

## 5. Заключение

Высоконадежный миниатюрный интегрирующий гироскоп ВТГ-иг30 с цифровым выходом является высокоточным прибором автономной ориентации, разработанным российскими специалистами на основе промышленного инерциального датчика ТВГ-01.2 космического применения на базе кварцевого беззубцового резонатора диаметром 30мм и нового модуля функциональной обслуживающей электроники (многоканальной системы прямого цифрового управления, съема и обработки сигналов). Такой прибор способен весьма успешно конкурировать с волоконно-оптическими и кольцевыми лазерными гироскопами по цене и точности, превосходя последние по показателю надежности функционирования в самых различных климатических условиях.

## Список литературы

1. Пешехонов В.Г. Перспективы гироскопии // Состояние и перспективы развития современных систем навигации // XIII Всероссийское Собрание по проблемам управления. Москва, 17-20 июня 2019 г. М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2019.
2. Loper E., Lynch D.D. The HRG: a new low-noise inertial rotation sensor // Proc. 16th Jt. Services Data Exchange for Inertial Systems. Los Angeles, CA, 1982.
3. Журавлев В.Ф., Климов Д.М. Волновой твердотельный гироскоп. М.: Наука, 1985.
4. Бодунов Б.П., Lynch D., Voros A. Недорогой полусферический резонатор для малогабаритных ВТГ навигационных систем гражданского назначения // Материалы II Санкт-Петербургской Международной конференции по интегрированным навигационным системам. 1995. С. 89-92.
5. Патент №2362121 Российская Федерация, МПК G01C 19/56. Малогабаритный твердотельный волновой гироскоп. Бодунов Б.П., Бодунов С.Б., Котельников С.В. № 2007125894А; заявл. 09.07.2007; опубл. 27.07.2009.
6. Бодунов Б.П., Владимиров В.А., Игонин А.Н., Костенко Н.А. Твердотельный волновой гироскоп двухрежимной работы для космического применения // XX Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. СПб.: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2013. С. 173-178.
7. Журавлев В.Ф., Линч Д.Д. Электрическая модель волнового твердотельного гироскопа // Изв. РАН. Механика твердого тела. 1995. № 5. С. 12-24.