

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОДНООСНОГО ГИРОСТАБИЛИЗАТОРА ДЛЯ СИСТЕМЫ ГИРОСКОПИЧЕСКОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ В АВТОНОМНЫХ СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ

Баженов Н.Г. *, Филина О.А. **, Озерова Е.Ю. ***

*Казанский государственный энергетический университет,
КГЭУ, ул. Красносельская, 51, Казань, 420066, Россия*

** e-mail: kgey-et@yandex.ru*

*** e-mail: olga_yuminova83@mail.ru*

**** e-mail: kgey-et@yandex.ru*

Вопросы повышения точности работы гироскопов автономной системы управления (АСУ) достаточно полно освещены в технической литературе. Вместе с тем авторы статьи считают, что, используя кинематическую схему, можно добиться улучшения динамических характеристик управления, точности стабилизации.

Ключевые слова: гиростабилизатор (ГС), гироскопы, вибрационный гироскоп, магнитный поток, гиromотор, динамика перемещения, динамические характеристики поплавков, пьезоэлектрические гироскопы.

Введение

Предлагаемое устройство относится к области навигационной техники. Данный тип гироскопических устройств является наиболее простым и дешевым по сравнению с роторным гироскопом. К настоящему времени известны гироскопические компасы (ГК) на базе двух- и трёхстепенных гироскопов, которые широко используются как в военном деле, так и в народном хозяйстве. Их недостатком, особенно это касается трёхстепенного гироскопа, является низкое быстродействие в определении ориентирного направления — несколько минут. Вибрационный гироскоп (ВГ) позволяет существенно уменьшить указанный недостаток и одновременно резко повысить точность в определении направления «Север—Юг». Он состоит из одноосного гироскопического стабилизатора (ГС), который выполнен по классической схеме и ось стабилизации которого размещена строго вертикально, и вибрационного гироскопа (ВГ), ось ротора которого соосна оси стабилизации ГС. В вибрационном гироскопе стержневого типа чувствительным элементом являются некоторые вибрирующие массы, например стержни, подобные ветвям камертона.

Предлагаемая схема (рис. 1) состоит из ротора гиromотора 1, поплавковой камеры 2, датчика команд (ДК), датчика угла (ДУ), датчика момента по

оси прецессии (ДМ), стабилизирующего двигателя (СД), усилителя стабилизации (Уст), усилителей стабилизации по осям прецессии и стабилизации (УстХ) и (УстУ). Пространственные диаграммы предложенного гироскопа представлены на рис. 2.

Из рассмотренного принципа действия предлагаемого ГК следует:

1) предложенная схема работоспособна и выполняет предназначенную функциональную роль гироскопа;

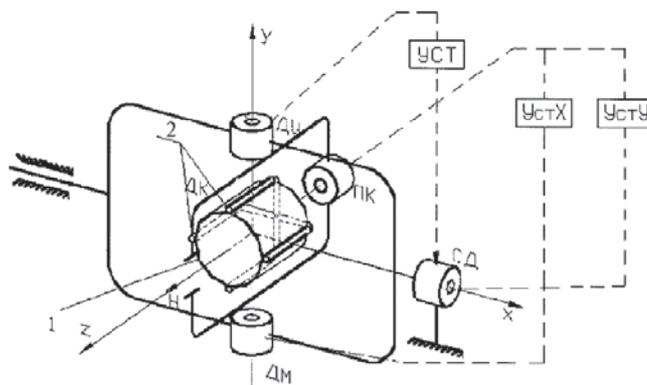


Рис. 1. Схема гиростабилизатора: 1 — ротор гиromотора; 2 — поплавковая камера, заполненная жидкостью; ДК — датчик команд (чувствительный элемент); ДУ — датчик угла; ДМ — датчик момента по оси прецессии; СД — стабилизирующий двигатель; Уст — усилитель стабилизации; УстХ, УстУ — усилитель стабилизации по осям прецессии и стабилизации соответственно

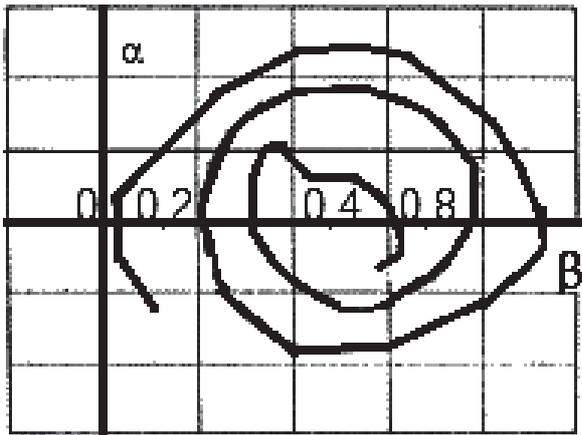


Рис. 2. ГК с несимметричным ротором, $K_c = 1000$

2) использование ротора с данной формой позволяет объединить положительные качества классических гироскопов;

3) величина ошибки определения направления «Север—Юг» может уменьшаться не только благодаря совершенствованию технологических процессов изготовления, но и изменением статических коэффициентов усилительно-преобразовательной цепи управления;

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

Методы исследования

Основной недостаток существующих классических гиросtabilизаторов — систематический дрейф, обусловленный действием возмущающих моментов по оси прецессии. Проблема при решении задачи точности стабилизации заключается в том, что до настоящего времени не удавалось получить непосредственную информацию о наличии и характере возмущающих моментов по этой оси. В предложенном варианте технического решения получение информации о характере возмущающего момента по оси прецессии достигается: во-первых, использованием ротора гироскопа с неравными экваториальными моментами инерции $J_M \neq J_y$, во-вторых — созданием дополнительной системы коррекции. Принцип работы заключается в следующем: при действии всех систем прецизионного гиросtabilизатора (ПГС) система стабилизации по классической схеме работы разгружает ось стабилизации от действия возмущающих моментов по оси внешней рамки, а система коррекции за счёт несимметрии ротора и при наличии возмущающих моментов по оси прецессии создает угловые колебания с двойной частотой (где ω — частота вращения ротора), амплитуда колебаний пропорциональ-

на величине возмущающих моментов, а фаза — направлению действия этих моментов, выделяя сигналы, пропорциональные возмущающему моменту по оси прецессии, подает их через усилитель координации на датчик момента, который компенсирует этот момент. Решение системы уравнений, описывающих движение ПГС, позволяет получить зависимости вида

$$\dot{\alpha} \sim \frac{M_\beta}{\omega} \frac{J_0}{J_2^2 - J_0^2} \cos 2\omega t;$$

$$\ddot{\alpha} \sim -\frac{M_\beta}{\omega} 2\omega \frac{J_0}{J_2^2 - J_0^2} \sin 2\omega t;$$

$$\dot{\beta} \sim \frac{M_\beta}{\omega} 2\omega \frac{J_0}{J_2^2 - J_0^2} \cos 2\omega t;$$

$$\ddot{\beta} \sim -\frac{M_\beta}{\omega} 2\omega \frac{J_0}{J_2^2 - J_0^2} \sin 2\omega t.$$

Отсюда следует, что ось гироскопа при $M_\beta \neq 0$ своим движением будет описывать конус с окружностью в основании, а также что амплитуда колебаний по углу β прямо пропорциональна возмущающему моменту M_β и фаза определяет направление действия. Используя этот сигнал в системе коррекции, обеспечивают требуемую точность стабилизации.

Исследование рассматриваемого гиросtabilизатора проведено на математической модели:

$$\begin{aligned} &\ddot{\beta}[J_\beta^* + (J_0 - J)(1 + \cos 2\omega t)] + \dot{\beta}[h - 2\omega(J_0 + J)\sin 2\omega t] + \\ &+ \dot{\alpha}(H - 2\omega J) - \dot{\alpha}(J_0 + J)2\omega \cos 2\omega t - \\ &- \ddot{\alpha}(J_0 - J)\sin 2\omega t = M_\beta; \\ &\ddot{\alpha}[J_\alpha^* + (J_0 + J)(1 - \cos 2\omega t)] + \dot{\alpha}[f + 2\omega(J_0 + J)\sin 2\omega t] - \\ &- \dot{\beta}(J_0 + J)2\omega \cos 2\omega t - \ddot{\beta}(J_0 - J)\sin 2\omega t - K_c W_c \beta = M_\alpha, \end{aligned}$$

где J_β^*, J_α^* — приведенные моменты инерции по осям стабилизации и прецессии; J_0 — момент инерции, обусловленный наличием дополнительной вставки в ротор; h, f — коэффициенты вязкости по соответствующим осям; H — кинематический момент ротора; K_c, W_c — статический коэффициент передачи и функция управления цепи управления;

$\alpha, \dot{\alpha}, \ddot{\alpha}, \beta, \dot{\beta}, \ddot{\beta}$ — угловые ускорения, скорости и координаты по осям стабилизации и прецессии.

Если в уравнение трехстепенного гироскопа, с учётом построения обратной связи (см. рис. 1), ввести дополнительные моменты от СД и ДМ, то из анализа уравнений следует: во-первых, кинематическая схема гиростабилизатора, выполненная по схеме рис. 1, позволяет реализовать двухкоординатный способ управления по возмущению; во-вторых, можно добиться требуемых динамических характеристик управления; точности стабилизации, значений кинематического момента путем выбора соответствующих коэффициентов передачи; в-третьих, при малых габаритных и весовых характеристиках гироскопа, требуемого значения кинематического момента H можно достичь за счёт изменения статических коэффициентов; в-четвертых, поскольку в рассматриваемой схеме гиростабилизатора с датчика команд снимается информация, пропорциональная возмущающим моментам по соответствующим осям, то отпадает необходимость в использовании классических схем стабилизации классических гиростабилизаторов.

Общий вид пространственной диаграммы движения главной оси гиростабилизатора, составленного по кинематической схеме рис. 1, без учета классической цепи стабилизации, представлен на рис. 2 и 3, где указанные значения $\alpha_{уст}$, $\beta_{уст}$ могут быть заранее рассчитанными.

Выводы

Кинематическая схема стабилизатора позволяет реализовать двухкоординатный способ управления по возмущению. Можно добиться требуемых характеристик управления: точности стабилизации, кинематической стабилизации путем подбора соответствующих коэффициентов передачи. При малых габаритных и весовых характеристиках гироскопа, требуемое значение коэффициентов передачи, кинематического момента можно получить за счёт увеличения статических коэффициентов. Так как в рассматриваемой схеме гиростабилизатора снимается информация пропорционально возмущающим моментам, то нет необходимости в использовании классических схем стабилизации классических гиростабилизаторов.

Библиографический список

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

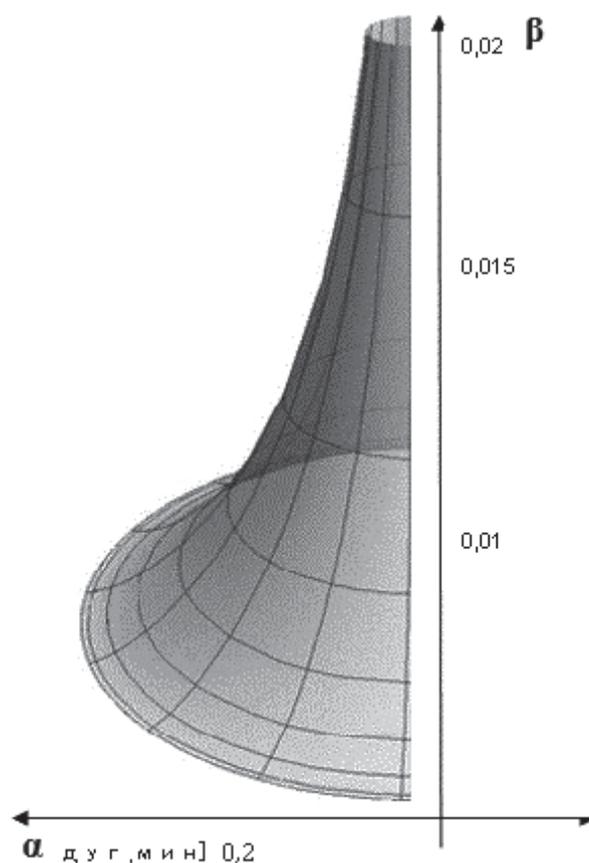


Рис. 3. Траектория движения главной оси ПГС

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

3. *Бесекиерский В.А., Попов Е.П.* Теория систем автоматического управления. — СПб.: Профессия, 2003. — 752 с.

4. *Фатеев В.В., Кулешов А.В., Носов Н.А.* Поведение роторного вибрационного гироскопа для вращающегося носителя при наличии угловых колебаний // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Приборостроение. 2002. № 3(48). С. 119-134.

5. *Биндер Я.И.* Аналитическое компасирование в инклинометрии скважин малого диаметра // 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. дисс. канд. физико-математических наук. — Саратов, 2004. — 21 с.

7. *Loper E.J., Lynch D.D.* Vibratory rotation sensor. Patent US 4 951 508A, 28.08.1990.

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

9. *Loper E.J., Lynch D.D., Stevenson K.M.* Projected performance of smaller hemispherical resonator gyros // PLANS'86 — Position Location and Navigation Symposium, Las Vegas, 1986, pp. 61-64.
10. *Джашитов В.Э., Панкратов В.М.* Датчики, приборы и системы авиакосмического и морского приборостроения в условиях тепловых воздействий / Под общей ред. акад. РАН В.Г. Пешехонова. — СПб.: Изд-во ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2005. — 404 с.
11. *Баженов Н.Г., Филина О.А., Валеева П.Н., Ермакова Е.Ю.* Интерпретация классического трансформатора как системы автоматического управления // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2017. № 2. С. 136-144. DOI: 10.24143/2072-9502-2017-2-136-144
12. *Баженов Н.Г., Филина О.А., Ермакова Е.Ю.* Принцип определения ориентирных направлений с помощью вибрационных гироскопов // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2017. Т. 9. № 5. С. 1104-1112. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-1104-1112
13. *Баженов Н.Г., Бакиров А.Р., Филина О.А.* Анализ работы гиростабилизатора с ротором, имеющим перемещающиеся массы // Проблемы механики современных машин: Сборник трудов V международной конференции. Улан-Удэ: Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, 2012. С. 29-33.
14. *Бомштейн К.Г., Паршина Т.М., Станкевич А.И.* Экспериментальная оценка деформированного и виброакустического состояний цилиндрической оболочки из композиционных материалов при стационарном акустическом воздействии // Вестник Московского авиационного института. 1995. Т. 2. № 2. С. 74-78.
15. *Пантелеев А.В., Пименов П.В.* Синтез локально-оптимального нечеткого управления нелинейными динамическими системами // Вестник Московского авиационного института. 1998. Т. 5. № 2. С. 49-56.
16. *Данилин А.Н., Тютюнников Н.П., Шалашилин В.И.* Расчет собственных колебаний упругих конструкций с варьируемыми параметрами // Вестник Московского авиационного института. 1999. Т. 6. № 1. С. 67-71.
17. *Тишков В.В., Фирсанов В.В.* Проектный метод расчета вибродинамического состояния объектов авиационной техники для оценки безопасности авиационных комплексов в аварийных ситуациях // Вестник Московского авиационного института. 1999. Т. 6. № 2. С. 8-14.
18. *Леонов В.А., Ниязманд М.А., Поплавский Б.К.* Критерии апериодической и колебательной устойчивости самолетов в продольном движении на закритических углах атаки // Вестник Московского авиационного института. 1999. Т. 6. № 2. С. 56-59.
19. *Гордеев А.А., Ефимов Б.В., Ильин С.А., Соболев В.И.* Исследование зоны захвата лазерного гироскопа при различных амплитудах частотной подставки // Вестник Московского авиационного института. 1999. Т. 6. №2. С. 72-75.
20. *Бернс В.А., Бобрышев А.П., Присекин В.Л., Самуйлов В.Ф.* Контроль соосности установки отклоняемых поверхностей по результатам вибрационных испытаний // Вестник Московского авиационного института. 2008. Т. 15. № 1. С. 87-91.

UNIAXIAL GYROSTABILIZER APPLICATION FOR THE GYROSCOPIC STABILIZATION SYSTEM IN SELF-CONTAINED CONTROL SYSTEMS

Bazhenov N.G.* , Filina O.A. , Ozerova E.Yu.*****

*Kazan State Power Engineering University,
KSPEU, 51, Krasnoselskaja str., Kazan, Republic of Tatarstan, 420059, Russia*

* *e-mail: kgey-et@yandex.ru*

** *e-mail: olga_yuminova83@mail.ru*

*** *e-mail: kgey-et@yandex.ru*

Abstract

The proposed unit relates to the field of navigation technology. This type of gyroscopic devices is the simplest and low cost compared to a rotary gyroscope. Single-axis and dual-axis gyroscopes, widely used for movement direction determining, are wellknown, by now, both in civil and military spheres. The main disadvantage of the now-employed gyroscopes is a low speed of the oriented direction determining, reaching up to several minutes. The proposed gyrocompass allows

significantly reduce the above said disadvantage and at the same time dramatically improve the accuracy in the “North-South” direction determining. It aims at improving accuracy and speed in the “North-South” orientation determining. This type of gyroscope is much simpler and low cost at commensurable accuracy compared to a rotary gyroscope. The article presents a kinematic scheme of the HS, which allows implement a twin-axis perturbation control method. With this, it allows achieving the required control dynamic

characteristics; stabilization accuracy, and the kinematic moment values by selecting the appropriate transfer coefficients. Its main property consists in the ability to hold fixed direction of the axis of rotation in space in the absence of the external forces impact on it. This gyroscopic device structure consists of a gyroscope with a rotor of a “brick” shape; communication on angular deviations through amplifiers; torque sensors; and standard stabilizing motors. Thus, the whole complexity of the device consists in the gyro rotor manufacturing, and float chambers in particular. The proposed unit operates in the following way. At the effect of the moment on one of the axes, the rotor gyroscopic moment appears. Pulsating signals along the perpendicular axis appear as well. Thus, there are two types of signals, which can be employed to stabilize the object containing the above said unit is installed. These findings are supported by the presented equations, where $\tilde{\alpha}$ and $\tilde{\beta}$ are expressions for the deviations on the two axes. The gyrostabilizer motion was considered in the mathematical model under condition that the values of the moment of inertia on the axes α and β , with account for the presence of additional inserts, would be expressed in the form: $J_{\beta}^* + (J_0 - J)$ and $J_{\beta}^* + (J_0 + J)$. Thus, the equations were composed with account for these expressions.

The said unit allows find application in the aircraft automatic devices systems.

Keywords: gyrostabilizer, gyro instrument, vibratory gyroscope, magnetic flux, gyro motor, reallocation dynamics, float dynamic characteristics, piezoelectric gyroscopes.

References

- Matveev V.A., Podchezertsev V.P., Fateev V.V. *Girokopicheskie stabilizatory na dinamicheski nastroivaemykh vibratsionnykh girokopakh* (Gyroscopic stabilizers for dynamically tuned vibratory gyroscopes), Moscow, MGTU im. N.E. Baumana, 2014, 176 p.
- Anuchin O.N., Emel'yantsev G.I. *Integrirovannye sistemy orientatsii i navigatsii dlya morskikh podvizhnykh ob'ektov* (Integrated orientation and navigation systems for marine mobile objects), St. Petersburg, TsNII “Elektropribor”, 2003, 390 p.
- Besekerskii V.A., Popov E.P. *Teoriya sistem avtomaticheskogo upravleniya* (Theory of automatic control systems), St. Petersburg, Professiya, 2003, 752 p.
- Fateev V.V., Kuleshov A.V., Nosov N.A. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Priborostroenie*, 2002, no. 3(48), pp. 119–134.
- Binder Ya.I. *Girokopiya i navigatsiya*, 2003, no. 2 (41), pp. 38–46.
- Bol'shakov A.A. *Matematicheskoe modelirovanie raboty integrirovannykh besplatformennykh sistem orientatsii i navigatsii lokal'nogo naznacheniya* (Mathematical modeling of integrated gimbaless orientation and navigation systems for local purposes), Doctor's thesis, Saratov: SGTU, 2004, 21 p.
- Loper E.J., Lynch D.D. Vibratory rotation sensor. *Patent US 4 951 508A*, 28.08.1990.
- Dzhashitov V.E., Pankratov V.M. *Matematicheskie modeli teplovogo dreifa girokopicheskikh datchikov inertial'nykh sistem* (Mathematical models of gyroscopic sensors for inertial systems thermal drift), St. Petersburg, GNTs RF TsNII “Elektropribor”, 2001, 150 p.
- Loper E.J., Lynch D.D., Stevenson K.M. Projected performance of smaller hemispherical resonator gyros. *PLANS'86 - Position Location and Navigation Symposium*, Las Vegas, 1986, pp. 61–64.
- Dzhashitov V.E., Pankratov V.M. *Datchiki, pribory i sistemy aviakosmicheskogo i morskogo priborostroeniya v usloviyakh teplovykh vozdeistvii* (Sensors, devices and systems of aerospace and marine instrument-making in conditions of thermal impacts), St. Petersburg, GNTs RF TsNII “Elektropribor”, 2005, 404 p.
- Bazhenov N.G., Filina O.A., Valeeva P.N., Ermakova E.Yu. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika*, 2017, no. 2, pp. 136–144. DOI: 10.24143/2072-9502-2017-2-136-144
- Bazhenov N.G., Filina O.A., Ermakova E.Yu. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova*, 2017, vol. 9, no. 5, pp. 1104–1112. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-1104-1112
- Bazhenov N.G., Bakirov A.R., Filina O.A. *Materialy V Mezhdunarodnoi konferentsii “Problemy mekhaniki sovremennykh mashin”. Sbornik statei*. Ulan-Ude, Vostochno-Sibirskii gosudarstvennyi universitet tekhnologii i upravleniya, 2012, pp. 29–33.
- Bomshtein K.G., Parshina T.M., Stankevich A.I. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 1995, vol. 2, no. 2, pp. 74–78.
- Pantelev A.V., Pimenov P.V. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 1998, vol. 5, no. 2, pp. 49–56.
- Danilin A.N., Tyutyunnikov N.P., Shalashilin V.I. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 1999, vol. 6, no. 1, pp. 67–71.
- Tishkov V.V., Firsanov V.V. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 1999, vol. 6, no. 2, pp. 8–14.
- Leonov V.A., Niyazmand M.A., Poplavskii B.K. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 1999, vol. 6, no. 2, pp. 56–59.
- Gordeev A.A., Efimov B.V., Il'in S.A., Sobolev V.I. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 1999, vol. 6, no. 2, pp. 72–75.
- Berns V.A., Bobryshev A.P., Prisekin V.L., Samuilov V.F. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2008, vol. 15, no. 1, pp. 87–91.