

## ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

УДК 621.313

Член-корреспондент НАН РА Г. С. Караян<sup>1,2</sup>, С. В. Гандилян<sup>2</sup>,  
А. А. Макарян<sup>1</sup>

### Вопросы обобщенного электрофизического моделирования и расчета оптимальных энергетических характеристик электродинамических ускорителей масс

(Представлено 17/IX 2018)

**Ключевые слова:** *специальные электромеханические системы, индуктивные и емкостные накопители энергии, униполярные ударные генераторы, рельсотронный электродинамический ускоритель масс, индукционный электродинамический ускоритель масс, низко- и высокотемпературная сверхпроводимость.*

**Введение.** Среди современных комплексов электромеханических преобразователей энергии специального назначения особое место занимают электродинамические ускорители масс (ЭДУМ) разной модификации и предназначения, преобразующие электромагнитную энергию в механическую энергию ускоряемого тела (твердая электропроводящая или магнитопроводящая масса, плазма) [1, 2].

В 1970-1980-х гг., развивая физико-технические и технологические основы плазменных электрореактивных двигателей космического назначения, положили начало развитию плазменных ускорителей масс и начертили области их дальнейшего применения в различных направлениях науки и техники [3]. Системный анализ фундаментальных исследований в области электрофизического и математического моделирования, автоматизированного проектирования и технологического изготовления ЭДУМ разного предназначения приведен в многочисленных зарубежных и российских научных публикациях, например, в работах [4-9].

**1. Классификация ЭДУМ по принципу действия.** К настоящему времени сформировались два больших класса ЭДУМ, отличительной особенностью которых является принцип действия:

- а) рельсотронные электродинамические ускорители масс – РЭДУМ;
- б) индукционные (коаксиальные) электродинамические ускорители масс – ИЭДУМ.

Простейшая структурная схема рельсотронного ЭДУМ представлена на рис.1.

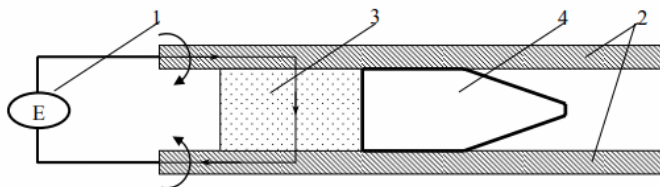


Рис. 1. Структурная схема рельсотронного ЭДУМ: 1 – источник питания; 2 – направляющие электроды (рельсы); 3 – токопроводящий плазменный якорь; 4 – ускоряемое тело (снаряд).

К токопроводящим рельсам подключается источник питания электромагнитной энергии, в котором используются индуктивные и емкостные накопители, униполярные ударные генераторы, характерные для высоко-точной электротехники и ускорительной техники, обеспечивающей **мощный** импульсивный ток возбуждения цепи.

В РЭДУМ ускоряющая сила, выталкивающая якорь (снаряд), действует по всей длине канала ускорения (ствола). В практике конструкция РЭДУМ может быть усложнена введением дополнительных рельсов подмагничивания, усложнением формы якоря, каскадным объединением нескольких ЭДУМ в один многорельсовый.

Одно из возможных применений таких систем – реализация на базе РЭДУМ стратегического кинетического оружия в модификации электромагнитных пушек, обеспечивающие скорость метания снарядов до  $6\div 6.5$  км/с (вместе  $1.3\div 1.6$  км/с – для снарядов обычных артиллерийских установок и ракетного оружия).

Из известных результатов по достижению рекордных скоростей разгона массивных тел наиболее значительным является полученный в США в 2015 г. эксперимент на установке ЭДУМ, где снаряд массой порядка 2.8 кг развил скорость 9000 км/ч. При этом в качестве энергетической системы возбуждения использовался емкостный накопитель с энергией 10 МДж [10, 11].

Принцип действия индукционных ЭДУМ (рис. 2) основан на взаимодействии магнитного поля, создаваемого соленоидом, с вихревыми токами, индуцируемыми магнитным полем на ускоряемом диамагнитном теле (ускорение якоря происходит под действием давления магнитного поля) [12].

Здесь предложен обобщенный энергетический подход электрофизического моделирования РЭДУМ, позволяющего учитывать большое число конструктивных и динамических взаимосвязанных факторов, определяющих их основные энергетические характеристики. Представленная модель позволяет оценивать основные параметры обобщенной ускорительной системы, такие как: величина токов в контурах и величина магнитной индукции в объеме ускоряемого объекта, ускоряющая сила, действующая на якорь (снаряд) и его скорость, температуры токопроводящих частей, их сопротивление и индуктивность, общая эффективность системы ЭДУМ.

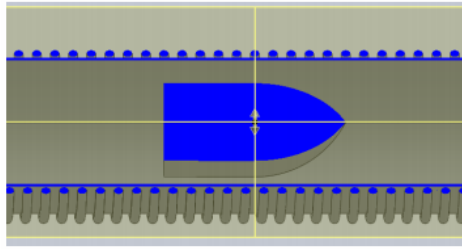


Рис. 2. Принцип индукционного (коаксиального) ускорения макрочастиц.

2. **Обобщенная электрофизическая модель электромеханических ЭДУМ.** Физические процессы, происходящие в ЭДУМ, можно описать с помощью следующих фундаментальных уравнений.

1) Исследование динамических режимов и энергетических характеристик ЭДУМ можно осуществить универсальной энергетической функцией на базе принципа наименьшего действия электродинамики и электромеханики в лагранж-максвелловском пространстве обобщенных переменных:

$$\varepsilon(t)\delta t = \sum_i^N \delta \left( \oint m_i V_i dl_i + \iint d\psi_i dq_i \right), \quad (1)$$

где  $N$  – число материальных контуров тока;  $m_i$  – масса,  $V_i$  – скорость движения,  $q_i$  – электрический заряд,  $\psi_i$  – магнитное потокосцепление  $i$ -го контура тока [13, 14]. Энергетическая функция  $\varepsilon(t)$  характеризует интенсивность взаимодействия электромеханической энергии с внешним источником энергии.

2) Процессы преобразования электромагнитных полей в ЭДУМ можно описать на основе системы уравнений Фарадея – Максвелла. При этом следует отметить, что, так как электрическая проводимость рельсов и якоря в РЭДУМ достаточно высока, в них можно использовать магнитогидродинамическое приближение этих уравнений [15]. В этом приближении ток смещения  $\frac{\partial D}{\partial t}$  в РЭДУМ можно пренебречь по сравнению с током проводимости  $J$ , и, соответственно, в рабочем объеме ЭДУМ уравнения электромагнитного поля выражаются в форме

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} E(r, t) &= -\frac{\partial B(r, t)}{\partial t} - \operatorname{rot} [B(r, t) \times U(r, t)], \\ \operatorname{rot} H(r, t) &= 4\pi j(r, t), \operatorname{div} D(r, t) = \rho_e(r, t), \\ j(r, t) &= \sigma E(r, t), B(r, t) = \beta(r, t) H(r, t), \operatorname{div} B(r, t) = 0, \end{aligned} \quad (2)$$

$$G \in (r, t), t \in [0, \tau]. \quad (3)$$

где  $U(r, t)$  – скорость деформации контура электрического тока,  $r(x, y, z)$  – радиус-вектор якоря  $G(r, t)$  – пространство-временная область действия электромагнитного поля в рабочем объеме ЭДУМ при единичном цикле

метания макротел. В РЭДУМ это скорость движения якоря (снаряда) –  $U = V$ .

Если в РЭДУМ рабочий ток разряда течет не через ускоряемое тело (твердотельный снаряд), а через плазменный поршень, создаваемый за тыльной стороной ускоряемого тела, то относительно системы отсчета, связанной с источником возбуждения, в уравнении (1) масса  $m$  определяется как суммарная ускоряемая масса и выражается в форме

$$m = m_1 + m_2,$$

где  $m_1$  – масса твердотельного снаряда,  $m_2$  – масса плазменного поршня, толкающего снаряд.

При этом поведение плазменного поршня в первом приближении можно описать на основе системы уравнений гидродинамики [16, 17], включающей в себя уравнение непрерывности и уравнение движения центра масс плазменного поршня

$$\operatorname{div}(\eta V) + \frac{\partial \eta}{\partial t} = 0, \quad \frac{\partial V}{\partial t} + (V * \operatorname{grad})V = F - \frac{1}{\eta} \operatorname{grad}(p), \quad (4)$$

где  $\eta$  – плотность плазменной струи,  $p$  – давление,  $F$  – электромагнитная сила, действующая на единицу массы плазменного поршня.

В данном случае можно полагать, что давление плазменной струи связано с температурой  $T$  следующим известным соотношением ( $K$  – постоянная Больцмана) [17]:

$$P = \frac{K\eta}{m_1} * T. \quad (5)$$

Величина суммарной силы сопротивления в РЭДУМ можно выразить в форме

$$F_c = F_1 + F_2 = N_1 V^2 + N_2 V^2, \quad (6)$$

где  $F_1$  – сила сопротивления,  $N_1$  – суммарный коэффициент сопротивления движению твердотельного якоря;  $F_2$  – сила,  $N_2$  – коэффициент турбулентного трения плазменного поршня.

В [18, 19] для  $N_1$  и  $N_2$  определены следующие выражения:

$$N_1 = C_x \rho_0 S_1 \left( 1 + f_1 \frac{S_2}{S_1} \right), \quad N_2 = \frac{f_2 m_2}{2d}, \quad (7)$$

где  $C_x$  – коэффициент сопротивления воздуха ( $x$  – текущая координата на оси, направленной вдоль электродов рельсотрона),  $\rho_0$  – плотность невозмущенного воздуха ( $\rho_0 \approx 1,206$  кг/м<sup>3</sup>),  $S_1$  – эффективная площадь сечения метаемого тела (снаряда),  $S_2$  – площадь боковой поверхности,  $f_1$  – безразмерный коэффициент трения боковой поверхности снаряда и внутренней поверхности канала ЭДУМ,  $f_2$  – безразмерный коэффициент трения плазменного поршня,  $d$  – межэлектродный зазор канала ЭДУМ.

Отметим одно важное обстоятельство. Из (1) и (2) следует, что электромагнитную силу (силу магнитного давления), действующую на метаемоое тело, в РЭДУМ можно выразить в следующих эквивалентных формах:

- на базе теории цепей с нестационарными параметрами

$$F_3 = \frac{1}{2} \left[ \frac{\partial}{\partial x} L(x, t) \right] i^2(t), \quad (8)$$

где  $L(x, t)$  – индуктивность рабочего канала рельсотрона,  $i(t)$  – импульсный ток возбуждения;

- на базе теории электромагнитного поля

$$F_3 = \frac{1}{2} \frac{d}{dx} \left[ \frac{\partial}{\partial \tau} \int_0^{V_0} \rho(r, t) dV_0 \right], \quad (9)$$

$$\rho(r, t) = \frac{1}{2} A(r, t) * D(r, t),$$

где  $\rho(r, t)$  – плотность действия в рабочем объеме  $V_0$  рельсотрона,  $\tau$  – длительность импульса тока возбуждения.

Совместное применение уравнений (1) - (9) позволяет выработать более комбинированный подход при изучении динамических процессов в РЭДУМ, их физико-математического моделирования и автоматизированного проектирования. Появляется возможность учитывать большое количество внешних и внутренних взаимосвязанных факторов, определяющих их основные динамические и энергетические характеристики.

Для исследования динамических и энергетических характеристик РЭДУМ конкретной конструкции необходимо в этих уравнениях учесть их конструкционные особенности, сочетая в одной программе уравнения электрических цепей с уравнениями электромагнитных и тепловых полей.

3. Расчет динамических и энергетических характеристик однокаскадных РЭДУМ. На базе (1) и (9) можно установить исходные уравнения моделирования процессов и расчета динамических и энергетических характеристик однокаскадного ЭДУМ базовой конструкции (рис. 1), в контуре которого протекает импульсный ток  $i(t)$ , создаваемый разрядом первичного источника электрической энергии с напряжением  $U_0$  в следующей форме:

уравнения баланса мощностей в замкнутой системе (в контуре тока) ЭДУМ и электромеханического движения ускоряемого тела

$$U_0(t) i(t) = i^2(t) R(x) + \frac{d}{dt} W_m + V(t) F_3, \quad (10)$$

$$m \frac{d}{dt} V(t) = \frac{1}{2} \frac{d}{dx} L(x) i^2 - NV^2(t), \quad (11)$$

где  $W_m$  – энергия рабочего магнитного поля,  $V(t) = \frac{dx}{dt}$  – скорость движения ускоряемого тела вдоль координаты  $x$ ,  $N = (N_1 + N_2)$  – суммарный коэффициент сопротивления движению тела.

Автоматизированное проектирование и технологическое изготовление РЭДУМ являются многопараметрической оптимизационной задачей получения заданной максимальной выходной скорости ускоряемого тела при минимальной мощности источника питания, которое обеспечивается как решением материаловедческих задач (выбор электротехнических материалов функциональных элементов с предельно высокими значениями электрофизической, теплофизической и механической прочности), так и оптимизацией их геометрических параметров [20, 21].

Как для любых технических систем, способность РЭДУМ в процессе эксплуатации сохранять предельные значения параметров устойчивости оценивается параметром «живучести» их функциональных (структурных) элементов.

Определяющие «живучесть» функциональных элементов РЭДУМ узловые принципы могут быть сформированы следующим образом:

максимальное магнитное давление и температура в канале ускорения не должны превышать пределы теплофизической и механической прочности материалов ускоряемого тела;

живучесть канала ускорения (ствола рельсотрона) обеспечивается, если при эксплуатации ЭДУМ протекающий рабочий ток возбуждения не приводит к эрозии контактной поверхности направляющих рельсов (электродов).

Первый принцип определяет ограничение, накладываемое на величину предельно допустимого тока возбуждения пределом динамической прочности материала ускоряемого тела, которое разрушается при ускорении

$$\alpha_m = \frac{\sigma}{\rho l}, \quad (12)$$

где  $\sigma$  – предел прочности материала тела на сжатие;  $\rho$  – плотность;  $l$  – длина ускоряемого тела в направлении движения. Для диэлектрических материалов метаемого тела (например, поликарбонаты)  $\sigma = 9 \div 10$  кг/мм<sup>2</sup>, а для изолированного от рельсов металлического тела (например, тело из алюминиевого сплава с объемной плотностью  $\rho = 3$  г/см<sup>3</sup>) максимальное давление прочности  $P_p \approx 80 \div 450$  Мпа [22].

Из (11) и (12) определяется предельное значение силы сжатия ускоряемого тела

$$\frac{L_x i^2(t)}{2m} + \frac{N}{m} V^2(t) \leq \frac{\sigma}{\rho l}, \quad L_x = \frac{d}{dx} L(x), \quad (13)$$

и, соответственно, предельное значение тока возбуждения определяется по формуле

$$i(t) = \sqrt{\frac{2}{L_x} [\sigma d^2 - NV^2(t)]}, \quad (14)$$

где  $d$  – ширина канала ускорения рельсотрона.

Из (11) - (14) определяется выражение движения тела без разрушения с предельной скоростью, если начальная скорость  $V(0) = 0$ , в форме

$$V(t) = \alpha * \frac{1 - e^{-\frac{4N\alpha t}{m}}}{1 + e^{-\frac{4N\alpha t}{m}}}, \quad (15)$$

где  $\alpha = d \sqrt{\frac{\sigma}{2N}}$  – параметр, характеризующий предельную скорость.

Интегрируя (15), можно определить длину ускорителя, при которой достигается заданная скорость в условиях устойчивости метаемого тела:

$$S(t) = \frac{m}{2N} \ln \left[ \alpha \left( 1 + e^{-\frac{4N\alpha t}{m}} \right) \right] + \alpha t. \quad (16)$$

Для приблизительного (оценочного) анализа электродинамических режимов РЭДУМ (например, графоаналитическими методами) и расчета энергетических характеристик в уравнениях (10) - (16) можно сделать следующие приемлемые допущения:

- пренебречь силами трения и полагать, что ускоряемое тело с массой  $m$  движется в вакууме, при котором  $N = 0$ ;
- считать, что индуктивность и сопротивление РЭДУМ приближенно линейно зависят от координаты  $x$  ускоряемого тела

$$L(x) = L_0 * x(t), R(x) = R_0 * x(t),$$

$$\frac{d}{dx} L(x) = L_0, \frac{d}{dx} R(x) = R_0, \quad (17)$$

где  $L_0, R_0$  – индуктивность и сопротивление РЭДУМ на единицу длины. Импульсный ток возбуждения  $i(t)$  с длительностью  $\tau$  и амплитудой  $J_m$  на интервале времени  $0 \leq t \leq \tau$  можно аппроксимировать функциональной последовательностью, образованной следующей исходной функцией:

$$i(t) = J_m \left( \frac{t}{\tau} \right)^n, n = 0, 1, 2 \dots \quad (18)$$

Более глубокий анализ разработанных в статье теоретических принципов и полученных результатов для задач обобщенного физико-математического моделирования и расчета оптимальных энергетических и массогабаритных характеристик РЭДУМ разной модификации на базе новейших достижений нанотехнологии в областях наноструктурного материаловедения электротехнического назначения и наноэлектроники будут приведены авторами в дальнейшем.

<sup>1</sup>Ереванский государственный университет  
e.mail: hkarayan@ysu.am, a.makaryan@ysu.am

<sup>2</sup>Московский энергетический институт  
e.mail: angastroi@mail.ru

**Член-корреспондент НАН РА Г. С. Караян, С. В. Гандилян,  
А. А. Макарян**

**Вопросы обобщенного электрофизического моделирования  
и расчета оптимальных энергетических характеристик  
электродинамических ускорителей масс**

Предложен новый обобщенный подход электрофизического моделирования релятивистских электродинамических ускорителей масс (ЭДУМ), позволяющего учитывать большое число взаимосвязанных (конструкционных, динамических, энергетических, массо-габаритных и др.) характеристик в задачах оптимального проектирования ЭДУМ разной модификации и различного назначения.

**ՀՀ ԳԱԱ թղթակից անդամ Հ. Ս. Կարայան, Ս. Վ. Դանդիլյան,  
Ա. Հ. Մակարյան**

**Զանգվածի էլեկտրադինամիկ արագացուցիչների ընդհանրացված  
էլեկտրաֆիզիկական մոդելավորման և օպտիմալ էներգետիկ  
բնութագրիչների հաշվարկման որոշ հարցեր**

Դիտարկվում է մասիվ էլեմենտների ռելսային կառուցվածքով էլեկտրադինամիկական արագացուցիչների էլեկտրաֆիզիկական մոդելավորման նոր ընդհանրացված մեթոդ, որը հնարավորություն է տալիս տարբեր ֆունկցիոնալ կառուցվածքով և տարբեր խնդիրներ կատարող արագացուցիչների օպտիմալ նախագծման խնդիրներում հաշվի առնելու մեծ թվով փոխկապակցված (կառուցվածքային, դինամիկ, էներգետիկ և այլն) պարամետրեր:

**Corresponding member of NAS RA G. S. Karayan, S. V. Gandilyan,  
A. H. Makaryan**

**Some Issues Concerning the Generalized Electro Physical  
Modelling and Calculation of Optimal Energy Characteristics of  
Electrodynamic Mass Accelerators**

In this paper, a new generalized approach to the electro physical acceleration of mass motion (EDUM) is proposed, which allows for a large number of interrelated (structural, dynamical, energy, mass-gabaritic, etc.) characteristics to be considered in the problems of optimal design of EDUM with various modifications and different destinations.

**Литература**

1. *Бут Д. А.* – Электричество. 1995. Вып. 1. С. 2-11; Вып. 2. С. 2-10.
2. *Ким В. П.* – Журнал технической физики. 2015. Т. 85. Вып. 3. С. 45-59.
3. *Арцимович Л. А., Андронов И. М. (Иосифян А. Г.)* – Космические исследования. 1974. Т. 12. Вып. 3. С. 45-58.



4. *Palmer M. R., Lenard R. X.* – IEEETrans. on Magnetics. 1991. V. 27. № 1. P. 38-49.
5. *Faiz H. D.* – IEEETrans.on Magnetics. 1993. V. 29. № 1. P. 71-83.
6. *Witt W., Loffler M.* – Military Technology. 1998. № 5. P. 80-86.
7. *Jerome T.* – IEEETrans. on Magnetics. 2007. V. 43. № 1. P. 207-213.
8. *Носов Г. В.* – Изв. Томского политехн. ун-та. 2007. Т. 310. № 2. С. 70-73.
9. *Жуков Б. Г., Резников Б. И., Розов С. И.* – Журнал технической физики. 2007. Т. 77. Вып. 7. С. 43-49.
10. *Жуков Б. Г., Курякин Р. О., Розов С. И.* – Письма в Журнал технической физики. 2013. Т. 39. № 12. С. 63-70.
11. *Fair H. D.* – IEEETrans.on Magnetics. 2005. V. 41. № 1. P. 158-164.
12. *Воронин А. В., Гусев В. К., Кобясов С. В.* – Журнал технической физики. 2011. Т. 81. Вып. 7. С. 63-68.
13. *Иосифян А. Г.* – Электричество. 1987. № 12. С. 18-27, 1988, № 1. С. 24-31.
14. *Копылов И. П., Гандилян С. В., Гандилян В. В.* – Электротехника. 1998. № 9. С. 25-40.
15. *Галанин М. П., Сорокин Д. Л.* Расчет квазистационарных электромагнитных полей в областях, содержащих несвязные проводящие подобласти. Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша. М. 2017. 27 с.
16. *Самарский А. А., Попов Ю. П.* Резонансные методы решения задач газовой динамики. М. УРСС. 2004. 424 с.
17. *Клеммоу Ф. Доуэрти Дж.* Электродинамика частиц и плазмы. Пер. с англ. М. Мир. 1996. 207 с.
18. *Галанин М. Г., Логоцкий А. П., Попов Ю. П.* – Математическое моделирование. 1999. Т. 11. № 8. С. 3-22.
19. *Азизов А. Э., Алексеев Ю. А., Бревнов Н. Н.* – Атомная энергия. 1982. Т. 52. С. 108-112.
20. *Сухачев К. И.* – Вестн. Самарского гос. аэрокосмического ун-та. 2015. Т. 14. №1. С. 177-188.
21. *Галагин М. П., Уразов С. С.* Математическое моделирование эрозии металлических контактов в рельсотронном ускорителе. М. ИПМ им. М. В. Келдыша. 2003. 23 с.
22. *Tumonis L., Kacianauskas R.* – Mechanica. 2007. № 1(63). P. 58-63.