

УДК 621.362:537.84

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПАКТНОГО НАКОПИТЕЛЯ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО УСКОРИТЕЛЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

А. Г. Афонин, В. Г. Бутов, С. В. Синяев, В. А. Солоненко,
Г. А. Швецов*, С. В. Станкевич*, Г. В. Носов**, М. Г. Носова***

Научно-исследовательский институт прикладной математики и механики
Томского государственного университета, 634050 Томск, Россия

* Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск, Россия

** Энергетический политехнический институт Томского государственного университета,
634050 Томск, Россия

*** Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,
634050 Томск, Россия

E-mails: aag@niipmm.tsu.ru, bvg@niipmm.tsu.ru, ssv@niipmm.tsu.ru, vik@niipmm.tsu.ru,
shvetsov@hydro.nsc.ru, stankevichsv@mail.ru, nosov@tpu.ru, mariia.g.nosova@tusur.ru

Проведено численное исследование характеристик и режимов работы накопителя энергии на основе импульсного магнитогидродинамического генератора и повышающего ток трансформатора с запасаемой энергией 25, 50 МДж и силой тока во вторичных обмотках на конечном этапе работы 250 кА. Выполнены расчеты рабочих параметров таких накопителей с рельсовым ускорителем в режиме скорострельного метания нескольких твердых тел.

Ключевые слова: электромагнитный ускоритель твердых тел, импульсный магнитогидродинамический генератор, накопитель энергии.

DOI: 10.15372/PMTF20180513

Введение. Одной из ключевых проблем, возникающих при создании электромагнитных ускорителей твердых тел, является разработка специализированных компактных накопителей энергии. Для реализации таких ускорителей необходимы энергоемкие источники, вырабатывающие электрическую энергию, составляющую несколько десятков или сотен мегаджоулей. Выбор магнитогидродинамических (МГД) генераторов в качестве первичного источника энергии для электромагнитного ускорителя обусловлен их автономностью и высокими удельными энергетическими характеристиками [1]. В работе [2] исследованы характеристики накопителей энергии для электромагнитных ускорителей твердых тел с двумя импульсными МГД-генераторами “Сахалин” [3]. В [4] исследован скорострельный рельсовый ускоритель с электропитанием от одного МГД-генератора “Сахалин” с промежуточным индуктивным накопителем энергии. В [5] показана возможность создания компактного многоцелевого импульсного накопителя энергии для генерации мощ-

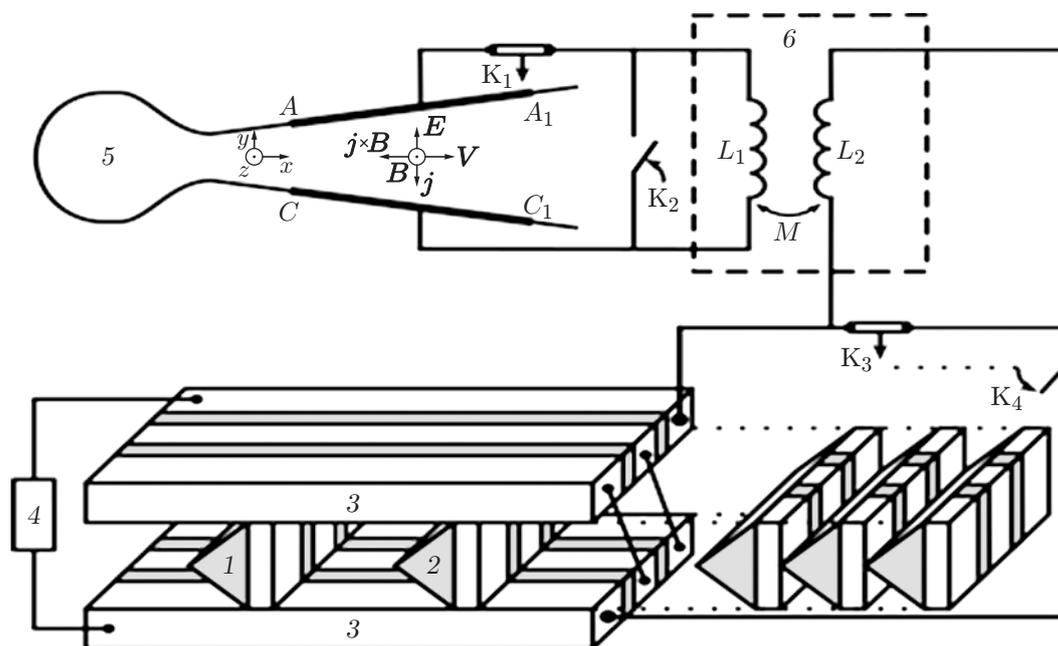


Рис. 1. Схема накопителя со скорострельным многорельсовым ускорителем твердых тел:

1, 2 — последовательно метаемые тела, 3 — пары рельсов, 4 — резистивная дугогасящая переключка, 5 — генератор плазмы, 6 — трансформатор; светлые детали — проводники, заштрихованные — изоляторы

ных импульсов тока на основе импульсного МГД-генератора мощностью 50 МВт и повышающего ток трансформатора с силой тока во вторичной обмотке 250, 500 кА. В данной работе исследуется возможность создания мобильного сильноточного источника энергии для рельсовых скорострельных ускорителей.

Характеристики накопителя энергии. На рис. 1 приведена схема скорострельного рельсового ускорителя. Накопитель энергии ускорителя состоит из импульсного МГД-генератора со сверхпроводящей магнитной системой [6] и повышающего ток трансформатора с охлаждаемыми обмотками [7]. Первичная и вторичная обмотки трансформатора выполняют функцию индуктивного накопителя энергии, увеличивающего силу тока, генерируемого МГД-генератором. Сплошные электроды AA_1 и CC_1 импульсного МГД-генератора с помощью ключа K_1 подключены к первичной обмотке L_1 трансформатора. В процессе накопления энергии трансформатором ключи K_2 и K_4 разомкнуты, а ключи K_1 и K_3 замкнуты. Параметры заряда твердого плазмообразующего топлива выбираются таким образом, чтобы его полное сгорание происходило при выходе мощности генератора на номинальное значение. Затем ключ K_2 замыкает первичную обмотку накоротко, а ключ K_1 отключает генератор от трансформатора. После накопления энергии вторичная обмотка трансформатора L_2 подключается к ускорителю с помощью коммутационного устройства с ключами K_3 и K_4 . В результате электропитание ускорителя происходит только через вторичную обмотку трансформатора при короткозамкнутой первичной обмотке.

Многорельсовый ускоритель [8] состоит из нескольких пар изолированных друг от друга рельсов, последовательно соединенных электропроводящими переключками во входном сечении ускорителя. Дугогасящая переключка (R_b) соединяет крайние рельсы, в которых ток направлен противоположно. В процессе метания происходит чередование двух режимов ускорения, при которых в канале рельсового блока ускоряется либо одно, либо одновременно два тела.

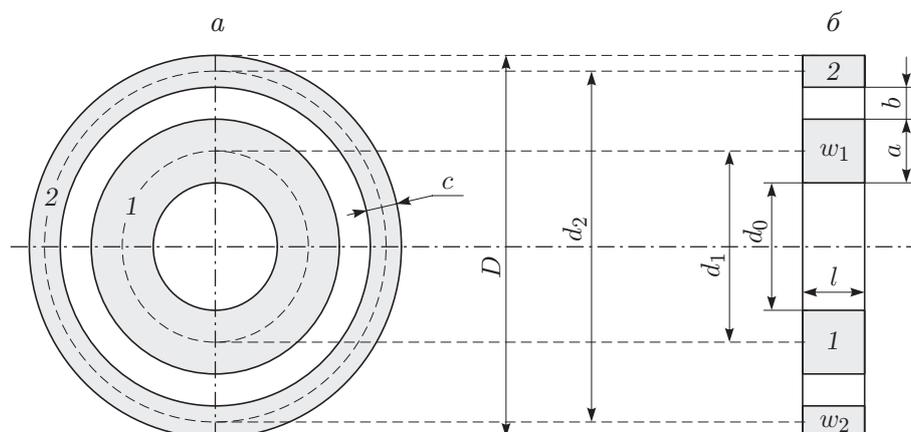


Рис. 2. Геометрия трансформатора:

a — поперечное сечение, b — продольное сечение; 1, 2 — первичная и вторичная обмотки трансформатора в виде соосно расположенных катушек с силой тока i_1, i_2 и числом витков w_1, w_2 соответственно

Моделирование работы МГД-генератора проводится в квазидвумерной МГД-постановке [2]. При определении параметров трансформатора предполагается, что накопление энергии в нем происходит при нарастающей силе тока МГД-генератора с момента начала его работы в режиме холостого хода до момента его выхода на номинальную мощность. Основные электротехнические параметры трансформатора определяются по формулам

$$L_1 = \frac{4W_2}{I_r^2}, \quad L_2 = \frac{2W_2}{i_{2r}^2}, \quad M = -\frac{2W_2}{i_{2r}I_r}, \quad k = \sqrt{0,5}, \quad (1)$$

где W_2 — магнитная энергия трансформатора в момент выхода генератора на номинальную мощность при силе тока I_r ; i_{2r} — сила тока во вторичной обмотке; M — коэффициент взаимной индуктивности обмоток трансформатора; k — коэффициент связи между обмотками трансформатора. Рассчитанные вольт-амперные характеристики для импульсных МГД-генераторов с номинальными мощностями от 10 до 600 МВт удовлетворительно аппроксимируются выражением

$$U(I) = U_0 - RI + \delta I^2,$$

где U — напряжение на электродах генератора; U_0 — напряжение при холостом ходе генератора; I — сила тока в нагрузке; R — характерная величина сопротивления МГД-канала генератора; δ — постоянный коэффициент, Ом/А. В этом приближении динамика накопления трансформатором магнитной энергии $W(t)$ описывается следующими выражениями:

$$W(t) = \frac{L_1}{2} I^2(t), \quad I(t) = \frac{2U_0}{\omega \operatorname{ctg}(\omega t/L_1) + R}, \quad i(t) = \frac{i_{2r}}{I_r} I(t), \quad \omega = \sqrt{4\delta U_0 - R^2}.$$

Параметры $W_2, I_r, i_{2r}, L_1, L_2, M$ из (1) использовались при расчете характеристик трансформаторов с концентрическими цилиндрическими обмотками с прямоугольным сечением (рис. 2).

Параметры обмоток трансформатора и их положение рассчитывались с учетом исходных значений их индуктивности (1). Коэффициент заполнения обмоток проводниками $K = 0,25$ и максимальные плотности токов $j_{\max} = 250, 500$ А/мм² выбирались с учетом ограничений на массу трансформатора и давления магнитного поля на обмотки.

В рассматриваемом режиме параметры работы ускорителя, представляющего собой активно-индуктивную нагрузку с циклически изменяемыми электротехническими параметрами, рассчитывались с использованием модели [2].

Результаты расчетов. Рассчитаны характеристики двух вариантов накопителя энергии на основе импульсного МГД-генератора и повышающего ток трансформатора.

Вариант 1 (накопитель с энергоемкостью 25 МДж). В качестве первичного источника электрической энергии выбран экспериментально отработанный МГД-генератор со сверхпроводящей магнитной системой мощностью 10 МВт [7], имеющий следующие основные параметры: расход продуктов сгорания плазмообразующего топлива “Старт-2” [9] — 10 кг/с, давление в генераторе плазмы — 7 МПа, длина электродной зоны канала — 0,95 м, индукция магнитного поля в МГД-канале — 3 Тл, номинальная сила тока — 19 кА, номинальное напряжение — 560 В, коэффициент преобразования энергии — 14 %, удельный съем энергии (отношение номинальной мощности МГД-генератора к расходу плазмообразующего топлива за 1 с) — 1,0 МДж/кг, масса МГД-генератора с учетом массы сверхпроводящей магнитной системы — 2,1 т, его длина — 3,3 м, ширина — 1,3 м, высота — 1,4 м.

Трансформатор с энергоемкостью 25 МДж имеет следующие параметры: время накопления энергии трансформатором — 3,8 с, количество витков $\omega_1 = 770$, $\omega_2 = 27$, коэффициенты заполнения $K_1 = K_2 = 0,25$, плотность тока в обмотках — 250 А/мм², объем — 1,4 м³, максимальная индукция магнитного поля на внутренней поверхности вторичной обмотки — 9,6 Тл.

Вариант 2 (накопитель с энергоемкостью 50 МДж). Расчетные параметры МГД-генератора мощностью 20 МВт имеют следующие значения: расход плазмообразующего топлива — 15,4 кг/с, давление плазмы на входе в МГД-канал — 2 МПа, длина электродной зоны канала — 1,3 м, индукция магнитного поля — 2,7 Тл, номинальная сила тока — 30 кА, номинальное напряжение — 670 В, коэффициент преобразования энергии — 15 %, удельный съем энергии — 1,3 МДж/кг, масса МГД-генератора — 4 т, длина — 4,3 м, ширина — 1,5 м, высота — 1,7 м.

Трансформатор с энергоемкостью 50 МДж имеет следующие параметры: время накопления энергии трансформатором — 4 с, количество витков $\omega_1 = 714$, $\omega_2 = 41$, плотность тока в обмотках — 500 А/мм², $K_1 = K_2 = 0,25$, объем — 1,2 м³, максимальная масса трансформатора с алюминиевым каркасом при $K = 1$ — 7900 кг, максимальная индукция магнитного поля на внутренней поверхности вторичной обмотки — 16 Тл.

Ускоритель имеет следующие параметры: число пар рельсов из медного сплава — 5, длина рельсов — 5,5 м, погонная индуктивность рельсового блока — 14,4 мкГн/м, погонная индуктивность 1-го и 10-го рельсов, к выходным сечениям которых подключена дугогасящая перемычка, — 0,7 мкГн/м, площадь поперечного сечения рельсов — 8 см², приведенный калибр ускорителя — 52 мм, начальное сопротивление перемычки из титанового сплава — 21 мОм, ее индуктивность — 2 мкГн, скорость тел на входе в рельсовый блок — 50 м/с, массы последовательно метаемых тел при использовании накопителя с энергоемкостью 25 МДж — 575, 435, 335, 260, 225 г, накопителя с энергоемкостью 50 МДж — 625, 540, 470, 415, 365, 315, 275, 240, 210, 210 г.

На рис. 3 представлены зависимости силы тока во вторичных обмотках трансформаторов с энергоемкостью 25 и 50 МДж от времени $i_2(t)$ на этапе накопления энергии и при запитывании ускорителя. Наличие пяти изломов на кривых для накопителя с энергоемкостью 25 МДж обусловлено последовательным ускорением пяти тел, наличие десяти изломов на кривых для накопителя с энергоемкостью 50 МДж — ускорением десяти тел (см. рис. 3,б).

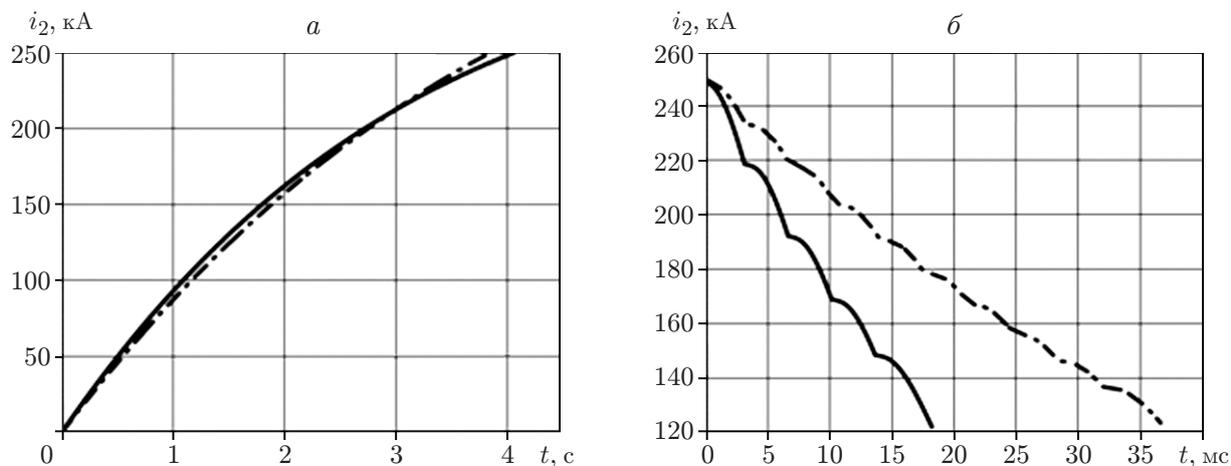


Рис. 3. Зависимость силы тока во вторичных обмотках трансформаторов от времени $i_2(t)$ на этапе накопления энергии (а) и при запитывании ускорителя (б):

сплошная линия — накопитель с энергоемкостью 25 МДж, штрихпунктирная — накопитель с энергоемкостью 50 МДж

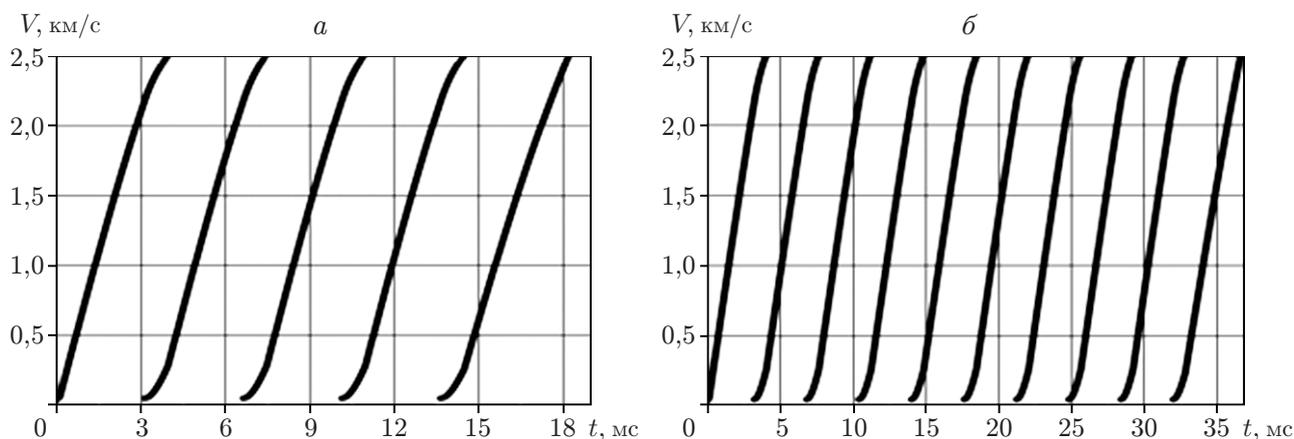


Рис. 4. Зависимость скорости метаемых тел от времени:

а — накопитель с энергоемкостью 25 МДж, б — накопитель с энергоемкостью 50 МДж

На рис. 4 приведены зависимости скорости метаемых тел от времени при работе ускорителя. Массы метаемых тел выбраны таким образом, чтобы конечная скорость всех тел составляла 2,5 км/с. Кинетическая энергия пяти ускоренных тел равна 5,7 МДж (см. рис. 4,а), десяти тел — 11,5 МДж (см. рис. 4,б). В обоих случаях эта энергия составляет приблизительно 23 % запасенной трансформатором энергии, скорострельность ускорителя в обоих вариантах одинакова — 280 тел в секунду.

Заключение. Предложена схема компактного двухступенчатого накопителя магнитной энергии для скорострельного рельсового ускорителя, состоящего из импульсного МГД-генератора со сверхпроводящей магнитной системой и повышающего ток трансформатора. Проведенные оценки массогабаритных параметров МГД-генераторов и трансформаторов свидетельствуют о возможности создания специализированных компактных мобильных накопителей энергии с энергоемкостью 25 ÷ 50 МДж и временем накопления 3 ÷ 5 с.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Панченко В. П.** О некоторых отечественных разработках МГД-установок кратковременного действия // Пути ученого. Е. П. Велихов. М.: Рос. науч. центр “Курчат. ин-т”, 2007. С. 156–166.
2. **Афонин А. Г., Бутов В. Г., Панченко В. П. и др.** Анализ работы многорельсового электромагнитного ускорителя твердых тел с прямым питанием от импульсной магнетогидродинамической установки // ПМТФ. 2015. Т. 56, № 5. С. 91–101.
3. **Velikhov E. P., Matveenko O. G., Panchenko V. P., et al.** Pulsed MHD power system “Sakhalin” — the world largest solid propellant fueled MHD generator of 500 MW electric power output // Proc. of the 13th Intern. conf. on magnetohydrodynamics power generation and high temperature technologies, Beijing (China), 12–15 Oct. 1999. Beijing: S. n., 1999. V. 2. P. 387–398.
4. **Afonin A. G., Butov V. G., Sinyaev S. V., et al.** Rail electromagnetic launchers powered by pulsed MHD generators // IEEE Trans. Plasma Sci. 2017. V. 45, N 7. P. 1208–1212.
5. **Butov V. G., Afonin A. G., Sinyaev S. V., et al.** Compact electric energy storage system based on a powerful pulsed MHD generator // Proc. of the IEEE pulsed power conf., Brighton (UK), June 18–22, 2017. S. 1.: IEEE, 2017. P. 404–408.
6. **Догадаев Р. В., Панченко В. П., Якушев А. А. и др.** Компактная МГД-установка для генерации мощных электрических импульсов // Изв. РАН. Энергетика. 2007. № 4. С. 130–139.
7. **Бут Д. А.** Накопители энергии / Д. А. Бут, В. Л. Алиевский, С. Р. Мизюрин, П. В. Васюкевич. М.: Энергоатомиздат, 1991.
8. **Poltanov A. E., Kondratenko A. K., Glinov A. P., et al.** Multi-turn railguns: The concept analysis and experiments // IEEE Trans. Magnetics. 2001. V. 37, N 1. P. 457–461.
9. **Дегтев Ю. Г., Догадаев Р. В., Панченко В. П. и др.** Экспериментальное и численное исследование свойств продуктов сгорания нового твердого (порохового) плазмообразующего топлива для импульсных МГД-генераторов // Теплофизика высоких температур. 2006. Т. 44, № 4. С. 494–502.

Поступила в редакцию 2/VIII 2018 г.
