

Резонансный электромагнитный ускоритель

К.И. Сухачев, Н.Д. Сёмкин, А.В. Пияков

Самарский государственный аэрокосмический университет им. ак. С.П. Королева
443086, Российская Федерация, г. Самара
Московское шоссе, 34

Представлены, теория, расчетные параметры и принцип действия резонансного электромагнитного ускорителя, позволяющего разгонять твердые ферромагнитные частицы и пучки частиц до скоростей 30 км/с. Существенное отличие описываемого ускорителя от существующих в том, что при движении частицы по ускоряющему тракту соленоиды подключаются поочередно, и в каждом новом колебательном контуре происходит резонансный перезаряд накопителя с возрастающей частотой свободных колебаний.

Ключевые слова: резонансный ускоритель, электромагнитный ускоритель, катушечный ускоритель, ферромагнитные материалы, моделирование ускорения частицы.

Введение

Последнее время характеризуется созданием космических аппаратов с продолжительным сроком службы в условиях воздействия микрометеоритов и твердых частиц космического мусора, плотность потока которого неуклонно растет. В связи с этим актуальным становится задача исследования поведения материалов открытых элементов конструкции космического аппарата при столкновении с микрометеоритами и твердыми частицами космического мусора. Для моделирования таких процессов в наземных условиях используются установки, позволяющие разгонять как единичные, так и потоки частиц до космических скоростей. Наиболее подходящим для этих целей является электромагнитный ускоритель катушечного типа. Он позволяет достичь высоких скоростей для широкого диапазона масс ускоряемых объектов, однако обладает самым низким коэффициентом полезного действия из остальных типов электромагнитных ускорителей.

1. Методы, позволяющие повысить КПД катушечного электромагнитного ускорителя

В современных катушечных ускорителях основная энергия тратится на нагрев токопроводящих элементов конструкции ускорителя. Наибольшим сопротивлением обладает тяговый соленоид. Это связано с ограниченными разме-

рами катушки, т.к. катушка должна обладать наименьшими размерами, чтобы обеспечить максимальную плотность линий магнитной индукции внутри соленоида. Для решения этой проблемы можно использовать сверхпроводящий материал, но это пока требует применения сверхнизких температур и сложных систем охлаждения. Также возможно увеличение числа ступеней ускорителя, так как КПД каждой последующей ступени увеличивается. Это связано с тем, что время протекания тока через катушку каждой последующей ступени уменьшается. Соленоид ускоряет намагниченный объект только до середины, поэтому ток в нем должен прекратиться в момент прохождения частицей половины длины ускоряющего соленоида. В противном случае это вызовет торможение снаряда и снижение КПД. Существующие многоступенчатые модели ускорителя катушечного типа [1] используют активную отсечку с помощью силовых ключей, управляемых датчиками. Такой подход позволяет незначительно повысить КПД в связи с тем, что не вся энергия от накопителя (конденсаторной батареи) успевает перейти в катушку к моменту отключения ключа, так как длительность аperiodического переходного процесса достаточна велика. Другим недостатком является разрыв больших токов при отключении соленоида, при этом возникает сильная самоиндукция [2] и появляется необходимость бороться с ней, чтобы защитить ключи от пробоа обратным напряжением [2].

2. Резонансный электромагнитный ускоритель

На рис. 1 представлена схема, позволяющая осуществить предлагаемый метод ускорения, который свободен от указанных недостатков. Для его реализации необходимо обеспечить согласование полупериодов колебательного процесса с переключением тяговых катушек. Это позволяет в каждую полуволну передавать катушке всю энергию накопителя. Каждый следующий соленоид должен иметь меньшую индуктивность. При движении частицы по ускоряющему тракту соленоиды подключаются поочередно, и в каждом новом колебательном контуре происходит резонансный переходный процесс с постоянно возрастающей частотой свободных колебаний. Каждая катушка отработывает одну полуволну и выключается. Выключение происходит автоматически при использовании разрядников или тиристорных сборок в качестве коммутаторов. Включение каждой следующей катушки происходит по сигналам системы управления. Возможны три варианта включения каждой следующей катушки относительно отключения предыдущей: с опережением, синхронно и с задержкой. В резонансном электромагнитном ускорителе (РЭМУ) облегчен режим коммутации из-за переключения в момент нулевого тока. Длительность импульсов тока через ускоряющие катушки значительно сокращается. Это приводит к существенному снижению потерь на активном сопротивлении катушки и проводящих силовых шин. Следует также отметить, что короткий импульс

тока является полуволной обычного колебательного процесса и не содержит высших гармоник. Поэтому РЭМУ менее опасен для чувствительной электроники по сравнению с классическим многоступенчатым ускорителем катушечного типа с точки зрения электромагнитной совместимости. Высокая добротность всех контуров ускорителя обеспечивает малое затухание колебаний, что позволяет использовать всего один накопитель для нескольких ступеней. Конденсаторная батарея перезаряжается через индуктивность тягового соленоида и подключается к следующему соленоиду, процесс повторяется для каждой ступени, но на большей частоте. Чем выше добротность системы, тем больше ступеней ускорителя можно запитать от одного накопителя, а чем больше ступеней, отработывающих всю энергию конденсаторов, тем выше КПД электромагнитного ускорителя.

Резонансный электромагнитный ускоритель обладает следующими преимуществами:

- увеличение КПД за счет использования всей энергии накопителя и уменьшения длительности импульса;
- снижение массы и стоимости из-за применения одного накопителя для многоступенчатой системы;
- отсутствие всплесков самоиндукции вследствие коммутации при нулевом токе;
- отсутствие высших гармоник при резонансном разряде;
- возможность ускорять любые ферромагнитные объекты, любой формы;

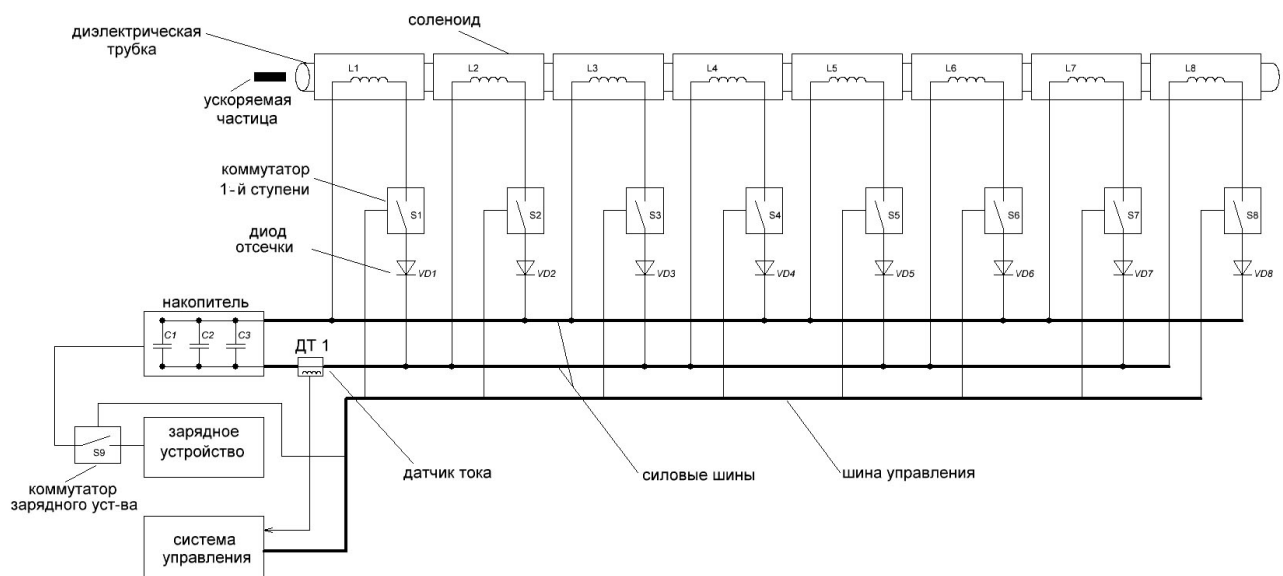


Рис. 1. Многоступенчатый резонансный электромагнитный ускоритель

- отсутствие износа ускоряющего тракта, как в рельсовом и индукционном ускорителях;
- уменьшение времени между испытаниями, за счет остаточного напряжения на конденсаторах после отработки всех ступеней.

3. Расчет электрических параметров одной ступени резонансного электромагнитного ускорителя

В простейшем случае одна ступень представляет собой звено второго порядка. В момент времени t_0 заряженный до напряжения E_u конденсатор емкостью C коммутируется на катушку индуктивностью L , также необходимо учесть все паразитные сопротивления, входящие в цепь. Следует учесть, что $R_C \gg R_L + R_{np}$ и R_C в расчетах можно пренебречь.

Пусть $R = R_L + R_{np}$, тогда по второму закону Кирхгофа:

$$U_R + U_L + U_C = 0, \tag{1}$$

где U_R, U_L, U_C – напряжение на активном сопротивлении, на индуктивности и емкости соответственно.

Для эквивалентной схемы, показанной на рис. 2, запишем дифференциальное уравнение в виде

$$Ri + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int idt = 0; \tag{2}$$

$$\frac{d^2i}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{di}{dt} + \frac{i}{LC} = 0. \tag{3}$$

Решение уравнения можно представить в виде

$$i = i_y + i_{св}. \tag{4}$$

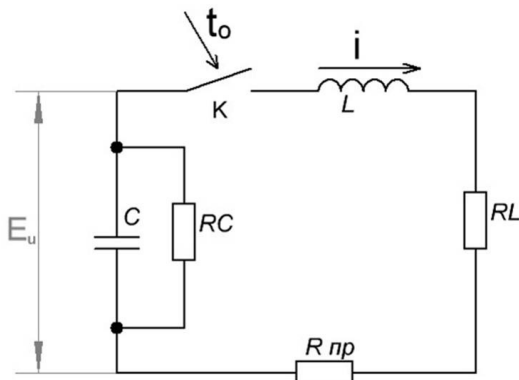


Рис. 2. Эквивалентная схема одной ступени РЕМУ: R_C – сопротивление утечки конденсатора; R_L – активное сопротивление катушки индуктивности (тягового соленоида); R_{np} – суммарное сопротивление остальных частей проводящего контура (силовых шин, обкладок конденсаторной батареи, сопротивление открытого ключа)

Установившееся значение тока равно нулю $i_y = 0$.

Свободное значение можно представить в виде

$$i_{св} = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t}. \tag{5}$$

Из уравнения (3) запишем характеристическое уравнение:

$$p^2 + \frac{R}{L} p + \frac{1}{LC} = 0. \tag{6}$$

Корни характеристического уравнения:

$$p_{1,2} = -\delta \pm \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2},$$

где $\delta = R / (2L)$ – коэффициент затухания; $\omega_0 = 1 / \sqrt{LC}$ – резонансная частота цепи.

Для нахождения постоянных интегрирования A_1, A_2 рассмотрим начальные условия. Из независимых начальных условий следует: $i(t = 0_-) = i(t = 0_+) = 0$ – закон коммутации для индуктивности.

$$i(0) = A_1 + A_2 = 0.$$

Из зависимых начальных условий:

$$U_L = L \frac{di}{dt} = (p_1 A_1 e^{p_1 t} + p_2 A_2 e^{p_2 t}) L;$$

$$\frac{U_L(t = 0)}{L} = p_1 A_1 + p_2 A_2.$$

В начальный момент времени напряжение на индуктивности равно напряжению на емкости $U_L(t = 0) = E$.

$$\begin{cases} A_1 + A_2 = 0; \\ p_1 A_1 + p_2 A_2 = \frac{E}{L}; \\ A_1 = \frac{-E}{L(p_2 - p_1)}; \\ A_2 = \frac{E}{L(p_2 - p_1)}. \end{cases} \tag{7}$$

Общее уравнение для тока ступени ускорителя

$$i = \frac{E - U}{L(p_1 - p_2)} (e^{p_1 t} - e^{p_2 t}). \tag{8}$$

Рассмотрим периодический переходный процесс. Для его установления необходимо, чтобы сопротивление цепи R было меньше характеристического сопротивления ρ в два раза. Характеристическое сопротивление $\rho = \sqrt{L/C}$, тогда у корней характеристического уравнения появляются мнимые части: $p_{1,2} = -\delta \pm j\omega_{св}$; $\omega_{св}$ – угловая частота свободных колебаний. $\omega_{св} = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$;

$$i(t) = \frac{E}{2j\omega_{св}L} e^{-\delta t} (e^{j\omega_{св}t} - e^{-j\omega_{св}t}). \tag{9}$$

Применив формулу Эйлера, уравнение (9) можно привести к виду

$$i(t) = \frac{E}{\omega_{ce}L} e^{-\delta t} \sin \omega_{ce}t. \quad (10)$$

Период собственных колебаний

$$T_\delta = \frac{2\pi}{\omega_{ce}}. \quad (11)$$

Можно рассчитать потери на активном сопротивлении одной ступени ускорителя. Количество теплоты, выделенное на активном сопротивлении:

$$Q = R \int_0^{T_{ce}} i^2 dt. \quad (12)$$

Это количество энергии из полной энергии, запасенной конденсаторами $W_{\max} = CE^2 / 2$, будет потрачено на тепло.

Следовательно, тепловой КПД первой ступени можно определить как

$$\eta_{\text{тепл}} = \frac{100(W_{\max} - Q)}{W_{\max}}. \quad (13)$$

При многоступенчатом резонансном ускорителе на следующую ступень затратится энергия, меньшая на величину тепловых потерь Q и энергии, затраченной на ускорение частицы E_k .

4. Скорость частицы, ускоряемой одной ступенью РЭМУ

Со стороны магнитного поля соленоида на ферромагнитную частицу будет действовать сила

$$F = k_u S_c B H, \quad (14)$$

где B – индукция магнитного поля в точке, соответствующей центру массы частицы; H – напряженность магнитного поля; S_c – площадь сечения соленоида; k_u – коэффициент пропорциональности, зависит от геометрических и магнитных свойств частицы, в случае ферромагнетика – от числа магнитных доменов в объеме.

Напряженность магнитного поля можно выразить через магнитную индукцию:

$$H = \frac{B}{\mu\mu_0}; \quad \mu = 1.$$

Тогда сила, действующая на частицу, равна:

$$F = \frac{k_u S_c B^2}{\mu_0}. \quad (15)$$

При прохождении частицы по оси симметрии соленоида индукция магнитного поля будет меняться согласно формуле:

$$B(x) = \frac{\mu_0 \mu i n}{2} \left(\frac{x}{\sqrt{x^2 + r^2}} + \frac{(l-x)}{\sqrt{(l-x)^2 + r^2}} \right), \quad (16)$$

где i – сила тока через тяговый соленоид; l – длина соленоида; r – радиус соленоида; n – количество витков соленоида; x – текущее положение центра массы частицы на оси соленоида относительно конца катушки, от которого началось ускорение частицы.

Подставив все данные в формулу (15), получим силу, действующую на частицу в точке x в момент времени t от момента замыкания ключа:

$$F = \frac{k_u S_c \mu_0}{4} \times \left(\frac{\mu E e^{-\frac{R}{2L}t} \sin \left(t \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2} \right) n}{L \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2}} \times \left(\frac{x}{\sqrt{x^2 + r^2}} + \frac{(l-x)}{\sqrt{(l-x)^2 + r^2}} \right) \right)^2. \quad (17)$$

Следует заметить, что параметр «координата частицы x » зависит от результата вычисления этой формулы, в предыдущий момент времени t_{-1} , координату x можно найти следующим образом:

$$x = x_0 + v_0 dt + \frac{adt^2}{2}, \quad (18)$$

где x_0 – положение в начальный момент времени; v_0 – начальная скорость; a – ускорение.

Ускорение равно:

$$a = \frac{F}{m}, \quad (19)$$

где m – масса частицы.

Скорость частицы

$$v = v_0 + adt.$$

Этапы вычисления скорости:

$$1) \left[a. \frac{dF_1}{dt} = z \frac{k_u S_c \mu_0}{4} \times \left(\frac{\mu E e^{-\frac{R}{2L}dt} \sin \left(dt \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2} \right) n}{L \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2}} \times \left(\frac{x}{\sqrt{x^2 + r^2}} + \frac{(l-x)}{\sqrt{(l-x)^2 + r^2}} \right) \right)^2 \right]$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \times \left(\frac{x_0}{\sqrt{x_0^2 + r^2}} + \frac{(l - x_0)}{\sqrt{(l - x_0)^2 + r^2}} \right); \\ x_0 > 0,5l, \quad z = -1; \quad x_0 < 0,5l, \quad z = 1; \\ \text{б. } da_1 = \frac{dF_1}{m}; \\ \text{в. } x_1 = x_0 + v_0 dt + \frac{da_1 dt^2}{2}; \\ \text{д. } v_1 = v_0 + da_1 dt; \end{array} \right. \quad (20)$$

$$\left. \begin{array}{l} 2) \left\{ \begin{array}{l} \text{а. } dF_2 = z \frac{k_u S_c \mu_0}{4} \times \\ \times \frac{\left(\mu E e^{-\frac{R}{2L} 2dt} \sin \left(2dt \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L} \right)^2} \right) n \right)}{L \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L} \right)^2}} \times \\ \left(\frac{x_1}{\sqrt{x_1^2 + r^2}} + \frac{(l - x_1)}{\sqrt{(l - x_1)^2 + r^2}} \right); \\ x_1 > 0,5l, \quad z = -1; \quad x_1 < 0,5l, \quad z = 1; \\ \text{б. } da_2 = \frac{dF_2}{m}; \\ \text{в. } x_2 = x_1 + v_1 dt + \frac{da_2 dt^2}{2}; \\ \text{д. } v_2 = v_1 + da_2 dt; \end{array} \right\} \\ \dots \end{array} \right. \quad (21)$$

$$\left. \begin{array}{l} n) \left\{ \begin{array}{l} \text{а. } dF_n = z \frac{k_u S_c \mu_0}{4} \times \\ \times \frac{\left(\mu E e^{-\frac{R}{2L} ndt} \sin \left(ndt \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L} \right)^2} \right) n \right)}{L \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L} \right)^2}} \times \\ \left(\frac{x_{n-1}}{\sqrt{x_{n-1}^2 + r^2}} + \frac{(l - x_{n-1})}{\sqrt{(l - x_{n-1})^2 + r^2}} \right); \\ x_n > 0,5l, \quad z = -1; \quad x_n < 0,5l, \quad z = 1; \\ \text{б. } da_n = \frac{dF_n}{m}; \end{array} \right\} \\ \dots \end{array} \right. \quad (22)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{с. } x_n = x_{n-1} + v_{n-1} dt + \frac{da_n dt^2}{2}; \\ \text{д. } v_n = v_{n-1} + da_n dt. \end{array} \right.$$

Из системы видно, что x_n и v_n являются положением и скоростью частицы соответственно на момент времени $t = ndt$.

5. Геометрия катушки

В формуле (17) есть несколько параметров, зависящих от размеров и конструкции соленоида, таких как: индуктивность катушки L , количество витков n , ее сопротивление в составе общего $R = R_L + R_{np}$, а также геометрические параметры: r , l , S_c – радиус катушки, длина и площадь сечения соответственно.

Индуктивность плоской цилиндрической катушки можно рассчитать по формуле

$$L = \frac{S_c n^2 4\pi}{l 10^7}; \quad [\text{Гн}]. \quad (23)$$

Площадь сечения: $S_c = \pi r^2$.

Сопротивление катушки равно:

$$R_L = \frac{\rho l}{S_{np}}, \quad (24)$$

где ρ – удельное сопротивление материала проводника; S_{np} – активная площадь сечения проводника.

Активную площадь сечения проводника S_{np} необходимо рассчитать с учетом поверхностного эффекта. Глубина скин-слоя равна:

$$\Delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi f \mu_{np} \mu_0}}. \quad (25)$$

где f – частота тока, протекающего по проводнику; μ_{np} – магнитная проницаемость проводника.

Площадь активного сечения проводника равна разности полного сечения проводника и площади, по которой не протекает ток. $S_{np} = S_{полн} - S_{св}$;

$$S_{np} = \pi (2\Delta r_{np} - \Delta^2); \quad (26)$$

Если $\Delta > r_{np}$, то $S_{np} = \pi r_{np}^2$.

6. Результаты моделирования

Пусть все частицы состоят из одного материала, тогда коэффициент k_u , характеризующий магнитные свойства вещества частицы, постоянен, и систему ускорителя нужно корректировать, только исходя из массы частицы. Параметры, позволяющие это сделать, – емкость накопителя и индуктивность тягового со-

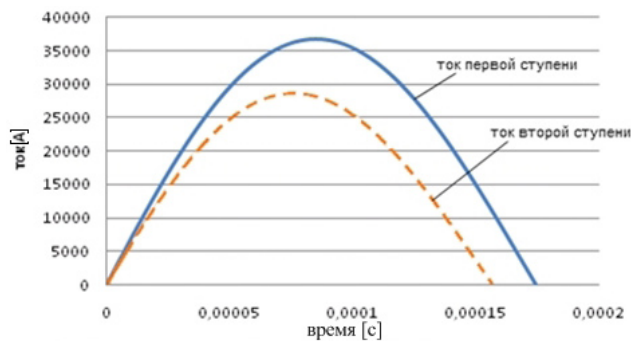


Рис. 3. Форма тока один полупериод

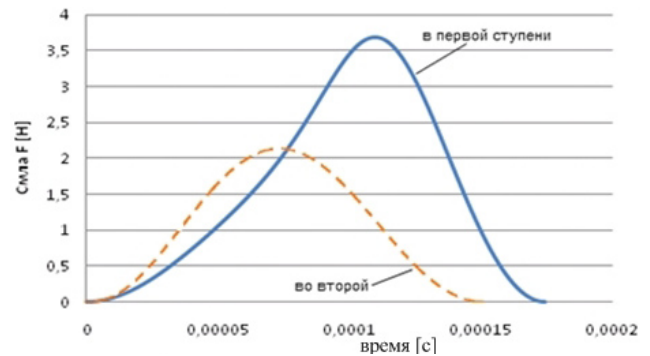


Рис. 4. Ускоряющая сила, действующая на частицу

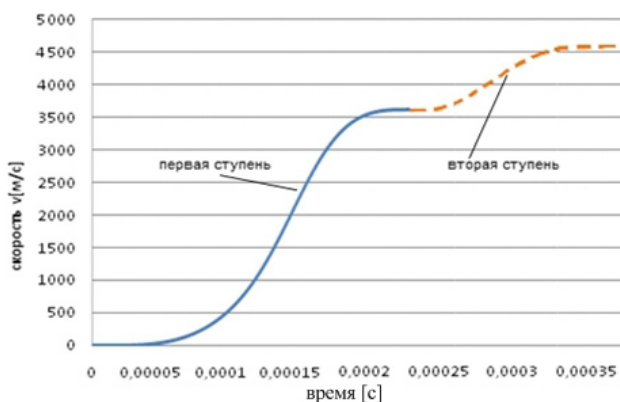


Рис. 5. Изменение скорости частицы массой 1 г при пролете двух ступеней ускорителя

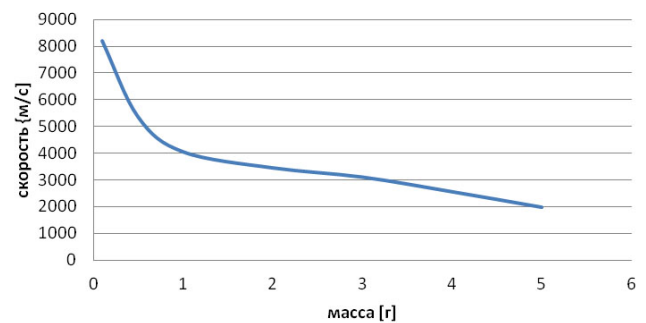


Рис. 6. Зависимость скорости частицы от ее массы (частицы от 5 до 0,1 г)

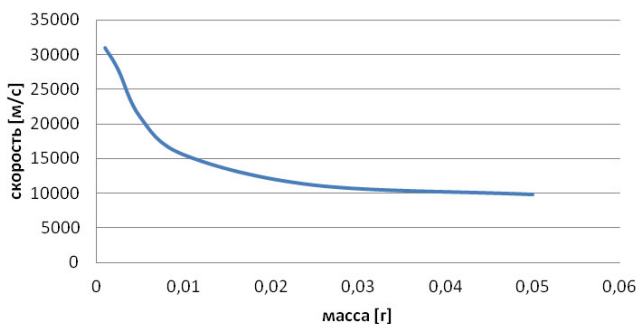


Рис. 7. Зависимость скорости частицы от ее массы (частицы от 0,05 до 0,001 г)

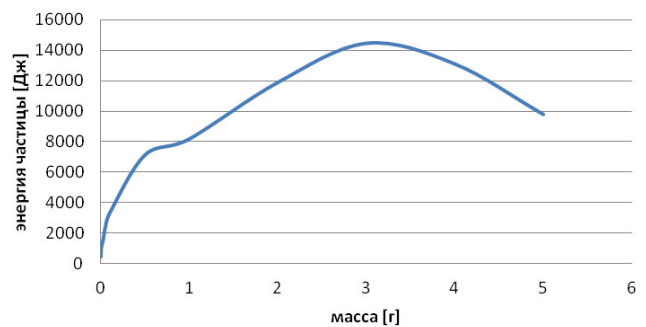


Рис. 8. Зависимость энергии от массы частицы

леноида. Емкость можно изменять, добавляя или отключая конденсаторы от батареи, а индуктивность — переставляя контакт с витка на виток. На рис. 3 представлены графики процессов при ускорении ферромагнитной частицы массой 1 г.

Из графика на рис. 3 видно, что ток, протекающий во второй ступени меньше, чем в первой; это вызвано потерями энергии и затратами на разгон частицы в первой ступени. Период полуволны во второй ступени сократился на 100 мкс.

Так как ток, протекающий через тяговый соленоид второй ступени, меньше, чем в первой, ускоряющая сила тоже уменьшается, что показано на рис. 4. Поэтому каждая последующая

ступень будет давать более низкий прирост скорости, чем предыдущая, но, так как используется энергия одного накопителя для нескольких ступеней, КПД ускорителя в целом будет увеличиваться с ростом числа ступеней. На рис. 5 представлен график скорости ускоряемого объекта.

Для частиц с массой в диапазоне от 0,001 до 0,05 г (рис. 6) и от 1 до 5 г (рис. 7) были произведены расчеты скорости и энергии после ускорения на двух ступенях резонансного ускорителя. Из графиков видно, что с уменьшением массы частицы максимальная скорость увеличивается, но эффективность передачи энергии уменьшается. На рис. 8 приведена зависимость энергии ускоряемого объекта от его массы.

Заключение

Для частиц массой от 1 до 5 г эффективность передачи энергии от конденсаторных накопителей ускоряемому объекту максимальна и достигает 50 %, что выше показателей современных электромагнитных ускорителей. Максимальная скорость при массе частиц менее 0,01 г может достигать 30 км/с при энергии накопителя 28 кДж.

Работа выполнена при поддержке программы ФЦП «Кадры», контракт № П889.

Список литературы

1. Патент России № 2331033 С1. Васильев Е.В. Многоступенчатый электромагнитный ускоритель с датчиком ускорения. Оpubл. От 10.08.2008, Бюл. 22.
2. Патент РФ № 2324249 С1. Васильев Е.В. Многоступенчатый ускоритель с бегущим переключением соленоидов. Оpubл. От 10.05.2008, Бюл. 13.
3. Алиев И.И. Справочник по электротехнике и электрооборудованию. М.: Высшая школа, 2000. 255 с.
4. Выгодский М.Я. Справочник по высшей математике. М.: АСТ, 2006. С. 555–558.
5. Иродов И.Е. Основные законы электромагнетизма. Изд. 2-е, стереотип. М.: Высшая школа, 1991. 288 с.

The accelerator electromagnetic resonant

K.I. Sukhachev, N.D. Semkin, A.V. Piyakov

Are presented, the theory, settlement parameters and a principle of action of the resonant electromagnetic accelerator, allowing to disperse firm ferromagnetic particles and bunches of particles till the speeds of 30 km/s. Essential difference of the described accelerator from existing that at shell movement on an accelerating path, solenoids are connected serially, and in each new oscillatory contour occurs a resonant recharge of the store to increasing frequency of free fluctuations.

Keywords: resonance accelerator, electromagnetic accelerator, coil accelerator, ferromagnetic materials, modeling of particle acceleration.

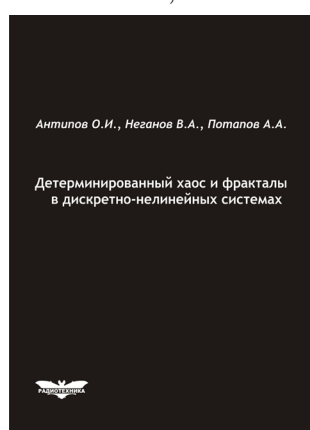
Антипов, О.И.

Детерминированный хаос и фракталы в дискретно-нелинейных системах / О.И. Антипов, В.А. Неганов, А.А. Потапов. – М.: Радиотехника, 2009. – 235 с., ил.

ISBN 978-5-88070-237-4

УДК 530.1:621.372+621.396

ББК 32.96



Антипов О.И., Неганов В.А., Потапов А.А.

Детерминированный хаос и фракталы
в дискретно-нелинейных системах

В монографии рассмотрены явления детерминированного хаоса и фрактальности в дискретно-нелинейных системах на примере устройств импульсной силовой электроники, приведены некоторые основные определения современной нелинейной динамики и некоторые математические методы целочисленных и дробных мер.

Представленные явления стохастической работы могут наблюдаться в широком классе систем с переменной структурой, действие которых может быть описано системами дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами, скачкообразно меняющими свои значения с течением времени в зависимости от состояния системы. Объектами исследования явились импульсные стабилизаторы напряжения различных типов и структур. Научной новизной является применение как фрактальных, так и мультифрактальных мер детерминированного хаоса к анализу стохастической работы импульсных стабилизаторов.

Для специалистов, интересующихся проблемами детерминированного хаоса, численным моделированием дискретно-нелинейных систем.