

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 62-133

doi: 10.30987/2782-5957-2022-7-19-23

## МАХОВИК ДЛЯ МАШИН С ОГРАНИЧЕНИЯМИ ПО ВЕСУ

Игорь Павлович Попов<sup>1✉</sup>

<sup>1</sup> Курганский государственный университет, г. Курган, Россия

<sup>1</sup> ip.popov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8683-0387>

**Аннотация.** Цель исследования состоит в обосновании возможности создания маховика с высоким моментом инерции и малой массой для использования в машинах с ограничениями по весу. Задача, решению которой посвящена статья, состоит в аналитическом синтезировании искусственного момента инерции и установлении определяющих его параметров. Используются методы электромеханических аналогий, в частности, дуальность инертной массы и электрической емкости. Новизна работы состоит в получении формулы момента инерции, выраженного через магнитную индукцию и электрическую емкость. Результаты исследования: отмечено, что механическая масса обязательно удовлетворяет второму закону Ньютона. Последнее обстоятельство положено в основу создания «искусственной» массы, не связанной ни с объемом, ни с плотностью материала, заключенного в искусственно инертном объекте. Речь идет об «электромагнитной» массе. Ее инертность, в том числе, удовлетворение второму закону Ньютона обуславливается известной инерционностью электромагнит-

ных процессов. Установлено, что устройство с искусственным моментом инерции может включать в себя электрический конденсатор и электромеханический преобразователь, например, машину постоянного тока. Существование аналогий между физическими величинами разной физической природы не приводит автоматически к возможности получения соответствующих функциональных зависимостей. Для этого в первую очередь необходимы технические средства, обеспечивающие согласование размерностей дуальных величин. Главными преимуществами искусственного маховика над «натуральным» являются несопоставимо меньший вес и возможность электрического управления моментом инерции в широких пределах путем изменения магнитного поля (возбуждения) и емкости, что создает хорошую перспективу применения его в системах автоматического управления.

**Ключевые слова:** искусственная масса, искусственный момент инерции, вес, магнитное поле, электрическая емкость.

Ссылка для цитирования:

Попов И.П. Маховик для машин с ограничениями по весу / И.П. Попов // Транспортное машиностроение. – 2022. - № 7. – С. 19 – 23. doi: 10.30987/2782-5957-2022-7-19-23.

Original article

Open Access Article

## FLYWHEEL FOR MACHINES WITH WEIGHT RESTRICTIONS

Igor Pavlovich Popov<sup>1✉</sup>

<sup>1</sup> Kurgan State University, Kurgan, Russia

<sup>1</sup> ip.popov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8683-0387>

**Abstract.** The study objective is to substantiate the possibility of designing a flywheel with a high moment of inertia and low mass for use in machines with weight restrictions. The problem to which the paper is devoted is the analytical synthesis of the artificial moment of inertia and setting its defining parameters. The methods of electromechanical analogies are used, in particular, the duality of the inert mass and the electric capacity. The novelty of the work is in getting the formula of the moment of inertia expressed in terms of magnetic induction and electric capacity. Research

results: it is noted that the mechanical mass necessarily satisfies Newton's second law. The latter condition is the basis for creating an artificial mass that is not related to either the volume or the density of the material of an artificially inert object. Electromagnetic mass is meant in this case. Its inertia, including satisfaction with Newton's second law, is due to the well-known inertia of electromagnetic processes. It is found out that a device with an artificial moment of inertia can include an electric capacitor and an electromechanical converter, for example, a DC machine. Analogies ex-

isting between physical quantities of different nature do not automatically lead to the possibility of obtaining corresponding functional dependencies. To do this, first of all, technical means are needed to ensure the coordination of the dimensions of dual quantities. The main advantages of an artificial flywheel over a natural one are incomparably lower weight and the possibility

Reference for citing:

Popov I. P. Flywheel for machines with weight restrictions. *Transport Engineering*. 2022; 7: 19 – 23. doi: 10.30987/2782-5957-2022-7-19-23.

## Введение

Момент инерции – это «вращательный аналог» инертной массы, которая, в свою очередь, характеризует способность материального тела ускоряться при оказании на него силового воздействия [1–3]. Механическая масса тела связана с его объемом и плотностью материала, из которого оно состоит. Механическая (естественная) масса обязательно удовлетворяет второму закону Ньютона.

Последнее обстоятельство положено в основу создания «искусственной» массы, не связанной ни с объемом, ни с плотностью материала, заключенного в искусственно инертном объекте. Речь идет об «электромагнитной» массе. Ее инертность, в том числе, удовлетворение второму закону Ньютона обуславливается известной инерционностью электромагнитных процессов.

Актуальность работы обусловлена тем, что наиболее распространенными движениями в технике являются вращательные [4–9].

## Материалы, модели, эксперименты и методы

Используются методы электромеханических аналогий, в частности, дуаль-

## Результаты

Одна из известных электромеханических аналогий

$$m \Leftrightarrow C \quad (1)$$

связана с электромагнитным преобразователем. Из этого следует, что устройство с искусственным моментом инерции может включать в себя электрический конденсатор и электромеханический преобразователь, например, машину постоянного тока (рис.).

of electrical control of the moment of inertia over a wide range by changing the magnetic field (excitation) and capacity, that gives a good prospect of its application in automatic control systems.

**Keywords:** artificial mass, artificial moment of inertia, weight, magnetic field, electric capacity.

В этой связи представляет интерес возможность создания условий для возникновения искусственного момента инерции.

Поскольку принцип эквивалентности инертной и гравитационной массы не распространяется на искусственную массу, устройство с искусственной массой может быть несопоставимо легче своего механического аналога с таким же моментом инерции. Это качество делает такое устройство особенно привлекательным для использования в машинах с ограничениями по весу, в том числе, в качестве *легких* маховиков.

Цель исследования состоит в обосновании возможности создания маховика с высоким моментом инерции и малой массой.

Задача, решению которой посвящена статья, состоит в аналитическом синтезировании искусственного момента инерции и установлении определяющих его параметров [10].

ность инертной массы и электрической емкости.

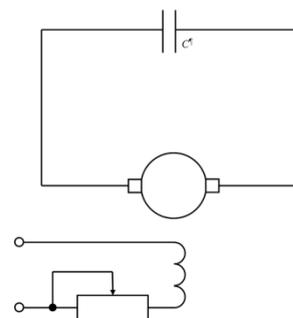


Рис. Схема устройства с искусственным моментом инерции  
Fig. Scheme of a device with an artificial moment of inertia

В генераторном режиме

$$e_i = -B2lw \frac{D}{2} \frac{d\varphi}{dt},$$

где  $e_i$  – индуцируемая ЭДС,  $B$  – магнитная индукция в зазоре,  $l$  – активная длина проводника якорной обмотки,  $w$  – число витков обмотки,  $D$  – эффективный диаметр обмотки,  $\varphi$  – угол поворота ротора. Потери, индуктивность обмотки и собственный момент инерции ротора не учитываются.

Напряжение на зажимах якорной обмотки приложено к конденсатору, поэтому

$$BlwD \frac{d\varphi}{dt} = \frac{1}{C} \int_0^t i dt,$$

где  $i$  – якорный ток.

Дифференцирование равенства дает

$$BlwD \frac{d^2\varphi}{dt^2} = \frac{1}{C} i,$$

$$i = BlwDC \frac{d^2\varphi}{dt^2}.$$

При протекании тока развивается момент

$$M = B2lw \frac{D}{2} i = (BlwD)^2 C \frac{d^2\varphi}{dt^2} = J_C \frac{d^2\varphi}{dt^2}, \quad (2)$$

где  $J$  – искусственный или электромагнитный момент инерции.

Последняя часть полученного преобразования представляет собой вращательный вариант второго закона Ньютона. Из преобразования следует, что

$$J_C = (BlwD)^2 C. \quad (3)$$

Таким образом, представленное на рисунке устройство обладает искусственным моментом инерции. В связи с этим оно может использоваться в качестве электрического маховика.

В состав выражения (3) масса (инертная/гравитационная) не входит. Поэтому вес устройства с моментом инерции напрямую не связан.

Из формулы (3) вытекает выражение для искусственной (инертной) электрической емкости

$$C_J = \frac{J}{(BlwD)^2}.$$

Из преобразования (2) следует

$$M = J_C \frac{d^2\varphi}{dt^2} = J_C \frac{d\omega}{dt},$$

$$dL = M dt = J_C d\omega,$$

$$L = J_C \omega = (BlwD)^2 C \omega,$$

где  $\omega$  – частота вращения,  $L$  – момент импульса

Если вместо вращательной электрической машины использовать линейную, то вместо искусственного момента инерции можно получить искусственную (емкостную) массу

$$m_C = (Blw)^2 C. \quad (4)$$

Учет влияния параметров схемы замещения якорной цепи. Таковым в первую очередь является активное сопротивление  $R$ , включая сопротивление якорной обмотки. Для качественной оценки его влияния методически целесообразно рассмотреть два характерных предельных режима (мгновенных).

*Первый режим* – конденсатор не заряжен (начало вращения). При этом напряжение на конденсаторе равно нулю и запись второго закона Кирхгофа имеет вид:

$$BlwD \frac{d\varphi}{dt} = Ri.$$

При протекании тока развивается момент

$$M = B2lw \frac{D}{2} i = \frac{(BlwD)^2}{R} \frac{d\varphi}{dt}.$$

Это момент вязкого трения.

*Второй режим* – установившийся. Конденсатор заряжен и больше не заряжается (вращение с постоянной скоростью). При этом ток и, соответственно, момент равны нулю.

*В промежуточном режиме* (процесс зарядки конденсатора) значение тормозного момента, обусловленного активным сопротивлением, лежит в диапазоне между двумя указанными предельными значениями.

Для ограничения токов и перегрева изоляции в якорную обмотку следует включить реостат.

## Обсуждение/Заключение

Существование *аналогий* между физическими величинами разной физической природы подобных (1) не приводит автоматически к возможности получения соответствующих функциональных зависимостей типа (3) и (4). Для этого в первую очередь необходимы технические средства, обеспечивающие согласование размерностей дуальных величин.

Если поместить искусственный электрический маховик в «черный ящик» с выведением вала наружу, то никакими экспе-

риментами невозможно установить, искусственный или «натуральный» маховик находится внутри.

Главными преимуществами искусственного маховика над «натуральным» являются несопоставимо меньший вес и возможность электрического управления моментом инерции в широких пределах путем изменения магнитного поля (возбуждения) и емкости, что создает хорошую перспективу применения его в системах автоматического управления.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Popov I.P. Theory of a Multi-Inert Oscillator. Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2020. no. 49(8). P. 667–671. doi: 10.3103/S1052618820080105.
2. Popov I.P. Free harmonic oscillations in systems with homogeneous elements. Journal of Applied Mathematics and Mechanics. 2012. no. 76(4). P. 393–395. doi: 10.1016/j.jappmathmech.2012.09.005.
3. Попов И.П. Колебательные системы, состоящие только из инертных или только упругих элементов, и возникновение в них свободных гармонических колебаний // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2013 no. 1(21). P. 95–103.
4. Aliste-Prieto J., Rand B., Sadun L. Rotation numbers and rotation classes on one-dimensional tiling spaces. Annales Henri Poincare. 2021. doi: 10.1007/s00023-021-01019-2.
5. Zhang Z., Cen L., Zhang J., Hu J., Zhao Y., Wang F. Rotation velocity detection with orbital angular momentum light spot completely deviated out of the rotation center. Optics Express. 2020. no. 28(5). P. 6859–6867. doi: 10.1364/OE.380324.

6. Kholmetskii A., Missevitch O., Yarman T., Arik M. Thomas precession and Thomas-wigner rotation: correct solutions and their implications. EPL. 2020. no. 129(3). P. 30006. doi: 10.1209/0295-5075/129/30006.
7. Avanzini G., Berardo L., Giulietti F., Minisci E.A. Optimal rotation sequences in presence of constraints on admissible rotation axes. Journal of Guidance, Control, and Dynamics. 2011. no. 34(2). P. 554–563. doi: 10.2514/1.49805.
8. Dong L., Rinoshika A. Comparison between rotation swirler and non-rotation swirler in a horizontal swirling flow pneumatic conveying. Powder Technology. 2019. no. 346. P. 396–402. doi: 10.1016/j.powtec.2019.02.017.
9. Попов И.П. Движение исполнительных органов механизмов по эллиптическим и круговым траекториям // Транспортное машиностроение. 2022. № 1-2(1-2). С. 53–59. doi: 10.30987/2782-5957-2022-01-02-53-59
10. Малинкович М.Д. Синтез некоторых передаточных механизмов // Вестник Брянского государственного технического университета. 2005. № 2(6). С. 69–73.

## REFERENCE

1. Popov I.P. Theory of a Multi-Inert Oscillator. Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2020;49(8):667–671. doi: 10.3103/S1052618820080105.
2. Popov I.P. Free harmonic oscillations in systems with homogeneous elements. Journal of Applied Mathematics and Mechanics. 2012;76(4):393–395. doi: 10.1016/j.jappmathmech.2012.09.005.
3. Popov I.P. Vibration systems consisting only of inert or only elastic elements, and the appearance of free harmonic vibrations in them. Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics. 2013;1(21):95–103.
4. Aliste-Prieto J, Rand B, Sadun L. Rotation numbers and rotation classes on one-dimensional tiling spac-

- es. Annales Henri Poincare; 2021. doi: 10.1007/s00023-021-01019-2.
5. Zhang Z, Cen L, Zhang J, Hu J, Zhao Y, Wang F. Rotation velocity detection with orbital angular momentum light spot completely deviated out of the rotation center. Optics Express. 2020;28(5):6859–6867. doi: 10.1364/OE.380324.
6. Kholmetskii A, Missevitch O, Yarman T, Arik M. Thomas precession and Thomas-wigner rotation: correct solutions and their implications. EPL. 2020;129(3):30006. doi: 10.1209/0295-5075/129/30006.
7. Avanzini G, Berardo L, Giulietti F, Minisci EA. Optimal rotation sequences in presence of constraints on admissible rotation axes. Journal of

- Guidance, Control, and Dynamics. 2011;34(2):554-563. doi: 10.2514/1.49805.
8. Dong L, Rinoshika A. Comparison between rotation swirler and non-rotation swirler in a horizontal swirling flow pneumatic conveying. Powder Technology. 2019;346:396-402. doi: 10.1016/J.powtec.2019.02.017.

9. Popov I.P. Movement of operating members of mechanisms along elliptical and circular trajectories. Transport Engineering. 2022;1-2 (1-2):53-59. doi: 10.30987/2782-5957-2022-01-02-53-59
10. Malinkovich M.D. Synthesis of some transmission mechanisms. Bulletin of Bryansk State Technical University. 2005;2(6):69–73.

#### **Информация об авторе:**

**Попов Игорь Павлович** – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Технология машиностроения, металлорежущие станки и ин-

струменты» Курганского государственного университета, e-mail: ip.popow@yandex.ru, AuthorID-РИНЦ: 655616.

#### **Information about the author:**

**Popov Igor Pavlovich**, Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer of the Department of Mechanical Engineering Technology, Metal-cutting Machines

and Tools at Kurgan State University, phone: 8-905-852-81-21, e-mail: ip.popow@yandex.ru, AuthorID-RSCI: 655616.

**Статья опубликована в режиме Open Access.  
Article published in Open Access mode.**

**Статья поступила в редакцию 28.03.2022; одобрена после рецензирования 04.04.2022; принята к публикации 23.05.2022. Рецензент – Пугачев А.А., доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Промышленная электротехника и электроника» Брянского государственного технического университета, член редколлегии журнала «Транспортное машиностроение».**

**The article was submitted to the editorial office on 28.03.2022; approved after review on 04.04.2022; accepted for publication on 23.05.2022. The reviewer is Pugachev A.A., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Industrial Electrical Engineering and Electronics at Bryansk State Technical University, member of the Editorial Board of the journal *Transport Engineering*.**