

УДК 621.313.12

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ РЕЛЬСОТРОНОВ ПРИ ИМПУЛЬСНЫХ ТОКАХ

Носов Г.В., Лусс А.А.

ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»,
Томск, e-mail: nosov@tpu.ru

Предложена методика расчета параметров рельсотронов при импульсных токах различной формы и длительности, позволяющая определять возможности рельсотронов, исходя из механической прочности шин. Для однополярного прямоугольного импульса тока, при заданной максимальной скорости тела и известной длине рельсотрона, получены формулы для расчета длительности импульса тока, объемной плотности материала ускоряемого тела и его максимальной кинетической энергии. При механической прочности бериллиевых шин результаты расчета амплитуды импульса тока, средней температуры шин при их адиабатном нагреве, объемной плотности ускоряемого тела и его максимальной кинетической энергии приведены в виде графиков зависимостей от расстояния между шинами, которая равна их высоте при разной ширине шин. С увеличением расстояния между шинами и ширины шин уменьшаются средняя температура шин и удельная плотность материала ускоряемого тела, при увеличении амплитуды импульса тока и максимальной кинетической энергии ускоряемого тела.

Ключевые слова: рельсотрон, шина, импульсный ток, амплитуда тока, действующее значение тока, длительность импульса, индуктивность, сопротивление, механическое напряжение, адиабатный нагрев шин

DETERMINING THE PARAMETERS OF RAILGUNS AT PULSE CURRENTS

Nosov G.V., Luss A.A.

Tomsk Polytechnic University, Tomsk, e-mail: nosov@tpu.ru

Proposed a method for calculating the parameters of railguns in pulsed currents of varying shape and duration, allowing to define the capabilities of the railgun, based on the mechanical strength of the tires. For the unipolar rectangular current pulse at a specified maximum speed of the body and the known length of the railgun obtain formulas for calculation of the duration of the current pulse, the bulk density of the material accelerated body and its maximum kinetic energy. When mechanical strength beryllium tires calculation results of the current pulse amplitude, tire average temperature when adiabatic heating, the bulk density of the accelerated body and a kinetic energy are plotted as the distance between the tires, their height is equal to the at different width of the tires. With increasing distance between the tires and the width of the tires reduces the average temperature of tires and the specific density of the material accelerated body with an increase in the amplitude of the current pulse and the maximum kinetic energy of the accelerated body.

Keywords: railgun, tire, pulse current, amplitude of the current, effective value of current, pulse width, inductance, resistance, mechanical stress, adiabatic heating of tires

В настоящее время для применения в космической и военной технике, а также для научных исследований рельсотроны рассматриваются как перспективные электромагнитные ускорители тел до скоростей, достигающих 10 км/с и более [1, 2, 6]. Поэтому расчет параметров рельсотронов представляется актуальной задачей. Рельсотрон является электромеханической установкой, преобразующей электромагнитную энергию импульса тока в механическую энергию ускоряемого тела и состоящий из двух параллельных шин (рельсов), между которыми движется ускоряемое тело (рис. 1).

Методика расчета

Рассмотрим режим ускорения тела массой m , одиночным импульсом тока $i(t)$ произвольной формы с длительностью τ , амплитудой I_m и действующим (среднеквадратичным) значением:

$$I = \sqrt{\frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} i(t)^2 dt}. \quad (1)$$

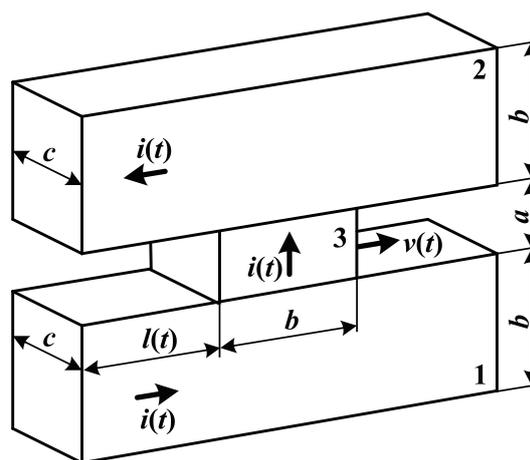


Рис. 1. Принципиальная схема рельсотрона:
1, 2 – одинаковые шины;
3 – ускоряемое тело;
 $v(t)$ – скорость тела; $l(t)$ – расстояние, пройденное телом в рельсотроне;
 $i(t)$ – электрический ток;
 a, b, c , – размеры ускоряемого тела и шин рельсотрона

На основании второго закона Ньютона получаем уравнение движения ускоряемого тела без учета сил сопротивления [5]:

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

откуда определяем скорость тела:

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

и пройденное этим телом расстояние в рельсотроне:

$$l(t) = l_H + V_H t + \frac{L_0}{2m} \int_0^t \left[\int_0^t i(t)^2 dt \right] dt, \quad (3)$$

причем, с учетом (1, 2, 3) находим при $t = \tau$ максимальную скорость тела на выходе из рельсотрона:

$$V_m = V_H + \frac{L_0 I^2 \tau}{2m} \quad (4)$$

и длину рельсотрона:

$$l_p = l_H + V_H \tau + \frac{L_0}{2m} \int_0^\tau \left[\int_0^t i(t)^2 dt \right] dt, \quad (5)$$

где L_0 – индуктивность рельсотрона (Гн/м); $m = abc\rho$ – масса ускоряемого тела при его удельной плотности ρ (кг/м³); $l_H = l(0)$; $V_H = v(0)$ – начальное положение тела в рельсотроне и его скорость при $t = 0$.

При постоянной удельной проводимости материала шин [4]:

$$\gamma = \frac{\gamma_0}{1 + \alpha_R \vartheta}, \quad (6)$$

усредненной действующей плотности тока $\delta_0 = I/bc$ и адиабатном нагреве [4] среднее повышение температуры шин над начальной температурой θ_0 за время τ составит:

$$\vartheta = \frac{\exp(\chi_0 \tau) - \chi_0 \tau - 1}{\alpha_R \chi_0 \tau} < \vartheta_{\text{доп}}, \quad (7)$$

тогда

$$I \approx bc \sqrt{\frac{2\gamma_0 C_0 \rho_0 \vartheta_{\text{доп}}}{\tau}}, \quad (8)$$

где $\chi_0 = \frac{\alpha_R \delta_0^2}{\gamma_0 C_0 \rho_0}$ – температурно-временной параметр шин (°C/c); α_R – температурный коэффициент проводимости (1/°C); γ_0 , C_0 , ρ_0 – при температуре θ_0 удельная проводимость (1/Ом·м), удельная теплоемкость (Дж/кг·°C) и удельная плотность (кг/м³) материала шин соответственно; $\vartheta_{\text{доп}}$ – допустимое повышение температуры шин над начальной температурой θ_0 за время τ .

Примем, что при импульсе тока $i(t)$ будет существенный поверхностный эффект и механическая прочность шин определяется максимальным механическим напряжением σ_m при максимальной индукции B_m на поверхности шин [5]:

$$\sigma_m = \frac{B_m^2}{2\mu_0} < \sigma_{\text{доп}}; \quad B_m \approx \frac{\mu_0 I_m}{c + \beta(2b + c)}, \quad (9)$$

причем индуктивность рельсотрона L_0 зависит от среднего действующего значения индукции B_0 в пространстве между шинами, которая получена, как и индукция B_m , на основе закона полного тока [5]:

$$L_0 \approx \frac{aB_0}{I};$$

$$B_0 \approx \frac{\mu_0 I}{c + 0,5a + \beta(2b + c + 1,5a)}, \quad (10)$$

где $\sigma_{\text{доп}}$ – допустимое механическое напряжение, которое выдерживает материал шин (Па); $\beta < 1$ – безразмерный параметр ослабления индукции вне пространства между шинами; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ (Гн/м) – магнитная проницаемость материала шин и пространства вокруг их.

При $a = c$; $\lambda = b/a$; $1 < \lambda < 2,5$ на основании (9), находим, исходя из механической прочности шин, амплитуду импульса тока I_m при параметре β :

$$I_m = a \sqrt{\frac{2\sigma_{\text{доп}} [1 + \beta(2\lambda + 1)]^2}{\mu_0}};$$

$$\beta \approx 0,625 - 0,247\lambda + 0,047\lambda^2. \quad (11)$$

Результаты расчета

Для однополярного импульса тока прямоугольной формы ($I = I_m$)

$$i(t) = \begin{cases} I_m & \text{при } 0 < t < \tau; \\ 0 & \text{при } t > \tau \end{cases} \quad (12)$$

при заданных значениях V_m , l_p , $V_H = 0$, $l_H = 0$ и размерах рельсотрона $a = c$ на основании (4), (5), (8), (11) получены формулы:

$$\tau = \frac{2l_p}{V_m};$$

$$\rho = \frac{\tau L_0 \sigma_{\text{доп}} [1 + \beta(2\lambda + 1)]^2}{\mu_0 a \lambda V_m};$$

$$W_m = \frac{a^2 l_p L_0 \sigma_{\text{доп}} [1 + \beta(2\lambda + 1)]^2}{\mu_0}, \quad (13)$$

причем ширина шин равна:

$$b = \sqrt{\frac{\tau \sigma_{\text{доп}} [1 + \beta (2\lambda + 1)]^2}{\mu_0 \gamma_0 C_0 \rho_0 \vartheta_{\text{доп}}}}, \quad (14)$$

где $W_m = 0,5 m V_m^2$ – максимальная кинетическая энергия ускоряемого тела.

По формулам (1)–(14) при $V_m =$ (км/с); $l_p = 9$ (м); $\tau = 2$ (мс) проведены расчеты параметров рельсотронов с шинами из особо прочной бериллиевой бронзы [5]: $\theta_0 = 20^\circ\text{C}$; $\gamma_0 = 12,5 \cdot 10^6$ 1/Ом·м; $\alpha_R = 0,0035$ 1/°C; $C_0 = 385,5$ Дж/°C·кг; $\rho_0 = 8230$ кг/м³; $\sigma_{\text{доп}} = 1350$ МПа; $\vartheta_{\text{доп}} = 28,04^\circ\text{C}$.

При этом на рис. 2–5 приведены рассчитанные, исходя из механической прочности бериллиевых шин, зависимости параметров рельсотронов от расстояния a между шинами при размерах $c = a$.

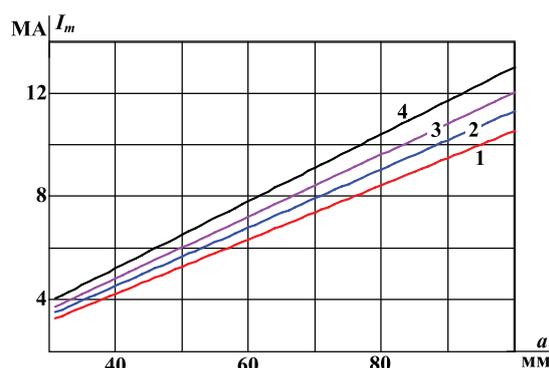


Рис. 2. Зависимости амплитуды импульса тока I_m от расстояния a между бериллиевым шинами при размерах $c = a$:
1 – $b/a = 1$; 2 – $b/a = 1,5$; 3 – $b/a = 2$;
4 – $b/a = 2,5$

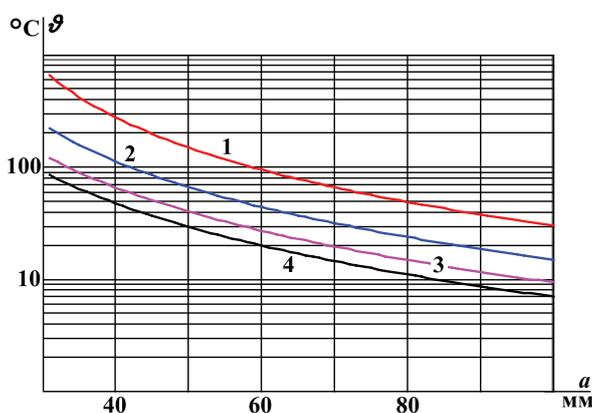


Рис. 3. Зависимости среднего повышения температуры бериллиевых шин ϑ от расстояния a при размерах $c = a$:
1 – $b/a = 1$; 2 – $b/a = 1,5$; 3 – $b/a = 2$; 4 – $b/a = 2,5$

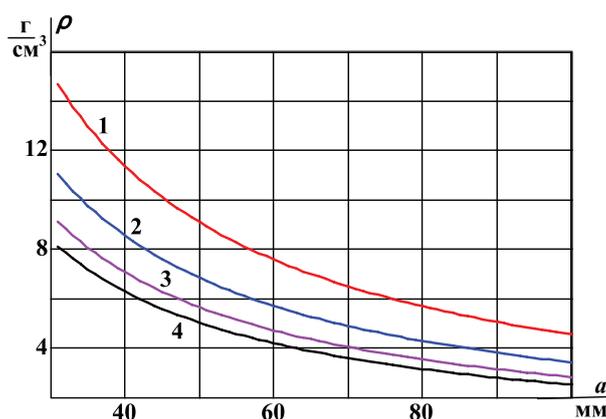


Рис. 4. Зависимости удельной плотности ускоряемого тела ρ от расстояния a при размерах $c = a$:
1 – $b/a = 1$; 2 – $b/a = 1,5$; 3 – $b/a = 2$; 4 – $b/a = 2,5$

В таблице приведены результаты расчета по формулам (9)–(11), (14) параметров рельсотронов с бериллиевыми шинами и результаты определения индуктивности L_0 рельсотрона на основании энергии маг-

нитного поля по программе компьютерного моделирования Elcut [3] при синусоидальном токе и частоте 50 кГц, когда имеет место существенный поверхностный эффект.

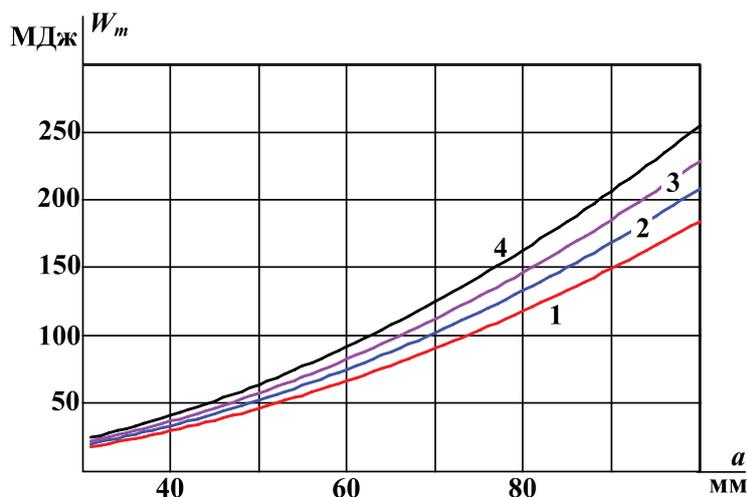


Рис. 5. Зависимости максимальной кинетической энергии ускоряемого тела W_m от расстояния a при размерах $c = a$:
 1 – $b/a = 1$; 2 – $b/a = 1,5$; 3 – $b/a = 2$; 4 – $b/a = 2,5$

Параметры рельсотронов при $I = I_m$; $\vartheta_{\text{доп}} = 28,04^\circ\text{C}$ и размерах $a = c$

Расчет						Elcut
$\lambda = b/a$	β	b	a	B_m/B_0	L_0	L_0
–	–	мм	мм	–	мкГн/м	мГн/м
1	0,425	100,000	100,000	1,500	0,368	0,351
1,5	0,360	107,297	71,532	1,426	0,361	0,354
2	0,319	114,067	57,033	1,377	0,352	0,339
2,5	0,301	123,407	49,363	1,339	0,334	0,340

Заключение

1. Предложена методика расчета параметров рельсотронов при импульсных токах различной формы и длительности, позволяющая определять возможности рельсотронов, исходя из механической прочности шин.

2. Для однополярного импульса тока прямоугольной формы, при заданной максимальной скорости тела и известной длине рельсотрона, получены формулы для расчета длительности импульса тока, объемной плотности материала ускоряемого тела и его максимальной кинетической энергии. При механической прочности бериллиевых шин результаты расчета амплитуды импульса тока, средней температуры шин при их адиабатном нагреве, объемной плотности

ускоряемого тела и его максимальной кинетической энергии приведены в виде графиков зависимостей от расстояния между шинами, которая равна их высоте при разной ширине шин.

3. С увеличением расстояния между шинами и ширины шин уменьшаются средняя температура шин и удельная плотность материала ускоряемого тела, при увеличении амплитуды импульса тока и максимальной кинетической энергии ускоряемого тела.

Список литературы

1. Тепловые и электромагнитные процессы на контактах электродинамического ускорителя / М.П. Галанин, А.Д. Лебедев, А.П. Лотоцкий, К.К. Миляев // Препринт Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН. – 2000. – № 42. – 32 с.

2. Железный В.Б., Лебедев А.Д., Плеханов А.В. Воздействие на динамику ускорения якоря в РЭУ // II Всесоюзный семинар по динамике силовых дуг в магнитном поле: материалы (Новосибирск, 4–6 декабря 1991 г.). – Новосибирск: Изд-во Института теплофизики СО РАН, 1992. – С. 16–32.

3. Методы и средства автоматизации профессиональной деятельности: учебн. пособие / А.С. Глазырин, Д.Ю. Ляпунов, И.В. Слащев, С.В. Ляпушкин. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2007. – Ч. 1. – 199 с.

4. Теория электрических аппаратов / под ред. проф. Г.Н. Александрова. – М.: Высшая школа, 1985. – 312 с.

5. Электротехнический справочник / под общ. ред. проф. МЭИ В.Г. Герасимова и др. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – Т. 1. – 488 с.

6. Witt W., Löffler M. The electromagnetic Gun-Closer to Weapon System Status // Military Technology. – 1998. – № 5. – P. 80–86.

References

1. Galanin M.P., Lebedev A.D., Lotockij A.P., Miljaev K.K. Teplovyje i jelektromagnitnye processy na kontaktah jelektrodinamicheskogo uskoritelja. Preprint Instituta prikladnoj matematiki im. M.V. Keldysha RAN, 2000, no. 42. 32 p.

2. Zheleznyj V.B., Lebedev A.D., Plehanov A.V. Vozdejstvie na dinamiku uskoreniya jakorja v RJeU. II *Vsesojuznyj seminar po dinamike sil'notochnogo dugovogo razrjada v magnetnom pole: materialy* (Novosibirsk, 4-6 dekabnja 1991 g.) [II

All-Union Seminar on the dynamics of the high-current arc discharge in a magnetic field: Materials (Novosibirsk, 4-6 December 1991)]. Novosibirsk, Institute of Thermal Physics, Russian Academy of Sciences, 1992, pp. 16–32.

3. Glazyrin A.S., Ljapunov D.Ju., Slashhev I.V., Ljapunskij S.V. *Metody i sredstva avtomatizacii professional'noj dejatel'nosti: uchebn. posobie*. Tomsk, Izd-vo Tomskogo politehnicheskogo universiteta, 2007. Ch. 1. 199 p.

4. *Teorija jelektricheskikh apparatov*. Pod red. prof. G.N. Aleksandrova. Moscow, Vysshaja shkola, 1985. 312 p.

5. *Jelektrotehnicheskij spravocnik*. Pod obshh. red. prof. MJeI V.G. Gerasimova i dr. Moscow, Jenergoatomizdat, 1985, vol. 1. 488 p.

6. Witt W., Löffler M. The electromagnetic Gun-Closer to Weapon System Status. *Military Technology*, 1998, no. 5, pp. 80–86.

Рецензенты:

Усов Ю.П., д.т.н., профессор кафедры ЭСиЭ ЭНИН ФГБОУ ВПО НИ ТПУ, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск;

Канев Ф.Ю., д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск.

Работа поступила в редакцию 17.10.2013.