



# Инертно-ёмкостной накопитель энергии для маневрового тепловоза



*Попов Игорь Павлович — Курганский государственный университет, Курган, Россия\*.*

**Игорь ПОПОВ**

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 счёт чего возрастет энергоэффективность маневрового тепловоза. Эта тема довольно часто и активно обсуждается на страницах журнала «Мир транспорта», что свидетельствует об актуальности проблемы.

Представлены теоретические предпосылки создания инертно-ёмкостного

накопителя энергии, который технически выполнен в виде машины постоянного тока с супермаховиком и делает возможным сгладить нагрузку на силовую установку, за счёт этого снизить её мощность и массогабариты. Увеличение массы за счёт накопителя энергии может компенсироваться снижением массы двигательной установки. Ещё более выгодным преимуществом тепловоза является наличие электромеханической трансмиссии, что минимизирует разработку для него рассмотренного инертно-ёмкостного накопителя. В статье приводятся исходные расчёты и схемы.

**Ключевые слова:** железные дороги, маневровый тепловоз, накопитель, супермаховик, силовая установка, энергоэффективность, рекуперация.

\*Информация об авторе:

**Попов Игорь Павлович** – старший преподаватель кафедры технологии машиностроения, металлорежущих станков и инструментов Курганского государственного университета, Курган, Россия, [ip.porow@yandex.ru](mailto:ip.porow@yandex.ru).

Статья поступила в редакцию 12.02.2019, актуализирована 24.04.2019, принята к публикации 25.04.2019.

**For the English text of the article please see p. 85.**

**Р**асчётная мощность силовой установки маневрового тепловоза определяется его пиковой нагрузкой, которая приходится на него, в первую очередь, при трогании поезда с места. Очевидно, что большую часть времени силовая установка работает в недогруженном режиме. Относительно частая смена режима работы маневрового тепловоза обуславливает эффективность и целесообразность оснащения его накопителем энергии [1, 2]. Использование накопителя энергии позволит сгладить нагрузку на силовую установку и за счёт этого снизить её мощность и массогабариты.

Помимо сглаживания нагрузки на силовую установку накопитель позволит рекуперировать энергию при торможении, за счёт чего возрастёт энергоэффективность маневрового тепловоза [3, 4].

Таким образом, целью исследования является обоснование оснащения маневрового локомотива инертно-ёмкостным накопителем энергии. Используются общенаучные и математические методы, электротехнические расчёты.

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ СОЗДАНИЯ ИНЕРТНО-ЁМКОСТНОГО НАКОПИТЕЛЯ ЭНЕРГИИ

В качестве такого накопителя можно рассматривать машину постоянного тока [5, 6] с супермаховиком. Для снижения потерь маховик может быть помещён в вакуумированный кожух. При этом проблемы, связанные с работой машины постоянного тока в вакууме, вполне разрешимы [7].

Подача на якорную обмотку постоянного напряжения  $U$  инициирует следующие механический [8, 9] и электрический [10, 11] процессы:

$$\begin{cases} J \frac{d^2\varphi}{dt^2} + k \frac{d\varphi}{dt} = B2lw \frac{D}{2} i; \\ B2lw \frac{D}{2} \frac{d\varphi}{dt} + Ri = U, \end{cases} \quad (1)$$

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. Указанные уравнения справедливы при следующих допущениях: сила трения пропорциональна скорости вращения и электрическое сопротивление не зависит от тока.

Можно ввести параметрический коэффициент:

$$B/lwD = Y. \quad (2)$$

Пусть начальные условия:

$$\begin{aligned} \varphi(0) &= \varphi_0, \\ \frac{d\varphi}{dt}(0) &= \omega_0. \end{aligned} \quad (3)$$

Из уравнения электрического равновесия следует:

$$\begin{aligned} \frac{d\varphi}{dt} &= -\frac{R}{Y} i + \frac{U}{Y}, \\ \frac{d^2\varphi}{dt^2} &= -\frac{R}{Y} \frac{di}{dt}. \end{aligned} \quad (4)$$

Подстановка в первое уравнение системы даёт:

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

Пусть:

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

Тогда:

$$\frac{di}{dt} + Ai = B. \quad (5)$$

Общим решением является:

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

Частным:

$$i_2 = C_2.$$

Подстановка его в формулу (5) даёт:

$$\begin{aligned} 0 + AC_2 &= B, \\ C_2 &= \frac{B}{A}. \end{aligned}$$

Искомый ток равен:

$$i = i_1 + i_2 = C_1 e^{-At} + \frac{B}{A}. \quad (6)$$

С учётом (3) и (4):

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

С учётом (6):

$$\begin{aligned} C_1 &= \frac{U}{R} - \frac{Y\omega_0}{R} - \frac{B}{A}, \\ i &= \left( \frac{U}{R} - \frac{Y\omega_0}{R} - \frac{B}{A} \right) e^{-At} + \frac{B}{A}. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} i &= \left( \frac{U - Y\omega_0}{R} - \frac{U}{Y^2/k + R} \right) e^{-t/\tau} + \frac{U}{Y^2/k + R} = \\ &= \left( \frac{U - E_0}{R} - \frac{U}{R_k + R} \right) e^{-t/\tau} + \frac{U}{R_k + R}, \end{aligned} \quad (7)$$

где  $E_0 = Y\omega_0$ .



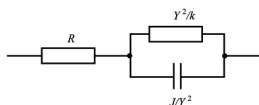


Рис. 1. Электрическая схема инертно-ёмкостного накопителя.

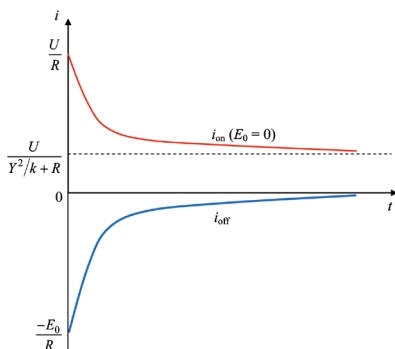


Рис. 2. Характер тока при зарядке и разрядке инертно-ёмкостного накопителя.

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{R} \frac{1}{J/Y^2} + \frac{1}{J/k} = \frac{1}{R} \frac{1}{J/Y^2} + \frac{1}{(J/Y^2)(Y^2/k)} = \frac{1}{RC_J} + \frac{1}{R_k C_J} = \frac{1}{\tau_e} + \frac{1}{\tau_m}. \quad (8)$$

При  $k = 0$   $R_k = \infty$ :

$$i = \frac{U - E_0}{R} e^{-t/\tau}, \quad (9)$$

$$\tau = \frac{RJ}{Y^2} = RC_J. \quad (10)$$

Формулы (9) и (10) 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 (7)–(10) свидетельствуют о ёмкостном характере рассматриваемого накопителя мощности.

Ёмкость накопителя равна:

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

Электромеханическое сопротивление:

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

Запасаемая накопителем энергия равна:

$$W = \frac{C_J U^2}{2} = \frac{J U^2}{2 Y^2} = \frac{J \omega^2}{2}. \quad (11)$$

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

## ВЫВОДЫ

В настоящее время созданы высокоэффективные супермаховики, и даже рассматривается возможность применения их на автомобилях [12–14]. Очевидно, что использование маховика, да ещё оснащённого достаточно массивной машиной постоянного тока, на маневровом тепловозе значительно менее проблематично в силу существенно менее жёстких требований к общей массе. При этом увеличение массы за счёт накопителя энергии может компенсироваться снижением массы двигательной установки. Ещё более выгодным преимуществом тепловоза является наличие электро-механической трансмиссии, что минимизирует разработку для него рассмотренного инертно-ёмкостного накопителя.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Незевак В. Л., Шатохин А. П. Характеристика тяговой нагрузки для определения параметров накопителя электрической энергии // Мир транспорта. — 2018. — № 2. — С. 84–94.
2. Милованова Е. А., Милованов А. А., Милованов А. И. Резервирование в тяговом приводе локомотива // Мир транспорта. — 2015. — № 5. — С. 86–98.
3. Черемисин В. Т., Никифоров М. М., Вильгельм А. С. Методика оценки использования энергии рекуперации // Мир транспорта. — 2018. — № 1. — С. 34–45.
4. Веселов П. А. Энергия рекуперативного торможения: копить или обмениваться? // Мир транспорта. — 2017. — № 5. — С. 76–84.
5. Калугин С. П., Беляев А. С. Тяговые электродвигатели для гибридных и электрохимических локомотивов // Мир транспорта. — 2015. — № 6. — С. 50–61.
6. Калугин С. П. Экономический выбор параметров силовой установки гибридных локомотивов // Мир транспорта. — 2015. — № 4. — С. 126–136.
7. Дроздов Б. В., Терентьев Ю. А. Перспективы вакуумного магнитолевитационного транспорта // Мир транспорта. — 2017. — № 1. — С. 90–99.
8. Попов И. П. Роторно-реактивный движитель // Оборонный комплекс — научно-техническому прогрессу России. — 2018. — № 4. — С. 24–26.
9. Попов И. П. Механические аналоги реактивной мощности // Вестник Пермского университета. Математика. Механика. Информатика. — 2015. — № 3(30). — С. 37–39.
10. Попов И. П. Комбинированные векторы и магнитный заряд // Прикладная физика и математика. — 2018. — № 6. — С. 12–20.
11. Попов И. П. Ёмкостно-инертное устройство // Известия Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ». — 2015. — Том 2. — С. 43–45.
12. Гавриленко Н. Г. Особенности циклического развития автомобилестроения // Мир транспорта. — 2017. — № 3. — С. 6–15.
13. Огороднов С. М., Малеев С. И. Эксперимент и теория: распределения характеристик движения автомобиля // Мир транспорта. — 2017. — № 4. — С. 20–33.
14. Демидов Д. В., Кучкаров В. В. О разрыве потока мощности в трансмиссии легковых автомобилей // Мир транспорта. — 2017. — № 6. — С. 80–87.