

DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-623775>

Оригинальное исследование



Электромеханическое устройство для аккумулирования энергии

В.Д. Павлов

Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, Владимир, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение. Кратковременные пиковые нагрузки машин и механизмов порождают необходимость в аккумулировании механической энергии для её последующего импульсного использования. Это вполне актуально, например, для тягачей на стартовом этапе буксировки тяжёлых прицепов. Применение аккумулятора механической энергии позволит уменьшить мощность двигателя тягача и расширить его функциональные возможности.

Цель — разработка математической модели аккумулятора механической энергии.

Методы исследований. Аккумулятор механической энергии может быть выполнен в виде электрической машины постоянного тока или вентильной, на валу которой закреплён супермаховик. При подключении машины к источнику питания возникает нестационарный процесс, описываемый двумя дифференциальными уравнениями: одно — для механических величин, другое — для электрических. Решения дифференциальных уравнений повторяют соотношения для зарядки и разрядки электрического конденсатора.

Результаты. Из полученных формул следует, что для электрической цепи рассматриваемый аккумулятор механической энергии неотличим от электрического конденсатора. Из этого следует, что в данном случае можно вести речь об искусственной электрической ёмкости. Кроме того, возникает искусственное электрическое сопротивление (которое не связано с удельным сопротивлением, длиной и площадью сечения проводников). В связи с изложенным аккумулятор механической энергии можно трактовать как искусственный электрический конденсатор, который запасает не энергию электрического поля, а кинетическую энергию вращения супермаховика.

Заключение. Существуют конструкции супермаховиков, способные запасть существенную кинетическую энергию. Изучалась даже возможность установки их на легковом транспорте. В этом смысле массивные тягачи имеют бесспорное преимущество, поскольку увеличение веса для них не только не проблематично, но в некоторых случаях желательно.

Ключевые слова: тягач; нагрузка; буксировка; прицеп; аккумулятор; энергия; электрическая машина.

Как цитировать:

Павлов В.Д. Электромеханическое устройство для аккумулирования энергии // Известия МГТУ «МАМИ». 2024. Т. 18, № 1. С. 13–17.

DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-623775>

DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-623775>

Original Study Article

The electromechanical device for energy accumulation

Valentin D. Pavlov

Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs, Vladimir, Russian Federation

ABSTRACT

BACKGROUND: Short-term peak loads of machines and mechanisms arise necessity in mechanical energy accumulation for its consequential impulse use. For instance, it is quite relevant for trucks at the initial stage of dragging heavy trailers. Use of mechanical energy accumulator will help to decrease truck engine power and to enlarge its functional capabilities.

AIM: Development of the mathematical model of the mechanical energy accumulator.

METHODS: The mechanical energy accumulator can be made either as a permanent magnet synchronous machine or as a converter-fed electric motor with the super flywheel mounted at the motor shaft. When the machine is connected to the supply source, the non-stationary process described with two differential equations, mechanical and electric, occurs. Solutions of the differential equations replicate ratios for charging and discharging of an electric capacitor.

RESULTS: According to the obtained formulae, the mechanical energy accumulator seems identical to an electric capacitor for an electric circuit. Therefore, artificial electric capacity can be discussed. Moreover, artificial electric resistance not related to conductor's specific resistance, length and cross-area, occurs. In view of the aforesaid, the mechanical energy accumulator can be considered as an artificial electric capacitor accumulating not electric field energy but kinematic energy of super-flywheel's rotation.

CONCLUSIONS: There are designs of super-flywheels capable of accumulating sufficient amount of kinetic energy. The ability of implementing them into passenger vehicles was studied as well. In this context, massive trucks have an undeniable advantage because weight increase is not only non-problematic but preferable in some cases.

Keywords: truck; load; dragging; trailer; accumulator; energy; electric machine.

To cite this article:

Pavlov VD. The electromechanical device for energy accumulation. *Izvestiya MGTU «MAMI»*. 2024;18(1):13–17.

DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-623775>

Received: 23.11.2023

Accepted: 01.02.2024

Published online: 30.03.2024

ВВЕДЕНИЕ

Кратковременные пиковые нагрузки машин и механизмов порождают необходимость в аккумулировании механической энергии для её последующего импульсного использования. Это вполне актуально, например, для тягачей на стартовом этапе буксировки тяжёлых прицепов [1–3]. Применение аккумулятора механической энергии позволит уменьшить мощность двигателя тягача.

МАТЕРИАЛЫ, МОДЕЛИ, ЭКСПЕРИМЕНТЫ И МЕТОДЫ

Аккумулятор механической энергии может быть выполнен в виде электрической машины постоянного тока или вентильной, на валу которой закреплён супермаховик.

При подключении машины к источнику питания возникает нестационарный процесс, описываемый следующими выражениями [4–7].

$$\begin{cases} J \frac{d^2\varphi}{dt^2} + k \frac{d\varphi}{dt} = B2lw \frac{D}{2} i \\ B2lw \frac{D}{2} \frac{d\varphi}{dt} + Ri = U \end{cases},$$

где J — момент инерции супермаховика в совокупности с собственным моментом инерции электрической машины, φ — угловое положение ротора [8, 9], k — коэффициент вязкого трения, B — значение магнитной индукции [10], $2l$ — рабочая длина витка якорной обмотки, w — число витков якорной обмотки, D — диаметр якоря, R — активное сопротивление электрической цепи, U — напряжение источника питания.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для компактности вводится обозначение:

$$BlwD = Y. \quad (1)$$

Очевидные начальные условия:

$$\varphi(0) = \varphi_0, \quad \frac{d\varphi}{dt}(0) = \omega_0. \quad (2)$$

Из второго выражения системы уравнений вытекает

$$\begin{aligned} \frac{d\varphi}{dt} &= -\frac{R}{Y}i + \frac{U}{Y}, \\ \frac{d^2\varphi}{dt^2} &= -\frac{R}{Y} \frac{di}{dt}. \end{aligned} \quad (3)$$

При подстановке в первое выражение системы уравнений получается:

$$-\frac{JR}{Y} \frac{di}{dt} - \frac{kR}{Y}i + \frac{kU}{Y} = Yi,$$

$$\frac{di}{dt} + \left(\frac{Y^2}{JR} + \frac{k}{J} \right) i = \frac{kU}{JR}.$$

Для компактности вводятся обозначения:

$$\frac{Y^2}{JR} + \frac{k}{J} = A, \quad \frac{kU}{JR} = B.$$

В соответствии с этим:

$$\frac{di}{dt} + Ai = B. \quad (4)$$

Общее решение этого уравнения имеет вид:

$$i_1 = C_1 e^{-At}.$$

Частное решение — $i_2 = C_2$.

Из этого в сочетании с (4) следует: $0 + AC_2 = B$,

$$C_2 = \frac{B}{A}.$$

Ток в цепи имеет вид:

$$i = i_1 + i_2 = C_1 e^{-At} + \frac{B}{A}. \quad (5)$$

Имея в виду (2) и (3),

$$i(0) = \frac{U}{R} - \frac{Y\omega_0}{R}.$$

Из этого в сочетании с (5) следует:

$$C_1 = \frac{U}{R} - \frac{Y\omega_0}{R} - \frac{B}{A},$$

$$i = \left(\frac{U}{R} - \frac{Y\omega_0}{R} - \frac{B}{A} \right) e^{-At} + \frac{B}{A},$$

$$\begin{aligned} i &= \left(\frac{U - Y\omega_0}{R} - \frac{U}{Y^2/k + R} \right) e^{-t/\tau} + \frac{U}{Y^2/k + R} = \\ &= \left(\frac{U - E_0}{R} - \frac{U}{R_k + R} \right) e^{-t/\tau} + \frac{U}{R_k + R}. \end{aligned} \quad (6)$$

Здесь $E_0 = Y\omega_0$. Тогда:

$$\begin{aligned} \frac{1}{\tau} &= \frac{1}{R} \frac{1}{J/Y^2} + \frac{1}{J/k} = \frac{1}{R} \frac{1}{J/Y^2} + \frac{1}{(J/Y^2)(Y^2/k)} = \\ &= \frac{1}{RC_J} + \frac{1}{R_k C_J} = \frac{1}{\tau_e} + \frac{1}{\tau_m}. \end{aligned} \quad (7)$$

Если $k = 0$, $R_k = \infty$, то

$$i = \frac{U - E_0}{R} e^{-t/\tau}, \quad (8)$$

$$\tau = \frac{RJ}{Y^2} = RC_J. \tag{9}$$

Выражения (8), (9) повторяют соотношения для зарядки электрического конденсатора.

Если соединить между собой концы якорной обмотки, то

$$i = \frac{-E_0}{R} e^{-t/\tau}.$$

Это выражение повторяет соотношение для разрядки электрического конденсатора.

Из формул (6) — (9) следует, что для электрической цепи рассматриваемый аккумулятор механической энергии неотличим от электрического конденсатора.

Из этого следует, что в данном случае можно вести речь об искусственной электрической ёмкости, которая равна:

$$C_J = \frac{J}{Y^2}.$$

Кроме того, возникает искусственное электрическое сопротивление (которое не связано с удельным сопротивлением, длиной и площадью сечения проводников):

$$R_k = \frac{Y^2}{k}.$$

Аккумулятор механической энергии накапливает энергию

$$W = \frac{C_J U^2}{2} = \frac{J U^2}{2 Y^2} = \frac{J \omega^2}{2}.$$

Эквивалентная электрическая схема аккумулятора механической энергии представлена на рис. 1.

На рис. 2 показан график тока зарядки/разрядки искусственной электрической ёмкости.

В связи с изложенным аккумулятор механической энергии можно трактовать как искусственный электрический конденсатор, который запасает не энергию электрического поля, а кинетическую энергию вращения супермаховика.

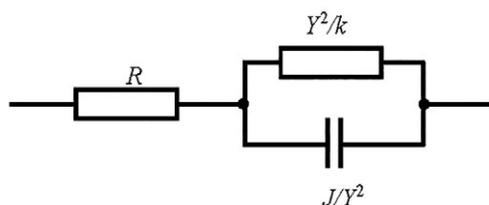


Рис. 1. Электрическая схема аккумулятора механической энергии.

Fig. 1. An electric diagram of the mechanical energy accumulator.

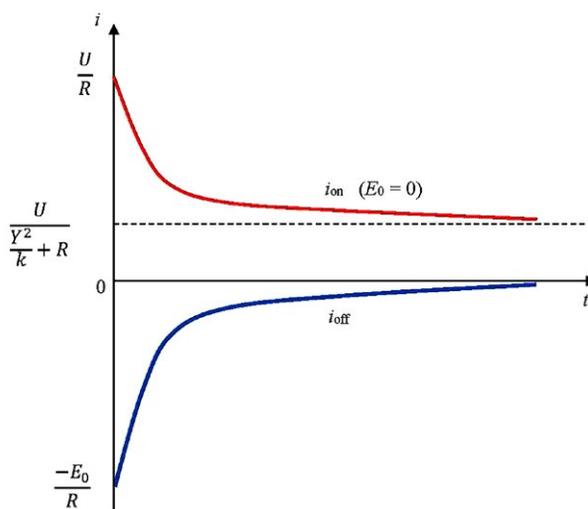


Рис. 2. Характер тока при зарядке и разрядке искусственной электрической ёмкости.

Fig. 2. Current behavior at charging and discharging of an artificial electric capacitor.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Существуют конструкции супермаховиков, способные запасать существенную кинетическую энергию. Изучалась даже возможность установки их на легковом транспорте. В этом смысле массивные тягачи имеют бесспорное преимущество, поскольку увеличение веса для них не только не проблематично, но в некоторых случаях желательно.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад автора. Автор подтверждает соответствие своего авторства международным критериям *ICMJE* (автор внёс существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочёл и одобрил финальную версию перед публикацией).

Конфликт интересов. Автор декларирует отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Источник финансирования. Автор заявляет об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

ADDITIONAL INFORMATION

Author`s contribution. The author confirms that his authorship complies with the international *ICMJE* criteria (the author made a significant contribution to the development of the concept, research and preparation of the article, read and approved the final version before publication).

Competing interests. The author declares that they have no competing interests.

Funding source. This study was not supported by any external sources of funding.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Павлов В.Д. Начальная динамика тягача с массивными буксируемыми объектами // Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2023. № 4. С. 31–37. doi: 10.14489/hb.2023.04.pp.031-037
2. Павлов В.Д. Решение задачи трогания многозвенного транспортного средства методами теоретической механики // Вестник НФ БГТУ: МехМат. 2022. Т. 2. № 04(08). С. 4–14. doi: 10.51639/2713-0657_2022_2_4_4
3. Павлов В.Д. Тягово-сцепное устройство для преодоления силы трения покоя // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2023. № 2. С. 51–57. doi: 10.36652/0202-3350-2023-24-2-51-57
4. Павлов В.Д. Немеханический момент инерции в системе ориентирования космического аппарата // Прикладная физика и математика. 2022. № 3. С. 3–5. doi: 10.25791/pfim.03.2022.1227
5. Павлов В.Д. Маховик с электромагнитным моментом инерции // Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2022. № 9(306). С. 53–55. doi: 10.14489/hb.2022.09.pp.053-055
6. Павлов В.Д. Управляемая искусственная упругость в мехатронных системах // Автоматизирован-

- ные технологии и производства. 2022. № 1 (25). С. 20–22. EDN: AZCJHH
7. Павлов В.Д. Переходный процесс в пьезоэлектрическом преобразователе с упругой нагрузкой в составе мехатронного комплекса // Автоматизированные технологии и производства. 2022. № 2 (26). С. 11–12. EDN: GZJTXK
8. Павлов В.Д. Траектории комбинированных круговых движений в механических системах // Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2022. № 3 (300). С. 23–28. doi: 10.14489/hb.2022.03.pp.023-028
9. Павлов В.Д. Обобщение принципа комбинации движений на круговые движения // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2021. № 6 (350). С. 4–9. doi: 10.33979/2073-7408-2021-350-6-4-9
10. Павлов В.Д. Магнитный поток и его квантование // Известия Уфимского научного центра РАН. 2020. № 4. С. 25–28. doi: 10.31040/2222-8349-2020-0-4-25-28

REFERENCES

1. Pavlov VD. Initial dynamics of a tractor with massive towed objects. *Spravochnik. Inzhenernyy zhurnal s prilozheniem*. 2023;4:31–37. (In Russ). doi: 10.14489/hb.2023.04.pp.031-037
2. Pavlov VD. Solving the problem of starting a multi-link vehicle using theoretical mechanics methods. *Vestnik NF BG TU: MekhMat*. 2022;2(04(08)):4–14. doi: 10.51639/2713-0657_2022_2_4_4
3. Pavlov VD. Towing device to overcome static friction force. *Sborka v mashinostroenii, priborostroenii*. 2023;2:51–57. (In Russ). doi: 10.36652/0202-3350-2023-24-2-51-57
4. Pavlov VD. Non-mechanical moment of inertia in the spacecraft orientation system. *Prikladnaya fizika i matematika*. 2022;3:3–5. (In Russ). doi: 10.25791/pfim.03.2022.1227
5. Pavlov VD. Flywheel with electromagnetic moment of inertia. *Spravochnik. Inzhenernyy zhurnal s prilozheniem*. 2022;9(306):53–55. (In Russ). doi: 10.14489/hb.2022.09.pp.053-055

6. Pavlov VD. Controlled artificial elasticity in mechatronic systems. *Avtomatizirovannye tekhnologii i proizvodstva*. 2022;1(25):20–22. (In Russ). EDN: AZCJHH
7. Pavlov VD. Transient process in a piezoelectric transducer with an elastic load as part of a mechatronic complex. *Avtomatizirovannye tekhnologii i proizvodstva*. 2022;2(26):11–12. (In Russ). EDN: GZJTXK
8. Pavlov VD. Trajectories of combined circular motions in mechanical systems. *Spravochnik. Inzhenernyy zhurnal s prilozheniem*. 2022;3(300):23–28. (In Russ). doi: 10.14489/hb.2022.03
9. Pavlov VD. Generalization of the principle of combination of movements to circular movements. *Fundamentalnye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii*. 2021;6(350):4–9. (In Russ). doi: 10.33979/2073-7408-2021-350-6-4-9
10. Pavlov VD. Magnetic flux and its quantization. *Izvestiya Ufimskogo nauchnogo tsentra RAN*. 2020;4:25–28. (In Russ). doi: 10.31040/2222-8349-2020-0-4-25-28

ОБ АВТОРЕ

Павлов Валентин Дмитриевич,

канд. техн. наук,

доцент кафедры «Автоматизация, мехатроника и робототехника»;

адрес: Российская Федерация, 600000, Владимир, ул. Горького, д. 87;

ORCID: 0000-0003-2125-4897;

eLibrary SPIN: 1046-4505;

e-mail: pavlov.val.75@mail.ru

AUTHOR'S INFO

Valentin D. Pavlov,

Cand. Sci. (Engineering),

Associate Professor of the Automation, Mechatronics and Robotics Department;

address: 87 Gorky street, 600000 Vladimir, Russian Federation;

ORCID: 0000-0003-2125-4897;

eLibrary SPIN: 1046-4505;

e-mail: pavlov.val.75@mail.ru