

## ИНЕРЦИОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ

В. И. ВЕТРЕНКО<sup>1</sup>, Т. И. РОМАНОВА<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ООО „Звездный“, 634040, Томск, Россия  
E-mail: vladim.vetrenko@yandex.ru

<sup>2</sup>Томский государственный архитектурно-строительный университет,  
634003, Томск, Россия

Рассматривается инерционный двигатель, используемый в устройствах кратковременного действия для придания элементам конструкции вращательного движения. Крутящий момент создается плоской пружиной, а маховик двигателя обеспечивает необходимый кинетический момент. Представлены аналитические выражения для вычисления размеров двигателя с учетом моментов инерции его элементов. Расчетные выражения выведены на основе установленного равенства момента импульса и пускового момента двигателя. По полученным выражениям рассчитан и изготовлен экспериментальный образец двигателя многократного действия, испытания которого показали соответствие расчетных характеристик полученным экспериментальным значениям. Разработанный двигатель не требует дополнительных источников питания, что позволяет снизить его стоимость и увеличить надежность. Представленная конструкция двигателя может применяться в устройствах стабилизации оптического изображения, управления угловым перемещением кресла космонавта в безвоздушном пространстве в экстренных случаях, а также для изменения положения рулей управления подвижных объектов.

**Ключевые слова:** инерционный двигатель, кинетический момент, маховик, упругая лента, пусковой момент, момент импульса, стабилизация оптического изображения, кресло космонавта

В конструкциях механических и электромеханических устройств широко используются инерционные двигатели, основное назначение которых — аккумуляирование энергии для придания элементам конструкции вращательного движения. В устройствах кратковременного действия — часовых механизмах, электрогенераторах и гироскопах — такие двигатели применяются для придания маховику кинетического момента [1, 2].

Основным элементом в инерционном двигателе для создания крутящего момента является пружина, выполненная как плоская упругая лента, имеющая вид спирали Архимеда и жестко закрепленная одним концом к валику, а другим — к массивному маховику. Маховик обеспечивает необходимое значение кинетического момента двигателя на определенном интервале времени. Задача придания маховику наибольшего ускорения при раскручивании пружины решается путем создания максимального момента пуска пружины и получения максимального момента инерции маховика при заданных габаритах конструкции.

В работах [3—5] приведены формулы для вычисления геометрических размеров спиральной ленты, маховика и валика инерционного двигателя. Однако эти формулы приводят к получению некорректных размеров, так как в них не учитываются инерционная составляющая

двигателя и значительное изменение конфигурации ленты при ее перемещении. Допускаемые напряжения в ленте при изгибе, рассчитанные по формулам, приведенным в работах [6, 7], превышают предел прочности материала при сохранении, тем не менее, малых деформаций и упругости материала. В этой связи возникает задача определения формулы пускового момента пружины и вывода аналитических выражений для вычисления размеров элементов конструкции двигателя с учетом инерционной составляющей при его многоциклической работе.

Инерционный двигатель в исходном положении показан на рис. 1. Правая система координат  $OXYZ$ , связанная с двигателем, расположена так, что оси  $OY$  и  $OZ$  находятся в плоскости вращения маховика 1, а ось  $OX$  направлена вдоль валика 2. Правая система координат  $AX_1Y_1Z_1$ , связанная с лентой (рис. 2), расположена таким образом, что ось  $AZ_1$  направлена вдоль ленты, а оси  $AX_1$  и  $AY_1$  расположены в плоскости ее поперечного сечения.

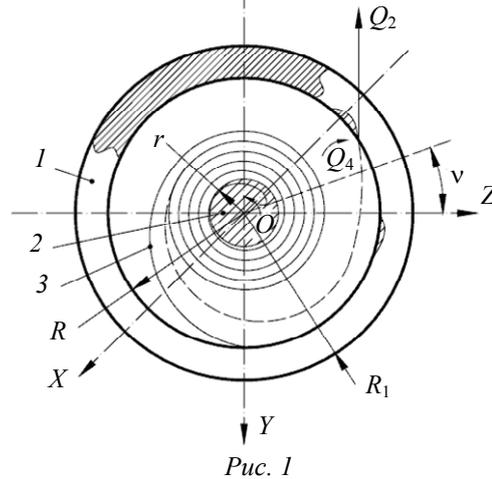


Рис. 1

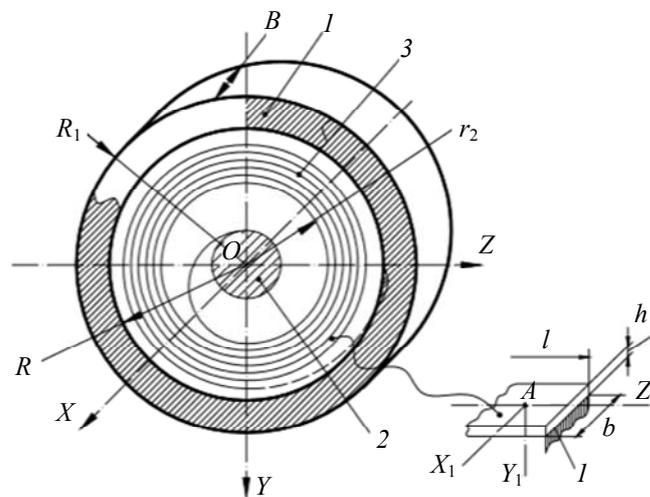


Рис. 2

Двигатель состоит из маховика 1 с наружным радиусом  $R_1$  и внутренним радиусом  $R$ , валика 2 с радиусом  $r$  и упругой спиральной ленты 3. В состав двигателя также входят элементы стопорения маховика относительно корпуса и храповой механизм заводки пружины. Для приведения двигателя в заведенное состояние валик 2 фиксируется, а маховик поворачивается на угол  $\nu$ . После пуска двигателя упругая лента, маховик вместе с валиком и элементами заводки и стопорения создают вращательное движение двигателя с угловым ускорением  $\varepsilon$ . Этот процесс можно описать выражением

$$\frac{dL}{dt} = J_0 \frac{d\Omega}{dt} = J_0 \varepsilon = M, \quad (1)$$

где  $M$  — пусковой момент пружины,  $L$  — момент импульса двигателя,  $J_0$  — момент инерции двигателя относительно оси  $OX$ ,  $\Omega$  — угловая скорость двигателя.

Так как вращающиеся элементы двигателя механически связаны между собой, то и их угловое ускорение будет одинаковым в конце разгона маховика.

Элементы инерционного двигателя обычно изготавливаются из материала одинаковой удельной плотности. Тогда суммарный осевой момент инерции двигателя  $J_0$  (согласно рис. 2) определяется выражением

$$J_0 = \frac{\gamma\pi}{2} \left[ B(R_1^4 - R^4 + r^4) + b(R^4 - r_2^4) \right], \quad (2)$$

где  $\gamma$  — удельная плотность материала,  $B$  — ширина маховика и валика,  $b$  — ширина упругой ленты,  $r_2$  — радиус внутреннего витка спущенной пружины.

Максимальный пусковой момент ленты относительно центра  $O$  двигателя (см. рис. 1) определяется как

$$M = Q_2 R - Q_4, \quad (3)$$

где  $Q_2$  и  $Q_4$  — сила и момент в точке закрепления ленты к маховику, значения которых получены в работе [8]:

$$Q_2 = -q_2 \frac{12EJ_{X_1}}{l^3} - q_4 \frac{6EJ_{X_1}}{l^2}, \quad Q_4 = -q_4 \frac{4EJ_{X_1}}{l} - q_4 \frac{6EJ_{X_1}}{l^2}, \quad (4)$$

где  $l$  — длина ленты;  $E$  — модуль упругости;  $J_{X_1} = \frac{bh^3}{12}$  — момент инерции сечения упругой ленты относительно оси  $AX_1$ ;  $h$  — толщина упругой ленты;

$$q_2 = y \approx Rv = R \cdot 2\pi n_3, \quad q_4 = v = 2\pi n_3, \quad (5)$$

— обобщенные координаты, где  $n_3$  — число витков заведенной пружины.

Подставив выражения (4) в формулу (3) с учетом значений обобщенных координат (5), получим максимальное значение пускового момента

$$M = \frac{2\pi Ebh^3}{3l} K_1 n_3 \eta, \quad (6)$$

где  $\eta$  — коэффициент потерь пускового момента двигателя,

$$K_1 = \left( 1 - 3 \frac{R^2}{l^2} \right) \leq 1. \quad (7)$$

Подставив выражения (2) и (6) в соотношение (1), получим

$$\frac{\varepsilon\gamma\pi}{2} \left[ B(R_1^4 - R^4 + r^4) + b(R^4 - r_2^4) \right] = \frac{2\pi Ebh^3}{3l} K_1 n_3 \eta. \quad (8)$$

Число витков заведенной и спущенной пружины двигателя и ее длина рассчитываются по известным формулам [5]:

$$n_3 = \frac{r_2 - r}{h}, \quad (9)$$

$$n_c = \frac{R - r_2}{h}, \quad (10)$$

$$l = \frac{\pi(R^2 - r^2)}{2h}. \quad (11)$$

Подставляя выражения (9) и (11) в (8), получаем основную формулу для расчета минимальной толщины ленты по заданным геометрическим размерам валика и маховика и заданной угловой скорости двигателя:

$$h = \frac{1}{2} \sqrt[3]{\frac{3\pi\varepsilon\gamma}{EK_1\eta(r_2-r)} \left[ K_2 (R_1^4 - R^4 + r_2^4) \right] (R^2 - r^2)}, \quad (12)$$

где  $\varepsilon = 2\pi\Omega/t$ ,  $t$  — время разгона двигателя,  $K_2 = B/b$ .

Как показано в работе [9], при цилиндрической форме маховика рациональное распределение его массы с учетом динамической неуравновешенности достигается, если внутренний радиус маховика  $R = 0,5R_1$ . Принимая во внимание толщину спущенной пружины (см. рис. 2), это условие можно записать в виде

$$r_2 = 0,5R_1, \quad (13)$$

при этом ширина маховика должна быть равной

$$B \approx 1,0R_1. \quad (14)$$

Ширина упругой ленты с учетом  $K_2$  и выражения (14)

$$b = R_1/K_2. \quad (15)$$

Известно [7], что маховик выполнит максимальное количество оборотов, в случае если в него вложена пружина из ленты такой длины, при которой соблюдается условие равенства объемов спущенной и заведенной пружины, т.е. этому условию соответствуют определенные размеры маховика и валика. Такая пружина называется нормальной заводной:

$$r_1 = r_2 = \sqrt{\frac{R^2 + r^2}{2}}, \quad (16)$$

где  $r_1$  — радиус внешнего витка заведенной пружины.

В работе [6] принято следующее отношение между внутренним радиусом маховика и радиусом валика:

$$r = \frac{1}{3}R. \quad (17)$$

Тогда подставляя выражения (13) и (17) в (16), для нормальной заводной пружины получаем

$$0,5R_1 = \sqrt{\frac{R^2 + r^2}{2}} = 0,745R \quad (18)$$

или

$$R = 0,671R_1. \quad (19)$$

Подставив значения (13), (17), (19) в формулу (12), получим выражение для расчета толщины ленты:

$$h = \sqrt[3]{\frac{\pi\varepsilon\gamma R_1^5 (5,71K_2 + 1) \cdot 0,076}{EK_1\eta}}. \quad (20)$$

Для пружинных двигателей фактическая толщина ленты должна приниматься больше расчетной, исходя из сортамента выпускаемых изделий.

По формулам (11), (15), (17), (19), (20) проведены вычисления геометрических размеров инерционного двигателя и изготовлен его экспериментальный образец [10] со следующими характеристиками: материал ленты — упругая сталь 65Г;  $E = 20 \cdot 10^{10}$  Н/м<sup>2</sup>, допустимое напряжение при изгибе  $[\sigma] = 170 \cdot 10^6$  Н/м<sup>2</sup>. Для увеличения прочности ленты в месте ее креп-

ления к валу и маховику использовались накладки такого же сечения, что и лента. Параметры изготовленного двигателя:

$$\Omega = 6000 \text{ об/мин}, t = 0,3 \text{ с}, R_1 = 22 \cdot 10^{-3} \text{ м}, R = 16 \cdot 10^{-3} \text{ м}, r = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}, B = 23 \cdot 10^{-3} \text{ м}, \\ h = 0,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}, b = 16 \cdot 10^{-3} \text{ м}, l = 1 \text{ м}, r_2 = 9 \cdot 10^{-3} \text{ м}, r_1 = 10,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}, n_3 = 18, n_c = 12.$$

Экспериментальное значение пускового момента  $M_0 = 2,35 \text{ Н}\cdot\text{м}$ ; расчетное значение, вычисленное по формуле (6), —  $M_p = 3,19 \text{ Н}\cdot\text{м}$ . Определим допустимые напряжения при изгибе ленты.

В работе [11] при больших перемещениях упругого элемента предлагается напряжения при изгибе определять по формуле

$$\sigma = \beta \omega \frac{Eh}{2l}, \quad (21)$$

где  $\beta = \sqrt{Pl^2/EJ_{X_1}}$  — силовой коэффициент подобия,  $P = M/R$  — приведенная сила в точке закрепления ленты к маховику,  $\omega$  — моментный коэффициент подобия, при различных формах упругой линии ленты принимающий значения, согласно работе [11],  $0 \leq \omega < 7,7274$ .

При указанных размерах упругой ленты и том же пусковом моменте значение напряжения при изгибе, рассчитанное по формуле (21), равно

$$\sigma = 1,39 \cdot 2,33 \frac{Eh}{2l} = 97 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2,$$

что не превышает допустимых напряжений при изгибе для упругой стали.

Таким образом, получены аналитические выражения для вычисления пускового момента упругой ленты и ее геометрических размеров с учетом инерционной составляющей двигателя при его многоциклической работе. На основании испытаний образца инерционного двигателя выявлено, что расчетные характеристики соответствуют полученным экспериментальным значениям.

Разработанный двигатель не требует дополнительных источников питания, что позволяет снизить его стоимость и увеличить надежность. Представленная конструкция двигателя может применяться в устройствах стабилизации оптического изображения, управления угловым перемещением кресла космонавта в безвоздушном пространстве в экстренных случаях, а также для изменения положения рулей управления подвижных объектов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ветренко В. И., Романова Т. И., Романов А. С. Гироскопическая стабилизация двухколесного подвижного устройства // Изв. вузов. Приборостроение. 2014. Т. 57, № 10. С. 47—50.
2. Еськов Д. Н., Ларионов Ю. П., Новиков В. А. и др. Автоматическая стабилизация оптического изображения. Л.: Машиностроение, 1988. 240 с.
3. Никитин Е. А., Шестов С. А., Матвеев В. А. Гироскопические системы: Элементы гироскопических приборов / Под ред. Д. С. Пельпора. М.: Высшая школа, 1988. 432 с.
4. Бабаева Н. Ф., Ерофеев В. М., Сивоконенко Ю. М. и др. Расчет и проектирование элементов гироскопических устройств. Л.: Машиностроение, 1967. 480 с.
5. Гевондян Т. А. Пружинные двигатели: Теория, расчет, методы контроля и испытаний. М.: Гос. изд-во оборонной пром-сти, 1956. 368 с.
6. Борисов С. И., Токарев В. Ф., Токарев В. А. Теория механизмов и детали точных приборов. М.: Машиностроение, 1966. 407 с.
7. Фесик С. П. Справочник по сопротивлению материалов. Киев: Будівельник, 1982. 280 с.

8. Ветренко В. И., Скорых В. Я. Определение радиальной жесткости трехленточной упругой опоры / Томск. политехн. ин-т. Томск, 1989. Деп. в ин-те „Информприбор“. 20.04.89, № 4613-89.
9. Павлов В. А. Основы проектирования и расчета гироскопических приборов. Л.: Судостроение, 1967. 408 с.
10. Пат. 1806292 РФ, АЗ, МКИ F03 G 1/02/3/08. Инерционный пружинный двигатель / В. И. Ветренко, О. В. Глазкин, В. И. Копытов, В. А. Петрухин, С. Н. Самойлов // Б.И. 1993. № 12.
11. Попов Е. П. Теория и расчет гибких упругих стержней. М.: Наука, 1986. 296 с.

#### Сведения об авторах

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

Рекомендована кафедрой  
экономики и организации строительства

Поступила в редакцию  
16.06.16 г.

**Ссылка для цитирования:** Ветренко В. И., Романова Т. И. Инерционный двигатель // Изв. вузов. Приборостроение. 2017. Т. 60, № 3. С. 245—250.

#### INERTIAL ENGINE

V. I. Vetrenko<sup>1</sup>, T. I. Romanova<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Limited Liability Company Zvezdny, 634040, Tomsk, Russia  
E-mail: vladim.vetrenko@yandex.ru

<sup>2</sup> Tomsk State University of Architecture and Building,  
634003, Tomsk, Russia

Inertial engine used in short-term action devices to bring structural elements into rotational motion is considered. Torque is generated by a flat spring, and the flywheel of the engine provide the necessary momentum. Analytical expressions for calculating the size of the engine with the account for moments of inertia of its elements are presented. The formulas are derived based on the equality of angular momentum and the starting torque of the motor. The obtained expressions are used to design and manufacture a reusable experimental model of the engine; results of the model test demonstrate compliance of design characteristics with the experimental data. Absence of additional power sources reduces the cost of the developed engine and increases its reliability. The design of the engine can be used in devices used for optical image stabilization, for angular movement of astronaut seat control in the space in case of emergency, and for changing the position of rudder control of moving objects.

**Keywords:** inertial engine, kinetic momentum, elastic tape, starting torque, angular momentum, flywheel, optical image stabilization, astronaut seat

#### Data on authors

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

**For citation:** Vetrenko V. I., Romanova T. I. Inertial engine // Journal of Instrument Engineering. 2017. Vol. 60, N 3. P. 245—250 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-3-245-250