

КОМПЕНСАЦИЯ ПИКОВЫХ НАГРУЗОК ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН

И.П. Попов

ip.popow@yandex.ru

Курганский государственный университет, г. Курган, Российская Федерация

Аннотация

Рассмотрена возможность оснащения транспортно-технологических машин инертно-емкостным накопителем энергии, что позволит сгладить нагрузку на силовую установку и за счет этого уменьшить ее мощность и массогабариты. Нагрузка ряда транспортно-технологических машин имеет существенно неравномерный характер. Мощность силовых установок определяется пиковой нагрузкой. Очевидно, что большую часть времени силовая установка работает в недогруженном режиме. Предложено техническое решение по компенсации пиковых нагрузок транспортно-технологических машин. Частая смена режима работы транспортно-технологических машин обуславливает эффективность и целесообразность оснащения их накопителем энергии. Помимо сглаживания нагрузки на силовую установку накопитель позволит рекуперировать энергию при торможении, за счет чего возрастет энергоэффективность машины. Представлены теоретические предпосылки создания инертно-емкостного накопителя энергии, который технически выполнен в виде машины постоянного тока с супермаховиком. Использование маховиков на транспортно-технологических машинах оправдано в силу нежестких требований к общей массе. Другим преимуществом некоторых транспортно-технологических машин является наличие электромеханической трансмиссии, что минимизирует разработку рассмотренного инертно-емкостного накопителя

Ключевые слова

Транспортно-технологическая машина, накопитель, супермаховик, силовая установка, энергоэффективность

Поступила 04.07.2019

Принята 07.10.2019

© Автор(ы), 2020

Введение. Нагрузка транспортно-технологических машин (экскаваторов, бульдозеров, маневровых тепловозов и др.) имеет существенно неравномерный характер [1, 2]. Мощность их силовых установок определяется

пиковой нагрузкой. Отметим также, что большую часть времени силовая установка работает в недогруженном режиме [3–5].

Цель работы — разработка технического решения по компенсации пиковых нагрузок транспортно-технологических машин.

Задача исследования состоит в построении математической модели инертно-емкостного накопителя энергии.

Актуальность настоящего исследования обусловлена тем, что использование накопителя энергии позволит сгладить нагрузку на силовую установку и, как следствие, уменьшить ее мощность и массогабариты [6, 7]. Относительно частая смена режима работы транспортно-технологической машины обуславливает целесообразность оснащения ее накопителем энергии [8, 9].

Помимо сглаживания нагрузки на силовую установку накопитель позволит рекуперировать энергию при торможении (особенно актуально для маневрового тепловоза) [10], за счет чего возрастет энергоэффективность машины.

Материалы и методы решения задач, принятые допущения. Основными методами исследования в рамках настоящей работы являются методы математического моделирования и анализа. Используемые методы позволяют получить достоверное описание исследуемых объектов.

Теоретические предпосылки создания инертно-емкостного накопителя энергии. В качестве такого накопителя можно рассматривать машину постоянного тока с супермаховиком.

Подача на якорную обмотку постоянного напряжения U инициирует следующие механический [11–13] и электрический [14–15] процессы:

$$J \frac{d^2\varphi}{dt^2} + k \frac{d\varphi}{dt} = B2lw \frac{D}{2} i;$$

$$B2lw \frac{D}{2} \frac{d\varphi}{dt} + Ri = U,$$

где J — суммарный момент инерции; k — коэффициент трения; B — магнитная индукция; $2l$ — активная длина проводника; w — число витков; D — эффективный диаметр ротора; R — электрическое сопротивление.

Можно ввести параметрический коэффициент

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

Начальные условия запишем так:

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

Из уравнения электрического равновесия следует

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

Подстановка в первое уравнение системы дает

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

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

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

Общим решением является $i_1 = C_1 e^{-At}$, частным — $i_2 = C_2$. Подстановка его в формулу (4) дает $0 + AC_2 = B$, $C_2 = \frac{B}{A}$.

Искомый ток равен

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

С учетом (2) и (3) получаем $i(0) = \frac{U}{R} - \frac{Y\omega_0}{R}$.

С учетом (5) имеем:

$$\begin{aligned} C_1 &= \frac{U}{R} - \frac{Y\omega_0}{R} - \frac{B}{A}; \\ i &= \left(\frac{U}{R} - \frac{Y\omega_0}{R} - \frac{B}{A} \right) e^{-At} + \frac{B}{A}; \\ i &= \left(\frac{U - Y\omega_0}{R} - \frac{U}{(Y^2/k) + R} \right) e^{-t/\tau} + \frac{U}{(Y^2/k) + R} = \\ &= \left(\frac{U - E_0}{R} - \frac{U}{R_k + R} \right) e^{-t/\tau} + \frac{U}{R_k + R}, \end{aligned} \quad (6)$$

где $E_0 = Y\omega_0$;

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

при $k = 0$, $R_k = \infty$,

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

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

Обсуждение полученных результатов. Формулы (8), (9) такие же, как и формулы, описывающие заряд конденсатора. При замыкании накопитолю клемм якорной обмотки

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

Эта формула также не отличается от формулы, описывающей разряд конденсатора.

Выражения (6)–(9) свидетельствуют о емкостном характере рассматриваемого накопителя мощности.

Емкость накопителя составляет $C_J = J/Y^2$; электромеханическое сопротивление $R_k = Y^2/k$; запасаемая накопителем энергия $W = C_J U^2 / 2 = JU^2 / (2Y^2) = J\omega^2 / 2$.

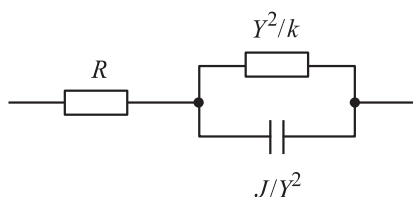


Рис. 1. Электрическая схема инертно-емкостного накопителя

На рис. 1 приведена электрическая схема инертно-емкостного накопителя, на рис. 2 — характер тока при его зарядке и разрядке.

Пример. Автомоториса АС1А с подвижным составом общей массой 10 т движется со скоростью 50 км/ч. На ней установлен инертно-емкостной накопитель энергии с параметрами: $J = 20 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$;

$B = 1 \text{ Тл}$; $l = 0,5 \text{ м}$; $w = 400$; $D = 0,3 \text{ м}$; $k = 0,3 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}\cdot\text{рад}^{-1}$; $R = 1 \text{ Ом}$. Определим возможность рекуперации кинетической энергии

$$W = \frac{mv^2}{2} = \frac{10\,000 \cdot 13,87^2}{2} = 962\,438,94 \text{ Дж.}$$

При условии полной рекуперации кинетической энергии число оборотов вращающейся части инертно-емкостного накопителя равно

$$n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2W}{J}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2 \cdot 962\,438,94}{20}} = 49,4 \text{ об/с} = 2964 \text{ об/мин.}$$

Таким образом, при допустимом для электрической машины числе оборотов инертно-емкостной накопитель способен рекуперировать всю кинетическую энергию.

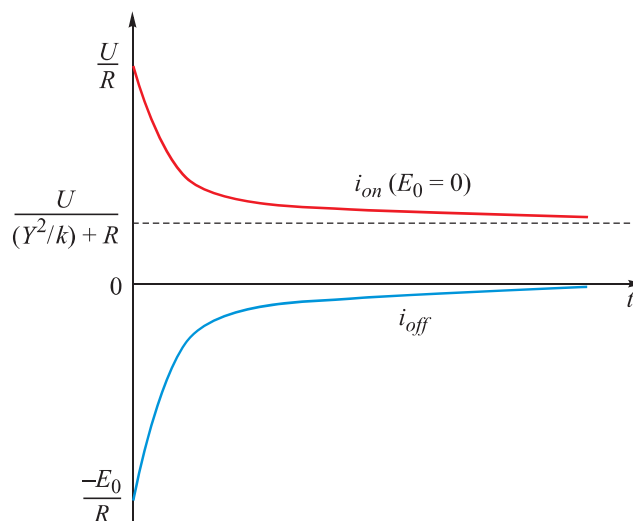


Рис. 2. Характер тока при зарядке и разрядке инертно-емкостного накопителя

Параметрический коэффициент $Y = BlwD = 1 \cdot 0,5 \cdot 400 \cdot 0,3 = 60 \text{ Тл} \cdot \text{м}^2$; емкость накопителя $C_J = J/Y^2 = 20/3600 = 5,6 \cdot 10^{-3} \text{ Ф}$ (довольно значительная емкость); электромеханическое сопротивление $R_k = Y^2/k = 60^2/0,3 = 12 \text{ кОм}$.

Величина, обратная постоянной времени τ , равна

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{RC_J} + \frac{1}{R_k C_J} = \frac{1}{1 \cdot 5,6 \cdot 10^{-3}} + \frac{1}{12 \cdot 10^3 \cdot 5,6 \cdot 10^{-3}} = 178,59 \text{ с}^{-1}.$$

Постоянная времени инертно-емкостного накопителя $\tau = 5,6 \cdot 10^{-3} \text{ с}$. Столь малая постоянная времени обеспечивает высокую скорость энергетического обмена. Во избежание ударных нагрузок скорость энергетического обмена может регулироваться в сторону уменьшения путем изменения возбуждения электрической машины и силовыми реостатами.

Сравнение с другими накопителями энергии. Наибольшую удельную энергоемкость имеют супермаховики — 500 Вт·ч/кг и литий-ионные аккумуляторы — 250 Вт·ч/кг.

В части удельной энергоемкости инертно-емкостные накопители и супермаховики идентичны. Передача энергии вращения супермаховика на колеса транспортного средства осуществляется посредством супервариатора, что усложняет конструкцию. В свою очередь электромеханический преобразователь инертно-емкостного накопителя вполне совместим с электромеханической трансмиссией многих транспортно-технологических машин.

Литий-ионные аккумуляторы, помимо меньшей удельной емкости (и высокой стоимости), требуют существенно длительного времени (часы) зарядки, что практически исключает возможность рекуперации кинетической энергии.

Заключение. В настоящее время созданы высокоэффективные супермаховики и даже рассматривается возможность их применения на легковых автомобилях. Очевидно, что использование маховиков на транспортно-технологических машинах значительно менее проблематично в силу существенно менее жестких требований к общей массе. Еще более выгодным преимуществом некоторых транспортно-технологических машин является наличие электромеханической трансмиссии, что минимизирует разработку для них рассмотренного инертно-емкостного накопителя (искусственной электрической емкости).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Нечаев Г.И., Ленич С.В., Турушин В.А. Исследование процесса ударного измельчения угля в пневмотранспортной измельчительной установке. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2016, № 3, с. 131–139.
DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/0236-3941-2016-3-131-139>
- [2] Кобылкин И.Ф., Горбатенко А.А. Феноменологическая модель пробивания керамических преград. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2016, № 6, с. 62–73. DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/0236-3941-2016-6-62-73>
- [3] Кузнецов А.Г. Динамическая модель энергетической установки тепловоза. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2009, № 3, с. 106–116.
- [4] Кузнецов А.Г. Результаты полунатурного моделирования динамических режимов энергетической установки тепловоза. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2011, № 3, с. 64–69.
- [5] Леонов И.В. Модель расхода энергии силового агрегата с ДВС. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2015, № 5, с. 106–116.
DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/0236-3941-2015-5-106-116>
- [6] Барбашов Н.Н., Леонов И.В. Выбор оптимальной мощности двигателя внутреннего сгорания гибридной силовой установки. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2010, № 4, с. 47–54.
- [7] Ларин В.В. Влияние законов распределения мощностного потока по двигателям колесной машины на ее эксплуатационные свойства. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2013, № 1, с. 49–59.
- [8] Барбашов Н.Н., Леонов И.В. Энергетическая модель передаточного механизма с маховичным аккумулятором энергии. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2010, № 4, с. 61–68.

- [9] Троицкий Н.И. Применение накопителей энергии — радикальный способ улучшения топливной экономичности наземных машин с газотурбинным двигателем. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2014, № 3, с. 110–118.
- [10] Леонов И.В. Снижение расхода энергии подъемно-транспортных машин в цикле разгон-торможение. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2014, № 1, с. 99–110.
- [11] Попов И.П. Дифференциальные уравнения двух механических резонансов. *Прикладная физика и математика*, 2019, № 2, с. 37–40.
DOI: <http://dx.doi.org/10.25791/pfim.02.2019.599>
- [12] Попов И.П. Моделирование триинертного осциллятора. *Прикладная математика и вопросы управления*, 2018, № 4, с. 73–79.
DOI: <http://dx.doi.org/10.15593/2499-9873/2018.4.04>
- [13] Попов И.П. Синтез инертно-инертного осциллятора. *Прикладная математика и вопросы управления*, 2017, № 1, с. 7–13.
- [14] Попов И.П. Комбинированные векторы и магнитный заряд. *Прикладная физика и математика*, 2018, № 6, с. 12–20.
DOI: <http://dx.doi.org/10.25791/pfim.06.2018.329>
- [15] Попов И.П. Емкостно-инертное устройство. *Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ»*, 2015, т. 2, с. 43–45.

Попов Игорь Павлович — старший преподаватель кафедры «Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты» Курганского государственного университета (Российская Федерация, 640020, г. Курган, Советская ул., д. 63/4).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Попов И.П. Компенсация пиковых нагрузок транспортно-технологических машин. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2020, № 3, с. 85–93.
DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2020-3-85-93>

PEAK LOAD BALANCING FOR ENGINEERING VEHICLES

I.P. Popov

ip.popow@yandex.ru

Kurgan State University, Kurgan, Russian Federation

Abstract

The paper considers the possibility of equipping engineering vehicles with inertial capacitance energy storage units, which should allow the power plant loads to be evened out, in turn leading to reducing the output power, mass and dimensions of the plant. In a range of engineering vehicles, such as excavators, bulldozers, diesel

Keywords

Engineering vehicle, energy storage unit, super flywheel, power plant, energy efficiency

shunter locomotives and so on, loads are of a substantially irregular character. Peak loads are what determines the output power of power plants. It is evident that the power plant is not fully loaded most of the time. We propose a technological solution for balancing peak loads in engineering vehicles. Since operation modes of engineering vehicles change relatively frequently, it is efficient and advisable to equip them with energy storage units. The storage unit will not only level the power plant load, but also allow the energy to be recuperated during deceleration, which should improve the energy efficiency of the machine. We present the theoretical background required to develop an inertial capacitance energy storage unit, which is implemented as a direct current machine featuring a super flywheel. Employing flywheels in engineering vehicles is feasible due to their total mass requirements being flexible. Another advantage of certain engineering vehicles is their electro-mechanical transmission, the presence of which should minimise the development effort concerning the inertial capacitance energy storage unit discussed in the paper

Received 04.07.2019

Accepted 07.10.2019

© Author(s), 2020

REFERENCES

[1] Nechaev G.I., Lenich S.V., Turushin V.A. Research results of coal impact grinding process in the pneumatic transport mill. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Bauman, Mashinostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mechan. Eng.], 2016, no. 3, pp. 131–139 (in Russ.).

DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/0236-3941-2016-3-131-139>

[2] Kobylkin I.F., Gorbatenko A.A. Phenomenological model of perforation ceramic plates. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Bauman, Mashinostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mechan. Eng.], 2016, no. 6, pp. 62–73 (in Russ.). DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/0236-3941-2016-6-62-73>

[3] Kuznetsov A.G. Dynamic model of power generating unit for diesel locomotive. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Bauman, Mashinostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mechan. Eng.], 2009, no. 3, pp. 106–116 (in Russ.).

[4] Kuznetsov A.G. Results of semi full-scale simulation of dynamical modes of diesel-locomotive power unit. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Bauman, Mashinostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mechan. Eng.], 2011, no. 3, pp. 64–69 (in Russ.).

[5] Leonov I.V. Energy consumption model for power plant with internal combustion engine. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Bauman, Mashinostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mechan. Eng.], 2015, no. 5, pp. 106–116 (in Russ.). DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/0236-3941-2015-5-106-116>

- [6] Barbashov N.N., Leonov I.V. Selection of optimal power of internal combustion engine of hybrid power plant. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mechan. Eng.], 2010, no. 4, pp. 47–54 (in Russ.).
- [7] Larin V.V. Effect of laws of power flow distribution over propulsion units of a wheeled vehicle on its operation properties. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mechan. Eng.], 2013, no. 1, pp. 49–59 (in Russ.).
- [8] Barbashov N.N., Leonov I.V. Energy model of transmission mechanism with flywheel energy storage. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mechan. Eng.], 2010, no. 4, pp. 61–68 (in Russ.).
- [9] Troitskiy N.I. Using energy accumulators is the radical way for improving efficiency of ground-based vehicles with gas-turbine engines. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mechan. Eng.], 2014, no. 3, pp. 110–118 (in Russ.).
- [10] Leonov I.V. Reduction in power consumption of hoisting and transport cars in acceleration-deceleration cycle. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mechan. Eng.], 2014, no. 1, pp. 99–110 (in Russ.).
- [11] Popov I.P. Differential equations of two mechanical resonances. *Prikladnaya fizika i matematika* [Applied Physics and Mathematics], 2019, no. 2, pp. 37–40 (in Russ.). DOI: <http://dx.doi.org/10.25791/pfim.02.2019.599>
- [12] Popov I.P. Modeling three-inert oscillator. *Prikladnaya matematika i voprosy upravleniya* [Applied Mathematics and Control Sciences], 2018, no. 4, pp. 73–79 (in Russ.). DOI: <http://dx.doi.org/10.15593/2499-9873/2018.4.04>
- [13] Popov I.P. Synthesis inert-inertial oscillator. *Prikladnaya matematika i voprosy upravleniya* [Applied Mathematics and Control Sciences], 2017, no. 1, pp. 7–13 (in Russ.).
- [14] Popov I.P. Combined vectors and magnetic charge. *Prikladnaya fizika i matematika* [Applied Physics and Mathematics], 2018, no. 6, pp. 12–20 (in Russ.). DOI: <http://dx.doi.org/10.25791/pfim.06.2018.329>
- [15] Popov I.P. Capacitive-inert device. *Izvestiya SPbGETU "LETI"*, 2015, vol. 2, pp. 43–45 (in Russ.).

Popov I.P. — Assist. Professor, Department of Mechanical Engineering Technology, Machine Tools and Work Tools, Kurgan State University (Sovetskaya ul. 63/4, Kurgan, 640020 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Popov I.P. Peak load balancing for engineering vehicles. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2020, no. 3, pp. 85–93 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2020-3-85-93>