

## РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ИСПЫТАНИЙ ДАТЧИКА УГЛОВОЙ СКОРОСТИ НА ОСНОВЕ ВОЛНОВОГО ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ГИРОСКОПА

*Рассматриваются вопросы проектирования датчиков угловой скорости на основе волнового твердотельного гироскопа. Обосновывается достаточность упрощенной модели гироскопа в виде двух уравнений математического осциллятора. На основе сравнения замеров физических параметров металлических резонаторов с математической моделью выбираются конкретные коэффициенты уравнений и вводятся дополнительные члены в правую часть, имитирующие внешние возмущения. Полученная математическая модель гироскопа обеспечивает возможность синтеза регулятора датчика с обеспечением заданных параметров прибора. Изготовлен и отлажен трехосный блок датчиков угловой скорости с применением фильтра-генератора в цепи формирования автоколебательного режима.*

### Введение

Построение перспективных недорогих инерциальных систем в первую очередь основывается на результатах разработки датчиков угловой скорости (ДУС) на новых физических принципах. Одним из вариантов развития данного направления является создание ДУС на базе волнового твердотельного гироскопа (ВТГ). Несмотря на то что эффект стоячей волны в тонкой оболочке был открыт в 19 веке [1], до настоящего времени датчик на основе эффекта Брайана не нашел широкого промышленного применения. Основными сдерживающими факторами являются отсутствие доступных и понятных методик проектирования ВТГ широкому кругу специалистов, а также недостаточная отработка технологий изготовления приборов.

Существующие методы проектирования сложных приборов и систем опираются на широкое применение методов математического моделирования с использованием современных средств вычислительной техники. Отсутствие доступных моделирующих программ имитации работы ВТГ приводит к сложности поиска оптимальных конструкций и схемотехнических решений.

В практике применения ВТГ существуют две схемы построения приборов: измеритель угла поворота и измеритель угловой скорости вращения. В датчике измерения угла используются инерционные свойства стоячей волны и оценивается угол поворота корпуса изделия относительно этой волны через коэффициент пересчета.

---

**Чуманкин** Евгений Алексеевич. Кандидат технических наук, начальник отдела ОАО Арзамасское научно-производственное предприятие «ТЕМП-АВИА».

Статья по докладу на XIX Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам.

В датчике угловой скорости ДУС-ВТГ осуществляется удержание стоячей волны относительно корпуса прибора в неизменном положении с применением дополнительных исполнительных устройств. Возбуждаемая стоячая волна в пучностях удерживается на одном уровне, а возникающая волна в узлах подавляется. Усилие, прикладываемое к элементам конструкции, и является эквивалентной величиной действующей угловой скорости.

В данной работе рассматриваются вопросы проектирования ДУС-ВТГ для создания блока чувствительных элементов инерциальной навигационной системы средней точности с эквивалентным дрейфом гироскопов  $2-3^\circ/\text{ч}$ .

### Система проектирования ДУС-ВТГ

При проектировании ДУС-ВТГ в качестве исходных данных выставлены требования по следующим параметрам: диапазон измеряемых угловых скоростей, точность измерения, динамические характеристики, габариты; потребляемая мощность; условия эксплуатации.

Работа прибора основывается на волновых процессах в тонкой оболочке, параметры которой существенным образом влияют на характер поведения волны в условиях внешних возмущений.

Математическая модель описания волнового процесса в тонкой оболочке имеет вид [2, 3]

$$\ddot{r}'' - \ddot{r} + 2\Omega\dot{r}' + 2\dot{\Omega}r' + \xi_{\text{демп}}(\dot{r}^{IV} + 2\dot{r}^{IV} + \dot{r}^{II}) - \omega^2(r^{VI} + 2r^{IV} + r^{II}) = f_b(t, \varphi) + f_k(t, \varphi), \quad (1)$$

где  $r$  – радиальные перемещения точек средней линии резонатора;  $\Omega$  – измеряемая угловая скорость;  $\xi_{\text{демп}}$  – коэффициент демпфирующих сил;  $\omega$  – собственная частота колебаний резонатора;  $f_b$ ,  $f_k$  – приведенные внешние силы;  $\varphi$  – угол ориентации стоячей волны относительно собственных осей оболочки.

Применительно к волновым гироскопам отсутствует простая методика расчетов, позволяющая связать исходные требования и конкретные схемно-технические и конструктивные параметры прибора. Это связано со сложностью решения дифференциальных уравнений, описывающих поведение стоячей волны в резонаторе, и многочисленными нелинейными факторами, влияющими на работу прибора.

Возможность удержания стоячей волны в ДУС-ВТГ относительно связанных осей резонатора существенно упрощает математическую модель гироскопа. Для данного случая многие факторы погрешностей из-за неоднородностей в оболочке, обусловленных изменением угла ориентации стоячей волны в резонаторе, можно не учитывать в математической модели прибора с достаточной точностью.

Таким образом, с учетом возможности жесткой привязки стоячей волны к конструктивным элементам резонатора была выбрана математическая модель ДУС-ВТГ следующего вида [7, 8]:

$$\begin{aligned} \ddot{x} - k\Omega\dot{y} + 2\xi_1\omega_1\dot{x} + \omega_1^2x &= f_1(t) + f_{\text{ВОЗМ}}^x(t); \\ \ddot{y} + k\Omega\dot{x} + 2\xi_2\omega_2\dot{y} + \omega_2^2y &= f_2(t) + f_{\text{ВОЗМ}}^y(t), \end{aligned} \quad (4)$$

где  $x$  – перемещение резонатора в точке расположения элементов возбуждения;  $y$  – перемещение резонатора в точке расположения элементов съема информации;  $k$  – коэффициент передачи действия внешней угловой скорости на угловую

скорость поворота стоячей волны относительно резонатора;  $\omega_1, \omega_2$  – собственные частоты колебаний волн по осям  $x$  и  $y$  соответственно;  $\xi_1, \xi_2$  – коэффициенты добротности по осям  $x$  и  $y$ ;  $f_1$  – сила возбуждения резонатора;  $f_2$  – усилие подавления стоячей волны в точке съема информации;  $f_{\text{возм}}$  – силы возмущения по осям  $x$  и  $y$  соответственно.

На основе результатов исследования реальных резонаторов и с учетом [4–6] дополнительно введены нелинейные члены уравнений, позволяющие связать математическую модель с результатами экспериментов, а именно: изменение собственных частот и коэффициентов добротности как функции температуры и времени готовности, перекрестные связи между осями возбуждения и осями измерения, дополнительные шумы в каналах измерения при механических воздействиях на прибор и другие факторы.

Для решения задач проектирования ДУС-ВТГ была разработана программа моделирования для персонального компьютера, позволяющая оптимальным образом синтезировать систему управления датчика в соответствии с заданными требованиями, производить оценку погрешностей, моделировать динамику работы прибора. Основной особенностью программы моделирования является отсутствие перехода к уравнениям для огибающей стоячей волны, решение ищется с учетом высокочастотной составляющей.

Примененная математическая модель позволила разработать моделирующую программу ДУС-ВТГ с учетом возможности построения нелинейной, цифровой системы управления прибором, что обеспечило проведение синтеза регулятора на базе микроконтроллера с широким применением алгоритмов управления.

Поиск оптимальной схемы осуществляется подбором параметров контура управления в математической модели для достижения желаемых параметров прибора. При этом удается учитывать ряд важных факторов: запаздывание в исполнительных устройствах, ограничение по воздействующему усилию, наличие зоны нечувствительности в устройстве съема информации, а также различные шумы и возмущения.

Имеющиеся вычислительные средства не позволяют однозначно связать конструктивные элементы резонатора с желаемыми параметрами прибора. Существующие в настоящее время способы проектирования деталей и узлов с применением методов конечных элементов [11, 12] имеют недостаточную разрешающую способность по оценке влияния неидеальности изготовления геометрических размеров резонатора на разносторонность и расщепление частоты. Поэтому для задания конкретных параметров резонатора в математическую модель гироскопа необходимо провести ряд обмеров реальных образцов, в первую очередь разночастотность и разносторонность в диапазоне рабочих температур, а также величины перекрестных связей, масштабные коэффициенты, амплитуды квадратурных составляющих и др. Оценка требуемых параметров резонатора осуществляется по широко известным методикам с помощью ряда универсальных электрорадиоизмерительных приборов широкого применения.

При проектировании ДУС-ВТГ необходимо обеспечить возбуждение резонатора ВТГ на второй моде и управление положением волны. Для обеспечения поддержания заданной амплитуды стоячей волны в резонаторе необходимо сформировать контур управления в осях возбуждения. Также необходимо спроектировать регулятор по обратной связи для контура подавления волны в осях измерения и оценки полезного сигнала.

Для уменьшения погрешности гироскопа дополнительно необходимо сформировать контур подавления квадратурной составляющей стоячей волны в осях измерения. С помощью разработанной моделирующей программы была построена система управления ДУС-ВТГ, реализованного на основе металлического резонатора.

В процессе разработки прибора поставлена задача обеспечения максимальной чувствительности гироскопа за счет минимизации количества дополнительно вводимой в колебательный контур резонатора энергии.

Возможным вариантом построения регулятора автогенератора является введение положительных обратных связей в цепь управления электромеханического резонатора. При условии возникновения критерия баланса фаз и амплитуд в системе самопроизвольно начинают формироваться устойчивые автоколебания на одной из резонансных частот. Как правило, захват происходит на высоких гармониках, что обусловлено наличием на этих частотах минимальных требований по условию возникновения режима автоколебаний. Поэтому возникает необходимость введения узкополосных фильтров в цепи управления резонатором, настроенных на частоту основной рабочей моды автогенератора. В свою очередь резонансный фильтр имеет крутую зависимость фазовой характеристики от частоты, и при реализации фильтра требуется точная настройка по частоте для обеспечения всех условий режима автоколебаний.

Замкнутая система может выйти на режим устойчивых колебаний только при наличии внешнего стимулирующего гармонического сигнала на частоте, близкой к основной моде колебаний [9], что обусловлено неким порогом чувствительности электромеханического резонатора. При этом ужесточаются требования по предварительной частотной настройке узлов и не обеспечивается максимальная эффективность прикладываемой мощности из-за существенной нелинейности фазовой характеристики фильтра на резонансной частоте.

Для решения возникших противоречий был сформирован фильтр-генератор (ФГ) с высокой добротностью. Структурная схема такого фильтра представлена на рис. 1.

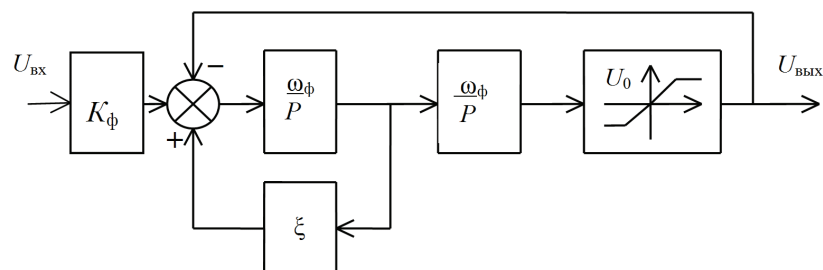


Рис. 1. Структурная схема фильтра-генератора

Представленный ФГ имеет внутреннюю слабую положительную обратную связь через коэффициент  $\xi$  и нелинейное звено в виде ограничения по амплитуде. Дифференциальное уравнение, описывающее работу ФГ, имеет вид:

$$\ddot{U}_{\text{вых}} - 2\xi\omega_{\text{ф}}\dot{U}_{\text{вых}} + \omega_{\text{ф}}^2 U_{\text{вых}} = K_{\text{ф}} U_{\text{вх}},$$

$$U_{\text{вых}} = \begin{cases} U_{\text{вых}} & \text{при } \text{abs}(U_{\text{вых}}) < U_0 \\ \text{sign}(U_{\text{вых}})U_0 & \text{при } \text{abs}(U_{\text{вых}}) \geq U_0. \end{cases} \quad (5)$$

В начальный момент времени при отсутствии входного сигнала в соответствии с общим решением дифференциального уравнения и с учетом малости значения  $\xi$  выходной сигнал будет иметь вид [10]

$$U_{\text{вых}} = U(0) \cdot e^{\xi \frac{t}{T_{\Phi}}} \cdot \sin(\omega_{\Phi} t), \quad (6)$$

где  $U(0)$  – тепловой шум электроники;  $\xi$  – декремент “затухания” (в данном случае возбуждения) выбирается исходя из желаемого времени выхода на режим генератора

$$\xi = \frac{T_{\Phi}}{t_{\text{жел}}} \ln\left(\frac{U_0}{U(0)}\right), \quad (7)$$

где  $t_{\text{жел}}$  – желаемое время возбуждения.

С учетом выхода на ограничение выходного сигнала в установившемся режиме можно записать [9]

$$U_{\text{вых}}(t) = U_0 \sin(\omega_{\Phi} t). \quad (8)$$

При этом будут присутствовать незначительные искажения формы сигнала в виде ограничения амплитуды, которыми можно пренебречь из-за высокой добротности резонатора. Таким образом, обеспечивается режим работы устройства по схеме генератора с выдачей синусоидального сигнала на заданной частоте  $\omega_{\Phi}$ .

Второй режим работы устройства можно описать следующим образом. При появлении на входе ФГ синусоидального сигнала устройство работает как обычный фильтр второго порядка промежуточных частот. При этом коэффициент усиления на низких и высоких частотах в несколько раз меньше коэффициента усиления на средних частотах. При частоте входного сигнала, близкой к собственной частоте фильтра  $\omega_{\Phi}$ , происходит захват частоты с некоторым увеличением амплитуды на первом интеграторе.

Выходной сигнал фильтра описывается в виде частного решения дифференциального уравнения

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{вх}} K_{\Phi} t \cdot \sin(\omega_{\Gamma} t),$$

где  $\omega_{\Gamma}$  – резонансная частота генератора.

С учетом звена ограничения амплитуды имеем

$$U_{\text{вых}} = U_0 \cdot \sin(\omega_{\Gamma} t).$$

Амплитуда выходного сигнала остается при этом неизменной. Важным свойством ФГ является постоянство сдвига фаз в большом диапазоне частот входного сигнала при определенных значениях коэффициента усиления, за счет чего удастся обеспечить необходимое условие возникновения устойчивых автоколебаний для электромеханического резонатора в большом диапазоне собственных частот механической и электрической части.

С помощью созданной математической среды был промоделирован алгоритм работы фильтра-генератора и реализовано устройство в виде электронной схемы. На рис. 2 и 3 представлены результаты работы ФГ в виде изменения фазы и частоты соответственно в момент захвата частоты от входного сигнала.

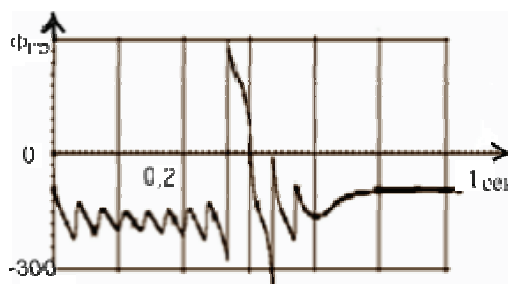


Рис. 2. Изменение фазы

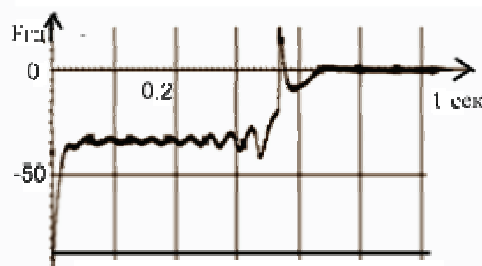


Рис. 3. Изменение частоты

В начальный момент времени схема работает как генератор со сдвигом частоты 40 Гц и со сдвигом фазы  $-180^\circ$ . После 0,3 с происходит самонастройка фильтра на заданную частоту, и сдвиг фазы устанавливается  $-90^\circ$ , что необходимо для существования устойчивых автоколебаний в системе.

Из оценки фактической величины сигнала возбуждения для поддержания требуемой амплитуды автоколебаний видно, что удалось минимизировать количество поступающей энергии в резонатор, при этом промежуточные переменные фильтра можно использовать в качестве опорной частоты демодулятора, сигнала подавления квадратуры и полезного сигнала отрицательной обратной связи контура подавления стоячей волны. Введение ФГ в контур возбуждения резонатора позволило существенно уменьшить влияние гармонических механических воздействий на работу прибора за счет поддержания заданной частоты на выходе генератора при наличии большой помехи на входе.

По рабочей документации, разработанной с помощью программы моделирования, был изготовлен макетный образец блока чувствительных элементов на базе ДУС-ВТГ, произведена его отладка. Общий вид трехосного БЧЭ на базе ДУС-ВТГ и трехосного блока акселерометров БА-24 представлен на рис. 4.

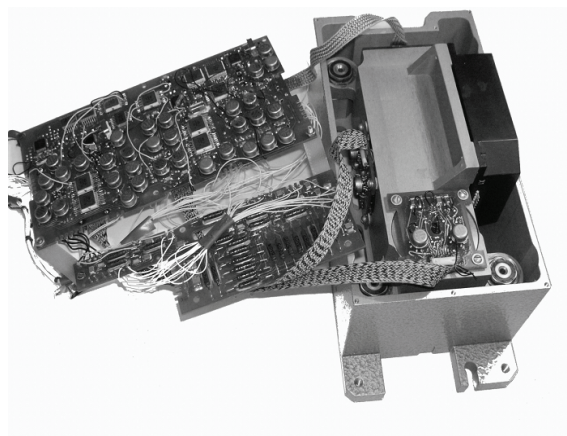


Рис. 4. Общий вид БЧЭ на базе ДУС-ВТГ и блока акселерометров БА-24

Результаты математического моделирования работы ВТГ и лабораторных испытаний макетного образца в основном совпали, из чего можно сделать вывод о достаточно высоком приближении математической модели прибора к реально действующему образцу.

На рис. 5 представлен выходной сигнал ДУС-ВТГ в виде накопленного угла поворота при постоянной угловой скорости  $360^\circ/\text{с}$  в интервале  $0,2\text{--}0,7\text{ с}$ ; на рис. 6 – динамическая ошибка по накопленному углу при данном виде воздействия.

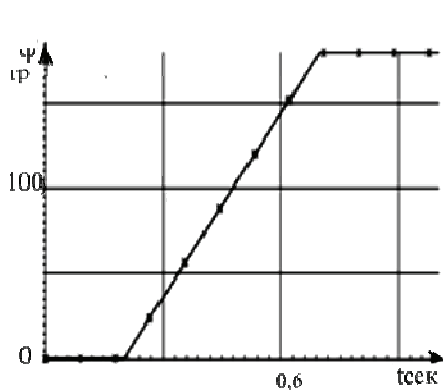


Рис. 5. Выходной сигнал ДУС-ВТГ

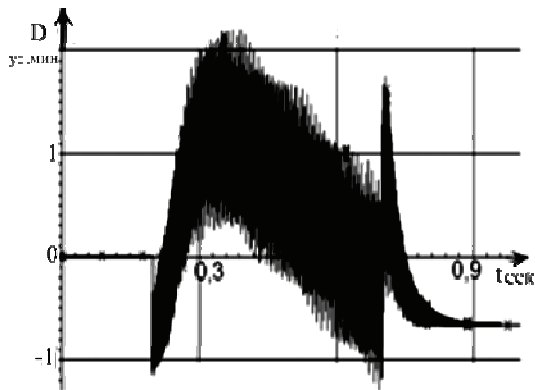


Рис. 6. Динамическая ошибка ДУС

Применение моделирующей программы ВТГ позволило создать нелинейный регулятор управления на основе микроконтроллера, обеспечивающий минимальные фазовые искажения при использовании в основном элементов дискретной логики и фильтров второго порядка. При этом удалось существенно сократить габариты электронного модуля и снизить влияние собственных погрешностей радиоэлементов на выходные параметры прибора.

Регулятор ДУС-ВТГ удалось реализовать на базе микроконтроллера программным способом с применением алгоритмов фильтрации и алгоритмов компенсации инструментальных погрешностей. Применение микроконтроллера также позволило обеспечить цифровой интерфейс прибора.

### Заключение

Моделирующая программа ДУС-ВТГ позволяет производить расчет основных параметров датчика в удобной для восприятия среде, используя традиционные навыки разработки в области электромеханических гироскопов; проста в восприятии и существенно сокращает сроки разработки.

Разработанный блок чувствительных элементов на базе ДУС-ВТГ обеспечивает измерение угловой скорости в диапазоне  $300^\circ/\text{с}$ , интегральную чувствительность оценки приращения угла поворота  $1\text{ усл. мин}$ , при этом случайный дрейф гироскопа не превышает  $5^\circ/\text{ч}$ .

Основным недостатком созданного макета БЧЭ является большое время выхода на рабочий режим ( $\sim 5\text{--}10\text{ мин}$ ) в интервале рабочих температур и существенное изменение систематической составляющей дрейфа на длительном интервале времени (более двух лет). Повышение технических характеристик ДУС-ВТГ, возможно, удастся достигнуть за счет более качественной балансировки металлического резонатора гироскопа.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Bryan G.H.** On the Beats in the Vibrations of a Revolving Cylinder or Bell // Proc. Camb. Phil. Soc. Math. Phys. Sci -1890. – V. 7. – P. 101-111.
2. **Журавлев, В.Ф.** Волновой твердотельный гироскоп / В.Ф.Журавлев, Д.М.Климов.- М.: Наука, 1985. -126 с.
3. **Матвеев, В.Л.** Проектирование волнового твердотельного гироскопа / В.Л.Матвеев, В.И.Липатников, А.В.Алехин.- М.: МГТУ, 1998. -168 с.
4. **Лунин, Б.С.** Физико-химические основы разработки полусферических резонаторов волновых твердотельных гироскопов.- М.: Изд-во МАИ, 2005.
5. **Матвеев, В.А.** Навигационные системы на волновых твердотельных гироскопах / В.А.Матвеев, Б.С.Лунин, М.А.Басараб.- М.: Изд-во Физматлит, 2008.
6. **Lynch, D.D.** Vibration-induced drift in the hemispherical resonator gyro // Proc. Of the Annual Meeting of the Institute of Navigation, 23-25 June, 1987. – Dayton, Ohio. – P. 34 -37.
7. **Журавлев, В.Ф.** Волновой твердотельный гироскоп: современное состояние теории // Российско-американский журнал «Актуальные проблемы авиационных и аэрокосмических систем: процессы, модели, эксперимент». – 2011.- № 2(33).
8. **Бонштедт, А.В.** Восьмиточечная модель твердотельного волнового гироскопа / А.В.Бонштедт [и др.] // Вестник Удмуртского университета. – 2007. - № 1. - С. -135-214.
9. **Зайцев, В.В.** Моделирование автоколебаний в генераторе с электромеханическим резонатором / В.В.Зайцев [и др.] // Вестник Самарского ГУ, 2003.
10. **Камке, Э.** Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям.- М. 1965.
11. **Зенкевич, О.** Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975.
12. **Еременко, С.Ю.** Методы конечных элементов в механике деформируемых тел. – Харьков: Изд-во «Основа» при Харьковском университете. 1991.

**Abstract.** Problems of angular rate sensor (ARS) development based on hemispherical resonator gyroscope (HRG) are considered. Sufficiency of the simplified gyro model is justified in the view of two equations for mathematical oscillator. By comparison of physical parameters of the metal resonator with mathematical model, special coefficients for equations are chosen as well as additional terms, which describe the external perturbations, are introduced in the right side of equation. The gyro mathematical model, derived in such a way, is a basis for mathematical programming, which, in turn, provides synthesis of the sensor for parameters to be set. On the basis of the development results, three-axis angular rate sensor assembly is manufactured and calibrated. The experimental results of the gyro assembly agree closely with the results of mathematical simulation.

**Key words:** development, angular rate sensor, hemispherical resonator gyroscope, mathematical simulation