

УДК 621.313.522.001.24

## РАСЧЕТ И АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ РЕЛЬСОТРОНА ОТ МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА И ТРАНСФОРМАТОРА

Г. В. Носов, М. Г. Носова\*, Ю. З. Васильева, Е. О. Кулешова

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
634050 Томск, Россия

\* Томский университет систем управления и радиоэлектроники, 634050 Томск, Россия  
E-mails: nosov@tpu.ru, nosovamgm@gmail.com, v19z@mail.ru, kuleshova@mail.ru

Рассчитывается и анализируется электропитание электромагнитного ускорителя твердых тел (рельсотрона) от источника электромагнитной энергии с магнитогидродинамическим генератором и трансформатором со сверхпроводящими обмотками. Используются законы и уравнения для электрических цепей, которые решаются аналитически и численно. Показана возможность использования трансформатора со сверхпроводящими обмотками для накопления электромагнитной энергии от магнитогидродинамического генератора и электропитания рельсотрона при метании нескольких тел в режиме “очереди”.

**Ключевые слова:** магнитогидродинамический генератор, индуктивный накопитель, трансформатор, сверхпроводящая обмотка, рельсотрон.

DOI: 10.15372/PMTF20180208

**Введение.** В настоящее время рельсотроны рассматриваются в качестве перспективных электромагнитных ускорителей твердых тел массой  $0,01 \div 10,00$  кг до скоростей, превышающих 2 км/с и являющихся практически максимальными для продуктов сгорания пороха. Для достижения таких скоростей рельсотрон необходимо запитать от очень мощного импульсного источника электромагнитной энергии, способного генерировать импульсы электрического тока с амплитудой не менее 1 МА, длительностью не менее 10 мс и энергией не менее 1 МДж [1, 2]. В качестве такого источника можно использовать электромашинные генераторы, которые запитывают промежуточные емкостные и индуктивные накопители или непосредственно подключаются к рельсотронам [2–6]. Однако значительные ударные механические нагрузки, наличие больших быстровращающихся масс, скользящих контактов и полупроводниковых преобразователей электрического тока силой несколько сотен килоампер, ограничивают использование электромашинных генераторов для электропитания рельсотронов.

В свою очередь созданные в Национальном исследовательском центре “Курчатовский институт” (Москва) и Государственном научном центре РФ “Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований” (г. Троицк) мощные магнитогидродинамические (МГД) генераторы импульсного и кратковременного действия, работающие на твердом реактивном топливе, рассматриваются в качестве мощных импульсных источников для

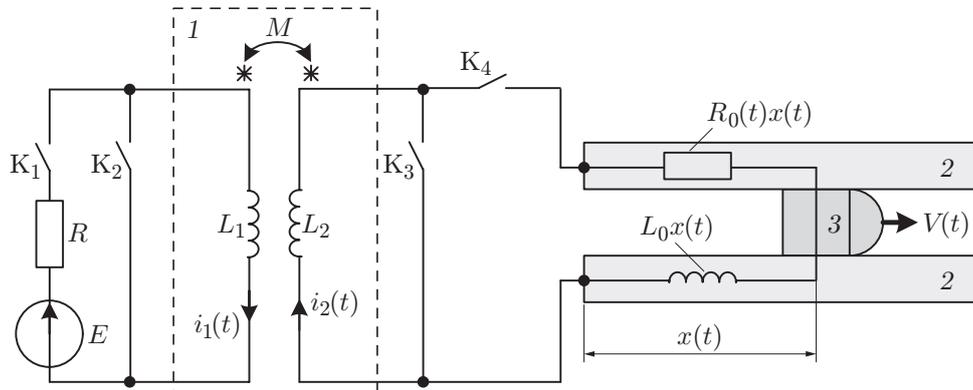


Рис. 1. Схема источника электропитания рельсотрона:

1 — индуктивный накопитель (увеличивающий силу тока трансформатор), 2 — рельсотрон с двумя направляющими токопроводящими рельсами, 3 — метаемое тело

высоковольтных установок [7] и прямого электропитания рельсотронов [8]. Однако для прямого электропитания рельсотронов требуются МГД-генераторы с силой тока до 500 кА и напряжением до 5 кВ, имеющие значительные габариты и массу (МГД-генератор “Сахалин” [8]), что ограничивает их применение на мобильных объектах.

Для уменьшения габаритов и мощности МГД-генераторов при электропитании рельсотронов можно использовать промежуточные емкостные и индуктивные накопители. Однако вследствие низких удельных энергетических параметров конденсаторов емкостные накопители громоздкие, состоят из большого числа конденсаторов, что затрудняет создание на их основе надежных и мобильных емкостных накопителей [2–4]. В свою очередь промежуточные резистивные и особенно сверхпроводящие индуктивные накопители имеют высокие удельные энергетические параметры [2–4], но для использования их при электропитании рельсотрона требуются МГД-генераторы с большой силой тока и значительными габаритами [9].

Для уменьшения силы тока и габаритов МГД-генератора индуктивный накопитель можно выполнить в виде увеличивающего силу тока трансформатора [3, 6] со сверхпроводящими обмотками, вторичная обмотка которого после накопления энергии подключается к рельсотрону. Таким образом, расчет и анализ электропитания рельсотрона от источника электромагнитной энергии с МГД-генератором и трансформатором со сверхпроводящими обмотками с целью оценки возможности создания мобильного источника является актуальной задачей. При этом в качестве мобильного МГД-генератора может рассматриваться компактная МГД-установка на твердом реактивном топливе с электрической мощностью 10 МВт, объемом 6 м<sup>3</sup> и массой 2,1 т [7].

**Постановка задачи.** На рис. 1 приведена схема электропитания рельсотрона от МГД-генератора и трансформатора ( $E$  — ЭДС МГД-генератора;  $R$  — сопротивление МГД-генератора и питающей трансформатор шины;  $L_1, L_2, M$  — индуктивности сверхпроводящих обмоток трансформатора;  $R_0(t), L_0$  — сопротивление как функция времени и индуктивность рельсотрона на единицу длины рельсов;  $K_1, K_2, K_3, K_4$  — быстродействующие ключи;  $i_1(t), i_2(t)$  — силы тока в обмотках трансформатора как функции времени;  $x(t), V(t)$  — координата (расстояние, пройденное метаемым телом в рельсотроне) и скорость метаемого тела как функции времени).

Будем полагать, что трансформатор выполнен без использования магнитопровода с двумя сверхпроводящими обмотками, а рельсотрон имеет два направляющих токопроводящих рельса прямоугольного сечения.

Параметры  $E, R, L_1, L_2, M, L_0$  (см. рис. 1) будем полагать практически постоянными, причем ЭДС  $E$  равна напряжению на выходе МГД-генератора при силе тока  $i_1(t) \approx 0$ , а сопротивление  $R = E/I_{KZ}$ , где  $I_{KZ}$  — максимально возможная сила тока МГД-генератора с учетом наличия питающей трансформатор шины при замкнутых ключах  $K_1, K_2$ .

При замкнутом  $K_1$  и разомкнутом  $K_2$  ключах последовательное соединение ЭДС  $E$  и сопротивления  $R$  дает линейную вольт-амперную характеристику на зажимах первичной обмотки трансформатора, которая практически совпадает с реальными вольт-амперными характеристиками МГД-генераторов [7, 8].

Ключи  $K_2, K_3$  являются реальными, ключи  $K_1, K_4$  — условными. Замкнутый ключ  $K_1$  соответствует подаче реактивного топлива в МГД-генератор, при разомкнутом ключе  $K_1$  подача реактивного топлива прекращается. Замкнутый ключ  $K_4$  соответствует наличию ускоряемого тела в рельсотроне, разомкнутый — его отсутствию.

Для проведения оценочного расчета примем следующие допущения: ключи  $K_1, K_2, K_3, K_4$  срабатывают мгновенно; сопротивления замкнутых ключей  $K_1, K_2, K_3, K_4$  равны нулю, разомкнутых — бесконечности; в моменты срабатывания ключей  $K_1, K_2, K_3, K_4$  значения силы тока  $i_1(t), i_2(t)$  в обмотках трансформатора не меняются; метание нескольких тел осуществляется независимо друг от друга и между рельсами находится одно метаемое тело; сила тока  $i_2(t)$  распределяется равномерно по поперечным сечениям рельсов длиной  $x(t)$ , нагревая их в каждой точке до одной и той же температуры  $\theta(t)$ ; за время  $t_p$  между “очередями” ускоряемых тел рельсы охлаждаются до начальной температуры  $\theta(0) = \theta_0$  или для каждой “очереди” используется рельсотрон с начальной температурой  $\theta_0$ ; электрический контакт метаемых тел с рельсами является бездуговым, сопротивлением которого пренебрегается; удельное сопротивление токопроводящего материала рельсов линейно зависит от температуры; индуктивность рельсотрона  $L_0$  на единицу длины рельсов является постоянным параметром рельсотрона; сопротивление метаемого тела, влияние теплопроводности в рельсах и теплоотдача в окружающую среду не учитываются; принят ряд мер для уменьшения отрицательного влияния “скоростного скин-слоя” на ускорение тел в рельсотроне, например, нанесена специальная “смазка” для создания высокорезистивного электроконтактного слоя рельсов [10], причем эта “смазка” и “скоростной скин-слой” увеличивают потери энергии на нагрев в рельсотроне, которые приближенно учитываются за счет уменьшения удельной проводимости материала рельсов  $\gamma_0$  при начальной температуре  $\theta_0$ .

Источник и рельсотрон работают следующим образом. Ключи  $K_1, K_3$  замкнуты, ключи  $K_2, K_4$  разомкнуты. Силы тока  $i_1(t), i_2(t)$  и энергия магнитного поля трансформатора  $W(t)$  увеличиваются от нулевых значений. В момент времени  $t = t_{m1}$ , когда  $I_{m1} = i_1(t_{m1}), I_{m2} = i_2(t_{m1}), W_{H1} = W(t_{m1})$ , ключ  $K_3$  размыкается, а первое метаемое тело массой  $m_1$  с начальной скоростью  $V(t_{m1}) = V_0$  входит в рельсотрон (ключ  $K_4$  замыкается). Под действием силы тока  $i_2(t)$  при ее начальном значении  $I_{m2}$  тело массой  $m_1$  начинает ускоряться. Энергия  $W(t)$  и силы тока  $i_1(t), i_2(t)$  уменьшаются, и в момент времени  $t_1 = t_{m1} + t_y$  первое метаемое тело с максимальной скоростью  $V_m = V(t_1)$  покидает рельсотрон, длина рельсов которого равна  $l = x(t_1)$ , причем  $x(t_{m1}) = 0$ . В тот же момент времени  $t_1$  в рельсотрон входит второе метаемое тело массой  $m_2$  и процесс ускорения до скорости  $V_m$  повторяется. После ускорения  $n$  тел первой “очереди” в момент времени  $t_{n1} \approx t_{m1} + nt_y$  силы тока  $i_1(t), i_2(t)$  и энергия  $W(t)$  уменьшаются до значений  $I_{H1}, I_{H2}, W_{H2}$  соответственно; ключи  $K_1, K_4$  размыкаются; ключи  $K_2, K_3$  замыкаются. После возможной паузы длительностью  $t_p$ , в течение которой за счет сверхпроводимости обмоток трансформатора значения силы тока  $i_1(t), i_2(t)$  не меняются, одновременно срабатывают ключи:  $K_1$  замыкается,  $K_2$  размыкается. Силы тока  $i_1(t), i_2(t)$  и энергия  $W(t)$  увеличиваются от значений  $I_{H1}, I_{H2}, W_{H2}$  в момент времени  $t_0 = t_{n1} + t_p$  до значений  $i_1(t_2), I_{m2},$

$W_{H3}$  в момент времени  $t_2 = t_0 + t_{m2}$ . В момент времени  $t_2$  ключ  $K_3$  размыкается; первое метаемое тело массой  $m_1$  второй “очереди” с начальной скоростью  $V(t_2) = V_0$  входит в рельсотрон (ключ  $K_4$  замыкается), ускоряется и покидает его в момент  $t_3 \approx t_2 + t_y$  с максимальной скоростью  $V_m = V(t_3)$ . Затем происходит ускорение остальных тел второй “очереди” до скорости  $V_m$ .

**Расчетные уравнения.** При замкнутых  $K_1, K_3$  и разомкнутых  $K_2, K_4$  ключах из решения уравнений для напряжений (см. рис. 1)

$$\begin{aligned} E &= Ri_1(t) + L_1 \frac{di_1(t)}{dt} - M \frac{di_2(t)}{dt}, \\ 0 &= L_2 \frac{di_2(t)}{dt} - M \frac{di_1(t)}{dt} \end{aligned}$$

при начальных значениях  $i_1(t_0) = I_{H1}$ ,  $i_2(t_0) = I_{H2}$  определяем силы тока

$$\begin{aligned} i_1(t) &= E/R - (E/R - I_{H1}) \exp[p(t - t_0)], \\ i_2(t) &= I_{H2} + (M/L_2)[i_1(t) - I_{H1}], \end{aligned} \quad (1)$$

где при значении коэффициента связи между обмотками трансформатора  $K < 1$  имеем

$$M = K \sqrt{L_1 L_2}, \quad p = -R/[L_1(1 - K^2)]. \quad (2)$$

С учетом (1), (2) запасаемая в магнитном поле трансформатора энергия равна

$$W(t) = 0,5L_1 i_1(t)^2 + 0,5L_2 i_2(t)^2 - K \sqrt{L_1 L_2} i_1(t) i_2(t). \quad (3)$$

С использованием (1)–(3) находим время накопления энергии в магнитном поле  $t_{m1,2}$  и индуктивность вторичной обмотки  $L_2$ :

— при  $t_0 = 0$ ,  $I_{H1} = I_{H2} = 0$

$$t_{m1} = \frac{L_1(1 - K^2)}{R} \ln \left[ \left( 1 - \frac{R}{E} \sqrt{\frac{2W_{H1}}{L_1(1 - K^2)}} \right)^{-1} \right], \quad L_2 = \frac{2W_{H1}K^2}{I_{m2}^2(1 - K^2)}; \quad (4)$$

— при  $t_0 = t_{n1} + t_p$ ,  $I_{m2} < I_{H2} + (M/(RL_2))(E - RI_{H1})$

$$t_{m2} = \frac{L_1(1 - K^2)}{R} \ln \left[ \left( 1 - \frac{L_2 R (I_{m2} - I_{H2})}{M(E - RI_{H1})} \right)^{-1} \right], \quad (5)$$

где  $t_{m1} = t_{m2}$  при  $I_{H2} = RI_{H1}I_{m2}/E$ .

На рис. 2 приведена схема трансформатора. Катушка первичной обмотки трансформатора имеет квадратное сечение площадью  $a^2$  и отношение среднего диаметра  $d_1$  к длине катушки  $a$   $d_1/a = 3$ , такое что при заданных длине и площади сечения провода индуктивность  $L_1$  максимальна [11]. На рис. 2  $d_1 = 3a$ ,  $d_2 = 4a + 2b + c$ . Индуктивности трансформатора  $L_1, L_2, M$  и максимальные плотности токов в обмотках  $j_{m1}, j_{m2}$  при значениях коэффициентов заполнения  $K_{Z1}, K_{Z2}$  можно рассчитать по формулам [11, 12]

$$\begin{aligned} L_1 &= 1,7 \cdot 10^{-6} r_1 w_1^2, & L_2 &= \frac{0,32 \cdot 10^{-4} r_2^2 w_2^2}{6r_2 + 9a + 10c}, & M &= \frac{w_1 w_2}{2ac} (L_{abc} + L_b - L_{ab} - L_{bc}), \\ L_{abc} &= \frac{0,32 \cdot 10^{-4} r_{abc}^2 d_{abc}^2}{6r_{abc} + 9a + 10d_{abc}}, & L_b &= \frac{0,32 \cdot 10^{-4} r_b^2 d_b^2}{6r_b + 9a + 10d_b}, & L_{ab} &= \frac{0,32 \cdot 10^{-4} r_{ab}^2 d_{ab}^2}{6r_{ab} + 9a + 10d_{ab}}, \\ L_{bc} &= \frac{0,32 \cdot 10^{-4} r_{bc}^2 d_{bc}^2}{6r_{bc} + 9a + 10d_{bc}}, & j_{m1} &= \frac{E w_1}{R K_{Z1} a^2}, & j_{m2} &= \frac{I_{m2} w_2}{K_{Z2} a c}, \end{aligned} \quad (6)$$

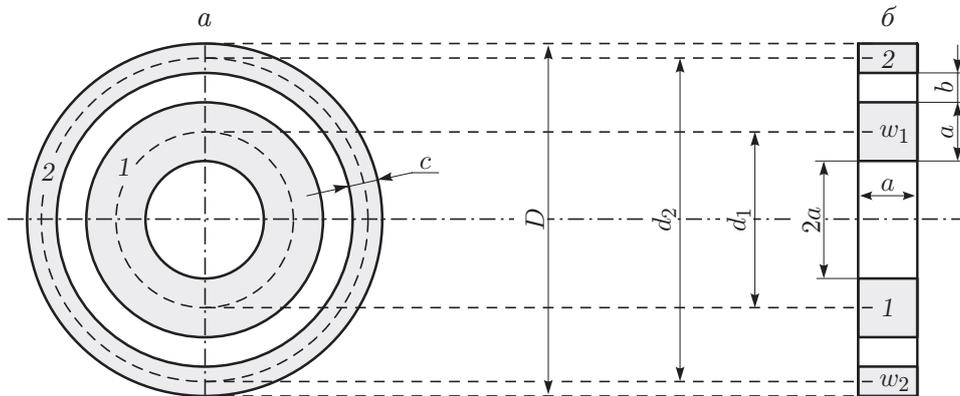


Рис. 2. Схема индуктивного накопителя, представляющего собой трансформатор с концентрическими цилиндрическими обмотками:

$a$  — поперечное сечение,  $b$  — продольное сечение; 1 — первичная обмотка с числом витков  $w_1$  и силой тока  $i_1(t)$ , 2 — вторичная обмотка с числом витков  $w_2$  и силой тока  $i_2(t)$ ;  $a, b, c$  — геометрические размеры

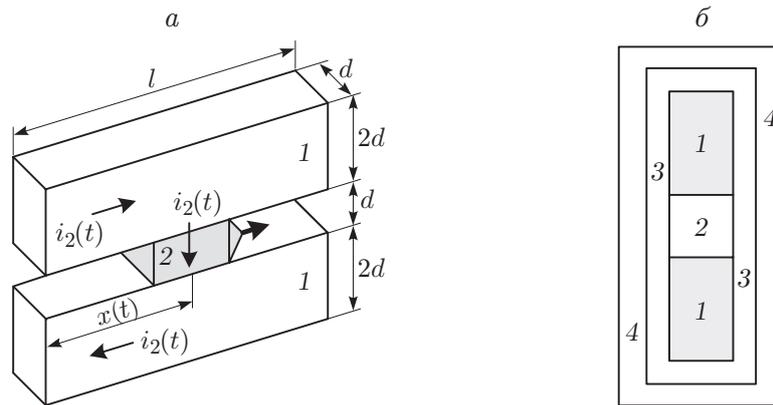


Рис. 3. Схема (а) и поперечное сечение (б) рельсотрона:

1 — направляющие токопроводящие рельсы, 2 — токопроводящее метаемое тело с квадратным поперечным сечением, 3 — изоляция, 4 — крепеж

где

$$\begin{aligned} r_1 &= 1,5a, & r_2 &= 2a + b + 0,5c, & r_{abc} &= 1,5a + 0,5b + 0,5c, & r_b &= 2a + 0,5b, \\ r_{ab} &= 1,5a + 0,5b, & r_{bc} &= 2a + 0,5b + 0,5c, \\ d_{abc} &= a + b + c, & d_b &= b, & d_{ab} &= a + b, & d_{bc} &= b + c. \end{aligned} \quad (7)$$

При замкнутых  $K_1, K_4$  и разомкнутых  $K_2, K_3$  ключах уравнения для схемы, представленной на рис. 1, имеют вид

$$\begin{aligned} E &= Ri_1(t) + L_1 \frac{di_1(t)}{dt} - M \frac{di_2(t)}{dt}, & V(t) &= \frac{dx(t)}{dt}, & m_q \frac{dV(t)}{dt} &= \frac{L_0 i_2(t)^2}{2}, \\ L_2 \frac{di_2(t)}{dt} - M \frac{di_1(t)}{dt} + R_0(t)x(t)i_2(t) + \frac{d}{dt} [L_0 x(t)i_2(t)] &= 0 \end{aligned} \quad (8)$$

( $m_q$  — масса метаемого тела при  $q = 1, 2, \dots$ ).

Конструкция рассматриваемого рельсотрона показана на рис. 3. При указанном соотношении геометрических размеров рельсотрона ( $l, d$  — длина и ширина рельсов) и равномерном распределении силы тока  $i_2(t)$  по поперечному сечению рельсов из неферромагнитного материала индуктивность равна  $L_0 \approx 0,57$  мкГн/м [11].

При линейной зависимости удельного сопротивления материала направляющих рельсов от их температуры  $\theta(t)$  и равномерном распределении силы тока  $i_2(t)$  по поперечному сечению рельсов (см. рис. 3) без учета теплопроводности в рельсах и теплоотдачи в окружающую среду уравнения для температуры рельсов и для сопротивления рельсотрона  $R_0(t)$  имеют вид [13]

$$\frac{i_2(t)^2[1 + \alpha(\theta(t) - \theta_0)]}{4d^4\gamma_0} = C\rho \frac{d\theta(t)}{dt}, \quad R_0(t) = \frac{1 + \alpha(\theta(t) - \theta_0)}{\gamma_0 d^2}, \quad (9)$$

где  $\gamma_0$  — удельная проводимость рельсов при их начальной температуре  $\theta_0$ ;  $\alpha$ ,  $C$ ,  $\rho$  — температурный коэффициент сопротивления, удельная теплоемкость и объемная плотность материала рельсов соответственно.

**Результаты расчета.** При заданных значениях параметров компактной МГД-установки [7]  $E = 1000$  В,  $I_{KZ} = 50$  кА,  $R = 0,02$  Ом,  $t_{m1} = 5$  с и сверхпроводящего трансформатора [3]  $I_{m2} = 500$  кА,  $W_{H1} = 50$  МДж,  $K_{Z1} = K_{Z2} = 0,25$ ,  $j_{m1} = j_{m2} = 5 \cdot 10^8$  А/м<sup>2</sup> из приближенного совместного решения уравнений (4), (6), (7) с учетом (1)–(3) получаем  $w_1 = 367$  витков,  $w_2 = 7$  витков,  $a = 0,383$  м,  $b = 0,086$  м,  $c = 0,167$  м,  $D = 2,039$  м,  $L_1 = 0,132$  Гн,  $L_2 = 1,279 \cdot 10^{-4}$  Гн,  $M = 2,013 \cdot 10^{-3}$  Гн,  $K = 0,491$ ,  $p = -0,201$  с<sup>-1</sup>,  $t_{m1} \approx 5,035$  с,  $W_{H1} \approx 50,36$  МДж,  $I_{m1} \approx 31,76$  кА,  $I_{m2} \approx 500$  кА.

Для рельсотрона (см. рис. 3) с шириной рельсов  $d = 25 \cdot 10^{-3}$  м, длиной  $l = 4,555$  м с использованием уравнений (8), (9) проводился численный расчет метания двух одинаковых “очередей” из 10 ( $n = 10$ ) тел со следующими параметрами:  $V_0 = 0,2$  км/с,  $V_m = 2,5$  км/с,  $t_y = 3,332 \cdot 10^{-3}$  с. Рельсы выполнены из немагнитной стали, имеющей следующие параметры:  $\theta_0 = 20$  °С,  $\gamma_0 = 10^7$  (Ом·м)<sup>-1</sup>,  $\alpha = 0,0036$  °С<sup>-1</sup>,  $C = 482$  Дж/(кг·°С),  $\rho = 7850$  кг/м<sup>3</sup>, причем для приближенного учета “скоростного скин-слоя” и “смазки” рельсов принята уменьшенная удельная проводимость стали  $\gamma_0 = 5 \cdot 10^6$  (Ом·м)<sup>-1</sup>.

На рис. 4 приведены расчетные массы  $n$  тел “очереди”, разгоняемых до скорости  $V_m = 2,5$  км/с ( $m_1 = 100$  г,  $m_2 = 92$  г, ...,  $m_{10} = 39$  г), а также максимальные температуры рельсов после ускорения  $n$ -го тела одной “очереди”. На рис. 5 приведены вычисленные максимальные значения силы тока первичной и вторичной обмоток трансформатора в момент входа ускоряемого  $n$ -го тела в рельсотрон для первой и второй “очереди” метаемых тел. На рис. 6 представлены расчетные зависимости силы тока и энергии трансформатора

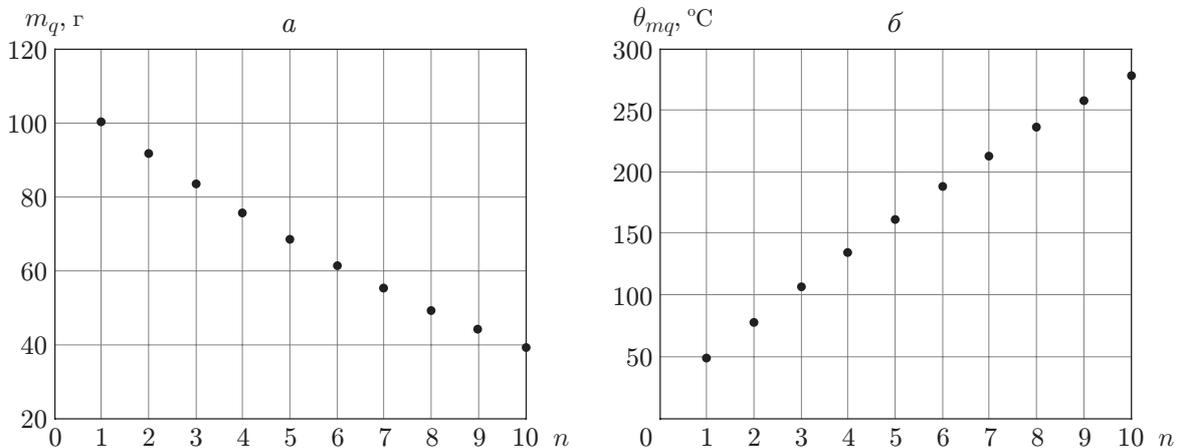


Рис. 4. Массы  $n$  тел “очереди”, разгоняемых до скорости, равной 2,5 км/с (а), и максимальные температуры рельсов после ускорения  $n$ -го тела одной “очереди” (б)

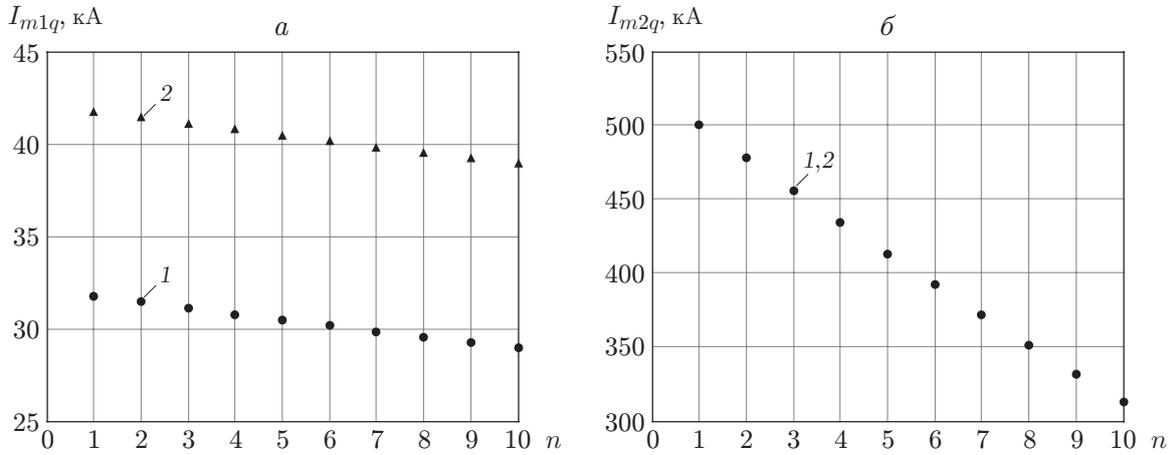


Рис. 5. Максимальные значения силы тока первичной (а) и вторичной (б) обмоток трансформатора в момент входа ускоряемого  $n$ -го тела в рельсотрон: 1 — первая “очередь” ускоряемых тел, 2 — вторая “очередь” ускоряемых тел

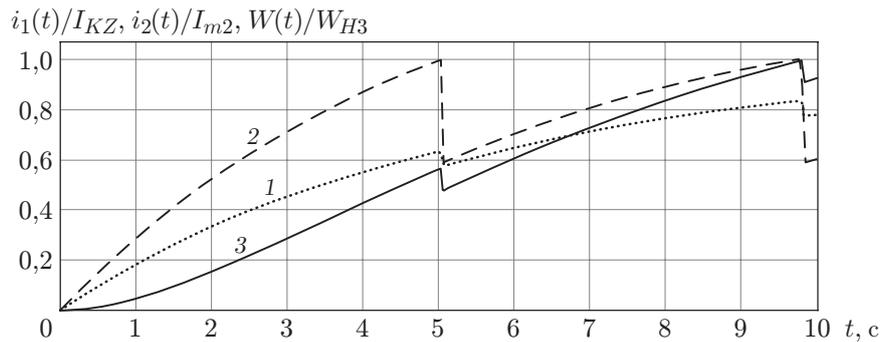


Рис. 6. Расчетные зависимости силы тока и энергии трансформатора от времени: 1 —  $i_1(t)/I_{KZ}$  при  $I_{KZ} = 50$  кА, 2 —  $i_2(t)/I_{m2}$  при  $I_{m2} = 500$  кА, 3 —  $W(t)/W_{H3}$  при  $W_{H3} = 88,75$  МДж

от времени. В соответствии с (5) время накопления энергии перед второй “очередью” метаемых тел равно  $t_{m2} = 4,727$  с, причем  $t_p = 0$ ,  $t_0 = 5,068$  с,  $I_{H1} = 28,72$  кА,  $I_{H2} = 295$  кА,  $W_{H2} = 42,77$  МДж. С использованием уравнений (1), (3) при  $t_2 = 9,795$  с находим значение силы тока  $i_1(t_2) = 41,78$  кА и накопленную в магнитном поле трансформатора энергию  $W_{H3} = 88,75$  МДж.

Затраты запасенной энергии  $W_{H1} \approx 50,36$  МДж на ускорение 10 тел первой “очереди” составляют  $W_{n1} = W_{H1} - W_{H2} \approx 7,59$  МДж, причем полезная суммарная кинетическая энергия 10 тел равна  $W_{k1} \approx 2,086$  МДж при КПД преобразования энергии  $\eta_1 = W_{k1}/W_{n1} \approx 0,275$ . Затраты запасенной энергии  $W_{H3} \approx 88,75$  МДж на ускорение 10 тел второй “очереди” составляют  $W_{n2} = W_{H3} - W_{H4} \approx 7,73$  МДж при кинетической энергии  $W_{k2} = W_{k1}$  и КПД  $\eta_2 = W_{k2}/W_{n2} \approx 0,27$ . В результате использована энергия  $W_{n1} + W_{n2} \approx 15,32$  МДж при остатке запасенной в магнитном поле трансформатора энергии  $W_{H4} \approx 81,02$  МДж. Энергию  $W_{H4}$  можно использовать далее: ключ  $K_1$  разомкнут; ключи  $K_2, K_3$  размыкаются; ключ  $K_4$  замыкается, и запасенная энергия  $W_{H4}$ , передается в рельсотрон для ускорения тел следующих “очередей”.

Таким образом, возможно создание мобильного источника электропитания рельсотрона, содержащего компактную МГД-установку (объем  $6 \text{ м}^3$ , напряжение до 1000 В, сила

тока до 50 кА) [7] и трансформатор со сверхпроводящими обмотками (объем 1,251 м<sup>3</sup>, сила тока на выходе до 500 кА, накопленная энергия до 88,75 МДж).

**Заключение.** Сформулирована и приближенно решена задача об электропитании рельсотрона от МГД-генератора и увеличивающего силу тока трансформатора со сверхпроводящими обмотками. Оценена возможность накопления энергии и реализации режима метания двух “очередей” из 10 тел со скоростью 300 выстрелов в секунду при скорости тел, равной 2,5 км/с. Полученные результаты свидетельствуют о возможности и перспективности использования МГД-генератора и трансформатора со сверхпроводящими обмотками для электропитания рельсотрона, особенно на мобильных объектах.

Авторы выражают благодарность С. В. Синяеву, обратившему внимание на возможность использования МГД-генератора в качестве первичного источника электропитания рельсотронов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Fair H. D.** The past, present and future of electromagnetics launch technology and the IEEE International EML symposia // IEEE Trans. Plasma Sci. 2013. V. 41, N 5. P. 1024–1027.
2. **McNab I. R.** Large-scale pulsed power opportunities and challenges // IEEE Trans. Plasma Sci. 2014. V. 42, N 5. P. 1118–1127.
3. **Бут Д. А.** Накопители энергии / Д. А. Бут, Б. Л. Алиевский, С. Р. Мизюрин, П. В. Васюкевич. М.: Энергоатомиздат, 1991.
4. **Взрывные генераторы мощных импульсов электрического тока** / Под ред. В. Е. Фортова. М.: Наука, 2002.
5. **Носов Г. В.** Генерирование мощных импульсов тока электромашинными источниками с изменяющейся индуктивностью // Изв. Том. политехн. ун-та. 2005. Т. 308, № 7. С. 68–70.
6. **Носов Г. В., Пустынников С. В.** Индуктивный генератор импульсов тока для частотного режима питания рельсотрона // Изв. Том. политехн. ун-та. 2010. Т. 317, № 4. С. 84–89.
7. **Догадаев Р. В., Панченко В. П., Полулях Е. П., Якушев А. А.** Компактная МГД-установка для генерации мощных электрических импульсов // Изв. РАН. Энергетика. 2007. № 4. С. 130–139.
8. **Афонин А. Г., Бутов В. Г., Панченко В. П. и др.** Анализ работы многорельсового электромагнитного ускорителя твердых тел с прямым питанием от импульсной магнито-гидродинамической установки // ПМТФ. 2015. Т. 56, № 5. С. 91–101.
9. **Afonin A. G., Butov V. G., Sinyaev S. V., et al.** Pulsed MHD generators for powering multirail electromagnetic launchers // Proc. of the 6th Euro-Asian pulsed power conf., 21st Intern. conf. on high-power particle beams and 15th Intern. conf. on megagauss magnetic field generation and related topics, Estoril, Lisbon (Portugal), Sept. 18–22, 2016. S. 1., 2016. P. 137.
10. **Станкевич С. В., Швецов Г. А.** К анализу предельных кинематических характеристик рельсовых ускорителей твердых тел // ПМТФ. 1999. Т. 40, № 2. С. 156–162.
11. **Калантаров П. Л.** Расчет индуктивностей: Справ. кн. / П. Л. Калантаров, Л. А. Цейтлин. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1986.
12. **Электротехнический справочник:** В 3 т. Общие вопросы. Электротехнические материалы / Под ред. В. Г. Герасимова и др. М.: Энергоатомиздат, 1985.
13. **Теория электрических аппаратов** / Под ред. Г. Н. Александрова. М.: Высш. шк., 1985.