

Научная статья
УДК: 531.36
DOI: [10.34759/trd-2022-123-01](https://doi.org/10.34759/trd-2022-123-01)

ИСКУССТВЕННЫЙ МОМЕНТ ИНЕРЦИИ

Игорь Павлович Попов

Курганский государственный университет,

Курган, Россия

ip.popov@yandex.ru

Аннотация. Цель исследования состоит в аналитическом синтезировании искусственного момента инерции и установлении определяющих его параметров. 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. Если поместить искусственный электрический маховик в «черный ящик» с выводением вала наружу, то никакими экспериментами 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.

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

Для цитирования: Попов И.П. Искусственный момент инерции // Труды МАИ. 2022. № 123. DOI: [10.34759/trd-2022-123-01](https://doi.org/10.34759/trd-2022-123-01)

ARTIFICIAL MOMENT OF INERTIA

Igor P. Popov

Kurgan State University,

Kurgan, Russia

ip.popow@yandex.ru

Abstract. The article demonstrates that creation of the “artificial mass”, which associates with neither volume, nor the density of the material, encased in the inertial object, is based on the requirement to the Newton’s second law satisfaction. As far as the equivalence principle of inertial and gravitational mass is not extended to the artificial mass, a device with the artificial mass may be incommensurably lighter than its mechanical analog with the same moment of inertia. This quality makes this device particularly attractive for application in aviation and astronautics, including light flywheels. The purpose of the study consists in analytical synthesizing of the artificial moment of inertia and identifying parameters determining it.

The existence of analogies between physical quantities of different physical nature does not automatically lead to the possibility of obtaining the corresponding functional dependencies. For this, technical means ensuring dimensionalities concordance of the dual quantities are necessary in the first place. If an artificial flywheel is being placed in a “black box”, it will be impossible to determine by any experiments whether an artificial or “natural” flywheel is inside it.

The main advantages of the artificial flywheel over a “natural” one are its incomparably lower weight and the possibility of electrically controlling the moment of inertia over a wide range by changing the magnetic field (excitation) and capacitance, which creates a good prospect for its application in automatic control systems.

Keywords: artificial mass, artificial moment of inertia, weight, magnetic field, electric capacitance

For citation: Popov I.P. Artificial moment of inertia. *Trudy MAI*, 2022, no. 123. DOI: [10.34759/trd-2022-123-01](https://doi.org/10.34759/trd-2022-123-01)

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 [4–6]. 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 [7]. Ее инертность, в том числе, удовлетворение второму закону Ньютона обуславливается известной инерционностью электромагнитных процессов.

Наиболее распространенными движениями в технике, в том числе, авиационной и космической являются вращательные [8–13]. В этой связи представляет интерес возможность создания условий для возникновения искусственного момента инерции.

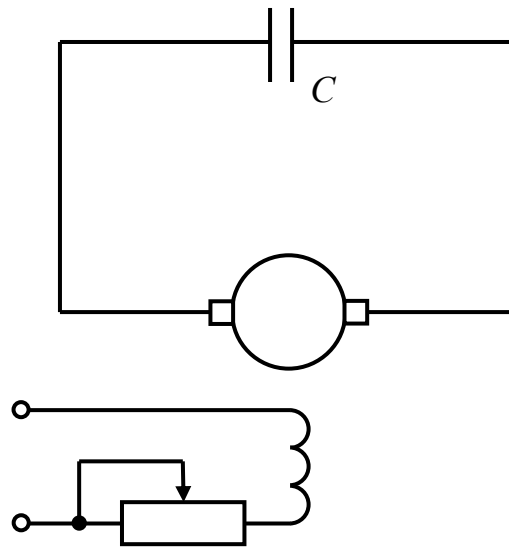
Поскольку принцип эквивалентности инертной и гравитационной массы не распространяется на искусственную массу, устройство с искусственной массой может быть несопоставимо легче своего механического аналога с таким же моментом инерции. Это качество делает такое устройство особенно привлекательным для использования в авиации и космонавтике [14–20], в том числе, в качестве *легких* маховиков.

Цель исследования состоит в аналитическом синтезировании искусственного момента инерции и установлении определяющих его параметров.

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 (см. рисунок).



Устройство с искусственным моментом инерции

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, φ – 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

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

$$dL = Mdt = J_C d\omega,$$

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

где ω – частота вращения, L – момент импульса

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

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

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 выводением вала наружу, то никакими экспериментами 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. Ермаков П.Г., Гоголев А.А. Сравнительный анализ схем комплексирования информации бесплатформенных инерциальных навигационных систем беспилотных летательных аппаратов // Труды МАИ. 2021. № 117. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=156253>. DOI: [10.34759/trd-2021-117-11](https://doi.org/10.34759/trd-2021-117-11)
2. Нигяр Э.С. Динамика пластины с упруго присоединённой массой // Труды МАИ. 2020. № 111. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=115111>. DOI: [10.34759/trd-2020-111-2](https://doi.org/10.34759/trd-2020-111-2)
3. Добрышкин А.Ю. Колебания стержня, несущего малую присоединенную массу // Труды МАИ. 2020. № 110. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=112820>. DOI: [10.34759/trd-2020-110-2](https://doi.org/10.34759/trd-2020-110-2)
4. Добрышкин А.Ю., Сысоев О.Е., Сысоев Е.О. Экспериментальная проверка математической модели вынужденных колебаний разомкнутой тонкостенной оболочки с малой присоединенной массой и жестко заземленными краями // Труды МАИ. 2019. № 109. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=111349>. DOI: [10.34759/trd-2019-109-4](https://doi.org/10.34759/trd-2019-109-4)
5. Ермаков В.Ю. Применение магнитожидкостного эффекта для снижения статического и динамического дисбаланса от подвижных масс приводных устройств // Труды МАИ. 2019. № 106. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=105679>
6. Панёв А.С. О движении твердого тела с подвижной внутренней массой по горизонтальной поверхности в вязкой среде // Труды МАИ. 2018. № 98. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=90072>

7. Попов И.П. Применение методов классической механики к электрическим зарядам // Труды МАИ. 2021. № 119. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=159770>. DOI: [10.34759/trd-2021-119-01](https://doi.org/10.34759/trd-2021-119-01)
8. Попов И.П. Комбинированные вращения в технических системах // Труды МАИ. 2021. № 120. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=161405>. DOI: [10.34759/trd-2021-120-01](https://doi.org/10.34759/trd-2021-120-01)
9. Загордан А.А., Загордан Н.Л. О применении специальных обобщенных координат для исследования совместных изгибных колебаний лопастей несущего винта, закрепленного на упругодемпфирующей опоре // Труды МАИ. 2019. № 108. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=109383>. DOI: [10.34759/trd-2019-108-4](https://doi.org/10.34759/trd-2019-108-4)
10. Сорокин Ф.Д., Чжан Х., Попов В.В., Иванников В.В. Экспериментальная верификация энергетической модели роликового подшипника для моделирования опорных узлов авиационных двигателей. Часть 2. Исследование влияния изгиба колец на нагрузочную характеристику в случае не закрепленного в обойме подшипника // Труды МАИ. 2019. № 104. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=102114>
11. Черноморский А.И., Курис Э.Д., Мельников В.Е. Программное управление поступательно-вращательными перемещениями одноосного колёсного модуля // Труды МАИ. 2018. № 98. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=87259>
12. Гимадиев А.Г., Букин В.А., Гареев А.М., Грешняков П.И., Кутуев С.С. Стабилизация частоты вращения турбовинтового двигателя при испытаниях с

- гидротормозом // Труды МАИ. 2018. № 103. URL:
<https://trudymai.ru/published.php?ID=100709>
13. Сиротин А.Н. О частных случаях одной задачи оптимального управления угловым движением симметричного космического аппарата стабилизированного вращением // Труды МАИ. 2017. № 96. URL:
<https://trudymai.ru/published.php?ID=85869>
14. Попов И.П. К расчетам параметров пассивных гравитационных маневров межпланетных космических аппаратов // Труды МАИ. 2021. № 118. URL:
<https://trudymai.ru/published.php?ID=158210>. DOI: [10.34759/trd-2021-118-01](https://doi.org/10.34759/trd-2021-118-01)
15. Алимов Н.И., Горбулин В.И., Сударь Ю.М. Формирование семейства траекторий свободного сферического движения космического аппарата как твёрдого тела, обеспечивающих переориентацию его оси динамической симметрии в заданное положение // Труды МАИ. 2021. № 121. URL:
<https://trudymai.ru/published.php?ID=162637>. DOI: [10.34759/trd-2021-121-02](https://doi.org/10.34759/trd-2021-121-02)
16. Гуськов А.А., Спиринов А.А., Норинская И.В. Имитационная модель электромеханического рулевого привода малогабаритного высокоманевренного летательного аппарата // Труды МАИ. 2020. № 111. URL:
<https://trudymai.ru/published.php?ID=115157>. DOI: [10.34759/trd-2020-111-14](https://doi.org/10.34759/trd-2020-111-14)
17. Низаметдинов Ф.Р., Сорокин Ф.Д., Иванников В.В. Разработка конечного элемента оболочки для моделирования больших перемещений элементов конструкций летательных аппаратов // Труды МАИ. 2019. № 109. URL:
<https://trudymai.ru/published.php?ID=111337>. DOI: [10.34759/trd-2019-109-2](https://doi.org/10.34759/trd-2019-109-2)

18. Алексеева М.М. Методика формирования объемно-массовой компоновки летательного аппарата с ракетно-прямоточным двигателем на твердом топливе // Труды МАИ. 2018. № 98. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=90158>
19. Низаметдинов Ф.Р., Сорокин Ф.Д. Особенности применения вектора Эйлера для описания больших поворотов при моделировании элементов конструкций летательных аппаратов на примере стержневого конечного элемента // Труды МАИ. 2018. № 102. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=98753>
20. Зинченко А.А. Организация весового контроля при производстве авиационной техники // Труды МАИ. 2018. № 102. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=99100>

References

1. Ermakov P.G., Gogolev A.A. *Trudy MAI*, 2021, no. 117. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=156253>. DOI: [10.34759/trd-2021-117-11](https://doi.org/10.34759/trd-2021-117-11)
2. Nigyar E.S. *Trudy MAI*, 2020, no. 111. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=115111>. DOI: [10.34759/trd-2020-111-2](https://doi.org/10.34759/trd-2020-111-2)
3. Dobryshkin A.Yu. *Trudy MAI*, 2020, no. 110. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=112820>. DOI: [10.34759/trd-2020-110-2](https://doi.org/10.34759/trd-2020-110-2)
4. Dobryshkin A.Yu., Sysoev O.E., Sysoev E.O. *Trudy MAI*, 2019, no. 109. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=111349>. DOI: [10.34759/trd-2019-109-4](https://doi.org/10.34759/trd-2019-109-4)
5. Ermakov V.Yu. *Trudy MAI*, 2019, no. 106. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=105679>

6. Panev A.S. *Trudy MAI*, 2018, no. 98. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=90072>
7. Popov I.P. *Trudy MAI*, 2021, no. 119. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=159770>. DOI: [10.34759/trd-2021-119-01](https://doi.org/10.34759/trd-2021-119-01)
8. Popov I.P. *Trudy MAI*, 2021, no. 120. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=161405>. DOI: [10.34759/trd-2021-120-01](https://doi.org/10.34759/trd-2021-120-01)
9. Zagordan A.A., Zagordan N.L. *Trudy MAI*, 2019, no. 108. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=109383>. DOI: [10.34759/trd-2019-108-4](https://doi.org/10.34759/trd-2019-108-4)
10. Sorokin F.D., Chzhan Kh., Popov V.V., Ivannikov V.V. *Trudy MAI*, 2019, no. 104. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=102114>
11. Chernomorskii A.I., Kuris E.D., Mel'nikov V.E. *Trudy MAI*, 2018, no. 98. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=87259>
12. Gimadiev A.G., Bukin V.A., Gareev A.M., Greshnyakov P.I., Kutuev S.S. *Trudy MAI*, 2018, no. 103. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=100709>
13. Sirotin A.N. *Trudy MAI*, 2017, no. 96. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=85869>
14. Popov I.P. *Trudy MAI*, 2021, no. 118. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=158210>. DOI: [10.34759/trd-2021-118-01](https://doi.org/10.34759/trd-2021-118-01)
15. Alimov N.I., Gorbulin V.I., Sudar' Yu.M. *Trudy MAI*, 2021, no. 121. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=162637>. DOI: [10.34759/trd-2021-121-02](https://doi.org/10.34759/trd-2021-121-02)
16. Gus'kov A.A., Spirin A.A., Norinskaya I.V. *Trudy MAI*, 2020, no. 111. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=115157>. DOI: [10.34759/trd-2020-111-14](https://doi.org/10.34759/trd-2020-111-14)

17. Nizametdinov F.R., Sorokin F.D., Ivannikov V.V. *Trudy MAI*, 2019, no. 109. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=111337>. DOI: [10.34759/trd-2019-109-2](https://doi.org/10.34759/trd-2019-109-2)
18. Alekseeva M.M. *Trudy MAI*, 2018, no. 98. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=90158>
19. Nizametdinov F.R., Sorokin F.D. *Trudy MAI*, 2018, no. 102. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=98753>
20. Zinchenko A.A. *Trudy MAI*, 2018, no. 102. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=99100>

Статья поступила в редакцию 23.03.2022; одобрена после рецензирования 06.04.2022; принята к публикации 20.04.2022

The article was submitted on 23.03.2022; approved after reviewing on 06.04.2022; accepted for publication on 20.04.2022.