

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

УДК 621.313

Член-корреспондент НАН РА Г. С. Караян^{1,2}, С. В. Гандилян²,
А. А. Макарян¹

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 магнито-проводящая 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.

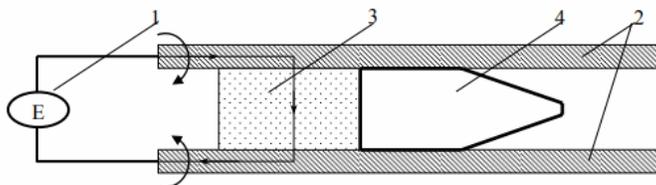


Рис. 1. Структурная схема рельсотронного ЭДУМ: 1 – источник питания; 2 – направляющие электроды (рельсы); 3 – токопроводящий плазменный якорь; 4 – ускоряемое тело (снаряд).

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.

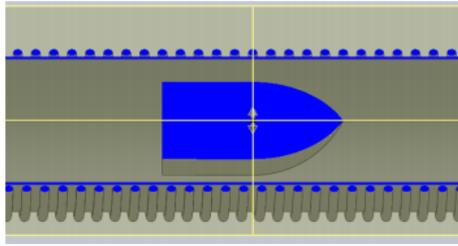


Рис. 2. Принцип индукционного (коаксиального) ускорения макротел.

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, ψ_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

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

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

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 η – 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), ρ_0 – плотность невозмущенного воздуха ($\rho_0 \approx 1,206 \text{ кг/м}^3$), 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 метаемое 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, τ – 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 σ – предел прочности материала тела на сжатие; ρ – плотность; l – длина ускоряемого тела в направлении движения. Для диэлектрических материалов метаемого тела (например, поликарбонаты) $\sigma = 9 \div 10$ кг/мм², а для изолированного от рельсов металлического тела (например, тело из алюминиевого сплава с объемной плотностью $\rho = 3$ г/см³) максимальное давление прочности $P_b \approx 80 \div 450$ 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 τ 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.

¹Ереванский государственный университет
e.mail: hkarayan@ysu.am, a.makaryan@ysu.am

²Московский 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. Ա. Մակարյան**

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

Դիտարկվում է մասիվ էլեմենտների ռելատիվ 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.