

## НАКОПИТЕЛЬ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН

**И.П. Попов**

*Курганский государственный университет, г. Курган, Россия*

Рассматривается возможность оснащения транспортно-технологических машин инертно-емкостным накопителем энергии, что позволит сгладить нагрузку на силовую установку и за счет этого снизить ее мощность и массогабариты. Нагрузка ряда транспортно-технологических машин, таких как экскаваторы, бульдозеры, маневровые тепловозы и др. имеет существенно неравномерный характер. Мощность их силовой установки определяется пиковой нагрузкой. Очевидно, что большую часть времени силовая установка работает в недогруженном режиме. Целью работы является разработка технического решения по компенсации пиковых нагрузок транспортно-технологических машин. Задачи исследования состоят в построении математической модели инертно-емкостного накопителя энергии. Актуальность настоящего исследования обусловлена тем, что использование накопителя энергии позволит сгладить нагрузку на силовую установку и за счет этого снизить ее мощность и массогабариты. Относительно 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. Основными методами исследования в рамках настоящей работы являются методы математического моделирования и анализа. Используемые методы позволяют получить достоверное описание исследуемых объектов. 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 не жестких требований к общему весу. Другим преимуществом некоторых транспортно-технологических машин является наличие электромеханической трансмиссии, что минимизирует разработку для них рассмотренного инертно-емкостного накопителя.

*Ключевые слова:* транспортно-технологическая машина, накопитель, супермаховик, силовая установка, энергоэффективность.

### **Введение**

Нагрузка ряда транспортно-технологических машин, таких как экскаваторы, бульдозеры, маневровые тепловозы и др., имеет существенно неравномерный характер [1–3]. Мощность их силовой установки определяется пиковой нагрузкой [4–6]. Очевидно, что большую часть времени силовая установка работает в недогруженном режиме [7–10].

*Целью работы* является разработка технического решения по компенсации пиковых нагрузок транспортно-технологических машин.

*Задачи исследования* состоят в построении математической модели инертно-емкостного накопителя энергии.

*Актуальность* настоящего исследования обусловлена тем, что использование накопителя энергии позволит сгладить нагрузку на силовую установку и за счет этого снизить ее мощность и массогабариты [11–13]. Относительно частая смена режима работы транспортно-технологической машины обуславливает эффективность и целесообразность оснащения ее накопителем энергии [14–16].

Помимо сглаживания нагрузки на силовую установку накопитель позволит рекуперировать энергию при торможении (особенно актуально для маневрового тепловоза), за счет чего возрастет энергоэффективность машины [17–19].

*Методика.* Основными методами исследования в рамках настоящей работы являются методы математического моделирования и анализа. Используемые методы позволяют получить достоверное описание исследуемых объектов.

Далее рассматривается инертно-емкостный накопитель энергии.

### Теоретические предпосылки создания инертно-емкостного накопителя энергии

Между величинами различной физической природы может существовать функциональная зависимость. Зачастую возможность установления такой зависимости не является очевидной. Последнее замечание может быть отнесено, например к таким величинам, как электрическая емкость и масса, поскольку ни одно из понятий, используемых при определении электрической емкости, не применяется для определения инертной массы. Существующие между электрическими и механическими величинами дуальные соотношения не являются функциональными, поскольку дуальные величины относятся к изолированным друг от друга системам.

Для того чтобы установить связь между электрическими и механическими величинами, их следует рассматривать в электромеханических системах.

Установление формул, связывающих электрические и «неэлектрические» величины, влечет за собой возможность моделирования электрических и механических величин – «искусственных» массы и емкости.

Под искусственными величинами следует понимать величины, поведение которых в соответствующих процессах неотлично от поведения «натуральных». Например, в классической механике механическая величина инертная масса  $m$  по существу определяется основной аксиомой динамики – вторым законом Ньютона. При этом «натуральная» масса объекта пропорциональна количеству вещества, заключенного в объекте. Под искусственной массой следует понимать величину, неотличимую от «натуральной» массы, т. е. удовлетворяющую второму закону Ньютона. Инертность искусственной массы обуславливается не количеством вещества, а некими иными физическими обстоятельствами. Искусственные электрические и механические величины могут быть компонентами разнообразных электромеханических систем.

Между электрическими и механическими системами существует две системы аналогий.

В соответствии с первой системой масса  $m$  соответствует индуктивности  $L$ , а коэффициент упругости  $k$  – электрической емкости  $C$ .

В соответствии со второй системой наоборот – масса  $m$  соответствует емкости  $C$ , а коэффициент упругости  $k$  – индуктивности  $L$ .

Физическим обоснованием первой аналогии может служить электростатический преобразователь, в котором осуществляется преобразование механической силы в электрическое напряжение, а скорости – в ток.

Физическим обоснованием второй аналогии может быть электродинамический преобразователь (например, электрическая машина), в котором осуществляется преобразование силы в ток, а скорости в напряжение (и наоборот).

Массивный ротор электрической машины, являясь инертным телом, обладает способностью, как запасать, так и отдавать кинетическую энергию. Если при этом не происходит потерь энергии, то логично предположить, что указанные свойства ротора должны обуславливать наличие неких реактивных сопротивлений машины, которые также характеризуются обменом энергии без ее диссипации.

Таким образом, дуальные соответствия между электрическими и механическими величинами являются предпосылкой установления между ними функциональных зависимостей.

В качестве инертно-емкостного накопителя можно рассматривать машину постоянного тока с супермаховиком.

Подача на якорную обмотку постоянного напряжения  $U$  инициирует следующие механический и электрический процессы [20]:

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

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

Можно ввести параметрический коэффициент

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

Пусть начальные условия

$$\varphi(0) = \varphi_0,$$

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

Из уравнения электрического равновесия следует

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

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

Подстановка в первое уравнение системы дает

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

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

Пусть

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

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)

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

с учетом (5)

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

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

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

где  $E_0 = Y\omega_0$ .

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

При  $k=0$   $R_k = \infty$

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

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

### Выводы

Формулы (8) и (9) неотличимы от формул, описывающих заряд конденсатора.

При замыкании накоротко клемм якорной обмотки

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

Эта формула неотличима от формулы, описывающей разряд конденсатора.

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

Емкость накопителя равна

$$C_J = \frac{J}{Y^2}. \quad (10)$$

Электромеханическое сопротивление

$$R_k = \frac{Y^2}{k}. \quad (11)$$

Запасаемая накопителем энергия равна

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

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

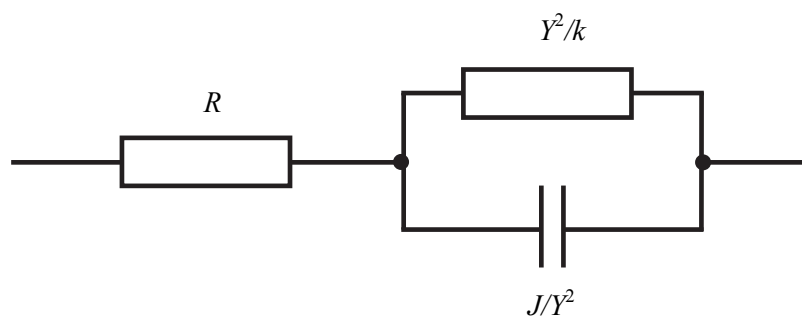


Рис. 1. Электрическая схема инертно-емкостного накопителя

Научная новизна работы заключается в том, что электрическая емкость (10) определяется не присущими традиционному конденсатору параметрами обкладок и свойствами диэлектрика, т. е. электрическими параметрами, а величиной принципиально другой физической природы – механическим моментом инерции.

Это же относится к электрическому сопротивлению (11), величина которого определяется механическим параметром – коэффициентом трения.

Возможности применения либо чисто механических накопителей, либо чисто электрических рассматривались независимо друг от друга. Предложение использовать электромеханический инертно-емкостный накопитель составляет практическую новизну работы.

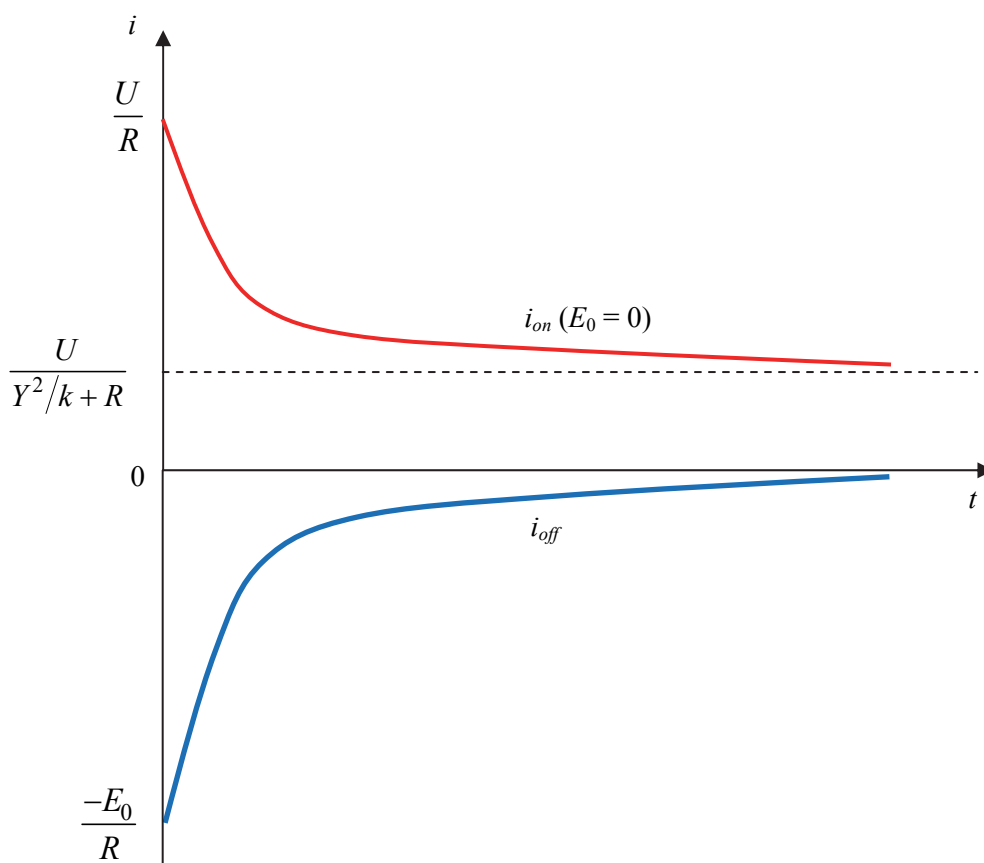


Рис. 2. Характер тока при зарядке и разрядке инертно-емкостного накопителя

### Обсуждение и применение

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 общему весу. Еще более выгодным преимуществом некоторых транспортно-технологических машин является наличие электромеханической трансмиссии, что минимизирует разработку для них рассмотренного инертно-емкостного накопителя (искусственной электрической емкости).

Стремительное развитие электрических аккумуляторов создает хорошие перспективы для разработки накопителей энергии для транспортно-технологических машин. Однако в этом направлении есть серьезные проблемы. Главная – это высокая стоимость аккумуляторов. Другая, не менее важная проблема – существенно низкая скорость запасания энергии, что почти исключает возможность рекуперации при торможении. Предлагаемый инертно-емкостный накопитель свободен от этих недостатков, что обеспечивает ему значительное преимущество над электрическими аккумуляторами.

### Литература

1. *Vehicle Stability Control through Optimized Coordination of Active Rear Steering and Differential Driving* / Z. Zhou, H. Miaohua, Z. Yachao, F. Cheng // *SAE International Journal of Passenger Cars – Mechanical Systems*. – 2018. – Vol. 11, No. 3. – P. 239–248. DOI: 10.4271/06-11-03-0020
2. *Keller, A. Comparative Analysis of Methods of Power Distribution in Mechanical Transmissions and Evaluation of their Effectiveness* / A. Keller, I. Murog, S. Aliukov // *SAE Technical Paper*. – 2015. – Номер статьи 2015-01-1097. DOI: 10.4271/2015-01-1097

3. Keller, A. Rational Criteria for Power Distribution in All-wheel-drive Trucks / A. Keller, S. Aliukov // *SAE Technical Paper*. – 2015. – Номер статьи 2015-01-2786. DOI: 10.4271/2015-01-2786
4. Chiatti, G. Turbocharging a small displacement diesel engine for urban vehicles / G. Chiatti, O. Chiavola, E. Recco // *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*. – 2017. – Vol. 8, No. 7. – P. 1916–1928.
5. Research progress in the development of natural gas as fuel for road vehicles / M.I. Khan, T. Yasmeen, M.I. Khan, et al. // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2016. – Vol. 66. – P. 702–741. DOI: 10.1016/j.rser.2016.08.041
6. Assessing the impacts of ethanol and isobutanol on gaseous and particulate emissions from flexible fuel vehicles / G. Karavalakis, D. Short, R.L. Russell, et al. // *Environmental Science and Technology*. – 2014. – Vol. 48 (23). – P. 14016–14024. DOI: 10.1021/es5034316
7. Ranjan, R. Emission Characteristic of Hydrogen and Gasoline Blend in Spark-Ignited Engine / R. Ranjan, R.K. Tyagi // *International Journal of Ambient Energy*. – 2015. – Vol. 38, No. 1. – P. 14–18. DOI: 10.1080/01430750.2015.1023840
8. Chatterjee, A. Combustion Performance and Emission Characteristics of Hydrogen as an Internal Combustion Engine Fuel / A. Chatterjee, S. Dutta, B.K. Mandal // *Journal of Aeronautical and Automotive Engineering (JAAE)*. – 2014. – Vol. 1, no. 1. – P. 1–6.
9. Sharma, S.K. Hydrogen-Fueled Internal Combustion Engine: A Review of Technical Feasibility / S.K. Sharma, P. Goyal, R.K. Tyagi // *International Journal of Performability Engineering*. – 2015. – Vol. 11, no. 5. – P. 491–501.
10. *The Automotive Transmission Book* / R. Fischer, F. Küçükay, G. Jürgens et al. – Springer International Publishing Switzerland, 2015. – 355 p. DOI: 10.1007/978-3-319-05263-2
11. Незевак, В.Л. Характеристика тяговой нагрузки для определения параметров накопителя электрической энергии / В.Л. Незевак, А.П. Шатохин // *Мир транспорта*. – 2018. – № 2. – С. 84–94.
12. Кузнецов, А.Г. Динамическая модель энергетической установки тепловоза / А.Г. Кузнецов // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*. – 2009. – № 3. – С. 106–116.
13. Кузнецов, А.Г. Результаты полунатурного моделирования динамических режимов энергетической установки тепловоза / А.Г. Кузнецов // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*. – 2011. – № 3. – С. 64–69.
14. Леонов, И.В. Модель расхода энергии силового агрегата с ДВС / И.В. Леонов // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*. – 2015. – № 5. – С. 106–116. DOI: 10.18698/0236-3941-2015-5-106-116
15. Этапы, проблемы и перспективы развития производственных проектов электромобилей и автомобилей с комбинированной энергоустановкой / В.Н. Козловский, А.В. Заятров, М.М. Васильев, Е.В. Полякова // *Грузовик*. – 2018. – № 2. – С. 27–32.
16. Макеев, В.Н. Один из конструктивных способов повышения эффективности применения гидравлических экскаваторов при строительстве лесовозных дорог / В.Н. Макеев, Д.Д. Плешков // *Грузовик*. – 2018. – № 3. – С. 10–14.
17. Черемисин, В.Т. Методика оценки использования энергии рекуперации / В.Т. Черемисин, М.М. Никифоров, А.С. Вильгельм // *Мир транспорта*. – 2018. – № 1. – С. 34–45.
18. Милованова, Е.А. Резервирование в тяговом приводе локомотива / Е.А. Милованова, А.А. Милованов, А.И. Милованов // *Мир транспорта*. – 2015. – № 5. – С. 86–98.
19. Веселов, П.А. Энергия рекуперативного торможения: копить или обмениваться? / П.А. Веселов // *Мир транспорта*. – 2017. – № 5. – С. 76–84.
20. Попов, И.П. Дифференциальные уравнения двух механических резонансов / И.П. Попов // *Прикладная физика и математика*. – 2019. – № 2. – С. 37–40. DOI: 10.25791/pfim.02.2019.599

**Попов Игорь Павлович**, старший преподаватель кафедры «Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты», Курганский государственный университет, г. Курган, ip.popov@yandex.ru.

*Поступила в редакцию 17 октября 2019 г.*



## ENERGY STORAGE FOR TRANSPORT TECHNOLOGY MACHINES

I.P. Popov, ip.popov@yandex.ru

Kurgan State University, Kurgan, Russian Federation

The possibility of equipping transport-technological machines with an inert-capacitive energy storage device is being considered, which will allow smoothing the load on the power plant and thereby reducing its power and mass and dimensions. The load of a number of transport-technological machines, such as excavators, bulldozers, shunting diesel locomotives, etc., is essentially uneven. The power of their power plant is determined by the peak load. Obviously, most of the time the power plant works in underloaded mode. The aim of the work is to develop a technical solution for compensation of peak loads of transport and technological machines. The research tasks are to build a mathematical model of an inert-capacitive energy storage. The relevance of this study is due to the fact that the use of energy storage will allow to smooth the load on the power plant and thereby reduce its power and mass and dimensions. The relatively frequent change in the mode of operation of transport and technological machines determines the efficiency and feasibility of equipping them with energy storage. In addition to smoothing the load on the power plant, the drive will allow energy to be recovered when braking, thereby increasing the energy efficiency of the machine. The main research methods in the framework of this work are the methods of mathematical modeling and analysis. The methods used allow to obtain a reliable description of the objects under study. The theoretical background for creating an inert-capacitive energy storage device, which is technically designed as a DC machine with a super flywheel, is presented. The use of flywheels on transport-technological machines is justified by virtue of not rigid requirements for the total weight. Another advantage of some transport-technological machines is the presence of an electromechanical transmission, which minimizes the development for them of the considered inert-capacitive drive.

*Keywords: transport and technological machine, drive, super-flywheel, power plant, energy efficiency.*

## References

1. Zhou Z., Miaohua H., Yachao Z., Cheng F. Vehicle Stability Control through Optimized Coordination of Active Rear Steering and Differential Driving. *SAE International Journal of Passenger Cars – Mechanical Systems*, 2018, vol. 11, iss. 3, pp. 239–248. DOI: 10.4271/06-11-03-0020
2. Keller A., Murog I., Aliukov S. Comparative Analysis of Methods of Power Distribution in Mechanical Transmissions and Evaluation of their Effectiveness. *SAE Technical Paper*, 2015, Number article 2015-01-1097. DOI: 10.4271/2015-01-1097
3. Keller A., Aliukov S. Rational Criteria for Power Distribution in All-wheel-drive Trucks. *SAE Technical Paper*, 2015, Number article 2015-01-2786. DOI: 10.4271/2015-01-2786
4. Chiatt G., Chiavola O., Recco E. Turbocharging a Small Displacement Diesel Engine for Urban Vehicles. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 2017, vol. 8, iss. 7, pp. 1916–1928.
5. Khan M.I., Yasmeen T., Khan M.I., et al. Research Progress in the Development of Natural Gas as Fuel for Road Vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, vol. 66, pp. 702–741. DOI: 10.1016/j.rser.2016.08.041
6. Karavalakis G., Short D., Russell R.L., et al. Assessing the Impacts of Ethanol and Isobutanol on Gaseous and Particulate Emissions from Flexible Fuel Vehicles. *Environmental Science and Technology*, 2014, vol. 48 (23), pp. 14016–14024. DOI: 10.1021/es5034316
7. Ranjan R., Tyagi R.K. Emission Characteristic of Hydrogen and Gasoline Blend in Spark-Ignited Engine. *International Journal of Ambient Energy*, 2015, vol. 38, no. 1, pp. 14–18. DOI: 10.1080/01430750.2015.1023840
8. Chatterjee A., Dutta S., Mandal B.K. Combustion Performance and Emission Characteristics of Hydrogen as an Internal Combustion Engine Fuel. *Journal of Aeronautical and Automotive Engineering (JAAE)*, 2014, vol. 1, no. 1, pp. 1–6.



9. Sharma S.K., Goyal P. and Tyagi R.K. Hydrogen-Fueled Internal Combustion Engine: A Review of Technical Feasibility. *International Journal of Performability Engineering*, 2015, vol. 11, no. 5, pp. 491–501.
10. Fischer R., Küçükay F., Jürgens G. et al. The Automotive Transmission Book. *Springer International Publishing Switzerland*, 2015. 355 p. DOI: 10.1007/978-3-319-05263-2
11. Nezevak V.L., Shatokhin A.P. [Characteristics of the Traction Load for Determining the Parameters of the Electric Energy Storage Device]. *World of Transport*, 2018, no. 2, pp. 84–94. (in Russ.)
12. Kuznetsov A.G. [Dynamic Model of Power Plant Locomotive]. *Vestnik MGTU im. N.E. Bauman. Ser. Mashinostroyeniye*, 2009, no. 3, pp. 106–116. (in Russ.)
13. Kuznetsov A.G. [The Results of the Semi-Natural Modeling of the Dynamic Modes of a Diesel Locomotive Power Plant]. *Vestnik MGTU im. N.E. Bauman. Ser. Mashinostroyeniye*, 2011, no. 3, pp. 64–69. (in Russ.)
14. Leonov I.V. [Model of Power Consumption of the Power Unit with Internal Combustion Engine]. *Vestnik MGTU im. N.E. Bauman. Ser. Mashinostroyeniye*, 2015, no. 5, pp. 106–116. (in Russ.) DOI: 10.18698/0236-3941-2015-5-106-116
15. Kozlovskiy V.N., Zayatrov A.V., Vasil'yev M.M., Polyakova Ye.V. [Stages, Problems and Prospects for the Development of Industrial Projects of Electric Vehicles and Cars with a Combined Power Plant]. *Truck*, 2018, no. 2, pp. 27–32. (in Russ.)
16. Makeyev V.N., Pleshkov D.D. [One of the Constructive Ways to Improve the Efficiency of Hydraulic Excavators in the Construction of Forest Roads]. *Truck*, 2018, no. 3, pp. 10–14. (in Russ.)
17. Cheremisin V.T., Nikiforov M.M., Vil'gel'm A.S. [Methods for Estimating the Use of Energy Recovery]. *World of Transport*, 2018, no. 1, pp. 34–45. (in Russ.)
18. Milovanova Ye.A., Milovanov A.A., Milovanov A.I. [Reservations in the Locomotive Traction Drive]. *World of Transport*, 2015, no. 5, pp. 86–98. (in Russ.)
19. Veselov P.A. [Energy of Regenerative Braking: to Save or Exchange?]. *World of Transport*. 2017, no 5, pp. 76–84. (in Russ.)
20. Popov I.P. [Differential Equations of Two Mechanical Resonances]. *Applied Physics and Mathematics*, 2019, no. 2, pp. 37–40. (in Russ.) DOI: 10.25791/pfim.02.2019.599

*Received 17 October 2019*

---

**ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ**

Попов, И.П. Накопитель энергии для транспортно-технологических машин / И.П. Попов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2019. – Т. 19, № 4. – С. 61–68. DOI: 10.14529/engin190407

**FOR CITATION**

Popov I.P. Energy Storage for Transport Technology Machines. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*, 2019, vol. 19, no. 4, pp. 61–68. (in Russ.) DOI: 10.14529/engin190407

---