

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

отсутствует гиросtabilизированная платформа, обладающая большими габаритами, массой и низкой надежностью, а инерциальные чувствительные элементы устанавливаются непосредственно на борту подвижного объекта. При этом функции гиросtabilизированной платформы выполняет вычислительное устройство, позволяющее алгоритмически пересчитывать показания акселерометров из связанной системы координат в опорную, на основе решения задачи ориентации. Прямым интегрированием получить углы поворота объекта не представляется возможным, так как проекции угловой скорости не являются голономными координатами [1]. Корректный способ определения углов отклонения подвижного объекта относительно опорной системы координат состоит в интегрировании кинематических уравнений относительно искомым параметров ориентации. В качестве параметров ориентации могут служить углы Эйлера-Крылова, направляющие косинусы, параметры Родрига-Гамильтона, вектор конечного поворота и др. От эффективности алгоритмов ориентации зависит точность определения координат местоположения объекта.

Обзору кинематических параметров, используемых для решения задачи ориентации, посвящен настоящий доклад.

**Углы Эйлера-Крылова.** Три угла:  $\psi$  – рыскание,  $\vartheta$  – тангаж,  $\gamma$  – крен, называемые углами Эйлера-Крылова, описывают положение подвижного объекта относительно опорной системы координат  $OX_gY_gZ_g$  (рис. 1). БИНС содержит инерциальный измерительный модуль на трех гироскопах с измерительными осями, направленными вдоль осей связанной с подвижным объектом системы координат  $OXYZ$ . Каждый гироскоп измеряет одну из трех проекций абсолютной угловой скорости объекта  $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ .

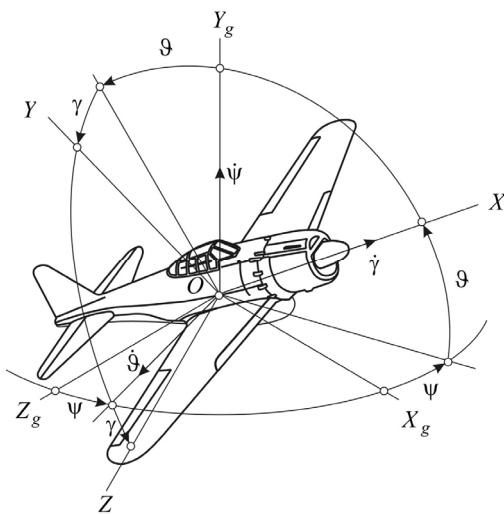


Рисунок 1 – Углы ориентации подвижного объекта

В этом случае углы ориентации могут быть найдены на основе решения трех кинематических уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \dot{\psi} &= \frac{1}{\cos \vartheta} (\omega_y \cos \gamma - \omega_z \sin \gamma), \\ \dot{\vartheta} &= \omega_y \sin \gamma + \omega_z \cos \gamma, \\ \dot{\gamma} &= \omega_x - \operatorname{tg} \vartheta (\omega_y \cos \gamma - \omega_z \sin \gamma). \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Недостатком кинематических уравнений в углах Эйлера-Крылова является наличие особой точки при угле тангажа значением  $90^\circ$ , так как данные углы по сути моделируют некоторый виртуальный карданов подвес, поэтому в англоязычной литературе такой эффект называют «*gimbal lock*» («запирание кардана»).

**Направляющие косинусы.** Угловое положение подвижного объекта можно задать девятью направляющими косинусами между осями двух систем координат. Алгоритм ориентации с направляющими косинусами основан на решении матричного уравнения Пуассона [2]:

$$\dot{A} = -[\omega \times]A, \quad (2)$$

где  $[\omega \times]$  – кососимметрическая матрица, являющаяся матричным эквивалентом векторного произведения и составленная из проекций вектора угловой скорости подвижного объекта,  $A$  – матрица направляющих косинусов, характеризующая переход от опорной системы координат к связанной.

После численного решения уравнения (2) осуществляется переход к углам рыскания, тангажа и крена.

Особенностью уравнений (2) является их линейность и определенность для любых углов рыскания, тангажа и крена, т.е. отсутствие эффекта «*gimbal lock*». Недостатком алгоритма является девятый порядок системы (2), что ограничивает его применение.

**Параметры Родрига-Гамильтона.** Положение подвижного объекта можно задать 4-мя числами  $q_0, q_1, q_2, q_3$ , называемыми параметрами Родрига-Гамильтона [3]. Часто параметры Родрига-Гамильтона рассматривают как элементы кватерниона  $Q$  – гиперкомплексного числа, в котором мнимая часть содержит три мнимые единицы. Для кватернионов определена операция умножения, которая подобна матрицам, некоммутативна, но подчиняется свойствам дистрибутивности и ассоциативности.

Кинематическое уравнение в кватернионах имеет вид

$$2\dot{Q} = Q \circ \Omega, \quad (3)$$

где  $Q$  – кватернион ориентации,  $\Omega$  – кватернион, компонентами которого является показания гироскопов, « $\circ$ » – символ произведения кватернионов.

По элементам кватерниона  $Q$  восстанавливаются углы рыскания, тангажа и крена. Кинематические уравнения (3) линейные, имеют четвертый порядок и определены для любых значений углов ориентации, что делает их наиболее часто используемых в алгоритмах БИНС.

**Вектор Эйлера.** Понятие вектора Эйлера связано с одноименной теоремой, согласно которой произвольное вращение твердого тела вокруг неподвижной точки можно осуществить одним поворотом вокруг соответствующим образом избранной оси вращения, проходящей через эту точку. Вектор Эйлера  $\phi$  направлен по оси конечного поворота, а его проекции на оси связанной системы координат определяются через направляющие косинусы оси конечного поворота.

Кинематическое уравнение для вектора Эйлера приближенно имеет вид [4]

$$\dot{\phi} \approx \omega + \frac{1}{2} \phi \times \omega + \frac{1}{12} \phi \times (\phi \times \omega), \quad (4)$$

где  $\omega$  – вектор угловой скорости подвижного объекта.

Использование вектора Эйлера вместо направляющих косинусов и кватернионов приводит к уменьшению объема вычислений, поскольку вы-

числяется не девять элементов матрицы направляющих косинусов и не четыре параметра Родрига-Гамильтона, а всего три проекции вектора ориентации на измерительные оси. К тому же отпадает необходимость в нормировке составляющих вектора Эйлера в отличие от направляющих косинусов и параметров Родрига-Гамильтона.

**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 высокоточных летательных аппаратов (FEWG-2022-0002)».

#### Литература

1. Магнус, К. Гироскоп. Теория и применения / К. Магнус. – М.: Мир, 1974. – 516 с.
2. Бранец, В. Н. Применение кватернионов в задачах ориентации твердого тела / В. Н. Бранец, И. П. Шмыглевский. – М.: Наука, 1973. – 320 с.
3. Ишлинский, А. Ю. Ориентация, гироскопы и инерциальная навигация / А. Ю. Ишлинский. – М.: Наука, 1976. – 672 с.
4. Bortz, J. E. A New Mathematical Formulation for Strapdown Inertial Navigation / J. E. Bortz // IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine. – 1971. – Vol AES-7, No. 1. – P. 61–66.

УДК 681.5.09

## МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ АВТОМАТИКИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Мацук А.С., Савкова Е.Н.

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь*

**Аннотация.** Представлена концепция применения технологий оценки рисков и управления реестром риска на проектируемых и существующих системах автоматизации направленной на повышения надежности систем автоматизации энергетического оборудования.

**Ключевые слова:** надежность, оценка рисков, система автоматизации, реестр рисков.

## METHODS OF INCREASING THE RELIABILITY OF AUTOMATION SYSTEMS OF POWER EQUIPMENT

Matsuk A., Saukova Y.

*Belarusian National Technical University  
Minsk, Republic of Belarus*

**Abstract.** The concept of applying risk assessment technologies and risk register management on designed and existing automation systems aimed at improving the reliability of automation systems of power equipment is presented.

**Keywords:** reliability, risk assessment, automation system, risk register.

*Address for correspondence: Matsuk A., lilia karastonova st.17, Minsk 2200689, Republic of Belarus;*

*Saukova Y., Nezavisimosty av. 65, Minsk 220113, Republic of Belarus*

*e-mail: 375336759859@yandex.by; savkova@bntu.by*

Системы автоматизации энергетических предприятий направлены на обеспечение эффективного выполнения рабочих процессов и их безопасности. К основным видам таких систем относятся релейная защита, противоаварийная

автоматика, автоматизированные системы производства и передачи тепловой и электрической энергии, системы контроля и учета электроэнергии и передача данных с приборов учета тепловой энергии. Несмотря на многообразие выполняе-