

УДК 621.313.12

## К РАСЧЕТУ ПАРАМЕТРОВ И ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ РЕЛЬСОТРОНОМ

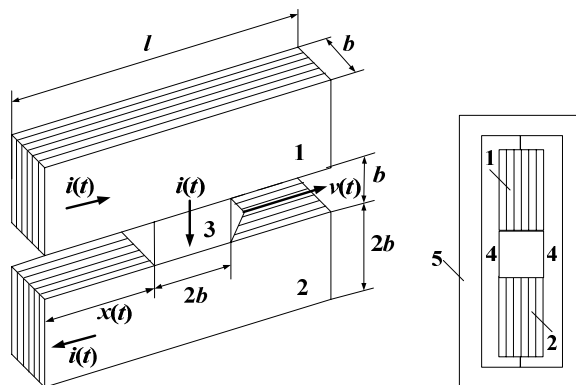
Г.В. Носов

Томский политехнический университет

E-mail: nosov@elti.tpu.ru

Получены формулы для расчета длительности и амплитуды импульса нарастающего тока при заданных значениях максимальной скорости и массы ускоряемого рельсотроном тела. Для обеспечения минимальных значений тока и мощности источника питания рельсотрона необходимо получить от источника импульс тока близкий к прямоугольной форме и иметь наибольшую индуктивность рельсотрона. Для прямоугольного импульса тока приведены зависимости, характеризующие эффективность преобразования энергии рельсотроном с учетом потерь энергии в рельсах, возможной электрической дуге и остатка энергии в магнитном поле рельсотрона. Показано, что эффективность преобразования возрастает с увеличением массы ускоряемого тела и его максимальной скорости, а также с уменьшением длины рельсотрона при оптимальных величинах объемной плотности ускоряемого тела и его начальной скорости.

Рельсотрон является электромеханической установкой, преобразующей электромагнитную энергию импульса тока в механическую энергию ускоряемого тела. В настоящее время рельсотроны рассматриваются как перспективные электромагнитные ускорители тел массой 0,001...1 кг до скоростей, достигающих 10 км/с, для применения в космической технике, научных исследованиях. Рельсотрон состоит из двух параллельных рельсов (шин), между которыми движется ускоряемое тело, рис. 1. При протекании тока по рельсам и телу за счет электродинамической силы тело ускоряется и может достичь скоростей, значительно превышающих 1,8 км/с. Скорость 1,8 км/с является максимальной для ускорителей, использующих газодинамическое давление продуктов сгорания пороха. Однако для достижения таких скоростей рельсотрон необходимо запитать от очень мощного импульсного источника электромагнитной энергии, способного генерировать импульсы тока с амплитудой до 1 МА и более, длительностью до 5 мс и энергией до 1 МДж и более [1]. В качестве такого источника можно использовать электромашинный генератор с изменяющейся индуктивностью [2].



**Рис. 1.** Принципиальная схема рельсотрона: 1) и 2) рельсы, набранные из изолированных пластин; 3) ускоряемое тело; 4) изоляция; 5) крепеж;  $v(t)$  – скорость тела;  $x(t)$  – расстояние, пройденное телом в рельсотроне;  $i(t)$  – электрический ток;  $l$  и  $b$  – длина и ширина рельсов

Расчет параметров и выявление факторов, направленных на повышение эффективности  $\eta$  преобразования рельсотроном электромагнитной энергии в кинетическую энергию ускоряемого тела с целью уменьшения мощности источника, представляет собой актуальную задачу.

Для расчета параметров и эффективности  $\eta$  рельсотрона примем, что индуктивность и сопротивление рельсотрона приближенно линейно зависят от пройденного ускоряемым телом в рельсотроне расстояния:

$$Lp(t) \approx L_0 \cdot x(t); \quad Rp(t) \approx R_0 \cdot x(t),$$

где  $L_0$ ,  $R_0$  – индуктивность и сопротивление рельсотрона на единицу длины.

Тогда ускоряющую тело силу определим как [3]

$$F = \frac{d}{dx} \left[ \frac{Lp(t) \cdot i(t)^2}{2} \right] \approx \frac{i(t)^2}{2} \cdot L_0.$$

Если пренебречь силами трения о рельсы и изоляцию, а также полагать, что ускоряемое тело массой  $m$  движется в вакууме, то на основании второго закона Ньютона можно записать уравнение

$$F = m \cdot \frac{dv(t)}{dt} = \frac{i(t)^2}{2} \cdot L_0,$$

откуда находится скорость

$$v(t) = V_0 + \frac{L_0}{2m} \cdot \int_0^t i(t)^2 dt \quad (1)$$

и определяется пройденное расстояние

$$x(t) = \int_0^t v(t) dt. \quad (2)$$

С целью определения влияния формы и амплитуды импульса тока для получения заданной максимальной скорости при минимальном токе и минимальной мощности источника будем считать, что импульс тока  $i(t)$  с длительностью  $\tau$  и амплитудой  $I_m$  на интервале времени  $0 \leq t \leq \tau$  записывается как ( $n \geq 0$ )

$$i(t) = I_m \left( \frac{t}{\tau} \right)^n.$$

Тогда по формулам (1, 2) находим ( $V_0$  – начальная скорость)

$$v(t) = V_0 + \frac{I_m^2 L_0 t}{2m(2n+1)} \left( \frac{t}{\tau} \right)^{2n};$$

$$x(t) = V_0 t + \frac{I_m^2 L_0 t^2}{2m(2n+1)(2n+2)} \left( \frac{t}{\tau} \right)^{2n},$$

а также определяем напряжение на входе рельсотрона для самого неблагоприятного случая ускорения с учетом напряжения  $u_d(t)$  на электрической дуге в узком щелевом канале [4], образовавшейся после срыва тока с ускоряемого тела и горячей между рельсами позади ускоряемого тела

$$u(t) = \frac{d[L_0 \cdot x(t) \cdot i(t)]}{dt} + R_0 \cdot x(t) \cdot i(t) + u_d(t) =$$

$$I_m \left( \frac{t}{\tau} \right)^n \left[ \frac{nL_0 x(t)}{t} + L_0 v(t) + R_0 x(t) \right] + u_d(t).$$

Откуда при  $t=\tau$  получаем максимальную скорость

$$V_m = V_0 + \frac{I_m^2 L_0 \tau}{2m(2n+1)}, \quad (3)$$

длину рельсотрона

$$l = V_0 \tau + \frac{I_m^2 L_0 \tau^2}{2m(2n+1)(2n+2)} \quad (4)$$

и максимальное значение напряжения

$$U_m = I_m \left( \frac{nL_0 l}{\tau} + L_0 V_m + R_0 l \right) + u_d(\tau). \quad (5)$$

Если значения  $m$ ,  $V_0$ ,  $V_m$ ,  $l$  и  $L_0$  заданы, то из (3–5) находим необходимые параметры импульса тока и максимальную мощность  $P_m$  источника

$$\tau = \frac{2(n+1)l}{(2n+1)V_0 + V_m};$$

$$I_m = \sqrt{\frac{m(2n+1)[V_m^2 - V_0^2 + 2nV_0(V_m - V_0)]}{(n+1)L_0 l}}; \quad (6)$$

$$P_m = U_m I_m = I_m^2 \left( \frac{nL_0 l}{\tau} + L_0 V_m + R_0 l \right) + u_d(\tau) \cdot I_m.$$

Полученная телом в рельсотроне кинетическая энергия составляет

$$W_m = \frac{m(V_m^2 - V_0^2)}{2}$$

при максимальном значении ускоряющей силы

$$F_m = \frac{I_m^2 L_0}{2}$$

и максимальном давлении магнитного поля на ускоряемое тело и рельсы

$$\sigma_m \approx \frac{F_m}{b^2}.$$

Из соотношений (5) и (6) следует, что для обеспечения заданных значений  $m$ ,  $V_0$ ,  $V_m$ ,  $l$  при мини-

мальных величинах  $I_m$ ,  $\tau$  и  $P_m$  необходимо иметь наибольшую индуктивность рельсотрона  $L_0$  и импульс тока прямоугольной формы, т. е. когда  $n=0$  и на интервале времени  $0 \leq t \leq \tau$  ток  $i(t)$  постоянен и равен  $I_m$ . Для формирования такого импульса тока из уравнения

$$\frac{d\psi}{dt} + Ri(t) + u(t) = 0$$

можно определить необходимый закон изменения потокосцепления рабочей обмотки электромашиного генератора

$$\psi(t) = \psi_0 - I_m \left( R + \frac{U_d}{I_m} + L_0 V_0 \right) t -$$

$$- I_m \left( \frac{I_m^2 L_0^2}{4m} + \frac{R_0 V_0}{2} \right) t^2 - I_m \left( \frac{I_m^2 L_0 R_0}{12m} \right) t^3,$$

где  $R$  – сопротивление рабочей обмотки генератора;  $\psi_0$  – начальное значение потокосцепления;  $U_d$  – постоянное напряжение на электрической дуге.

Примерно наибольшую индуктивность имеет рельсотрон с соотношением геометрических размеров, показанных на рис. 1. При любом размере  $b$  этот рельсотрон с рельсами, выполненными из неферромагнитного материала, при постоянной плотности тока имеет  $L_0 = 0,5881$  мкГн/м [5]. Увеличение объемной плотности  $\rho$  материала ускоряемого тела дает уменьшение размера  $b$ , что приводит к увеличению плотности тока в рельсах, увеличению  $R_0$  и возрастанию потерь энергии на тепло в рельсах, однако потери энергии в возможной электрической дуге уменьшаются.

Определим эффективность рельсотрона для импульса тока прямоугольной формы. Для этого рассчитаем возможные электромагнитные потери энергии в рельсотроне. Будем полагать, что рельсы для достижения равномерной плотности тока выполнены набранными из отдельных изолированных высокопрочных полос (рис. 1), например, из бериллиевой бронзы с удельной проводимостью  $\gamma \approx 10^7$  См/м [6], тогда

$$R_0 = \frac{2}{\gamma \cdot (2b) \cdot b} \approx \frac{0,1}{b^2}, \text{ мкОм/м,}$$

$$b \approx \sqrt[3]{\frac{m}{2,3\rho}}.$$

Тепловые потери энергии в рельсах определяем как

$$W_T = \int_0^\tau i(t)^2 R_0 x(t) dt = \frac{I_m^2 R_0 V_0 \tau^2}{2} + \frac{I_m^4 R_0 L_0 \tau^3}{12m},$$

тогда с учетом остатка энергии в магнитном поле рельсотрона

$$W_L = \frac{I_m^2 L_0 l}{2}$$

и потерь энергии в возможной электрической дуге длиной  $b$  при напряженности  $E_d \approx 30$  кВ/м [7]

$$W_d = U_d I_m \tau \approx E_d b I_m \tau$$

эффективность преобразования энергии рельсотроном составит

$$\eta = \frac{W_m}{W_L + W_T + W_d + W_m}.$$

Например, при  $m=0,1$  кг;  $V_0=0,1$  км/с;  $V_m=3$  км/с;  $W_m=0,45$  МДж;  $l=1,94$  м по выше приведенным формулам рассчитываем  $\tau=1,25$  мс;  $I_m=0,89$  МА,  $F_m=0,232$  МН. Если ускоряемое тело выполнено из алюминиевого сплава с объемной плотностью  $\rho=3$  г/см<sup>3</sup>, то средняя температура рельсов для адиабатного процесса нагрева за счет энергии  $W_T$  повысится на 24 °С. По формулам получаем  $b=2,4$  см;  $\sigma_m \approx 403$  МПа;  $R_0 \approx 171$  мкОм/м;  $U_m=2,59$  кВ;  $W_T=0,11$  МДж;  $W_d=0,8$  МДж;  $P_m=2305$  МВт;  $\eta \approx 0,247$ . Если ускоряемое тело выполнено из материала с объемной плотностью  $\rho=20$  г/см<sup>3</sup>, то средняя температура рельсов повысится на 491 °С;  $b=1,3$  см;  $\sigma_m \approx 1373$  МПа;  $R_0 \approx 606$  мкОм/м;  $U_m=3$  кВ;  $W_T=0,4$  МДж;  $W_d=0,43$  МДж;  $P_m=2670$  МВт;  $\eta \approx 0,261$ .

При принятых допущениях, согласно проведенным расчетам, эффективность  $\eta$  рельсотрона возрастает с увеличением массы ускоряемого тела  $m$  (рис. 2) и его максимальной скорости  $V_m$  (рис. 3), а также с уменьшением длины рельсотрона  $l$  (рис. 4) при оптимальных величинах объемной плотности ускоряемого тела  $\rho$  и начальной скорости тела  $V_0$ , когда эффективность максимальна (рис. 5, 6).

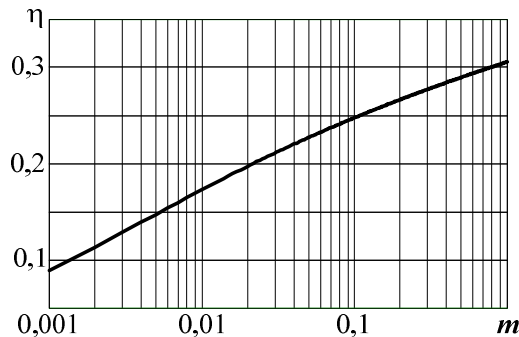


Рис. 2. Зависимость эффективности преобразования от массы ускоряемого тела (в кг) при  $V_0=0,1$  км/с;  $V_m=3$  км/с;  $l=1,94$  м;  $\rho=3$  г/см<sup>3</sup>

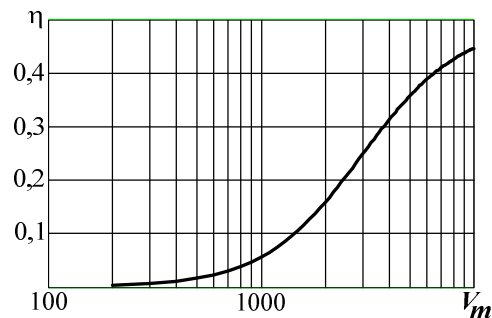


Рис. 3. Зависимость эффективности преобразования от максимальной скорости ускоряемого тела (в м/с) при  $V_0=0,1$  км/с;  $m=0,1$  кг;  $l=1,94$  м;  $\rho=3$  г/см<sup>3</sup>



Рис. 4. Зависимость эффективности преобразования от длины рельсотрона (в метрах) при  $V_0=0,1$  км/с;  $V_m=3$  км/с;  $m=0,1$  кг;  $\rho=3$  г/см<sup>3</sup>

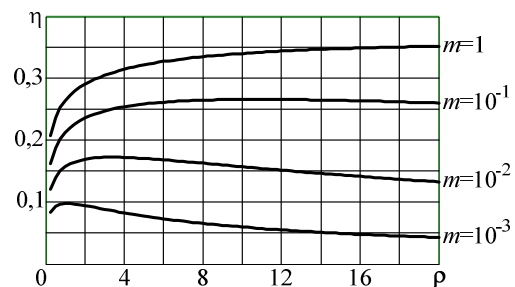


Рис. 5. Зависимость эффективности преобразования от объемной плотности ускоряемого тела (в г/см<sup>3</sup>) для его различной массы  $m$  (в кг) при  $V_0=0,1$  км/с;  $V_m=3$  км/с;  $l=1,94$  м

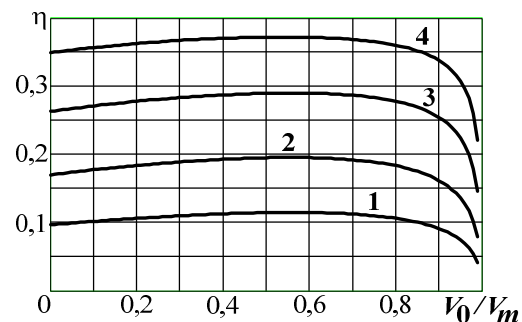


Рис. 6. Зависимость эффективности преобразования от относительной начальной скорости тела при  $V_m=3$  км/с;  $l=1,94$  м: 1)  $m=10^{-3}$  кг и  $\rho=1$  г/см<sup>3</sup>, 2)  $m=10^{-2}$  кг и  $\rho=3$  г/см<sup>3</sup>, 3)  $m=10^{-1}$  кг и  $\rho=10$  г/см<sup>3</sup>, 4)  $m=1$  кг и  $\rho=20$  г/см<sup>3</sup>

Таким образом, для обеспечения минимальных значений тока и мощности источника питания рельсотрона необходимо получить от источника импульс тока, близкий к прямоугольной форме, и иметь наибольшую индуктивность рельсотрона. Эффективность преобразования энергии рельсотрона возрастает с увеличением массы ускоряемого тела и его максимальной скорости, а также с уменьшением длины рельсотрона при оптимальных величинах объемной плотности ускоряемого тела и его начальной скорости. Несомненно, учет трения [8] и сопротивления воздуха снизит эффективность рельсотрона, однако полученные формулы и графики зависимостей позволяют рассчитывать и оптимизировать параметры рельсотрона и источника.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Witt W., Löffler M. The electromagnetic Gun-CCloser to Weapon System Status // Military Technology. – 1998. – № 5. – P. 80–86.
2. Носов Г.В. Генерирование мощных импульсов тока электромагнитными источниками с изменяющейся индуктивностью // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 308. – № 7. – С. 68–70.
3. Татур Т.А. Основы теории электромагнитного поля. – М.: Высшая школа, 1989. – 271 с.
4. Теория электрических аппаратов / Под ред. проф. Г.Н. Александрова. – М.: Высшая школа, 1985. – 312 с.
5. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей: Справочная книга. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 488 с.
6. Электротехнический справочник: в 3 т. Т. 1. Общие вопросы. Электротехнические материалы / Под общ. ред. проф. МЭИ В.Г. Герасимова и др. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 488 с.
7. Железный В.Б., Лебедев А.Д., Плеханов А.В. Воздействие на динамику ускорения якоря в РЭУ // II Всес. семинар по динамике сильноточного дугового разряда в магнитном поле: Материалы. – Новосибирск, 4–6 декабря 1991 г. – Новосибирск: Изд-во Института теплофизики СО РАН, 1992. – С. 16–32.
8. Галанин М.П., Лебедев А.Д., Лотоцкий А.П., Милиев К.К. Тепловые и электромагнитные процессы на контактах электродинамического ускорителя // Препринт Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН. – 2000. – № 42. – 32 с.

Поступила 04.12.2006 г.

УДК 621.391

## РЕГУЛЯРИЗИРУЮЩИЙ АЛГОРИТМ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЯДА. Ч. II.

Ю.Е. Воскобойников\*, Ю.Н. Исаев, В.А. Литасов\*, В.А. Колчанова, Е.О. Кулешова

Томский политехнический университет

\*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет

E-mail: voscob@mail.ru, isaev\_yusup@mail.ru

Предлагается новый регуляризирующий алгоритм вычисления параметров функции переходной проводимости для идентификации схемы замещения разрядного промежутка с использованием устойчивых алгоритмов дифференцирования и решения интегральных уравнений, более эффективно учитывающих погрешности исходных данных. Использование метода наименьших полных квадратов при построении оценок для параметров функции переходной проводимости является дополнительным способом «сглаживания» ошибки построения регуляризованного решения.

## 1. Регуляризирующий алгоритм вычисления функции переходной проводимости

В интегральном уравнении (1) первой части данной работы [1] подынтегральную функцию  $\frac{dU(\tau)}{d\tau}$  заменим ее оценкой  $S'_\lambda(t)$  – производной сглаживающего кубического сплайна. Необходимо найти решение этого уравнения – переходную проводимость  $g(t)$ . Известно, что решение такого уравнения является некорректно поставленной задачей и для вычисления устойчивого решения необходимо использовать специальные методы – методы регуляризации [2, 3].

В работе [4] предложен регуляризирующий алгоритм идентификации импульсной функции стационарной динамической системы (ядра интегрального уравнения) когда входной и выходной сигналы идентифицируемой системы известны со случайными ошибками. Использование дискретного преобразования Фурье (ДПФ) и алгоритма быстрого преобразования Фурье (БПФ) обуславливает высокую вычислительную эффективность регуляризирующего алгоритма. Не повторяя построение этого алгоритма, приведем основные расчетные соотношения, адаптируя их к задаче восстановления функции  $g(t)$  и к используемым в данной статье обозначениям.

Алгоритм вычисления  $g(t)$  можно представить следующими шагами [4]:

Этап 1. Формирование периодических (с периодом  $N$ ) последовательностей:

$$i_p(j) = \begin{cases} \tilde{I}(j \cdot \Delta), & j = 0, \dots, N_I - 1; \\ 0, & j = N_I, N_I + 1, \dots, N - 1, \end{cases}$$

$$d_p(j) = \begin{cases} S'_\lambda(j \cdot \Delta) \cdot \Delta, & j = 0, \dots, N_U - 1; \\ 0, & j = N_U, N_U + 1, \dots, N - 1. \end{cases}$$

Этап 2. Вычисление элементов последовательности

$$D_p(l) = \sum_{j=0}^{N-1} d_p(j) \exp\left(\frac{2\pi i}{N} lj\right), \quad l = 0, \dots, N-1, \quad (1)$$

где  $i = \sqrt{-1}$ .

Этап 3. Вычисление коэффициентов ДПФ последовательности  $\{i_p(j)\}$  (прямое ДПФ):

$$I_p(l) = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} i_p(j) \exp\left(-\frac{2\pi i}{N} lj\right), \quad l = 0, \dots, N-1. \quad (2)$$

Этап 4. Определение коэффициентов ДПФ (обозначаемые как  $\{G_{pa}(l)\}$ ) регуляризованного решения (расчетные соотношения приводятся ниже).