ВЕСТНИК
ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
МОРСКОГО И РЕЧНОГО ФЛОТА ИМЕНИ АДМИРАЛА С. О. МАКАРОВА

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-1104-1112

PRINCIPLE OF DETERMINING THE ORIENTATION DIRECTIONS USING VIBRATION GYROSCOPES

N. G. Bazhenov, O. A. Filina, E. Yu. Ermakova

Kazan State Power Engineering University, Kazan,
Republic of Tatarstan, Russian Federation

The article discusses a new principle of determining reference directions based on vibrating gyroscopes, allowing to improve the accuracy and speed of determining reference directions for various devices for military and civilian use, retains its vibrations in one plane while turning. The vibrating gyroscope, the device for determining the angular speed of the object containing responsive to the rotation of an object vibrating parts. The article describes the principles of operation of single-axis vibration micro gyroscope. The mathematical model of single-mass device describes the various modes of operation, specified the relations between the subject measurement value (rotation angle or a corresponding projection of the angular velocity) of generalized coordinates of the sensitive mass. Discussed in detail different modes of operation: one mode of forced oscillations (measuring angular velocity) and two modes of oscillations (for measuring the angle of rotation and for measuring the angular velocity).The proposed method for identifying the parameters of neravnomernosti suspension of the sensitive mass.Presents an analysis of the modes of operation of piezoelectric vibratory gyroscope.Identified patterns linking characteristics of piezoelectric vibratory gyroscope with its design parameters.The influence of residual gas damping of the vibrations of the vibrating gyroscopes resonators, and the properties of the various getter materials and their application to maintain a high vacuum in these devices. In vibrating gyroscopes must be maintained high vacuum inside the device, in particular, to micromechanical gyroscopes, where weight and size are small and gaps amount to several micrometers. Because of the small size of the corpus and the developed surface of the internal structure of MEMS gyroscopes, it is necessary the use of getter and ensure in them high vacuum. It is recommended to use non-evaporable getters, in which mixtures of zirconium, titanium, rare earth metals and alloys on their basis. Non-evaporable getters have high specific sorption capacity and can be regenerated after saturation by heating. In the design of gyroscopes, it is advisable to isolate the getter from the vacuum volume of the device before completing the processes of pumping and out gassing, as well as to avoid the use of materials that can release hydrocarbons.

Keywords:Vibrating gyro, magnetic flux, gyrostabilizer, gyro motor, dynamics of displacement, and dynamic characteristics of the float.

For citation:
Bazhenov, Nikolay G., Olga A. Filina, and Ekaterina Yu. Ermakova. “Principle of determining the orientation directions using vibration gyroscopes.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.5 (2017): 1104–1112. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-1104-1112.

УДК 621.313

ПРИНЦИП ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОРИЕНТИРНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ ВИБРАЦИОННЫХ ГИРОСКОПОВ

Н. Г. Баженов, О. А. Филина, Е. Ю. Ермакова

Казанский Государственный энергетический университет,
г. Казань, Республика Татарстан, Российская Федерация

В статье рассматривается новый принцип определения ориентирных направлений на основе вибрационных гироскопов, позволяющий повысить точность и быстродействие определения ориентирных направлений для различных устройств военного и гражданского назначения, сохраняющих свои колебания в одной плоскости при повороте. Излагаются принципы работы одноосного вибрационного микрогироскопа, приведена математическая модель одномассового устройства, описаны различные режимы его работы, указаны соотношения, связывающие подлежащую измерению величину (угол поворота или соответствующую проекцию угловой скорости) с обобщёнными координатами чувствительной массы. Подробно рассмотрены различные режимы функционирования прибора: один режим вынужденных колебаний (для измерения угловой скорости) и два режима собственных колебаний (для измерения угла поворота и угловой

скорости). Предложена методика для идентификации параметров неравножёсткости подвеса чувствительной массы. Представлен анализ режимов работы пьезоэлектрического вибрационного гироскопа. Выявлены закономерности, связывающие характеристики пьезоэлектрического вибрационного гироскопа с его конструктивными параметрами. Рассмотрено влияние остаточного газа на демпфирование колебаний резонаторов вибрационных гироскопов, а также свойства различных геттерных материалов и вопросы их применения для поддержания высокого вакуума в этих приборах. В вибрационных гироскопах должно поддерживаться высокое разрежение внутри корпуса прибора (в частности, в микромеханических гироскопах, где массогабаритные характеристики малы, а зазоры составляют единицы микрометров). Ввиду малого объема корпуса и развитой поверхности внутренней структуры микромеханических гироскопов представляется необходимым применение геттера и обеспечение в них высокого вакуума. Рекомендовано применение нераспыляемых геттеров, использующих смеси циркония, титана, редкоземельных металлов и сплавы на их основе. Нераспыляемые геттеры имеют большую удельную сорбционную емкость и могут быть регенерированы после насыщения путем нагревания. При конструировании гироскопов целесообразно изолировать геттер от вакуумного объема прибора до завершения процессов обезгаживания, а также избегать применения материалов, которые могут выделять углеводороды.

Ключевые слова: вибрационный гироскоп, магнитный поток, гиростабилизатор, гиромотор, динамика перемещения, динамические характеристики поплавок, пьезоэлектрические гироскопы.

Для цитирования:
Баженов Н. Г. Принцип определения ориентирных направлений с помощью вибрационных гироскопов / Н. Г. Баженов, О. А. Филина, Е. Ю. Ермакова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 5. — С. 1104–1112. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-1104-1112.

Введение

Предлагаемое устройство относится к области навигационной техники и имеет цель повысить точность и быстродействие в определении ориентирного направления «Север – Юг». Данный тип гироскопов является намного более простым и дешёвым при сопоставимой точности по сравнению с роторным гироскопом. Различают вибрационный гироскоп стержневого и роторного типа. К настоящему времени известны гироскопические компасы на базе двух- и трёхстепенных гироскопов, которые широко используются как в военном деле, так и в народном хозяйстве. Вибрационный гирокомпас (рис. 1) позволяет существенно уменьшить указанный недостаток и одновременно резко повысить точность в определении направления «Север – Юг». Он состоит из одноосного гироскопического стабилизатора (ГС), выполненного по классической схеме и размещённого строго вертикально оси стабилизации, и вибрационного гирокомпаса (ВГ), ось ротора которого соосна оси стабилизации ГС [1]. У стержневого типа чувствительным элементом являются некоторые вибрирующие массы, например стержни, подобные ветвям камертона.

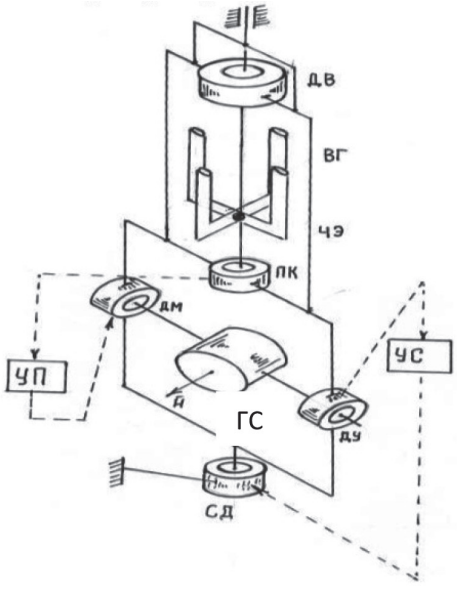

Рис. 1. Вибрационный гирокомпас

Методы и материалы

Вибрационный компас состоит из электродвигателя (ДВ), ротор которого закреплён на оси ротора ВГ, а статор — на стабилизационной площадке ГС, и преобразователя координат (ПК), закреплённого по аналогии с электродвигателем — ротор ПК на оси, статор — на стабилизированной площадке ГС. Причём две статорные обмотки размещены под углами 45° к главной оси гирокомпаса. Один из гироскопов стержневого типа, получивший практическое применение, называется *гиротроном*. Основу ВГ составляют четыре грузика массой m_i, где i = 1, 2, 3, 4 — четыре пьезокристалла, образующие рычаги длиной l_i, на которых непосредственно размещены грузики. На рис. 2 представлена кинематическая схема одной пары грузиков, которые перемещаются на угол φ относительно перемещения оси поплавка $Ф_1$.

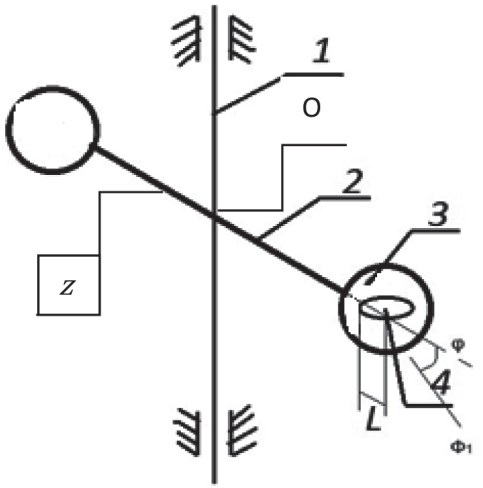

Рис. 2. Кинематическая схема гиродинамического датчика угловых скоростей:
1 — стержень; *2* — упругий торсион; *3*— камера; *4* — пластинки

Принцип работы вибрационного гирокомпаса состоит в следующем. Одноосный ГС предназначен для разгрузки оси стабилизации от воздействия вредных внешних моментов. Для этого с датчика угла (ДУ), размещённого по оси процессии, снимается сигнал, который усиливается и преобразуется по определённому закону в усилителе-преобразователе (УС) — и затем подаётся на стабилизирующий двигатель (СД), который и разгружает ось стабилизации. На датчик момента (ДМ) гиростабилизатора с выходной обмотки преобразователя координат подаётся сигнал вида $K_п \cdot \omega_п \cdot \gamma_0$, где $K_п$ — коэффициент передачи; $\omega_п$ — закон управления; γ_0 — угол отклонения пьезокристаллов от установившегося положения.

Результаты

Ветви вибратора-камертона с помощью специальной электрической схемы приводятся в колебательное движение. Если при этом объект вместе с основанием *3* вибратора поворачивается вокруг оси *Oz* с угловой скоростью w_y, то возникает момент Кориолиса сил инерции, вызывающий крутильные колебания вибратора вокруг оси *Oz*.

Уравнения движения одноосного ГС имеют вид:

$$J_\alpha \ddot{\alpha} + f\dot{\alpha} - H\dot{\beta} - k_c W_c \beta = M_\alpha - J_\alpha \omega_г \dot{\beta} - H\alpha; \quad (1)$$

$$J_\beta \ddot{\beta} + h\dot{\beta} + H\dot{\alpha} + k_п W_п \gamma_0 = M_\beta + J_\beta \omega_г \dot{\alpha} - H\omega_г \beta, \quad (2)$$

где J_β, J_α — моменты инерции ГС по осям стабилизации и прецессии соответственно; f, h — коэффициенты вязкого трения по осям подвеса; H — кинетический момент; k_c, W_c — статический коэффициент передачи и функция управления по оси стабилизации; M_α, M_β — возмущающие моменты по соответствующим осям; $\omega_г$, $\omega_в$ — соответственно горизонтальная и вертикальная составляю-

щие вращения Земли в точке определения ориентирного направления; $\ddot{\alpha}$, $\dot{\alpha}$, α, $\ddot{\beta}$, $\dot{\beta}$, β — угловые ускорения, скорости и координаты по осям стабилизации и прецессии соответственно.

Вибрационный гирокомпас предназначен для измерения горизонтальной составляющей вращения Земли по двум взаимно перпендикулярным направлениям [2]. Ротор ВГ приводится во вращение специальным синхронным электродвигателем ДВ и в установившемся движении ВГ и ГС, в принципе, независимы, или более точно — их зависимость проявляется только через момент M_α, действующий по осям стабилизации. При этом пластинка *4* колеблется между катушками *5*, амплитуда колебаний пропорциональна угловой скорости w_V.

При вращении ротора ВГ с угловой скоростью Ω = const и наличии $\omega_г$ на грузики m_i будут действовать кориолисовы силы инерции, которые создадут относительно центра размещения пьезокристаллов — точки *O* (см. рис. 2) — гироскопические моменты:

– одна пара диаметрально противоположных грузиков:

$$M_{г1} = 4m\omega_{г1}\Omega l^2 \sin\Omega t; \tag{3}$$

– вторая пара:

$$M_{г2} = 4m\omega_{г2}\Omega l^2 \cos\Omega t. \tag{4}$$

Здесь предполагается, что масса всех четырёх грузиков и длины плеч пьезокристаллов одинаковы. Значение w_V снимают с катушек *5* с помощью радиотехнических методов.

Тогда уравнения движения для каждой пары грузиков запишутся в виде:

$$J_{\alpha1}\ddot{\gamma}_1 + f_1\dot{\gamma}_1 + C_1\gamma_1 = 4m\omega_{г1}\Omega l^2 \sin\Omega t; \tag{5}$$

$$J_{\alpha2}\ddot{\gamma}_2 + f_2\dot{\gamma}_2 + C_2\gamma_2 = 4m\omega_{г2}\Omega l^2 \sin\Omega t, \tag{6}$$

где $\omega_{г1} = \omega_г\cos(45°+\gamma_0)$, $\omega_{г2} = \omega_г\cos(45° - \gamma_0)$; $J_{\alpha1}$, $J_{\alpha2}$ — моменты инерции рычагов относительно точки *O*; f_1, f_2 — коэффициенты вязкого трения; C_1, C_2 — коэффициенты жесткости пьезокристаллов; γ_i — угол отклонения рычагов грузиков (см. рис. 1).

Если принять во внимание равенство масс грузиков и длин плеч, то можно записать

$$J_{\alpha1} = J_{\alpha2} = 2ml^2 = J_{\alpha0}. \tag{7}$$

Решение уравнений (5) и (6) для установившегося процесса имеет вид:

$$\gamma_1 = \frac{-4m\omega_2\Omega l^2}{\sqrt{\Omega^2 f_1^2 - 2\Omega_{\alpha1}^{2J}C_1 + C_1^2 + \Omega^4 J_2\alpha_1}}\sin\left(\Omega t + \alpha_1\right); \tag{8}$$

$$\gamma_2 = \frac{-4m\omega_2\Omega l^2}{\sqrt{\Omega^2 f_2^2 - 2\Omega_{\alpha2}^{2J}C_2 + C_2^2 + \Omega^4 J_2\alpha_2}}\sin\left(\Omega t + \alpha_2\right), \tag{9}$$

где

$$\alpha_1 = \operatorname{arctg}\frac{\Omega f_1}{\Omega^2 J_{\alpha1} - C_1};$$

$$\alpha_2 = \operatorname{arctg}\frac{\Omega^2 J_{\alpha2} - C_{C2}}{\Omega f_2}.$$

Если выполняются условия: $C_1 = C_2 = C; f_1 = f_2 = f; \Omega = \sqrt{\dfrac{C}{J_{\alpha o}}}$,

$$\text{то } \gamma_1 = -\frac{2m\omega_{21}l^2}{f}\cos\Omega t; \tag{10}$$

$$\gamma_2 = -\frac{2m\omega_{22}l^2}{f}\sin\Omega t. \tag{11}$$

С каждой пары пьезокристаллов будут сниматься сигналы:

$$U_1 = k_1 \frac{2ml^2}{f} \omega_г \cos\left(45° + \gamma_0\right)\cos\Omega t; \tag{12}$$

$$U_2 = k_2 \frac{2ml^2}{f} \omega_г \cos\left(45° - \gamma_0\right)\sin\Omega t, \tag{13}$$

где k_1, k_2— коэффициенты передачи пьезокристаллов; γ_0— угол отклонения главной оси гироскопа ГС от направления «Север – Юг».

Напряжения U_1, U_2 с пьезокристаллов подаются на роторные (взаимно перпендикулярные) обмотки преобразователя координат. Прибор обладает рядом достоинств: отсутствие карданова подвеса, вращающихся и трущихся частей; наличие одной оси чувствительности; линейность показаний; высокая надёжность и др. [3].

С выходных обмоток ПК,также взаимно перпендикулярных и жестко закреплённых на стабилизированном основании гиростабилизатора, снимаются сигналы в виде:

$$U_{п1} = k_{п1} \cdot \varphi_2 \cos\Omega t - \varphi_1 \sin\Omega t; \tag{14}$$

$$U_{п2} = k_{п2} \cdot \varphi_2 \sin\Omega t + \varphi_1 \cos\Omega t, \tag{15}$$

где

$$\varphi_1 = k_1 \cdot \frac{2ml^2}{f} \omega_г \cos\left(45° + \gamma_0\right)\cos\Omega t;$$

$$\varphi_2 = k_2 \cdot \frac{2ml^2}{f} \omega_г \cos\left(45° - \gamma_0\right)\sin\Omega t;$$

$k_{п1}$, $k_{п2}$ — коэффициенты передачи преобразователя координат.

Обеспечив условия [4]: $k_{п1} \cdot k_1 = k_{п2} \cdot k_2 = k_0$, систему уравнений (14), (15) можно будет переписать в виде:

$$U_{п1} = k_0 \cdot \varphi_1 \frac{1}{2} \sin\Omega t\left[\cos\left(45° - \gamma_0\right) - \cos\left(45° + \gamma_0\right)\right]; \tag{16}$$

$$U_{п2} = k_0 \cdot \varphi_2 \left[\cos\left(45° - \gamma_0\right)\sin^2\Omega t + \cos\left(45° + \gamma_0\right)\cos^2\Omega t\right], \tag{17}$$

где $\varphi_2 = (2ml^2)/(f\omega_г)$.

Если теперь усилить и продемодулировать двойной частотой Ω сигнал с первой обмотки ПК, то получим

$$U_{п.ус} = k_{ус} \cdot \left[\cos\left(45° - \gamma_0\right) - \cos\left(45° + \gamma_0\right)\right] = k_п \gamma_0, \tag{18}$$

где k — коэффициент усиления.

Подав это напряжение на датчик момента ДМ гиростабилизатора в статическом режиме, имеем:

$$\gamma_0 = M_\beta / k_0 \text{ при } k_п \to \infty \text{ и } \gamma_0 \to 0.$$

Последнее означает, что при выборе определённого значения статического коэффициента передачи $k_п$ главная ось гироскопа ГС с точностью до $M_\beta / k_п$ будет стремиться совместиться с направлением «Север – Юг». Принцип работы роторного вибрационного гироскопа аналогичен, но вместо стержней и пластин вибрирующим элементом является вращающийся ротор с упругим подвесом [5], [6].

Можно поступить иначе — усилить и продифференцировать сигнал со второй статорной обмотки ПК, т. е.

$$U_{п2} = k\varphi_2 \sin^2\Omega t\left[\cos\left(45° - \gamma_0\right) - \cos\left(45° + \gamma_0\right)\right] = k_п \gamma_0, \tag{19}$$

затем также подать на ДМ ГС или вначале просуммировать с (17), а потом подать на ДМ, и, таким образом, решить задачу. Однако создание вибрационного гироскопа сопряжено с рядом технических трудностей. Если из сигнала $U_{п2}$ в уравнении (17) после его усиления выделить только постоянную составляющую и подать её на тот же ДМ ГС, то в этом случае главная ось гироскопа будет ориентирована на направление «Запад – Восток».

Возможности применения вибрационного гироскопа весьма разнообразны [7]. Гиродинамический датчик угловых скоростей может быть использован как самостоятельно (для измерения угловых скоростей), так и в сочетании с некоторыми устройствами и системами. Например, он может размещаться в роторе какого-либо гироскопического устройства. Наиболее просто прибор используется в качестве измерителя угловой скорости объекта (см. рис. 2). Его основу составляет вращающийся ротор, состоящий из оси вращения *1*, рычага *2*, поплавковых камер *3* и поплавков *4*, размещённых в жидкости и связанных с поплавковой камерой через пьезокристалл. Вибрационные гироскопы могут также найти применение в системах гироскопической стабилизации, в инерциальных навигационных системах и других областях гироскопической техники.

Поплавковая камера (рис. 3) выполняется в виде полусферы сочлененной с конусом, угол наклона образующей конуса к поверхности полусферы обозначен через α.

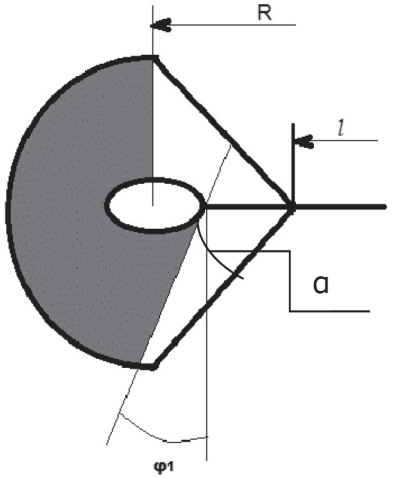

Рис. 3. Поплавковая камера

Полость полусферы полностью заполняется поддерживающей жидкостью с удельной массовой плотностью $\rho_ж$, а внутренняя полость конуса остаётся свободной. Поплавки, их по числу камер может быть два или четыре, погружаются в жидкость не полностью, а частично, например на 3/4 их объема. Кроме того, по форме они выполняются в виде эллипсоида вращения. Благодаря этому (при отсутствии измеряемых угловых скоростей) давление на поплавок, обусловленное центральными силами инерции, будет наименьшим, при переливании жидкости оно будет другим, увеличенным [8].

Уравнение движения одной пары закреплённых поплавков имеет вид

$$J\cdot\frac{d^2}{dt^2}\varphi_1+\mu\cdot\frac{d}{dt}\varphi_1+\left(C-m_0\Omega^2Rl\right)\varphi_1=$$
$$=2mRl\left\{\begin{array}{l}\left[\Omega\dot{\alpha}\sin\Omega t+\Omega\dot{\beta}\cos\Omega t\right]+\ddot{\beta}\cdot\frac{4}{\pi}\left[\frac{2}{3}\sin2\Omega t+\frac{4}{15}\sin4\Omega t+\frac{6}{35}\sin6\Omega t+...+\right]+\\ +\ddot{\alpha}\frac{2}{\pi}\left[1-\frac{2}{3}\cos2\Omega t-\frac{2}{15}\cos4\Omega t+\frac{2}{35}\cos6\Omega t+...\right].\end{array}\right. \quad (20)$$

Уравнение движения для второй пары поплавков, размещенных на рычагах взаимно перпендикулярно к рычагам первой пары, запишется в виде

$$J\cdot\frac{d^2}{dt^2}\varphi_2+\mu\cdot\frac{d}{dt}\varphi_2+\left(C-m_0\Omega^2Rl\right)\varphi_2=$$
$$=2mRl\left\{\begin{array}{l}\left[\Omega\dot{\alpha}\cos\Omega t+\Omega\dot{\beta}\sin\Omega t\right]+\ddot{\alpha}\cdot\frac{4}{\pi}\left[\frac{2}{3}\sin2\Omega t+\frac{4}{15}\sin4\Omega t+\frac{6}{35}\sin6\Omega t\right]+\\ +\ddot{\beta}\frac{2}{\pi}\left[1-\frac{2}{3}\cos2\Omega t-\frac{2}{15}\cos4\Omega t-\frac{2}{35}\cos6\Omega t-...\right]\end{array}\right\}. \quad (21)$$

где J — момент инерции поплавков относительно точки закрепления в поплавковой камер; Ω — угловая скорость вращения ротора; μ — коэффициент вязкого трения поддерживающей жидкости; C — модуль упругости пьезокристалла; R — радиус окружностей, описываемых поплавками; l — длины плеч поплавков; m — масса вытесненной поплавком жидкости с учетом разностей их массовых плотностей; m_0 — масса жидкости, обусловленная переливанием ее из полости полусферы в полость конуса.

Обсуждение

Некоторые замечания:

– с целью уменьшения объема поплавковых камер они могут быть усечены двумя параллельными плоскостями, при этом должны быть обеспечены условия свободного перемещения поплавков;

– поскольку в пределах нескольких оборотов ротора угловые ускорения α, β имеют однонаправленные воздействия на поплавки, их математическая модель представлена в виде рядов Фурье;

– в приведенных уравнениях предполагается, что параметры отдельных элементов поплавковых камер одинаковы или близки.

Принцип действия ГДУС рассматриваемой конструкции состоит в следующем.

При отсутствии измеряемых угловых скоростей ($\dot{\alpha}=\dot{\beta}=0$) за счет центробежных сил инерции и сил тяжести, действующей на жидкость, плоскости зеркал жидкостей в каждой поплавковой камере будут занимать или строго вертикальное положение, или с учетом силы тяжести будут под некоторым углом к вертикали. Важно то, что эти углы будут одинаковы в каждой полости и постоянны по величине [9].

При наличии измеряемых угловых скоростей ($\dot{\alpha}\neq0$ или $\dot{\beta}\neq0$) за счет сил инерции Кориолиса поддерживающая жидкость в поплавковых камерах, сохраняя свою, по закону инерции, первоначальную форму, будет вызывать колебания поплавков с угловой частотой Ω. Часть жидкости из «полусферы» должна перейти во внутреннюю часть конуса, их объемы неравны, поэтому центр давления на поплавок сместится.

Математическая модель работы ГУДС представлена уравнениями (20) и (21). Из ее анализа следует, что поскольку величина электрического сигнала, снимаемого с пьезокристалла, пропорциональна углу отклонения φ_1, то с двух пар пьезокристаллов, размещенных на взаимно перпендикулярных рычагах, можно получить информацию как об угловых скоростях, так и об угловых ускорениях.Решить эту задачу можно с помощью применения узкополосных фильтров и классических преобразователей координат [10]. В результате могут быть получены сигналы вида:

$$U_1=k\left(\Omega\dot{\alpha}+\ddot{\beta}\right); \quad (22)$$

$$U_2=k\left(\Omega\dot{\beta}+\ddot{\alpha}\right), \quad (23)$$

которые можно использовать как для коррекции гироскопических устройств, так и для построения гирокомпасов по принципу равносигнальной зоны. Причем в последнем случае с большой степенью точности угловыми ускорениями можно пренебречь, т. е. считать, что $\alpha=\beta=0$.

Заключение

Из рассмотренного принципа действия предлагаемого ГК следует:

– предложенная схема ВГ работоспособна и выполняет предназначенную функциональную роль гирокомпаса;

– использование ротора с данной формой позволяет объединить положительные качества классических и вибрационных гироскопов;

– величина ошибки определения ориентирного направления «Север – Юг» может регулироваться не только совершенствованием технологических процессов изготовления, но и изменением статических коэффициентов усилительно-преобразовательной цепи управления;

– применение в предложенной схеме типовых исполнительных элементов автоматики удешевляет конструкцию ГК.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Матвеев В. А.*Гироскопические стабилизаторы на динамически настраиваемых вибрационных гироскопах / В. А. Матвеев, В. П. Подчезерцев, В. В. Фатеев. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. — 176 с.

2. *Анучин О. Н.* Интегрированные системы ориентации и навигации для морских подвижных объектов / О. Н. Анучин, Г. И. Емельянцев; под общ. ред. В. Г. Пешехонова. — СПб.: Изд-во ЦНИИ «Электроприбор», 2003. — 390 с.

3. *Джашитов В. Э.* Датчики, приборы и системы авиакосмического и морского приборостроения в условиях тепловых воздействий / В. Э. Джашитов, В. М. Панкратов; под общ. ред. акад. РАН В. Г. Пешехонова. — СПб.: Изд-во ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2005. — 404 с.

4. *Фатеев В. В.*Поведение роторного вибрационного гироскопа для вращающегося носителя при наличии угловых колебаний / В. В. Фатеев, А. В. Кулешов, Н. А. Носов // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Серия: Приборостроение. — 2002. — № 3. — С. 119–134.

5. *Биндер Я. И.* Аналитическое компасирование в инклинометрии скважин малого диаметра / Я. И. Биндер // Гироскопия и навигация. — 2003. — № 2 (41). — С. 38–46.

6. *Большаков А. А.* Математическое моделирование работы интегрированных бесплатформенных систем ориентации и навигации локального назначения: автореф. дис.… канд. техн. наук / А. А. Большаков. — Саратов, 2004. — 21 с.

7. PatentUS 4 951 508 (1990). Vibratory rotation sensor / E. J. Loper, D. D. Lynch.

8. *Джашитов В. Э.* Математические модели теплового дрейфа гироскопических датчиков инерциальных систем / В. Э. Джашитов, В. М. Панкратов; под общ. ред. акад. РАН В. Г. Пешехонова. — СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2001. — 150 с.

9. *Loper E. J.* Projected performance of smaller hemispherical resonator gyros / E. J. Loper, D. D. Lynch, K. M. Stevenson //PLANS'86-Position Location and Navigation Symposium. — 1986. — Pp. 61–64.

10. *Бесекерский В. А.* Теория систем автоматического управления / В. А. Бесекерский, Е. П. Попов. — СПб.: Профессия, 2003. — 752 с.

REFERENCES

1.Matveev, V. A., V. P. Podchezertsev, and V. V. Fateev. *Giroskopicheskie stabilizatory na dinamicheski nastraivaemykh vibratsionnykh giroskopakh*. M.: Izdatel'stvo MGTU im. N.E. Baumana, 2014.

2. Anuchin, O. N., and G. I. Emel'yantsev. *Integrirovannye sistemy orientatsii i navigatsii dlya morskikh podvizhnykh ob"ektov*. Edited by V. G. Peshekhonov. SPb.:Izd-voTsNII «Elektropribor», 2003.

3. Dzhashitov, V. E., and V. M. Pankratov. *Datchiki, pribory i sistemy aviakosmicheskogo i morskogo priborostroeniya v usloviyakh teplovykh vozdeistvii*. Edited by V. G. Peshekhonova. SPb.:GNTsRFTsNII "Elektropribor", 2005.

4. Fateev, V. V., A. V. Kuleshov, and N. A. Nosov. "*Povedenie rotornogo vibratsionnogo giroskopa dlya vrashchayushchegosya nositelya pri nalichii uglovykh kolebanii*." *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N. E. Baumana. Seriya: Priborostroenie* 3 (2002): 81.

5. Binder, Ya. I. "Analytical compassing in slim holeinclinometry." *Gyroscopy and Navigation* 2(41) (2003): 38–46.

6. Bol'shakov, A. A. *Matematicheskoe modelirovanie raboty integrirovannykh besplatformennykh system orientatsii i navigatsii lokal'nogo naznacheniya*. Abstractofdiss. Saratov, 2004.

7. Loper, E. J., and D. D. Lynch. Patent US 4 951 508 (1990). Vibratory rotation sensor.

8. Dzhashitov, V. E., and V. M. Pankratov. *Matematicheskie modeli teplovogo dreifa giroskopicheskikh datchikov in ertsial'nykh system*. Edited by V. G. Peshekhonov. SPb.: GNTs RF TsNII "Elektropribor", 2001.

9. Loper, E. J., D. D. Lynch, and K. M. Stevenson. "Projected performance of smaller hemispherical resonator gyros." *PLANS'86-Position Location and Navigation Symposium*. 1986. 61–64.

10. Besekerskii, V. A., and E. P. Popov. *Teoriya system avtomaticheskogo upravleniya*. SPb.: Izd-vo «Professiya», 2003.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Баженов Николай Георгиевич —
кандидат технических наук, доцент
Казанский Государственный
Энергетический Университет
420066, Российская Федерация, Республика
Татарстан, Казань, ул. Красносельская, 51
e-mail: *kgey-et@yandex.ru*

Филина Ольга Алексеевна —
старший преподаватель
Казанский Государственный
Энергетический Университет
420066, Российская Федерация, Республика
Татарстан, Казань, ул. Красносельская, 51
e-mail: *olga_yuminova83@mail.ru*

Ермакова Екатерина Юрьевна — аспирант
Научный руководитель:
Баженов Николай Георгиевич
Казанский Государственный
Энергетический Университет
420066, Российская Федерация, Республика
Татарстан, Казань, ул. Красносельская, 51
e-mail: *kgey-et@yandex.ru*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Bazhenov, Nikolay G. —
PhD, associate professor
Kazan State Power Engineering University
51 Krasnoselskaya Str., Kazan,
Republic of Tatarstan, 420066,
Russian Federation
e-mail: *kgey-et@yandex.ru*

Filina, Olga A. —
Senior lecturer
Kazan State Power Engineering University
51 Krasnoselskaya Str., Kazan,
Republic of Tatarstan, 420066,
Russian Federation
e-mail: *olga_yuminova83@mail.ru*

Ermakova, Ekaterina Yu. — Postgraduate
Supervisor:
Bazhenov, Nikolay G.
Kazan State Power Engineering University
51 Krasnoselskaya Str., Kazan,
Republic of Tatarstan, 420066,
Russian Federation
e-mail: *kgey-et@yandex.ru*

Статья поступила в редакцию 15 мая 2017 г.
Received: May 15, 2017.