

Труды МАИ. 2023. № 134
Trudy MAI, 2023, no. 134

Научная статья

УДК 531.382

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=178458>

МЕХАНИЧЕСКИЙ АККУМУЛЯТОР ЭНЕРГИИ С ХАРАКТЕРИСТИКАМИ КОНДЕНСАТОРА

Игорь Павлович Попов

Курганский государственный университет,

Курган, Россия

ip.popov@yandex.ru

Аннотация. Кратковременные пиковые нагрузки машин и механизмов порождают необходимость в аккумулировании механической энергии для ее последующего импульсного использования. Это вполне актуально, например, для аэродромных тягачей на стартовом этапе буксировки тяжелых самолетов. Применение аккумулятора механической энергии позволит уменьшить мощность двигателя тягача. Аккумулятор механической энергии может быть выполнен в виде электрической машины постоянного тока или вентильной, на валу которой закреплен супермаховик. При подключении электрической машины к источнику питания возникает нестационарный процесс, описываемый двумя дифференциальными уравнениями: одно – для механических величин, другое – для электрических. Аккумулятор механической энергии можно трактовать как искусственный электрический конденсатор, который запасает и отдает не энергию электрического поля, а кинетическую энергию вращения супермаховика.

Ключевые слова: импульсная нагрузка, аккумулятор, кинетическая энергия, тягач, самолет, двигатель, электрическая машина, супермаховик

Для цитирования: Попов И.П. Механический аккумулятор энергии с характеристиками конденсатора // Труды МАИ. 2024. № 134. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=178458>

Original article

MECHANICAL ENERGY ACCUMULATOR WITH CAPACITOR CHARACTERISTICS

Igor P. Popov

Kurgan State University,

Kurgan, Russia

ip.popow@yandex.ru

Abstract. Short-term peak loads of machines and mechanisms create the need to accumulate mechanical energy for its subsequent pulsed use. This is quite relevant, for example, for airfield tractors at the initial stage of towing heavy aircraft. The use of a mechanical energy accumulator will reduce the power of the tractor engine. The mechanical energy accumulator can be made in the form of a direct current electric machine or a valve machine, on the shaft of which a superflywheel is attached. When a machine is connected to a power source, a non-stationary process occurs, described by two differential equations: one for mechanical quantities, the other for electrical quantities.

From the resulting formulas it follows that for an electrical circuit, the mechanical energy accumulator in question is indistinguishable from an electrical capacitor. It follows from this that in this case we can talk about artificial electrical capacitance. In addition, artificial electrical resistance arises (which is not related to the resistivity, length and cross-sectional area of the conductors). In connection with the above, a mechanical energy accumulator can be interpreted as an artificial electric capacitor, which stores not the energy of the electric field, but the kinetic energy of rotation of the superflywheel. There are superflywheel designs that can store significant kinetic energy. Even the possibility of installing them on passenger vehicles was studied. In this sense, massive airfield tractors have an undeniable advantage, since the increase in weight is not only not problematic for them, but in some cases it is desirable.

Keywords: impulse load, battery, kinetic energy, tractor, aircraft, engine, electric machine, superflywheel

For citation: Popov I.P. Mechanical energy accumulator with capacitor characteristics.

Trudy MAI, 2024, no. 134. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=178458>

Кратковременные пиковые нагрузки машин и механизмов порождают необходимость в аккумулировании механической энергии для ее последующего импульсного использования. Это вполне актуально, например, для аэродромных тягачей на стартовом этапе буксировки тяжелых самолетов [1-4]. Применение аккумулятора механической энергии позволит уменьшить мощность двигателя тягача.

Теоретическое обоснование

Аккумулятор механической энергии может быть выполнен в виде электрической машины постоянного тока или вентильной [5], на валу которой закреплен супермаховик.

При подключении машины к источнику питания возникает нестационарный процесс, описываемый следующими выражениями [6, 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 [8, 9], φ – угловое положение ротора [10, 11], k – коэффициент вязкого трения [12-15], B – значение магнитной индукции [16], $2l$ – рабочая длина витка якорной обмотки, w – число витков якорной обмотки, D – диаметр якоря, R – активное сопротивление электрической цепи, U – напряжение источника питания [17].

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

$$\frac{d\varphi}{dt} = -\frac{R}{Y}i + \frac{U}{Y}, \quad (3)$$

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} = -\frac{R}{Y} \frac{di}{dt}.$$

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

$$\frac{Y^2}{JR} + \frac{k}{J} = A,$$

$$\frac{kU}{JR} = B.$$

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

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

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

$$i = \left(\frac{U - Y\omega_0}{R} - \frac{U}{Y^2/k + R} \right) e^{-t/\tau} + \frac{U}{Y^2/k + R} =$$

$$= \left(\frac{U - E_0}{R} - \frac{U}{R_k + R} \right) e^{-t/\tau} + \frac{U}{R_k + R}. \quad (6)$$

Здесь $E_0 = Y\omega_0$.

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{R} \frac{1}{J/Y^2} + \frac{1}{J/k} = \frac{1}{R} \frac{1}{J/Y^2} + \frac{1}{(J/Y^2)(Y^2/k)} =$$

$$= \frac{1}{RC_J} + \frac{1}{R_k C_J} = \frac{1}{\tau_e} + \frac{1}{\tau_m}. \quad (7)$$

если $k = 0, R_k = \infty$, то

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

$$\tau = \frac{RJ}{Y^2} = RC_J. \quad (9)$$

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 [18].

Обсуждение

Из формул 6) – (9) следует, что для электрической цепи рассматриваемый аккумулятор механической энергии неотличим от электрического конденсатора [19-20].

Из этого следует, что в данном случае можно вести речь об искусственной электрической емкости, 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 рисунке 1.

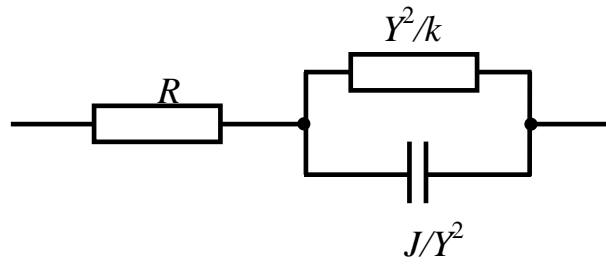


Рис. 1. Электрическая схема аккумулятора механической энергии

На рисунке 2 показан график тока зарядки/разрядки искусственной электрической емкости

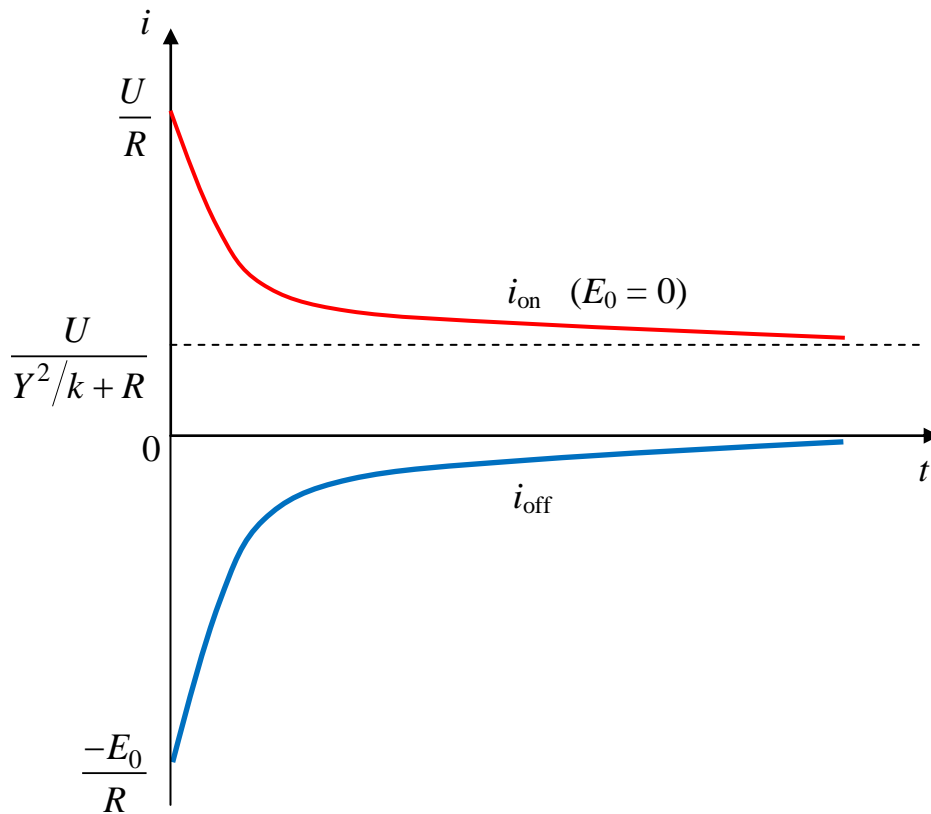


Рис. 2. Характер тока при зарядке и разрядке искусственной электрической емкости

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

Список источников

1. Попов И.П. Фрагмент динамики аэродромного тягача с массивными буксируемыми объектами // Труды МАИ. 2022. № 127. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=170323>. DOI: [10.34759/trd-2022-127-03](https://doi.org/10.34759/trd-2022-127-03)
2. Моисеев К.А., Панов Ю.Н., Моисеев К.К. Математические модели двухзвенного тягача, движущегося по грунту с периодическими неровностями // Труды МАИ. 2017. № 96. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=85654>
3. Гайнанов Д.Н., Рассказова В.А. Математическое моделирование в задаче оптимального назначения и перемещения локомотивов методами теории графов и

- комбинаторной оптимизации // Труды МАИ. 2017. № 92. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=77259>
4. Кулыгин С.В., Казачков В.О., Кочкаров А.А. Мониторинг потоков транспортных средств на платных участках автомобильных дорог на основе применения ГНСС // Труды МАИ. 2021. № 117. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=122250>. DOI: [10.34759/trd-2021-117-06](https://doi.org/10.34759/trd-2021-117-06)
5. Лисов А.А., Чернова Т.А., Горбунов М.С. Моделирование предельных состояний в эксплуатации электромеханических преобразователей // Труды МАИ. 2017. № 95. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=84624>
6. Морозов А.Ю., Ревизников Д.Л. Модификация методов решения задачи Коши для систем обыкновенных дифференциальных уравнений с интервальными параметрами // Труды МАИ. 2016. № 89. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=73407>
7. Лисов А.А., Чернова Т.А., Горбунов М.С. Определение параметров дифференциального уравнения математической модели механического вращения ротора при отключении электродвигателя от сети // Труды МАИ. 2017. № 93. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=80501>
8. Попов И.П. Механический аналог циклотронного движения // Труды МАИ. 2022. № 125. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=168148>. DOI: [10.34759/trd-2022-125-02](https://doi.org/10.34759/trd-2022-125-02)

9. Иванычев Д.А. Решение краевых осесимметричных задач смешанного типа для анизотропных тел вращения с массовыми силами // Труды МАИ. 2019. № 105. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=104014>
10. Лян Ц., Литвиненко Ю.А., Степанов О.А. Анализ влияния ошибок датчиков углов модуляционного вращения на точность системы ориентации // Труды МАИ. 2018. № 98. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=90371>
11. 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>
12. Быкова Т.В., Могилевич Л.И., Попов В.С., Попова А.А., Черненко А.В. Радиальные и изгибные колебания круглой трехслойной пластины, взаимодействующей с пульсирующим слоем вязкой жидкости // Труды МАИ. 2020. № 110. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=112836>. DOI: [10.34759/trd-2020-110-6](https://doi.org/10.34759/trd-2020-110-6)
13. Воропай А.В., Гришакин В.Т. Моделирование внутреннего вязкого трения в материале пластины при ее нестационарном нагружении с помощью дифференциальных и интегральных операторов // Труды МАИ. 2019. № 109. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=111341>. DOI: [10.34759/trd-2019-109-3](https://doi.org/10.34759/trd-2019-109-3)
14. Иванов С.В., Могилевич Л.И., Попов В.С. Продольные волны в нелинейной цилиндрической оболочке, содержащей вязкую жидкость // Труды МАИ. 2019. № 105. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=104003>

15. 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>
16. Канев С.В. Поток электронов в слабом стационарном магнитное поле // Труды МАИ. 2017. № 94. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=80967>
17. Газизов Р.Р., Заболоцкий А.М., Белоусов А.О., Газизов Т.Т. Локализация максимумов напряжения в шине печатной платы системы автономной навигации космического аппарата // Труды МАИ. 2016. № 89. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=73345>
18. Захаров Р.С., Скворцов Б.В., Таипова Д.Р. Анализ дополнительных погрешностей ёмкостных датчиков систем заправки ракет-носителей // Труды МАИ. 2019. № 109. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=111410>. DOI: [10.34759/trd-2019-109-18](https://doi.org/10.34759/trd-2019-109-18)
19. Хедрих (Стеванович). Элементы математической феноменологии: математические и качественные аналогии // Trudy MAI. 2015. № 84. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=62990>
20. 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)

References

1. Popov I.P. *Trudy MAI*, 2022, no. 127. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=170323>. DOI: [10.34759/trd-2022-127-03](https://doi.org/10.34759/trd-2022-127-03)
2. Moiseev K.A., Panov Yu.N., Moiseev K.K. *Trudy MAI*, 2017, no. 96. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=85654>
3. Gainanov D.N., Rasskazova V.A. *Trudy MAI*, 2017, no. 92. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=77259>
4. Kulygin S.V., Kazachkov V.O., Kochkarov A.A. *Trudy MAI*, 2021, no. 117. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=122250>. DOI: [10.34759/trd-2021-117-06](https://doi.org/10.34759/trd-2021-117-06)
5. Lisov A.A., Chernova T.A., Gorbunov M.S. *Trudy MAI*, 2017, no. 95. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=84624>
6. Morozov A.Yu., Reviznikov D.L. *Trudy MAI*, 2016, no. 89. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=73407>
7. Lisov A.A., Chernova T.A., Gorbunov M.S. *Trudy MAI*, 2017, no. 93. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=80501>
8. Popov I.P. *Trudy MAI*, 2022, no. 125. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=168148>. DOI: [10.34759/trd-2022-125-02](https://doi.org/10.34759/trd-2022-125-02)
9. Ivanychev D.A. *Trudy MAI*, 2019, no. 105. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=104014>
10. Lyan Ts., Litvinenko Yu.A., Stepanov O.A. *Trudy MAI*, 2018, no. 98. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=90371>
11. Nizametdinov F.R., Sorokin F.D. *Trudy MAI*, 2018, no. 102. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=98753>

12. Bykova T.V., Mogilevich L.I., Popov V.S., Popova A.A., Chernenko A.V. *Trudy MAI*, 2020, no. 110. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=112836>. DOI: [10.34759/trd-2020-110-6](https://doi.org/10.34759/trd-2020-110-6)
13. Voropai A.V., Grishakin V.T. *Trudy MAI*, 2019, no. 109. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=111341>. DOI: [10.34759/trd-2019-109-3](https://doi.org/10.34759/trd-2019-109-3)
14. Ivanov S.V., Mogilevich L.I., Popov V.S. *Trudy MAI*, 2019, no. 105. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=104003>
15. Panev A.S. *Trudy MAI*, 2018, no. 98. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=90072>
16. Kanev S.V. *Trudy MAI*, 2017, no. 94. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=80967>
17. Gazizov R.R., Zabolotskii A.M., Belousov A.O., Gazizov T.T. *Trudy MAI*, 2016, no. 89. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=73345>
18. Zakharov R.S., Skvortsov B.V., Taipova D.R. *Trudy MAI*, 2019, no. 109. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=111410>. DOI: [10.34759/trd-2019-109-18](https://doi.org/10.34759/trd-2019-109-18)
19. Khedrikh (Stevanovich). *Trudy MAI*, 2015, no. 84. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=62990>
20. 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)

Статья поступила в редакцию 02.11.2023

Одобрена после рецензирования 10.11.2023

Принята к публикации 27.02.2024

The article was submitted on 02.11.2023; approved after reviewing on 10.11.2023; accepted for publication on 27.02.2024