

## Катушечный ускоритель твердых тел

К.И. Сухачёв, Н.Д. Сёмкин

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

Проведены анализ катушечных электромагнитных ускорителей; математическое моделирование работы одной ступени электромагнитного ускорителя. Исследовано влияние параметров тяговых катушек, начальных условий и материала частиц на конечную скорость.

*Ключевые слова:* электромагнитный катушечный ускоритель, резонансный ускоритель, ферромагнетики, моделирование магнитного поля и ускоряющей силы.

### Введение

Проблема изучения высокоскоростного воздействия частиц на материалы космических аппаратов возникла более пятидесяти лет назад. Однако вследствие появления новых материалов [1] и все увеличивающейся концентрации техногенных высокоскоростных частиц на орбитах Земли проблема продолжает оставаться актуальной и на сегодняшний день. Как показала практика, наиболее целесообразным является лабораторное моделирование столкновения ускоренных частиц с различными материалами, так как при этом возможны не только высокая повторяемость и контролируемость эксперимента, но и измерение параметров частиц с достаточной достоверностью. Так как на космические аппараты воздействуют частицы в широком диапазоне масс, то моделировать их с помощью одного устройства затруднительно. Воздействие частиц микронного диапазона моделируется с помощью электростатических и электродинамических ускорителей [2; 3]. Для имитации более крупных частиц (до нескольких миллиметров), как правило, применяют легкогазовые системы метания и реже рельсовые электромагнитные ускорители. Данные способы метания тел позволяют получить высокие скорости (до 10 км/с), но при этом их затруднительно применять для моделирования космических условий высокоскоростного удара. Наиболее подходящим для этих целей является катушечный электромагнитный ускоритель, использующий энергию магнитного поля тяговых соленоидов для ускорения ферро-

магнитных тел. В статье описаны процессы, протекающие в катушечных ускорителях; построена модель движения частицы; проведен анализ конструкции таких систем и сделан вывод о возможности использования катушечных ускорителей в экспериментальной физике.

### 1. Моделирование магнитного поля

Любой катушечный ускоритель в простейшем случае состоит из источника электрической энергии (емкостного или индуктивного накопителя) и тягового соленоида. По соленоиду протекает ток, создавая в пространстве внутри и вокруг себя неоднородное магнитное поле, которое, взаимодействуя с магнитными доменами вещества частицы, вызывает его ускорение. Для того чтобы оценить силу, действующую на частицу, необходимо смоделировать магнитное поле соленоидов с током, причем для полноты исследований необходимо рассмотреть разные конструкции катушек. Тяговые катушки независимо от конструкции состоят из кольцевых витков, так как круг обладает минимальной площадью и, следовательно, плотность линий магнитной индукции в нем будет выше.

Рассмотрим один виток катушки, он представляет собой круговой виток радиусом  $R$ , по которому протекает ток. Для построения адекватной модели движения необходимо найти модель поля, позволяющую находить вектор магнитной индукции в любой точке пространства. Модуль магнитной индукции элемента проводника с током  $I(t)$  можно найти по формуле [4]

$$|dB| = \frac{\mu_0}{4\pi} I(t) \frac{dl \sin \alpha}{r^2}, \quad (1)$$

где  $dl$  – элемент проводника с током;  $r$  – вектор, соединяющий точку, в которой необходимо найти величину магнитного поля, и элемент проводника  $dl$ ;  $\alpha$  – угол между элементом  $dl$  и вектором  $r$ .

Пусть ток  $I(t)$  течет по круговому проводнику радиусом  $R$  (рис. 1), тогда можно сделать замену:  $dl = Rdf$ , которая справедлива при малых углах  $df$ . Следует заметить, что магнитное поле кругового витка с током обладает симметрией относительно оси  $OZ$ , поэтому достаточно найти поле в одной из полуплоскостей  $Y0Z$  или  $X0Z$  при выборе последней,  $X, Z$  являются координатами расчетной точки.

Магнитная индукция, создаваемая участком  $dl$ , является векторной величиной, поэтому расчет по формуле (1) следует производить через компоненты:

$$\begin{cases} |dB_X| = \frac{\mu_0}{4\pi} R I(t) \frac{\sin \alpha_X}{r_X^2} df, \\ |dB_Y| = \frac{\mu_0}{4\pi} R I(t) \frac{\sin \alpha_Y}{r_Y^2} df, \\ |dB_Z| = \frac{\mu_0}{4\pi} R I(t) \frac{\sin \alpha_Z}{r_Z^2} df. \end{cases} \quad (2)$$

Найдем проекции вектора  $r$  и синуса угла  $\alpha$ :

$$\begin{cases} r_X = \sqrt{R^2 + X^2 - R(2X \cos f + R \sin^2 f)}, \\ r_Y = R \sin f, \\ r_Z = Z, \\ \sin \alpha_X = \cos f, \\ \sin \alpha_Y = \sin f, \\ \sin \alpha_Z = 1. \end{cases} \quad (3)$$

Подставим (3) в (2) и проинтегрируем по всему кольцу:

$$\begin{cases} B_X = \frac{\mu_0}{4\pi} I(t) R \times \\ \times \int_0^{2\pi} \frac{\sin^2 f}{R^2 + X^2 - R(2X \cos f + R \sin^2 f)} df, \\ B_Y = \frac{I(t) \mu_0}{2}, \\ B_Z = \frac{\mu_0 R}{2Z^2} I(t). \end{cases} \quad (4)$$

Тогда индукция, создаваемая кольцом на плоскости  $X0Z$ , в точке с координатами  $X, Z$  равна  $|B| = \sqrt{B_X^2 + B_Y^2 + B_Z^2}$ . Для перехода от еди-

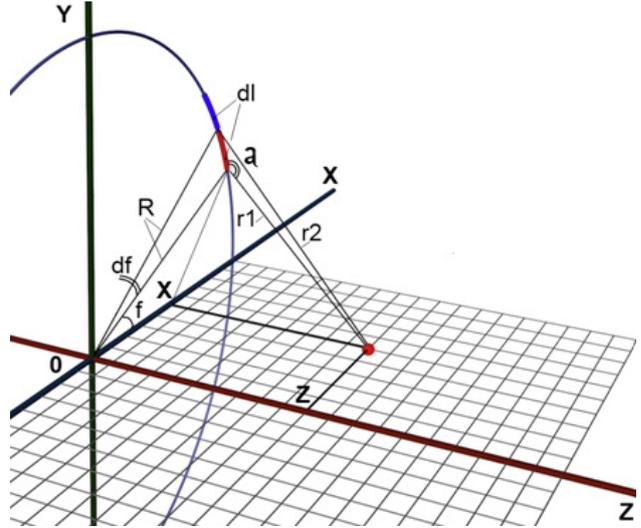


Рис. 1. Модель кругового витка с током

ничного кольца с током к катушке необходимо просуммировать компоненты вектора магнитного поля, создаваемого всеми витками катушки. Тогда модуль вектора магнитной индукции, создаваемый катушкой, состоящей из  $n$  слоев по  $m$  витков в каждом, в точке с координатами  $X$  и  $Z$  будет равен

$$|B| = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sqrt{(B_{0Z})_{ij}^2 + (B_{0X})_{ij}^2}.$$

Необходимо учесть, что для каждого витка координата расчетной точки  $Z$  будет сдвинута на величину, равную шагу витков катушки.

Симметрия магнитного поля катушки дает возможность провести вращение полученного среза поля, лежащего на плоскости  $X_G, 0, Z_G$ , и рассчитать магнитную индукцию в любой точке с координатами  $X_G, Y_G, Z_G$ , проведя следующее преобразование:  $Z = Z_G, X = \sqrt{X_G^2 + Y_G^2}$ , что позволяет получить трехмерную картину поля.

Чтобы от картины поля перейти к реальному значению, необходимо определить значение тока, протекающего в рассматриваемый момент времени по катушке. Для данной модели примем, что источником энергии является конденсаторная батарея емкостью  $C$ , заряженная до напряжения  $U_C(0)$ ;  $L_{sum}$  – общая индуктивность контура, в которую основной вклад вносит индуктивность самой тяговой катушки,  $R_{sum}$  – суммарное сопротивление контура. Тогда ток можно найти по формуле [5]

$$I(t) = \frac{U_C(0)}{L_{sum}(d_1 - d_2)} (e^{d_1 t} - e^{d_2 t}), \quad (5)$$

где

$$d_{1,2} = -\frac{R_{sum}}{2L_{sum}} \pm \sqrt{\frac{CR_{sum}^2}{4CL_{sum}} - 4}.$$

## 2. Ускоряющая сила

Следующим шагом в построении модели движения является определение силы, действующей со стороны неоднородного магнитного поля на ферромагнитное тело [6]. Известно, что компоненты силы, действующие на любой магнитный диполь, равны

$$\begin{cases} F_X = m \operatorname{grad} B_X, \\ F_Y = m \operatorname{grad} B_Y, \\ F_Z = m \operatorname{grad} B_Z. \end{cases} \quad (6)$$

где  $m$  – магнитный дипольный момент.

Рассмотрим кубический элемент ферромагнитной частицы, помещенной в магнитное поле. Материал элемента перейдет в состояние равномерной намагниченности при величине внешнего поля, большей его индукции насыщения. Это означает, что все атомные магнитные дипольные моменты имеют примерно одинаковое направление. Это условие достижимо только в равномерном внешнем магнитном поле, по линиям магнитной индукции которого выстраиваются атомные магнитные моменты. Из этого следует, что размеры кубического элемента должны быть настолько малы, что внешнее поле в его области можно было считать равномерным. В таких условиях элемент намагниченного вещества можно считать магнитным диполем с собственным магнитным дипольным моментом  $M$ , равным произведению эффективных атомных моментов  $(\mu_J)_{MAX}$  на количество атомов  $N$  [7]. Количество атомов в элементе объема частицы равно

$$N = \frac{N_A \rho_{mat} \Delta a^3}{M_{mat}}, \quad (7)$$

где  $N_A$  – число Авогадро;  $\rho_{mat}$ ,  $M_{mat}$  – плотность и молярная масса материала элемента частицы соответственно;  $\Delta a$  – параметр кубического элемента.

Основной вклад в атомный магнитный момент многоэлектронного атома вносит электронная оболочка [8]. Для полного квантового описания многоэлектронной оболочки необходимо знать ее конфигурацию, т. е. число электронов с заданными квантовыми числами  $l$  и  $n$ , и полные моменты – орбитальный  $L$  и спиновый  $S$ .

Эффективный магнитный момент атома можно рассчитать по формуле

$$(\mu_J)_{MAX} = g_J J \mu_B. \quad (8)$$

Здесь

$$g_J = 1 + \frac{J(J+1) + S(S+1) - L(L+1)}{2J(J+1)}$$

– фактор Ланде многоэлектронного атома;  $J = L \pm S$  – суммарное квантовое число полного момента электронной оболочки атома,  $\mu_B = e\hbar / (2m_e)$  – магнетон Бора.

Тогда компоненты силы, действующей на ускоряемое тело:

$$\begin{cases} F_X = \sum_{i=1}^k (\mu_J)_{MAX} \frac{N_A \rho_{mat} \Delta a^3}{M_{mat}} \operatorname{grad} B_{Xi}; \\ F_Y = \sum_{i=1}^k (\mu_J)_{MAX} \frac{N_A \rho_{mat} \Delta a^3}{M_{mat}} \operatorname{grad} B_{Yi}; \\ F_Z = \sum_{i=1}^k (\mu_J)_{MAX} \frac{N_A \rho_{mat} \Delta a^3}{M_{mat}} \operatorname{grad} B_{Zi}. \end{cases} \quad (9)$$

Из выражения для силы (9) следует, что ускорение частицы зависит не столько от величины поля, сколько от его неоднородности, а также свойств материала. Материал должен обладать высокой магнитной восприимчивостью, чтобы можно было допустить полную ориентированность моментов по линиям внешнего поля, и, кроме того, электронная оболочка атомов вещества должна обладать максимальным магнитным моментом. Больше всего этим параметрам отвечают элементы группы железа и некоторые редкоземельные металлы. Параметры некоторых из них приведены в табл. 1.

Таким образом все усилия по увеличению ускоряющей силы следует направить на увеличение неоднородности поля по направлению движения частицы, при этом необходимо сохранить однородность поля по другим направлениям, чтобы не вызвать сильного отклонения от прямолинейной траектории. Для этого нужно рассмотреть разные конструкции тяговых катушек и построить картину поля, создаваемого ими.

## 3. Уравнение движения

Расчет движения частицы по тракту одноступенчатого электромагнитного ускорителя осуществлен численным методом с использованием программы, позволяющей отказаться от интерполяции функции по точкам сетки поля. Это достигается тем, что поле считается не во всем тракте, а локально в окрестностях ускоряемой частицы, в точках адаптивной сетки, совпада-

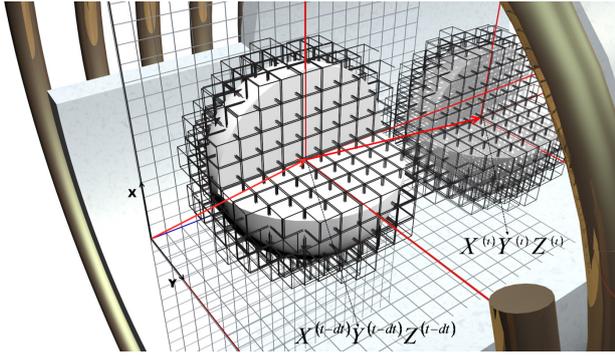


Рис. 2. Компьютерная модель движения частицы

ющей с сеткой разбиения тела, т. е. все расчетные точки поля совпадают с координатами центра масс элементов объема тела (рис. 2). После расчета градиента поля и определения силы, действующей на тело, определяется смещение координат сетки тела за интервал времени, после чего осуществляется новый локальный расчет области поля. Такой подход позволяет создавать максимально полную эволюционную модель, так как каждый шаг основного цикла есть возможность оценивать изменения всех переменных и параметров вследствие явлений и процессов, протекающих в предыдущий момент времени.

Перемещение тела определяется из координат центра масс, рассчитанных в каждый момент времени, по следующим соотношениям:

$$\begin{cases} a_x^{(t)} = F_x^{(t)} / m, \\ a_y^{(t)} = F_y^{(t)} / m, \\ a_z^{(t)} = F_z^{(t)} / m, \end{cases} \begin{cases} v_x^{(t)} = v_x^{(t-dt)} + a_x^{(t)}t, \\ v_y^{(t)} = v_y^{(t-dt)} + a_y^{(t)}t, \\ v_z^{(t)} = v_z^{(t-dt)} + a_z^{(t)}t, \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} X^{(t)} = X^{(t-dt)} + v_x^{(t-dt)} + a_x^{(t)}t / 2, \\ Y^{(t)} = Y^{(t-dt)} + v_y^{(t-dt)} + a_y^{(t)}t / 2, \\ Z^{(t)} = Z^{(t-dt)} + v_z^{(t-dt)} + a_z^{(t)}t / 2. \end{cases}$$

#### 4. Анализ магнитного поля катушек

Рассмотрим срез поля катушки, через которую пропущен ток в один ампер. Конструктивные параметры и величина магнитной индукции поля представлены на рис. 3. Из графика магнитного поля видно, что максимальная неоднородность поля по оси Z наблюдается в области начала обмоток, внутри катушки ускорение, сообщаемое телу, будет значительно ниже, также видно, что на всем протяжении катушки магнитная индукция увеличивается при движении от оси катушки к границе обмотки, что неизбежно приведет к появлению радиальной со-

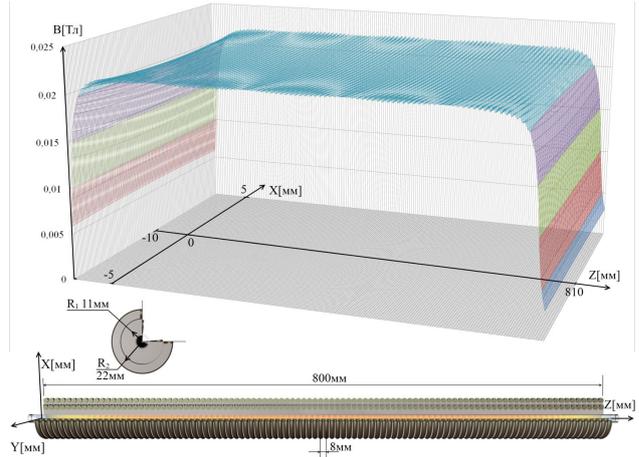


Рис. 3. Конструкция и магнитное поле длинной катушки

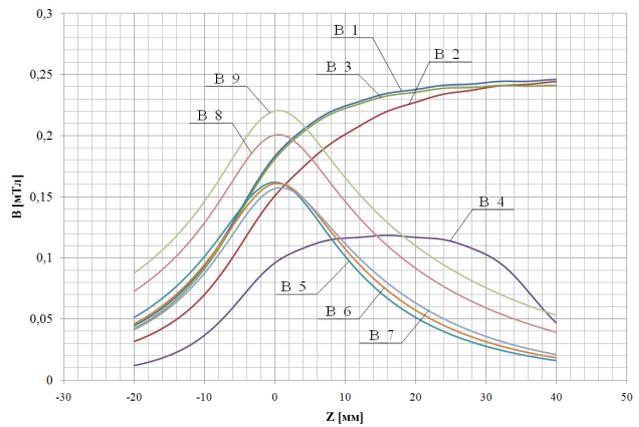


Рис. 4. Магнитная индукция катушек различной конструкции при одинаковом токе

ставляющей силы и вызовет отклонение частицы от прямолинейного направления. Прежде чем перейти непосредственно к моделированию движения частицы, приведем анализ конструкций нескольких катушек, чтобы выбрать оптимальный вариант, обладающий максимальной неоднородностью поля по оси движения частицы, параметры рассмотренных конструкций приведены в табл. 2.

По выражению (4) была рассчитана магнитная индукция для катушек различных форм (табл. 2). Результаты вычислений вектора магнитной индукции на оси катушек приведены на рис. 4. По всем катушкам течет одинаковый ток, равный одному амперу.

Из приведенных на рис. 4 графиков видно, что максимальную магнитную индукцию создают катушки под номерами 1 и 3, минимальную магнитную индукцию – однослойная катушка под номером 4, спиральные катушки 5–7 при таком же количестве витков, что и 4, создают почти вдвое большее поле. Более наглядно силовые характеристики катушек отражают графи-

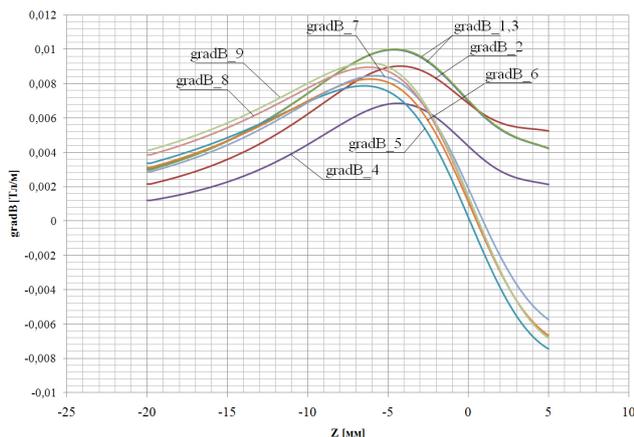


Рис. 5. Градиент магнитного поля катушек различной конструкции при одинаковом токе

ки градиентов полей на осях катушек (рис. 5), из которых видно, что почти все катушки при одинаковом токе обладают примерно одинаковыми тяговыми характеристиками, поэтому выгодно отличаются спиральные катушки 5–9, так как обладают более простой конструкцией и малым количеством витков, что позволяет достигать более высоких токов при прочих равных параметрах. Причем спиральные катушки со смещенными слоями создают больший градиент поля, чем катушки без смещения. Особенностью спиральных катушек также является то, что градиент, а следовательно, и ускоряющая сила, резко меняет свой знак при прохождении центра катушки. В цилиндрических многовитковых катушках тоже происходит смена направления силы при прохождении центра, но характер намного более плавный, чем в спиральных. Из этого следует, что требования к синхронизации включения спиральных катушек с положением ускоряемой частицы значительно выше, чем в случае с цилиндрическими катушками.

На рис. 6 представлены графики градиента магнитного поля, создаваемые катушками с параметрами, указанными в табл. 2, при работе от одного накопителя с энергией 100 кДж.

Из графиков на рис. 6 видно, что максимальный градиент поля по оси  $Z$  создает катушка под номером 7 (табл. 2), при этом она обладает относительно простой конструкцией и малым количеством витков. Данная конструкция катушки будет использована для дальнейшего моделирования ускорителя.

## 5. Моделирование движения частицы

В качестве топологии ускорителя используем резонансный электромагнитный ускоритель [9],

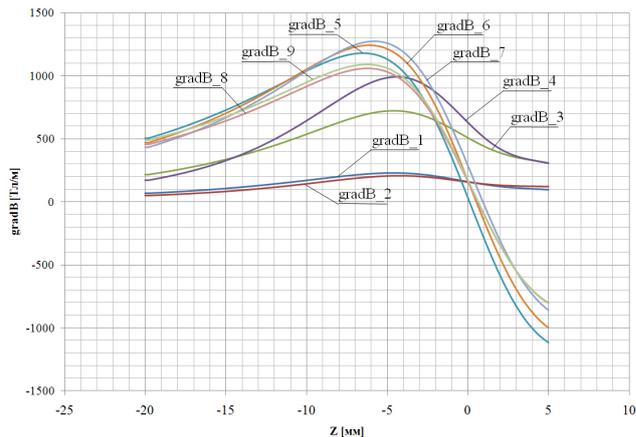


Рис. 6. Градиент магнитного поля катушек различной конструкции при работе от одного источника энергии

так как он обладает максимальной эффективностью передачи энергии от накопителя катушке. В качестве источника энергии используется конденсаторный накопитель с энергией 100 кДж. Рассмотрим начальные условия для выбора оптимальных параметров. Важными из них являются координаты центра масс частицы в момент включения катушки и начальная скорость объекта. Для моделирования массу частицы примем равной 0,11 г, что соответствует шарообразному железному объекту диаметром 3 мм. Шаг сетки объекта равен 0,3 мм. Рассматриваемые начальные условия приведены в табл. 3.

На рис. 7 отражены графики скорости частиц для разных начальных положений центра масс объекта. Рассматриваемый интервал времени в графиках скорости соответствует одному полупериоду колебательного процесса, возникающему в каждой ступени резонансного электромагнитного ускорителя. График тока, протекающего через тяговый соленоид, для наглядности приведен на рис. 5.

По результатам моделирования при разных начальных координатах можно сделать вывод, что координаты частицы в момент включения сильно влияют на конечную скорость. Графики 1–3, соответствующие начальным условиям из табл. 3, являются оптимальными, так как в момент, когда частица подлетает к центру катушки, происходит размыкание цепи и ток через катушку не протекает. Такой режим создает максимальное ускорение частицы по оси катушки при минимальном отклонении от прямолинейного движения рис. 8.

При малом смещении частицы по оси  $Z$ , которому соответствуют начальные условия под номером 4–6 в табл. 3, частица начинает терять

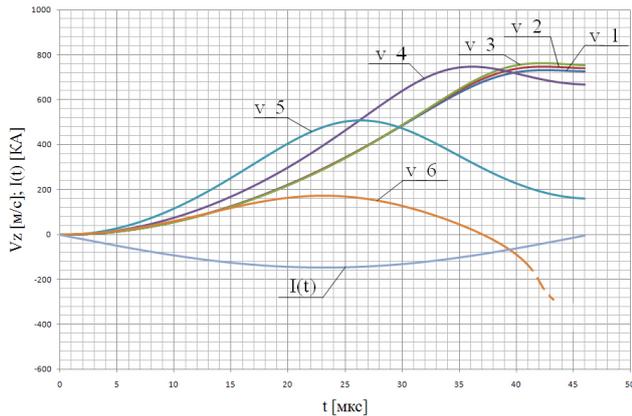


Рис. 7.  $V_z$ -составляющая скорости частицы при различных начальных условиях и токе катушки

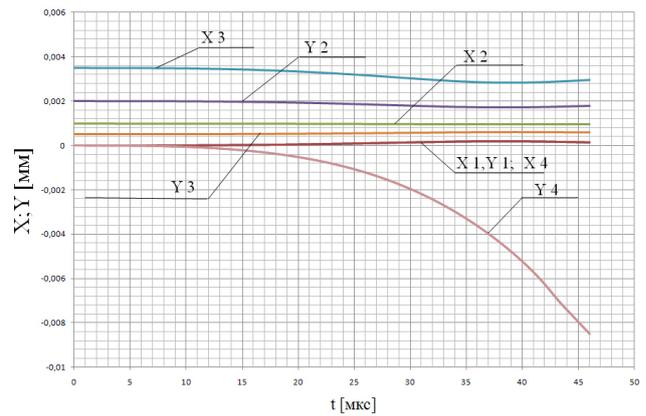


Рис. 8. Отклонение частицы от прямолинейной траектории по координатам X и Y

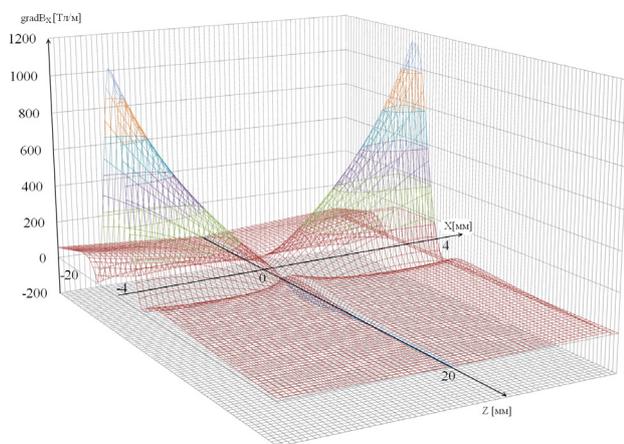


Рис. 9. Градиент магнитной индукции поля по направлению оси X

скорость уже на четверти периода тока (рис. 5). При этом она сильно отклоняется от прямолинейной траектории движения (график Y4 на рис. 6). Это объясняется тем, что градиент поля по направлению X и Y в области катушки резко возрастает (рис. 9). Центр катушки совпадает с началом координат. Магнитная частица, попавшая в эту область, будет притягиваться к виткам катушки, отклоняясь от прямолинейной траектории.

Влияние массы и материала частицы на конечную скорость приведено на рис. 10. В табл. 4 содержатся параметры моделируемых частиц.

Из графиков на рис. 10 видно, что масса частиц в диапазоне от 0,1 мкг до нескольких граммов на конечную скорость оказывает слабое влияние; это связано с тем, что сила действующая на магнитное тело линейно зависит от массы тела. При уменьшении массы объекта линейно уменьшается его собственный магнитный момент и, следовательно, ускоряющая сила.

В результате анализа работы одной ступени резонансного катушечного электромагнитного

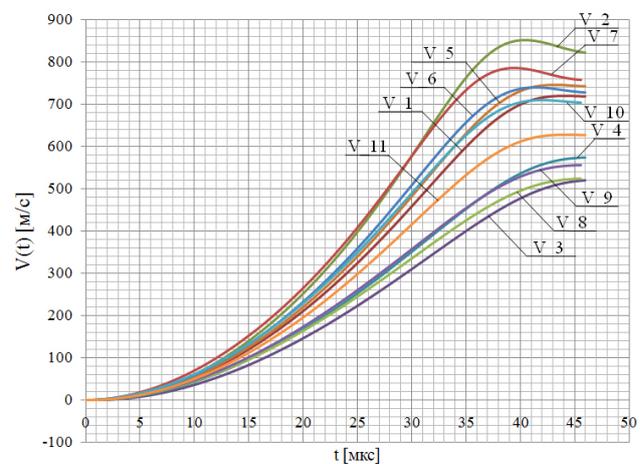


Рис. 10. Зависимость скорости частиц разной массы и материала от времени

ускорителя можно сделать вывод, что оптимальным является центральное расположение частицы с удалением от центра катушки, равным диаметру внутренних витков. Наиболее неоднородное поле создает спиральная катушка со смещением витков. Приведенная математическая модель одной ступени резонансного электромагнитного ускорителя применима для анализа ускорения ферромагнитных частиц, что необходимо для соблюдения условия сонаправленности магнитных моментов доменов вещества. Следует заметить, что для реальных испытаний нужно выбирать материал с более высокой температурой Кюри. В процессе ускорения материал будет нагреваться из-за деформаций, и поэтому тело может выйти из состояния намагниченности и прекратить взаимодействие с внешним магнитным полем. Моделирование показало, что одна ступень дает приращение энергии частицы массой 2,1 г, равное 540 Дж, что составляет 0,5 % от энергии накопителя, при этом из накопителя расходуется 750 Дж, что соответствует эффективности ускорения, равной примерно 75 %.

В будущем для увеличения полноты модели в расчет будет включен анализ затрат энергии, вызванный деформацией тела в процессе ускорения.

### Заключение

1. При принятых допущениях и оптимальных начальных условиях, согласно результатам моделирования, можно заключить, что все ступени резонансного электромагнитного катушечного ускорителя наиболее эффективно передают энергию ферромагнитным объектам большей массы и объема.

2. Ступени ускорителя дают конечное приращение энергии, которое невозможно увеличить без применения сверхпроводников и дальнейшего повышения напряжения накопителя.

3. Резонансный электромагнитный катушечный ускоритель целесообразно делать многоступенчатым (более 100 ступеней), чтобы израсходовать всю энергию накопителя и придать максимальную скорость частице. Многоступенчатая конструкция обеспечивает более плавное ускорение тел, чем другие типы электромагнитных ускорителей макротел. Эту особенность можно применить для ускорения макротел, не терпящих перегрузки, до высоких скоростей.

4. Перечисленные особенности делают применение катушечного электромагнитного ускорителя нецелесообразным для ускорения ферромагнитных микротел и имитации воздействия условий космической среды.

Таблица 1

Некоторые термы элементов группы железа

Атомный номер	Элемент	Электронная конфигурация внешней оболочки	$g_J$	$g_J J$ , [ $\mu_B$ ]
65	Tb	$4f^8 5d 6s^2$	24/12	12
67	Ho	$4f^{11} 6s^2$	18/15	9
23	V	$3d^3 4s^2$	2/5	0,6
24	Cr	$3d^5 4s$	2	6
25	Mn	$3d^5 4s^2$	2	5
26	Fe	$3d^6 4s^2$	3/2	6
27	Co	$3d^7 4s^2$	4/3	6
28	Ni	$3d^8 4s^2$	5/4	5
29	Cu	$3d^{10} 4s^2$	2	1

Таблица 2

Параметры катушек

№ катушки	Количество слоев	Радиусы слоев [мм]	Число витков в одном слое	Межвитковый шаг [мм]	Смещение слоев [мм]
1	2	1-11; 2-22	100	8	0
2	2	1-11; 2-22	100	8	10
3	2	1-11; 2-22	10	8	0
4	1	1-11	5	8	0
5	5	1-11; 2-17; 3-23; 4-29; 5-35	1	0	0
6	5	1-11; 2-17; 3-23; 4-29; 5-35	1	0	1
7	5	1-11; 2-17; 3-23; 4-29; 5-35	1	0	2

Таблица 2 (Продолжение)

№ катушки	Количество слоев	Радиусы слоев [мм]	Число витков в одном слое	Межвитковый шаг [мм]	Смещение слоев [мм]
8	8	1-11; 2-17; 3-23; 4-29; 5-35; 6-41; 7-47; 8-53	1	0	1
9	10	1-11; 2-17; 3-23; 4-29; 5-35; 6-41; 7-47; 8-53; 9-59; 10-65	1	0	1

Таблица 3

Начальные условия

№	Масса [мг]	Смещение по оси Z [мм]	Смещение по оси X [мм]	Смещение по оси Y [мм]
1	110	-12	0	0
2	110	-12	1	2
3	110	-12	3,5	0,5
4	110	-10	0	0
5	110	-5	0	0
6	110	-1	0	0

Таблица 4

Параметры частиц

№	Масса частицы [г]	Материал частицы	Плотность материала [г/см <sup>3</sup> ]	Молярная масса [г/моль]	$g_J J$ , [ $\mu_B$ ]
1	2,1	Fe	7,874	55,847	6
2	2,1	Co	8,9	58,9332	6
3	2,1	Ni	8,902	58,6934	5
4	2,1	Ho	8,795	164,93032	9
5	2,1	Tb	8,229	158,92534	12
6	0,11	Fe	7,874	55,847	6
7	0,11	Co	8,9	58,9332	6
8	0,11	Ni	8,902	58,6934	5
9	0,11	Ho	8,795	164,93032	9
10	0,11	Tb	8,229	158,92534	12
11	0,00008	Fe	7,874	55,847	6

### Список литературы

- Акишин А.И. Космическое материаловедение. М.: МГУ, 2007. 209 с.
- Variable-frequency radially-stable micrometeoroid accelerator / D.G. Becker [et al.] // Review of Scientific Instruments. 1965. V. 36. № 10. P. 1480-1481 (перевод: Ускоритель для микрометеоритов / Д.Г. Беккер [и др.] // Приборы для научных исследований. 1965. № 10. С. 86-87).
- Моделирование частиц космического мусора с помощью электромагнитного и электроплазменного ускорителя / Н.Д. Семкин [и др.] // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2011. Т. 14. № 1. С. 79-85.
- Парселл Э. Берклевский курс физики. Изд. 3-е, испр. Т. II. Электричество и магнетизм. М.: Наука, 1983. С. 205-211.
- Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники: электрические цепи. М.: Высшая школа, 1996. 580 с.
- Парселл Э. Берклевский курс физики. Изд. 3-е, испр. Т. II. Электричество и магнетизм. М.: Наука, 1983. С. 355-363.

7. Парселл Э. Берклевский курс физики. Изд. 3-е, испр. Т. II. Электричество и магнетизм. М.: Наука, 1983. С. 373–379.
9. Резонансный электромагнитный ускоритель / К.Е. Сухачёв [и др.]. Патент на изобретение RU2466340 С1 от 10.11.2012.
8. Вонсовский С.В. Магнетизм. Магнитные свойства диа-, пара-, ферро-, антиферро и ферримагнетиков. М.: Наука, 1971. С. 24–32. 1032 с.

## Reel accelerator of solid bodies

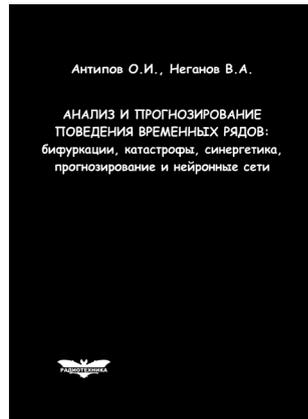
*K.I. Sukhachev, N.D. Semkin*

The analysis of the coil electromagnetic launchers. The mathematical modeling of a single stage of the electromagnetic accelerator. The influence of parameters of traction coils, the initial conditions and the particle material to the final speed.

*Keywords:* the solenoid coil accelerator, resonant accelerator ferromagnets, modeling of the magnetic field and the accelerating force.

**Антипов, О.И.**

**Анализ и прогнозирование поведения временных рядов: бифуркации, катастрофы, синергетика, фракталы и нейронные сети / О.И. Антипов, В.А. Неганов. – М.: Радиотехника, 2011. – 350 с. ISBN 978-5-88070-294-7**



УДК 530.1:621.372+621.396  
ББК 32.96

Монография посвящена объединению нескольких направлений в науке: бифуркаций в нелинейных динамических (или детерминированных) системах, причем внимание уделяется бифуркациям-кризисам, которые отождествляются с катастрофами в синергетике – науке о самоорганизации в сложных системах, где велика роль коллективных, кооперативных эффектов, возникновения порядка – фрактальных структур в турбулентности (или хаосе). В синергетике общим является принцип подчинения, который позволяет исключать большое число переменных в сложных системах и описывать в них сложные процессы. Использование в роли одной из основных количественных характеристик катастроф фрактального показателя Херста связывает фракталы с бифуркациями. Объединение этих четырех направлений позволяет упростить проектирование прогнозирующих нейронных сетей, которое в настоящее время отчасти является искусством.

Даны авторские модификации некоторых известных фрактальных методов, позволяющие проводить более глубокий анализ хаотических процессов. Эти результаты, на наш взгляд, должны являться необходимой частью полного алгоритма построения прогностических моделей, описанного в книге. В частности, описан авторский алгоритм определения временного лага, необходимого для реконструкции аттрактора динамической системы и модификация метода ближайших ложных соседей, которую можно использовать в качестве индикатора приближающейся катастрофы.

Приведены конкретные примеры из таких областей науки, как радиотехника, экономика и медицина.

*Монография представляет интерес для научных работников, аспирантов и докторантов, работающих в области прикладных задач анализа, моделирования и прогнозирования хаотических процессов в нелинейных системах из различных отраслей науки и техники.*