

на результаты измерений АФР оказывают направленные свойства антенны-зонда. И использование в качестве зондов широкополосных антенн с КНД порядка 9–13 дБ приводит к сглаживанию вариаций поля по сравнению с открытым концом волновода, имеющим КНД около 6–8 дБ.

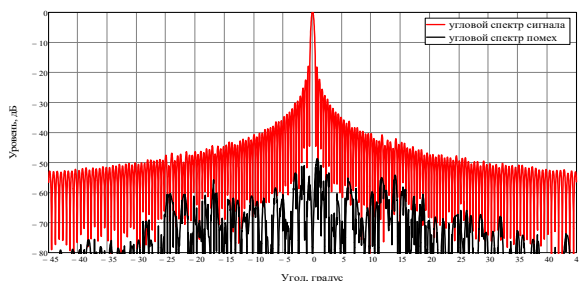


Рисунок 3 – Угловое распределение помех в вертикальное плоскости на частоте 10 ГГц

**Выводы.** Реализованная схема антенного измерительного комплекса на основе радиоколлиматора с зеркалом со скругленными краями обес-

печивает превосходство по величине ЭУП порядка 10 дБ над имеющимися аналогами с зубчатыми краями. Достигнутые характеристики позволяют использовать комплекс при выполнении измерений, требующих высокую точность или же в качестве эталонного компаратора при измерениях радиотехнических характеристик апертурных антенн.

#### Литература

1. Lee, T.-H. Performance Tradeoff Between Rolled and Serrated Edge / Teh-Hong Lee; W. D. Burnside // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1996. – Vol. 44, № 1.
2. Озеро, М. А. Многомерная пространственная фильтрация для повышения точности измерений электродинамических характеристик излучения антенн / М. А. Озеров, А. В. Титаренко // Измерительная техника. – 2021. – № 11. – С. 46–54.
3. Wayne, D. Effects of a Non-Ideal Plane Wave on Compact Range Measurements / D. Wayne, J. Fordham, J. McKenna // Antenna Measurements Techniques Association 2014 Proceedings. – 2014.

УДК 681.586.2

### АНАЛИЗ СПОСОБОВ СОЗДАНИЯ ПЕРВИЧНЫХ КОЛЕБАНИЙ В МЕТАЛЛИЧЕСКОМ РЕЗОНАТОРЕ

Абгарян Ж.С., Дулуб Я.В., Лихошерст В.В.

ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»  
Тула, Российская Федерация

**Аннотация.** Рассмотрены два способа создания первичных колебаний волнового твердотельного гироскопа с металлическим резонатором. Проведены экспериментальные исследования и анализ достоинств и недостатков обоих способов с позиции построения датчика угловой скорости для систем ориентации или стабилизации.

**Ключевые слова:** резонанс, автоколебания, собственная частота, гироскоп.

### ANALYSIS OF WAYS TO CREATE PRIMARY OSCILLATIONS IN A METAL RESONATOR

Abgaryan Zh., Dulub Ya., Likhosherst V.

Tula State University  
Tula, Russian Federation

**Abstract.** Two methods of creating primary oscillations of a wave solid-state gyroscope with a metal resonator are considered. Experimental studies and analysis of the advantages and disadvantages of both methods have been carried out from the position of constructing an angular velocity sensor for orientation or stabilization systems.

**Key words:** resonance, self-oscillation, natural frequency, gyroscope.

Адрес для переписки: Лихошерст В.В., пр. Ленина, 95, Тульский государственный университет, ЛИДПИ СОиН, Тула 300012, Российская Федерация  
e-mail: lvy\_01@inbox.ru

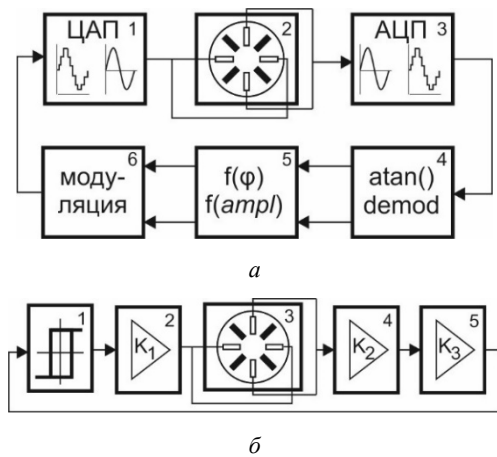
Выбор способа создания первичных колебаний является первоочередной задачей с которой сталкиваются разработчики при проектировании волнового твердотельного гироскопа (ВТГ), в частности с металлическим цилиндрическим резонатором [1]. Принцип работы гироскопов такого типа известен довольно давно [2], при этом одним из основных требований обеспечения функционирования гироскопа является создание

и поддержание колебаний на резонансной частоте. На сегодняшний день широко используются два способа: создание вынужденных колебаний на резонансной частоте и построение автоколебательного контура [1]. В упрощенном виде структурные схемы контуров приведены на рис. 1.

На рис. 1, а приведена структурная схема контура поддержания колебаний на резонансной частоте. Работа контура реализуется следующим

образом: на пьезоэлементы резонатора 2 подается сигнал с ЦАП 1 на частоте, определенной на стадии производства резонатора. АЦП 3 приводит выходной сигнал с другой пары пьезоэлементов к цифровой форме. На основе полученного сигнала вычислительным алгоритмом 4 определяются амплитуда и фаза по отношению к поданному сигналу. Вычислитель 5 вырабатывает необходимые для поддержания резонанса величины фазы, частоты и амплитуды, после чего блоком 6 формируется управляющий сигнал в цифровом виде и подается на ЦАП.

Сложность построения такого контура заключается в малой ширине резонансной зоны (порядка десятых долей герц при собственных частотах от 4500 до 8000 Гц), что предъявляет высокие требования к точности измерения/вычисления и формирования частоты, амплитуды и фазы сигнала управления.



*a* – вынужденные колебания на резонансной частоте;  
*б* – автоколебания;

Рисунок 1 – Структурные схемы создания первичных колебаний

Автоколебательный контур (рис. 1, б) формирует посредством триггера Шмитта 1 прямоугольные импульсы. Амплитуда импульсов уменьшается до требуемого уровня коэффициентом  $K_1$  усилителя 2 после чего они поступают на пьезоэлементы резонатора 3. Гармонический сигнал с другой пары пьезоэлементов резонатора поступает на предварительный усилитель 4 с коэффициентом  $K_2$ . Усилитель 5 служит для формирования сигнала требуемой амплитуды на входе триггера Шмитта. При построении автоколебательного контура основной трудностью является малая мощность исполнительных пьезоэлементов не досточная на не резонансных частотах для деформирования основания с требуемой амплитудой отклика резонатора.

Для проведения сравнительного анализа использовался резонатор с собственной частотой порядка 7,5 кГц. Структурные схемы контуров

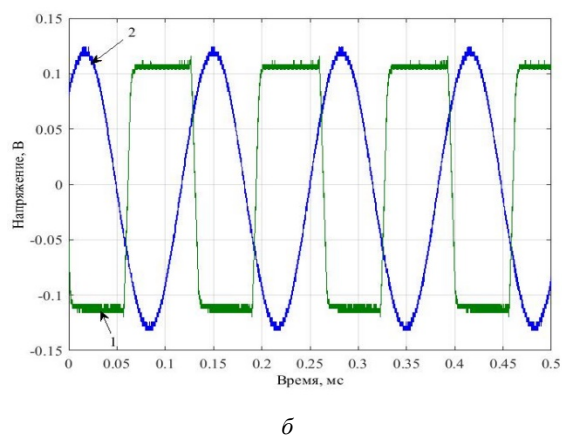
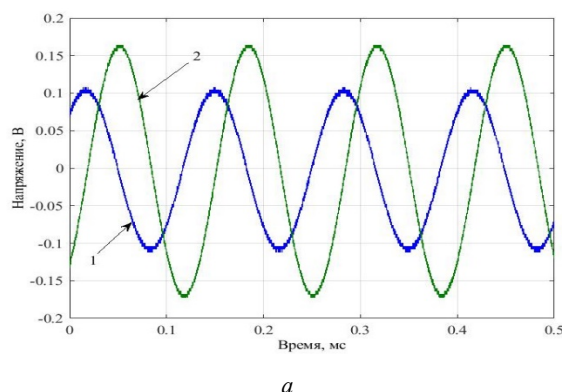
(рис. 1) были реализованы наиболее простыми способами:

– вынужденные колебания реализованы лабораторным генератором, условие резонанса – фазовое запаздывание между входными и выходными колебаниями  $90^\circ$  обеспечивалось путем изменения частоты генерируемого сигнала.

– автоколебательный контур построен на базе операционных усилителей. Коэффициенты усиления и пороги срабатывания триггера выбирались такими, чтобы обеспечить запуск колебаний при подаче питания на схему.

Амплитуды напряжения возбуждения были реализованы равными в двух схемах. Анализ функционирования схем создания первичных колебаний проводился по следующим параметрам: время разгона; время выбега (уменьшение выходного напряжения до уровня менее 20 мВ); амплитуда и частота в установившемся состоянии; фазовый угол между входным и выходным сигналом.

Проведены испытания в процессе которых записаны осциллограммы сигналов, приведенные на рис. 2, где 1 – задающий сигнал, 2 – сигнал, получаемый с резонатора. Величины, измеренные по осциллограммам (рис. 2) и осциллограммам разгона и выбега сведены в табл. 1.



*a* – вынужденные колебания на резонансной частоте;  
*б* – автоколебания

Рисунок 2 – Осциллограммы входных и выходных сигналов

Таблица 1. Результаты измерений

Наименование	Значение	
	Вынужденные колебания	Автоколебания
Способ возбуждения		
Время разгона, с	3,5	4
Время выбега, с	3	2,5
Амплитуда раскачки, мВ	220	220
Амплитуда установившаяся, мВ	336	240
Частота колебаний, Гц	7518,45	7518,69
Фазовый угол, °	-90	-144

Анализ данных табл. 1 позволяет сделать следующие выводы:

- при автоколебательном режиме резонатор работает на за резонансной частоте, что и определяет уменьшение амплитуды колебаний и увеличение фазы по сравнению с режимом вынужденных колебаний;
- время выбега и разгона в режиме автоколебаний меньше чем в режиме вынужденных колебаний, это приводит к увеличению времени готов-

ности гироскопа в целом и препятствует построению датчика угла с малым временем работы (наличие свободной волны при выбеге).

Проведенное исследование подтверждает вывод, что автоколебательный контур значительно проще и дешевле при реализации, однако простейшая его схема построения не позволяет получить характеристик соответствующих режиму резонансной настройки, т.е. требуется более тщательное исследование и доработка его структуры.

**Благодарности.** Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания по теме «Развитие теории инерциальных датчиков первичной информации для навигационных систем высокоманевренных летательных аппаратов» (FEWG-2022-0002).

#### Литература

1. Волновой твердотельный гироскоп с металлическим резонатором / В. Я. Распопов [и др.] ; под ред. В. Я. Распопова. – Тула: Издательство ТулГУ, 2018. – 189 с.
2. Журавлев, В. Ф. Волновой твердотельный гироскоп / В. Ф. Журавлев, Д. М. Климов. – М.: Наука, 1985. – 125 с.

УДК 531.383

### ЗАДАЧА ОРИЕНТАЦИИ В БЕСПЛАТФОРМЕННОЙ ИНЕРЦИАЛЬНОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ

Матвеев В.В., Колесникова А.Г., Стрельцов Д.С.

ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»  
Тула, Российская Федерация

**Аннотация.** Рассматриваются алгоритмы ориентации бесплатформенной инерциальной навигационной системы. Дана характеристика кинематических параметров, используемых для описания положения подвижного объекта: углов Эйлера-Крылова, направляющих косинусов, параметров Родрига-Гамильтона, компонентов вектора Эйлера. Приводятся кинематические уравнения, связывающие параметры ориентации и проекции вектора угловой скорости подвижного объекта.

**Ключевые слова:** кинематические параметры, алгоритм ориентации, бесплатформенная инерциальная навигационная система.

### PROBLEM OF ORIENTATION IN STRAPDOWN INERTIAL NAVIGATION SYSTEM

Matveev V., Kolesnikova A., Streltsov D.

Tula State University  
Tula, Russian Federation

**Abstract.** Algorithms for orientation of a strapdown inertial navigation system are considered. The characteristic of the kinematic parameters used to describe the position of a moving object is given: Euler-Krylov angles, direction cosines, Rodrigues-Hamilton parameters, components of the Euler vector. Kinematic equations are given that relate the orientation parameters and projections of the angular velocity vector of a moving object.

**Key words:** kinematic parameters, orientation algorithm, strapdown inertial navigation system.

Адрес для переписки: Матвеев В.В., пр. Ленина, 95, Тула 300012, Российская Федерация  
e-mail: matweew.valery@yandex.ru

**Введение.** В настоящее время бесплатформенные инерциальные навигационные системы (БИНС) являются наиболее перспективными

системами в тех применениях, где требуется полная автономность, т.е. отсутствие какой-либо связи с внешней средой. Кроме того, в БИНС