

DOI: 10.15593/2499-9873/2019.3.03

УДК 531.382

И.П. Попов

Курганский государственный университет, Курган, Россия

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИСКУССТВЕННОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЕМКОСТИ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ПИКОВОЙ НАГРУЗКИ МАНЕВРОВОГО ТЕПЛОВОЗА

Рассматривается возможность оснащения маневрового тепловоза инертно-емкостным накопителем энергии, что позволит снизить неравномерность нагрузки силовой установки и за счет этого оптимизировать ее мощность и массогабариты. Относительно частая смена режима работы маневрового тепловоза обуславливает эффективность и целесообразность оснащения его накопителем энергии. Помимо снижения неравномерности нагрузки на силовую установку накопитель позволит рекуперировать энергию при торможении, за счет чего возрастет энергоэффективность маневрового тепловоза. Представлены теоретические предпосылки создания инертно-емкостного накопителя энергии, который технически выполнен в виде машины постоянного тока с супермаховиком. Использование маховиков на маневровых тепловозах оправданно в силу жестких требований к общему весу. Другим преимуществом тепловоза является наличие электромеханической трансмиссии, что минимизирует разработку для него рассмотренного инертно-емкостного накопителя.

Ключевые слова: маневровый тепловоз, накопитель, супермаховик, силовая установка, энергоэффективность.

I.P. Popov

Kurgan State University, Kurgan, Russian Federation

MATHEMATICAL MODEL OF ARTIFICIAL ELECTRICAL CAPACITY FOR REDUCING THE PEAK LOAD OF MANOVER HEAT

The possibility of equipping a shunting diesel locomotive with an inert-capacitive energy storage device is being considered, which will smooth the load on the power plant and thereby reduce its power and mass and dimensions. The relatively frequent change in the operating mode of a shunting locomotive determines the efficiency and feasibility of equipping it with an energy storage device. In addition to smoothing the load on the power plant, the drive will allow energy to be recovered during braking, thereby increasing the energy efficiency of the shunting diesel locomotive. 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 shunting diesel locomotives is justified by virtue of not rigid requirements for the total weight. Another advantage of the locomotive is the presence of an electromechanical transmission, which minimizes the development for it of the considered inert-capacitive drive

Keywords: shunting diesel locomotive, drive, super-flywheel, power plant, energy efficiency.

Введение

Мощность силовой установки маневрового тепловоза определяется его пиковой нагрузкой, которой в первую очередь является трогание поезда с места. Очевидно, что большую часть времени силовая установка работает в недогруженном режиме. Использование накопителя энергии позволит сгладить нагрузку на силовую установку и за счет этого снизить ее мощность и массогабариты. Относительно частая смена режима работы маневрового тепловоза обуславливает эффективность и целесообразность оснащения его накопителем энергии.

Помимо сглаживания нагрузки на силовую установку накопитель позволит рекуперировать энергию при торможении, за счет чего возрастет энергоэффективность маневрового тепловоза.

Далее рассматривается инертно-емкостной накопитель энергии.

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 [1–7] и электрический [8] процессы:

$$\begin{cases} J \frac{d^2\varphi}{dt^2} + k \frac{d\varphi}{dt} = B2lw \frac{D}{2} i, \\ B2lw \frac{D}{2} \frac{d\varphi}{dt} + Ri = U [9,10], \end{cases}$$

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

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

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

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

С учетом (2) и (3)

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

С учетом (5)

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

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 $k = 0$ $R_k = \infty$ и

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

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

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.

Искусственная электрическая емкость накопителя

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

Электромеханическое сопротивление

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

Запасаемая накопителем энергия

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

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

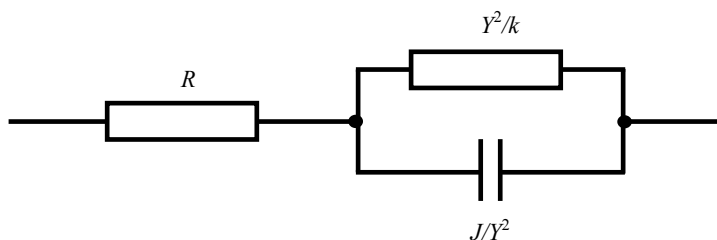


Рис. 1. Электрическая схема инертно-емкостного накопителя

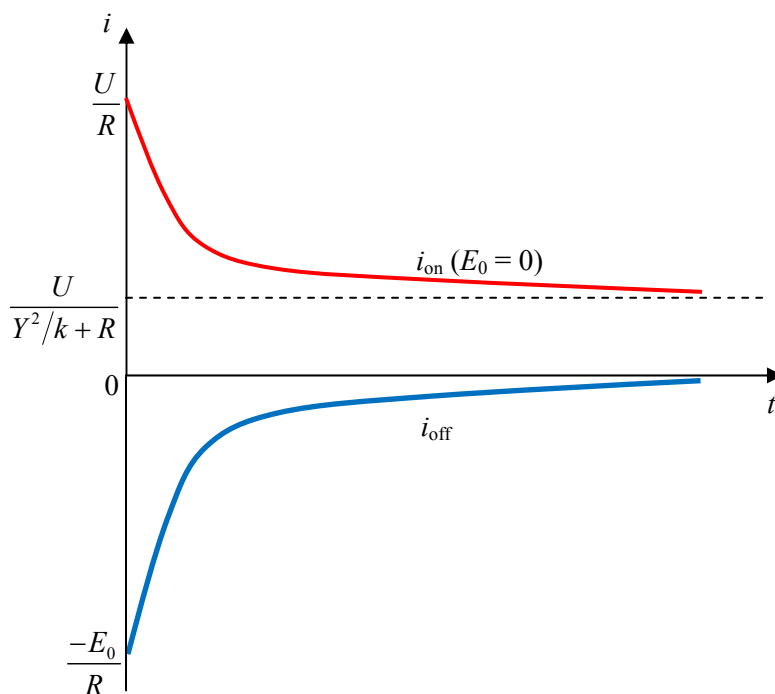


Рис. 2. Характер тока при зарядке и разрядке инертно-емкостного накопителя

Заключение

В настоящее время созданы высокоэффективные супермаховики и даже рассматривается возможность применения их на автомобилях. Очевидно, что использование маховиков на маневровых тепловозах значительно менее проблематично в силу существенно менее жестких требований к общему весу. Еще более выгодным преимуществом тепловоза является наличие электромеханической трансмиссии, что минимизирует разработку для него рассмотренного инертно-емкостного накопителя (искусственной электрической емкости).

Список литературы

1. Мулюков М.В. Устойчивость перевернутого маятника с запаздывающей обратной связью // Прикладная математика и вопросы управления. – 2017. – № 4. – С. 73–87.

2. Колмогоров Г.Л., Зиброва Е.О. Вопросы устойчивости анизотропных пластин // Прикладная математика и вопросы управления. – 2015. – № 4. – С. 36–42.

3. Бажуков П.С., Вильдеман В.Э. Влияние дополнительных циклических воздействий на равновесный рост трещин при квазистатическом нагружении // Прикладная математика и вопросы управления. – 2015. – № 3. – С. 71–79.

4. Шаяхметова Л.Р., Глузов Ю.В., Каменских А.А. Численное исследование воздействия различных динамических нагрузок на изделие // Прикладная математика и вопросы управления. – 2013. – № 11. – С. 140–152.

5. Цепенников М.В., Повышев И.А., Сметанников О.Ю. Верификация численной методики расчета разрушения конструкций из композиционных материалов // Прикладная математика и вопросы управления. – 2012. – № 10. – С. 225–241.

6. Вшивков О.Ю. Деформирование и разрушение слоистых композиционных материалов со сложноорганизованной структурой при ударно-волновых нагрузках // Прикладная математика и вопросы управления. – 2011. – № 9. – С. 42–61.

7. Попов И.П. Синтез инертно-инертного осциллятора // Прикладная математика и вопросы управления. – 2017. – № 1. – С. 7–13.

8. Попов И.П. Математическое моделирование формального аналога электромагнитного поля // Прикладная математика и вопросы управления. – 2016. – № 4. – С. 36–60.

9. Абдуллаев А.Р., Плехова Э.В., Сергеева Е.В. О линейном сингулярном уравнении второго порядка с отклоняющимся аргументом // Прикладная математика и вопросы управления. – 2016. – № 3. – С. 60–66.

10. Абдуллаев А.Р., Скачкова Е.А., Зубарева О.С. Периодические решения квазилинейного функционально-дифференциального уравнения второго порядка // Прикладная математика и вопросы управления. – 2018. – № 3. – С. 7–15. DOI: 10.15593/2499-9873/2018.3.01

References

1. Mulyukov M.V. Ustoychivost' perevernutogo mayatnika s zapazdyvayushchey obratnoy svyaz'yu [Stability of an inverted pendulum with delayed feedback]. Applied Mathematics and Control Sciences, 2017, no. 4, pp. 73–87.

2. Kolmogorov G.L., Zibrova Ye.O. Voprosy ustoychivosti anizotropnykh plastin [Anisotropic plate stability issues]. Applied Mathematics and Control Sciences, 2015, no. 4, pp. 36–42.

3. Bazhukov P.S., Vil'deman V.E. Vliyaniye dopolnitel'nykh tsiklicheskih vozdeystviy na ravnovesnyy rost treshchin pri kvazistaticheskom nagruzhenii [The effect of additional cyclic effects on the equilibrium crack growth under quasi-static loading]. Applied Mathematics and Control Sciences, 2015, no. 3, pp. 71–79.

4. Shayakhmetova L.R., Glumov YU.V., Kamenskikh A.A. Chislennoye issledovaniye vozdeystviya razlichnykh dinamicheskikh nagruzok na izdeliye [Numerical study of the effects of various dynamic loads on the product]. Applied Mathematics and Control Sciences, 2013, no. 11, pp. 140–152.

5. Tsepennikov M.V., Povyshev I.A., Smetannikov O.YU. Verifikatsiya chislennoy metodiki rascheta razrusheniya konstruktivnykh kompozitsionnykh materialov [Verification of the numerical method for calculating the destruction of structures made of composite materials]. Applied Mathematics and Control Sciences, 2012, no. 10, pp. 225–241.

6. Vshivkov O.Yu. Deformirovaniye i razrusheniye sloistykh kompozitsionnykh materialov so slozhnoorganizovannoy strukturoy pri udarno-volnovykh nagruzkakh [Deformation and destruction of layered composite materials with a complex structure with shock-wave loads]. Applied Mathematics and Control Sciences, 2011, no. 9, pp. 42–61.

7. Popov I.P. Sintez inertno-inertnogo ostsillyatora [Synthesis of an inert inert oscillator]. Applied Mathematics and Control Sciences, 2017, no. 1, pp. 7–13.

8. Popov I.P. Matematicheskoye modelirovaniye formal'nogo analoga elektromagnitnogo polya [Mathematical modeling of the formal analog of the electromagnetic field]. Applied Mathematics and Control Sciences, 2016, no. 4, pp. 36–60.

9. Abdullayev A.R., Plekhova E.V., Sergeyeva Ye.V. O lineynom singular'nom uravnenii vtorogo poryadka s otklonyayushchimsya argumentom [On a linear singular second order equation with deviating argument]. Applied Mathematics and Control Sciences, 2016, no. 3, pp. 60–66.

10. Abdullayev A.R., Skachkova Ye.A., Zubareva O.S. Periodicheskiye resheniya kvazilineynogo funktsional'no-differentsial'nogo uravneniya vtorogo poryadka [Periodic solutions of a quasilinear functional differential equation of the second order]. Applied Mathematics and Control Sciences, 2018, no. 3, pp. 7–15. DOI: 10.15593/2499-9873/2018.3.01

Получено 16.03.2019

Сведения об авторе

Попов Игорь Павлович (Курган, Россия) – старший преподаватель кафедры «Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты», Курганский государственный университет (640020, Курган, ул. Советская, 63/4, e-mail: ip.popov@yandex.ru).

About the author

Igor' P. Popov (Kurgan, Russian Federation) – Senior Lecturer, Department of Mechanical Engineering, Machine Tools and Instruments, Kurgan State University (640020, Kurgan, Sovetskaja st., 63/4, e-mail: ip.popov@yandex.ru).