

## ГИРОТАХОМЕТР НА УПРУГИХ ОПОРАХ С КВАЗИНУЛЕВОЙ КРУТИЛЬНОЙ ЖЕСТКОСТЬЮ

В. И. ВЕТРЕНКО, Т. И. РОМАНОВА

*Томский государственный архитектурно-строительный университет,  
634003, Томск, Россия, E-mail: vladim.vetrenko@yandex.ru*

Предложен гироскопический тахометр — прибор для измерения угловых скоростей в системах ориентации и стабилизации подвижных объектов. Основное отличие этого гироскопического тахометра от известных аналогов заключается в том, что гироскопический тахометр устанавливается в упругих опорах с квази нулевой крутильной жесткостью. При этом возможна настройка упругих опор на требуемый противодействующий момент.

**Ключевые слова:** гироскопический тахометр, квази нулевая жесткость, упругая трехленточная опора, регулируемый противодействующий момент, осевая и радиальная жесткость.

Гироскопические тахометры, или гироскопические тахометры, предназначены для измерения угловой скорости подвижных объектов, они отличаются от других типов измерителей угловой скорости низким порогом чувствительности. Эта особенность делает гироскопические тахометры пригодными для измерения сверхнизких скоростей порядка  $10^{-4}$ — $10^{-5}$  с<sup>-1</sup>. Величины угловых скоростей, которые могут измерять гироскопические тахометры, ограничиваются снизу в основном моментом сил сухого трения по оси подвеса гироскопического тахометра. Сухое трение также приводит к прерывистости движения вокруг этой оси. Для снижения порога чувствительности и достижения плавности хода в гироскопических тахометрах применяются опоры с упругим моментом сопротивления. Такие опоры имеют ограниченный угол поворота со строго стабильной функцией противодействующего момента, они могут применяться в гироскопах, в динамических моделирующих стендах для полунатурных испытаний объектов и других измерительных приборах. Недостатком упругих опор является чувствительность к осевым и радиальным нагрузкам, а также несоосность подвижных элементов по оси измерения. Это приводит к увеличению площади сечения упругих элементов, соответственно и к увеличению противодействующего момента по оси измерения прибора. Этот недостаток отсутствует у трехленточной опоры с регулируемым нагружением лент и регулируемой соосностью ее подвижных элементов [1]. Такая опора имеет ряд достоинств:

- 1) отсутствие моментов сопротивления, обусловленных силами трения-скольжения и трения-качения;
- 2) регулируемый противодействующий момент;
- 3) простота настройки на нулевой противодействующий момент;
- 4) большая осевая и радиальная жесткость, сравнимая с жесткостью шарикоподшипника;
- 5) постоянное положение оси вращения, совпадающее с геометрической осью;
- 6) простота в эксплуатации.

Недостаток опоры заключается в наличии остаточной деформации (гистерезис, упругое последействие), поэтому для гироскопического тахометра рассеяние энергии при поворотах гироскопического тахометра меньше потерь на гистерезис и упругое последействие, так как частота колебаний гироскопического тахометра незначительна.

Работа опоры (рис. 1) основана на законе изгиба длинной ленты под действием продольной нагрузки. Если трехленточная опора имеет устройство нагружения лент 3, то при растяжении или сжатии одной из лент 4, как известно из теоретической механики, они все

будут находиться под действием одинакового усилия. Если продольная нагрузка на ленту превышает какой-то предел, то лента изгибается и переходит к новой криволинейной форме равновесия. Очень малые отклонения ленты от равновесного состояния могут произойти практически в отсутствие дополнительной изгибающей силы. Подбором величины растягивающего или сжимающего усилия  $F_Z$  (рис. 1) восстанавливающий момент между цилиндрами 1 и 2 можно свести к нулю или сделать отрицательным. Это объясняется тем, что благодаря нагружающему усилию, действующему на ленту, на окружность 1 действует отрицательный момент противодействия, который возрастает с увеличением угла поворота.

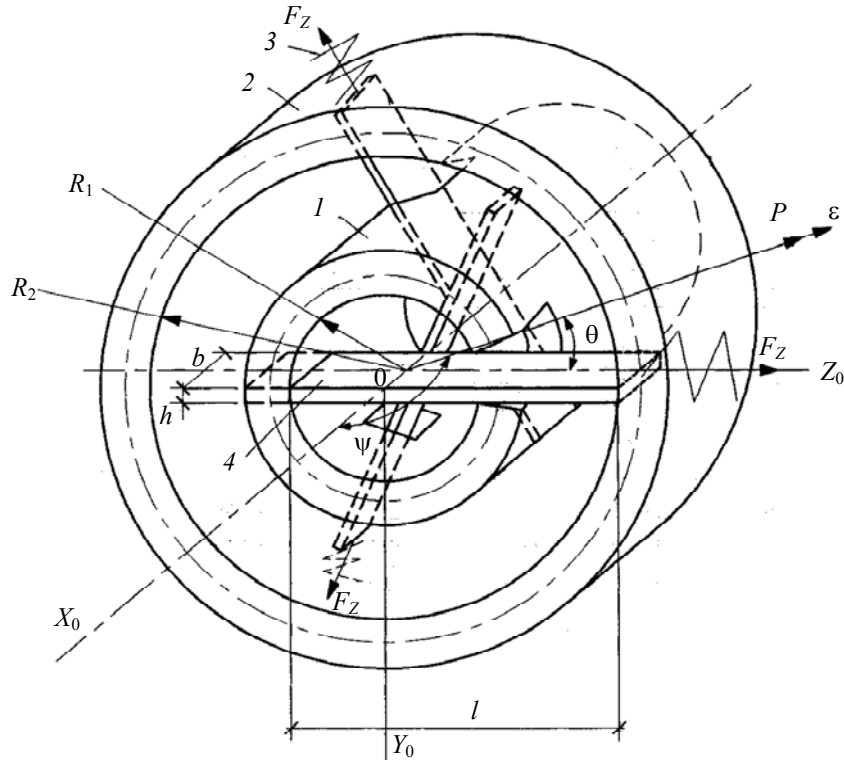


Рис. 1

Вместе с тем вследствие естественной жесткости ленты создается положительный восстанавливающий момент, таким образом, подбором этих моментов можно регулировать общий восстанавливающий момент. Исследованию свойств трехленточной опоры посвящен ряд работ [2, 3]. В статье [3] приведено выражение для момента противодействия опоры при действии растягивающего или сжимающего усилия:

$$M_{Y_0Z_0} = \frac{\text{ch } \alpha (R_1 + \lambda \text{th } \alpha)}{\text{ch } \alpha \left( \frac{l}{\lambda} + \alpha \right) - \text{ch } \alpha} F_Z \varphi, \tag{1}$$

где  $\varphi$  — угол поворота внутреннего цилиндра 1 относительно наружного 2;  $l$  — длина упругой ленты;  $R_1$  — внутренний радиус внутреннего цилиндра;  $\text{ch } \alpha$  — гиперболический косинус;  $\text{th } \alpha$  — гиперболический тангенс;  $\alpha = \frac{l}{R_1}$ ;

$$\lambda = \sqrt{\frac{E J_X}{F_Z}}; \tag{2}$$

$E$  — модуль упругости;  $J_X$  — момент инерции поперечного сечения ленты относительно оси  $OX_0$ ;

Момент противодействия опоры (1) будет равен нулю при условии

$$\lambda = R_1 = \sqrt{\frac{EJ_X}{F_Z}},$$

при небольших углах поворота формула (2) записывается в виде

$$R_1 = \sqrt{\frac{Eh^2}{12\sigma}}, \quad (3)$$

где  $\sigma = \frac{F_Z}{bh}$  — допустимое напряжение при растяжении ленты,  $h$  — толщина ленты,  $b$  — ее ширина.

Согласно уравнению (3) рассчитываются размеры лент. Условие устойчивости формы упругой ленты (2) позволяет рассчитывать ее геометрические размеры методом подбора по заданным размерам опоры. Но по приведенным формулам невозможно рассчитать осевую и радиальную жесткость опоры, поэтому нельзя определить, какую полезную нагрузку выдержит опора. Трехленточная опора сохраняет свою работоспособность при  $F_Z = 0$ , в этом случае подсчитать противодействующий момент по формуле (1) становится невозможным.

Поэтому возникает задача получения более общего выражения для определения жесткости упругой опоры. Такое выражение для линейной жесткости было получено в работе [4] с использованием энергетического подхода, обобщенного закона Гука и теоремы Кастилиано. Таким образом, линейная жесткость опоры в плоскости, расположенной произвольным образом, но проходящей через ось вращения опоры, имеет следующий вид:

$$\frac{\partial P}{\partial \varepsilon} = C_{\text{л}} = \frac{ES_Z}{l} \left\{ 3 + \left( \frac{\Delta - l}{l} \right) \left[ 3 - \left( \cos^2 \theta - \cos^2 \theta (6\theta - \theta) - \cos^2 (6\theta + \theta) \right) \sin^2 \Psi \right] \right\} + \frac{9EJ_Y}{l^3} \cos^2 \Psi + \frac{18EJ_X}{l^3} \frac{3}{2} \sin^2 \Psi, \quad (4)$$

где  $C_{\text{л}}$  — линейная жесткость опоры;  $S_Z$  — площадь сечения ленты;  $J_Y$  — момент инерции поперечного сечения ленты относительно оси  $OY_0$ ;  $P$  — полезная нагрузка, действующая в плоскости, проходящей через ось вращения опоры;  $\varepsilon$  — перемещение внутреннего цилиндра  $l$  (см. рис. 1) под действием  $P$ ;  $\Delta$  — деформация ленты под действием силы растяжения или сжатия  $F_Z$ .

Если сила  $P$  (см. рис. 1) действует только вдоль оси  $OX_0$ ,  $\Psi = 0$ , то осевая жесткость опоры в этом направлении будет равна

$$C_{X_0} = \frac{3ES_Z}{l} \left( \frac{\Delta}{l} \right) + \frac{9EJ_Y}{l^3}. \quad (5)$$

Если  $P$  действует только в направлении оси  $OZ_0$ ,  $\Psi = \pi/2$ , то выражение для радиальной жесткости примет вид

$$C_{Z_0} = \frac{3}{2} \left[ \frac{ES_Z}{l} \left( 1 + \frac{\Delta}{l} \right) + \frac{18EJ_X}{l^3} \right]. \quad (6)$$

При отсутствии деформации  $\Delta$  предварительного нагружения лент формулы (5) и (6) примут вид

$$C_{X_0} = \frac{9EJ_Y}{l^3}, \quad (7)$$

$$C_{Z_0} = \frac{3ES_Z}{2l} + \frac{27EJ_X}{l^3}. \quad (8)$$

В работе [5] была получена более простая формула для противодействующего момента опоры

$$M_{Y_0Z_0} = \left[ \frac{12\lambda^2 (3R_1^2 - 6R_1l + 2l^2) - 3R_2l^3}{l^3} \right] F_Z \varphi, \quad (9)$$

где  $\lambda$  определяется соотношением (2).

Проанализировав выражение (9), можно сделать вывод, что при достижении определенного значения  $F_Z$  противодействующий момент опоры станет квазинулевым или отрицательным. Если усилие предварительного нагружения  $F_Z$  отсутствует, противодействующий момент опоры будет положительным, и его значение будет определяться формулой

$$M_{Y_0Z_0} = \frac{12EJ_X}{l^3} (3R_1^2 - 6R_1l + 2l^2) \varphi. \quad (10)$$

Приведенные выше формулы позволяют рассчитать параметры упругой опоры и спроектировать на их основе гиротахометр, представленный на рис. 2.

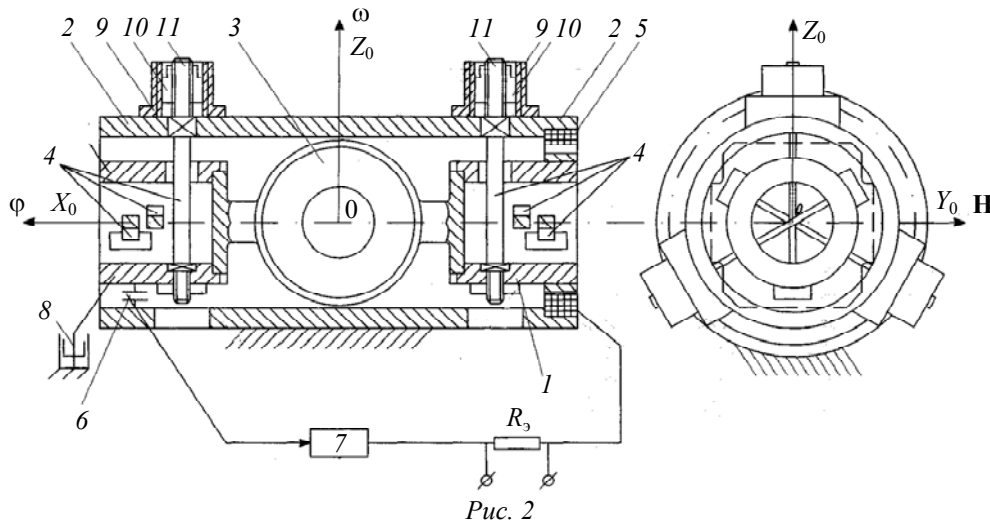


Рис. 2

Гиротахометр содержит гироузел 3, установленный в опорах, которые выполнены в виде наружного 2 и внутренних 1 цилиндров. Цилиндры соединены между собой упругими лентами 4, расположенными относительно друг друга под углами в  $120^\circ$  в плоскости  $Y_0Z_0$  и смещенными относительно друг друга вдоль оси  $OX_0$ . Гиротахометр снабжен электрической пружиной, выполненной в виде датчика момента 5, датчика угла 6, усилителя 7 и эталонного сопротивления  $R_3$ , с которого снимается сигнал. Между внутренними цилиндрами 1 и 2 расположен демпфер 8. Гиротахометр снабжен шестью устройствами перемещения гироузла в радиальном направлении, выполненными в виде дифференциальных винтовых передач, винты 11 которых выполнены заодно с упругой лентой. Винты перемещаются гайками 10, которые наружными резьбами ввинчены во втулки 9, закрепленные на наружном цилиндре 2. При вращении гаек 10 происходит перемещение внутренних цилиндров вместе с гироузлом 3 в радиальном направлении. Направление перемещения гироузла зависит от направления вращения гаек. Таким образом устраняется несоосность цилиндров 1 и 2, их соосность регистрируется на этапе сборки при помощи трех индикаторов часового типа, расположенных под углом  $110^\circ$  относительно друг друга в плоскости  $Y_0Z_0$ . Для достижения подвесом гироузла „нулевого“ момента противодействия необходимо одновременное вращение в одном направлении гаек 10, расположенных под углом в  $120^\circ$  друг к другу в плоскости  $Y_0Z_0$  с одинаковым усилием.

Известно, что для снижения влияния перекрестной угловой скорости на показания прибора угол поворота  $\varphi$  внутреннего цилиндра относительно наружного должен быть достаточно мал (на практике несколько градусов, а в высокоточных гиротахометрах — доли градуса). Такое конструктивное решение в описанной упругой опоре достигается кинематическими

связями ее элементов. Применение в конструкции прибора электрической пружины обусловлено тем, что упругая опора используется как опора вращения, так как ее противодействующий момент настраивается на значение, близкое к нулевому.

Известно, что порог чувствительности такого гиротакметра определяется выражением

$$\omega \geq \frac{M_{Y_0 Z_0}}{H},$$

где  $\omega$  — минимальная измеряемая угловая скорость;  $H$  — кинетический момент гиروزла.

Использование полученных выражений позволяет спроектировать опору с высокой осевой и радиальной жесткостью, сравнимой с жесткостью шарикоподшипника.

Таким образом, применение дифференциальных винтов для регулирования нагружающего усилия приводит к достижению в опорах гиротакметра практически нулевого противодействующего момента с сохранением соосности подвижных элементов. Порог чувствительности такого прибора близок к нулю. При правильном выборе размеров можно получить конструкцию с минимальными габаритами и весом, позволяющую измерить сверхнизкие угловые скорости.

На основании проведенных исследований изготовлена модель опоры и прибора, подтвердившая представленные в статье результаты.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. 2011057 SU, C1 5 F16F 3/10 / А. Н. Гормаков, Ю. М. Камашев, В. И. Ветренко. 1994. Б.И. № 7.
2. Бабаева Н. Ф., Ерофеев В. М., Сивоконенко И. М. и др. Расчет и проектирование элементов гироскопических устройств. Л.: Машиностроение, 1967. 480 с.
3. Schlitt H. Investigations of a bearing for small angular deflections without any friction and with negligible restoring torque // J. Appl. Phys. 1949. Vol. 20, N 4. P. 297.
4. Ветренко В. И., Скорых В. Я. Пространственная жесткость трехленточной опоры. Томск: Томский политехн. ин-т, 1989. 14 с. Деп. в Информприборе 19.09.89. № 4724-89.
5. Ветренко В. И. Трехленточная упругая опора испытательных стендов систем управления космических аппаратов: Дис. ... канд. техн. наук. Томск: Томский политехн. ин-т, 1990.

#### Сведения об авторах

- Владимир Ильич Ветренко** — канд. техн. наук; Томский государственный архитектурно-строительный университет, кафедра экономики и организации строительства; E-mail: vladim.vetrenko@yandex.ru
- Татьяна Ильинична Романова** — Томский государственный архитектурно-строительный университет, кафедра экономики и организации строительства; старший преподаватель; E-mail: e2e4@vtomske.ru

Рекомендована кафедрой  
экономики и организации строительства

Поступила в редакцию  
14.05.15 г.

**Ссылка для цитирования:** Ветренко В. И., Романова Т. И. Гиротакметр на упругих опорах с квазинулевой крутильной жесткостью // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 10. С. 810—815.

#### GIROTACHOMETER ON ELASTIC BEARINGS WITH QUASI-ZERO TORSIONAL RIGIDITY

V. I. Vetrenko, T. I. Romanova

Tomsk State University of Architecture and Building,  
634003, Tomsk, Russia, E-mail: vladim.vetrenko@yandex.ru

A gyrotachometer is designed for measurement of mobile object angular velocities. The sensor possesses a number of advantages over the traditional ones. The main distinctive feature of the proposed prototype is that the gyrounit of the sensor is mounted on bearings having a small moment of resistance of elastic character; the bearings may be tuned to obtain desirable counteracting moment.

**Keywords:** gyrotachometr, near-zero rigidity, ribbon elastic support, bearing, steering far moment, axial and radial rigidity.

**Data on authors**

- Vladimir I. Vetrenko** — PhD; Tomsk State University of Architecture and Building, Department of Economics and Organization of Construction;  
E-mail: vladim.vetrenko@yandex.ru
- Tatyana I. Romanova** — Tomsk State University of Architecture and Building, Department of Economics and Organization of Construction; Senior Lecturer;  
E-mail: e2e4@vtomske.ru

**For citation:** *Vetrenko V. I., Romanova T. I. Girotachometer on elastic bearings with quasi-zero torsional rigidity // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Priborostroenie. 2015. Vol. 58, N 10. P. 810—815 (in Russian).*

DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-10-810-815