

УДК. 539.1:621.039

РЕЛЬСОВЫЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ С ВНЕШНИМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

2015 © К. И. Сухачёв

Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет)

Определены основные проблемы применения рельсовых электромагнитных ускорителей для ускорения твёрдых тел миллиметрового диапазона. Предложено применение модернизированной системы подмагничивания рельсотрона, описан её принцип действия. Проведено математическое моделирование работы рельсотрона без системы подмагничивания и с ней для ускоряемых тел различной массы. Проведён анализ влияния системы подмагничивания на основные параметры рельсовых электромагнитных ускорителей. Получены графики ускоряющих сил, действующих на объект со стороны основного контура и контуров подмагничивания, и графики скорости якоря и индукции магнитного поля в области ускоряемого объекта. Указаны границы применимости описанной модели. Предложено несколько вариантов конструкции системы подмагничивания рельсотрона, в том числе и многоступенчатая. Исследовано влияние некоторых начальных условий на процесс ускорения объекта в канале рельсового электромагнитного ускорителя. Показана эффективность введения внешнего магнитного поля в канал ускорителя, позволяющая увеличить конечную скорость якоря более чем в два раза при сохранении ресурса рельсовых электродов.

Электромагнитный рельсовый ускоритель, система подмагничивания, рельсотрон, резонансный принцип ускорения, моделирование ускоряющей силы в рельсотроне, эффективность рельсотрона с системой подмагничивания.

doi: 10.18287/1998-6629-2015-14-1-177-189

Введение

В настоящее время для высокоскоростного метания твёрдых тел в научных и практических целях часто используют электромагнитные ускорители [1], в частности рельсовые ускорители. Их популярность объясняется относительной простотой конструкции ускорителя и возможностью получения высоких скоростей ускоряемого тела. Для повышения эффективности рельсовых ускорителей существует несколько методов [2–4]. В данной статье проведён анализ одного из них [4] – введение внешнего магнитного поля в область ускорительного канала рельсового ускорителя. Построена обобщённая итерационная модель рельсотрона, работающего совместно с системой подмагничивания. Модель позволяет оценить эффективность введения дополнительного магнитного поля в систему ускорителя. Кроме того, в первом приближении представленная модель позволяет оценивать

основные параметры обобщённой ускорительной системы, такие как:

- величина токов в контурах и величина магнитной индукции в объёме ускоряемого объекта;
- ускоряющая сила, действующая на объект, и его скорость;
- температуры токопроводящих частей, их сопротивление и индуктивность;
- общая эффективность системы.

Модель может быть полезна для начального анализа и выбора конструкции рельсовых ускорителей с конденсаторными накопителями энергии, применяемых для ускорения металлических тел небольшого размера, массой от миллиграммов до нескольких граммов с системой подмагничивания и без неё. Окончательный подбор параметров системы можно провести только в ходе испытания ускорителя. Проведено моделирование для металлических ускоряемых тел разной массы и объёма при различных параметрах системы ускорителя. Моделирование по-

казало повышение эффективности рельсового ускорителя и увеличение конечной скорости объекта при применении внешней системы подмагничивания рельсотрона для ускоряемых тел любого размера.

Построение математической модели

Рельсовый электромагнитный ускоритель позволяет ускорять объекты до сверхзвуковых скоростей посредством силы Ампера, возникающей при протекании мощного тока по контуру рельс и перемычки, называемой якорем. В простейшем случае (рис. 1) рельсотрон состоит из двух параллельных электродов-рельс, находящегося между ними якоря, силового корпуса, силовых контактов, источника тока и коммутатора.

Такая конструкция позволяет эффективно ускорять довольно крупные тела [5]. Ширина межэлектродного пространства должна быть от 10 мм. При уменьшении расстояния между рельсами эффективность ускорения значительно снижается. Это связано с тем, что при ускорении небольших тел в начальный момент времени, когда якорь ещё неподвижен, электроды испытывают большую токовую перегрузку и подвергаются катастрофической эрозии. При этом могут образоваться перемычки из расплава рельс или якоря, замыкающие часть тока на себя, и тем самым уменьшающие выталкивающую силу. Образование плазмы в межэлектродном пространстве также вызывает снижение эффективности, однако позволяет использовать эффект плазменного поршня для разгона непроводящих твёрдых тел. Таким образом, катастрофическая эрозия становится основным препятствием на пути создания рельсотрона, способного ускорять небольшие тела размером до 1 мм. В работе [4] приведён образец рельсового ускорителя, способного ускорять диэлектрические кубики массой 1 - 10 мг со сторонами 1-2 мм. Авторам удалось преодолеть катастрофическую эрозию в начальный момент путём введения внешнего магнитного поля в меж-

электродное пространство. Внешнее поле создавалось системой подмагничивания рельсотрона (СПР), представляющей собой дополнительную пару контуров, расположенных по обе стороны от основных электродов. Питание на электроды контуров подмагничивания подавалось от отдельного источника с опережением в 20 - 30 мкс относительно момента подачи тока на рельсы. Применение подмагничивания в конструкции, описанной в работе [4], позволило увеличить скорость якоря более чем в три раза: с 1,2 до 4,5 км/с. Такой прирост объясняется не только уменьшением эрозии рельс, но и увеличением силы Ампера, так как перпендикулярные току якоря составляющие магнитного поля рельс и системы подмагничивания складываются. Величина магнитного поля системы подмагничивания в описанной конструкции составляет более 8 Тл, что существенно увеличивает силу выталкивания.

В данной статье проводится анализ и моделирование рельсотрона с модернизированной системой подмагничивания. Большинство ускорителей подобного типа работают на импульсе тока положительной полярности с коротким фронтом и относительно постоянной амплитудой на протяжении длительности импульса. В предлагаемой модели ток, протекающий по контуру рельс, имеет характер затухающих колебаний. Такой режим коммутации позволяет существенно упростить электрическую схему ускорителя, так как не применяются меры по согласованию накопителя и нагрузки. Кроме того, достигается максимальная амплитуда тока, которую можно получить с помощью конденсаторного накопителя. Эквивалентная схема для расчёта переходных процессов в данном случае упрощается и в первом приближении описывается дифференциальным уравнением, которое имеет аналитическое решение. Систему подмагничивания предлагается разделить на несколько независимых секций. На рис. 2 приведена компоновка описываемой конструкции.

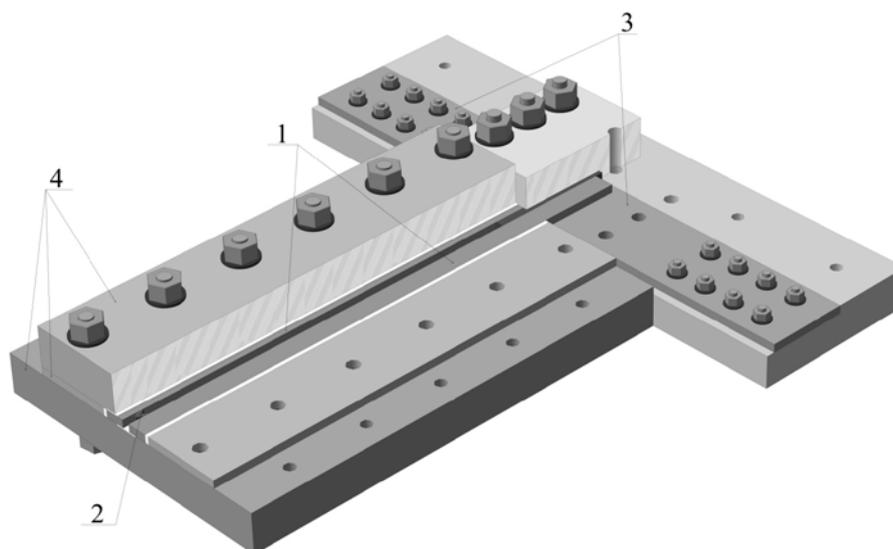


Рис. 1. Рельсотрон: 1 – рельсовые электроды; 2 – якорь; 3 – токоподводящие контакты; 4 – элементы конструкции корпуса рельсотрона

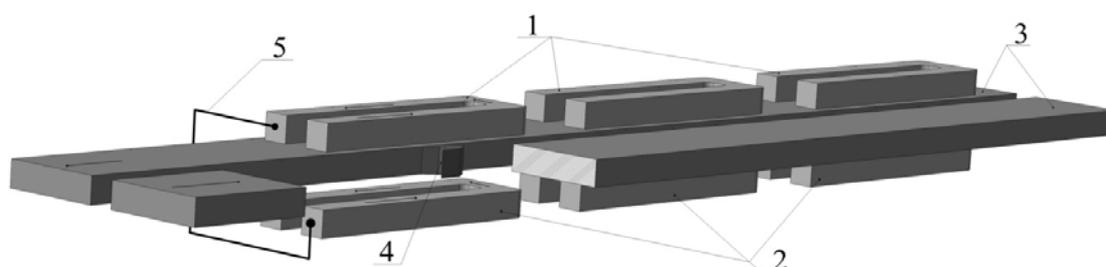


Рис. 2. Компонировка конструкция рельсотрона с модернизированной СПР:
1 – верхние электроды СПР; 2 – нижние электроды СПР; 3 – рельсовые электроды; 4 – якорь;
5 – условное обозначение электрического соединения верхних и нижних электродов СПР

Такая конструкция рельсотрона и СПР позволяет добиться повышения плотности энергии магнитного поля, создаваемого СПР в области нахождения якоря. Применение резонансного разряда накопителя рельсотрона делает необходимой синхронизацию токов обоих контуров: контура рельс и СПР. В противном случае магнитное поле, создаваемое внешними электродами, будет уменьшать величину поля рельс и тем самым снижать ускоряющую силу, действующую на якорь. Для выполнения условия синхронизации частота свободных колебаний в контуре СПР должна быть выше частоты

контура рельс. На каждую полуволну тока рельс должна приходиться одна синфазная полуволна тока СПР. Причём первый импульс тока системы подмагничивания должен опережать импульс тока рельс, как и предлагается авторами в [4], для создания оптимальных условий в момент начала движения якоря. На рис. 3 представлена электрическая функциональная схема, с помощью которой можно реализовать описанные выше условия работы рельсотрона и СПР. Для упрощения на схеме изображено два контура подмагничивания.

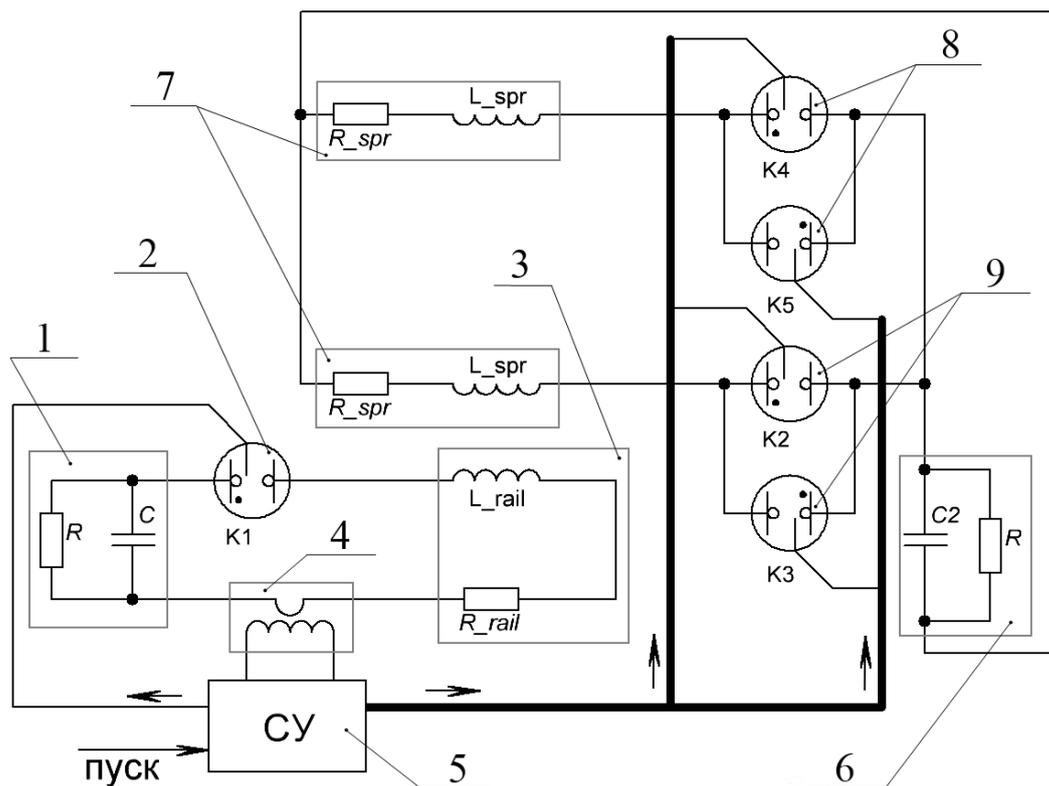


Рис.3. Электрическая схема рельсотрона с модернизированной СПР:

- 1 – конденсаторный накопитель рельсотрона; 2 – униполярный коммутатор рельсотрона (разрядник типа тригatron); 3 – эквивалентное изображение рельсовых электродов; 4 – датчик тока контура рельс (пояс Роговского); 5 – система управления ускорителем; 6 – конденсаторный накопитель системы подмагничивания; 7 – независимые контуры СПР; 8 и 9 – коммутаторы положительной и отрицательной полувольты тока первого и второго контура СПР

По сигналу «пуск» система управления (рис.3) генерирует поджигающий импульс на коммутатор положительной полувольты тока первого контура СПР. По истечении времени задержки генерируется поджигающий импульс на разрядник рельсотрона. Дальнейшая работа происходит в автоматическом режиме, система управления поочередно генерирует импульсы, поджигающие разрядники в момент нулевого тока через рельсы, информация о токе снимается с пояса Роговского. Важным параметром для разрядников СПР является быстродействие, причём основным является время деионизации проводящего канала, которое влияет на скорость выключения. Минимальное время перехода в непроводящее состояние разрядника необходимо для выполнения условия разрыва цепи при снижении ниже порогового значения тока, протекающего

по ней. В разряднике рельсотрона это время, напротив, желательно увеличить, так как в противном случае системе управления придётся генерировать поджигающий импульс на каждую полувольту тока контура рельс. Кроме того, система управления должна в реальном времени компенсировать задержки прохождения сигналов, поскольку иначе будет нарушаться условие синхронизации токов контуров по заранее рассчитанному алгоритму.

Для построения математической, а далее и компьютерной модели предлагаемой системы рельсотрона, были приняты допущения и установлены границы применимости модели:

1. Временной шаг Δt выбирается настолько малым, что изменениями токов на интервале Δt можно пренебречь и считать их постоянным. На участке времени

Δt постоянными считаются температура токопроводящих электродов и ускорение якоря.

2. Якорь движется в безвоздушной среде на магнитном подвесе, и поэтому силы трения о рельсы и сопротивление воздуха не учитываются.

3. Рельсовые электроды и СПР симметричны относительно начала координат системы отсчёта.

4. Токи утечки накопителей по сравнению с основными разрядными токами малы и ими можно пренебречь.

5. Скользящий контакт сохраняется на всём участке, где происходит ускорение якоря.

6. Явления эрозии рельс и разрушение якоря отсутствуют.

Принятые допущения позволяют построить итерационную модель, в которой при каждом временном шаге происходит пересчёт начальных параметров в зависимости от результатов расчётов на предыдущей временной итерации. Такой подход используется в [6] и позволяет учесть большинство изменяющихся во времени параметров, таких как температура электродов, напряжение накопителей, координаты якоря, индуктивность и сопротивление контуров рельс и СПР.

Рассмотрим уравнения, по которым происходит анализ изменений, произошедших с перечисленными параметрами на временном интервале $[t_{-1}, t]$. Перемещение якоря за один временной шаг Δt вычисляется с учётом допущения о равноускоренном характере движения. Под перемещением понимается изменение координаты центра масс якоря X_{arm} по оси X , так как по остальным направлениям движение якоря ограничено рельсами и корпусом ускорителя:

$$X_{arm}(t) = X_{arm}(t_{-1}) + V(t_{-1})\Delta t + \frac{a(t)\Delta t^2}{2}, \quad (1)$$

где $X_{arm}(t_{-1})$ и $V(t_{-1})$ – соответственно координата центра масс и скорость якоря на

предыдущей итерации; $a(t)$ – ускорение, с которым движется якорь на текущем временном интервале Δt .

Ускорение и скорость якоря вычисляются по следующим формулам:

$$a(t) = \frac{F_{total}(t)}{m_{arm}}, \quad (2)$$

$$V(t) = V(t_{-1}) + a(t)\Delta t, \quad (3)$$

где $F_{total}(t)$ – сила, действующая на якорь на протяжении данного временного интервала Δt со стороны магнитного поля рельс и СПР; m_{arm} – масса якоря.

Положение центра масс якоря по оси X влияет на индуктивность $L_{rail}(t)$ и сопротивление $R_{rail}(t)$ контура рельс в пределах текущего временного интервала и используется для построения трёхмерной сетки области якоря, поскольку индуктивность контура рельс в первом приближении зависит только от геометрии самого контура. Расчёт индуктивности вынесен за пределы данной модели и выполняется перед началом основного расчёта по стандартной формуле как коэффициент пропорциональности между током через контур I и магнитным потоком $\Phi = \iint_s B ds$, пронизывающим площадь

$$\text{данного контура } S : L_{rail} = \frac{1}{I} \iint_s B ds.$$

Результаты вычисления индуктивности для нескольких положений якоря экстраполировались полиномом, в простейшем случае зависящем только от положения якоря на предыдущей временной итерации $X_{arm}(t_{-1})$:

$$L_{rail}(t) = (0,566 \cdot X_{arm}(t_{-1}) + 0,1)^{-6}. \quad (4)$$

Результаты вычисления индуктивности имеют совпадение с результатами, представленными в работе [7]. Так как геометрия контуров СПР существенно не меняется в процессе ускорения, то их ин-

дуктивность L_{spr} считается величиной постоянной и задаётся в начале основного расчёта.

Токи, протекающие через контур рельс и СПР, описываются одинаковым

$$\text{уравнением вида: } RI + L \frac{dI}{dt} + \frac{1}{C} \int_0^t Idt = 0 ,$$

где R, L, C – соответственно сопротивление, индуктивность и ёмкость, входящие в состав контура. Если произвести

замены: $\delta = \frac{R}{2L}$ – коэффициент затухания

$$\text{и } \omega_{ce} = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}} \text{ – частота свободных}$$

колебаний, то решением данного уравнения для контура рельс в текущий момент времени t будет выражение:

$$I_{rail}(t) = \frac{U_{rail}(t_{-1})}{L_{rail}(t_{-1})\omega_{ce}(t_{-1})} \times \quad (5)$$

$$\times \exp[-\delta(t_{-1}) \cdot t] \sin(\omega_{ce}(t_{-1}) \cdot t),$$

где $U_{rail}(t_{-1}), L_{rail}(t_{-1})$ – соответственно напряжение конденсаторного накопителя рельсотрона и индуктивность контура рельс в предыдущий момент времени; t – текущее значение времени с начала отсчёта: $t = t_{-1} + \Delta t$.

Выражение для тока (5) справедливо и для описания тока в контурах СПР при подстановке в него соответствующих переменных и коэффициентов.

После расчёта тока по данным предыдущей временной итерации вычисляется температура рельсовых электродов для текущего интервала времени по формуле:

$$t^o_{rail}(t) = t^o_{rail}(t_{-1}) + \frac{I^2_{rail}(t)R_{rail}(t_{-1})}{2m_{rail}C_{t^o_{rail}}}, \quad (6)$$

где m_{rail} – масса одного рельсового электрода; $C_{t^o_{rail}}$ – теплоёмкость материала рельс.

Формула для вычисления температуры электродов, входящих в состав СПР, аналогична (6) с учётом того, что в одном контуре СПР имеется четыре электрода.

Сопротивление контура рельс зависит от двух динамических во времени параметров: температуры рельсовых электродов $t^o_{rail}(t)$ и положения якоря $X_{arm}(t_{-1})$, а сопротивление контуров СПР зависит только от их температуры $t^o_{spr}(t)$.

Сопротивления контуров находятся следующим образом:

$$R_{rail}(t) = 2\rho_{rail}(0) \times \left(1 + A_{rail}(t^o_{rail}(t) - 20)\right) \frac{X_{arm}(t_{-1})}{S_{rail}}, \quad (7)$$

$$R_{spr}(t) = 4\rho_{spr}(0) \times \left(1 + A_{spr}(t^o_{spr}(t) - 20)\right) \frac{l_{spr}}{S_{spr}}, \quad (8)$$

где $\rho_{rail}(0), \rho_{spr}(0)$ – соответственно проводимость материалов рельс и электродов СПР в начальный момент времени; $A_{rail}, A_{spr}, t^o_{rail}(t_{-1}), t^o_{spr}(t_{-1}), S_{rail}$ и S_{spr} – соответственно температурный коэффициент материалов рельс и СПР, температура в предыдущий момент времени рельс и СПР, площади сечения электродов рельс и СПР; l_{spr} – длина электродов СПР.

Уменьшение напряжения на конденсаторном накопителе рельсотрона вычисляется согласно закону сохранения энергии:

$$\Delta U_{rail}(t) = \sqrt{\frac{2}{C_{rail}}(\Delta E v_{rail}(t) + \Delta E t^o_{rail}(t))}, \quad (9)$$

где $\Delta E v_{rail}(t)$ – изменение кинетической энергии якоря, вызванное магнитным полем рельс за временной интервал $[t_{-1}, t]$; $\Delta E t^o_{rail}(t)$ – энергия, затраченная на нагрев рельс за тот же временной промежуток.

Уменьшение напряжения на накопителе СПР вычисляется аналогичным образом с заменой соответствующих переменных. Для соблюдения условия сохранения энергии (9) необходимо кроме общей силы, действующей на якорь, отдельно вычислять силы, действующие на якорь со стороны рельс и со стороны СПР.

Вычисление магнитного поля в области якоря проводится по координатам трёхмерной сетки в центрах элементарных объёмов. Каждый шаг по оси времени вызывает смещение центра масс якоря и соответствующий пересчёт координат расчётных точек поля. Для учёта неравномерности распределения плотности тока в массивных рельсовых электродах и электродах СПР, они разбиваются двухмерной сеткой. Каждой ячейке электродов присваивается свой весовой коэффициент, отвечающий за ток, протекающий по данному жгуту. Внутри отдельной ячейки электродов плотность тока считается равномерной. Якорь разбивается на n элементарных объёмов, причём количество разбиений по каждой оси может быть разным; рельсы разбиваются на m , а электроды СПР разбиваются на p ячеек. Каждой ячейке якоря, рельс и электродов СПР присваивается свой порядковый номер: i, j, k соответственно. Каждому

номеру соответствует свой набор координат относительно начала отсчёта и весовой коэффициент плотности тока J . На рис.4 представлена иллюстрация описываемой модели.

Согласно описываемой модели, i -й элемент объёма якоря (рис.4) имеет координаты центра X_i, Y_i, Z_i . Через него протекает ток $I_i = I_{rail} J_i$, и магнитное поле в области данного объёма имеет величину \bar{B}_i . Тогда суммарная сила, ускоряющая якорь по оси X на данной временной итерации, равна:

$$F_{total}(t) = \iiint_{V_{am}} \bar{B}_{z_i}(t) I_i(t) dxdydz.$$

В случае конечных объёмов интеграл можно выразить через сумму сил, действующих на каждый элемент якоря:

$$F_{total}(t) = \sum_{i=1}^n \bar{B}_{z_i}(t) I_i(t) d, \tag{10}$$

где $\bar{B}_{z_i}(t)$ и $I_i(t)$ – соответственно z составляющая вектора магнитной индукции в i -й области якоря на данной временной итерации и ток, протекающий по i -й области якоря в тот же временной шаг; d – ширина элементов объёма.

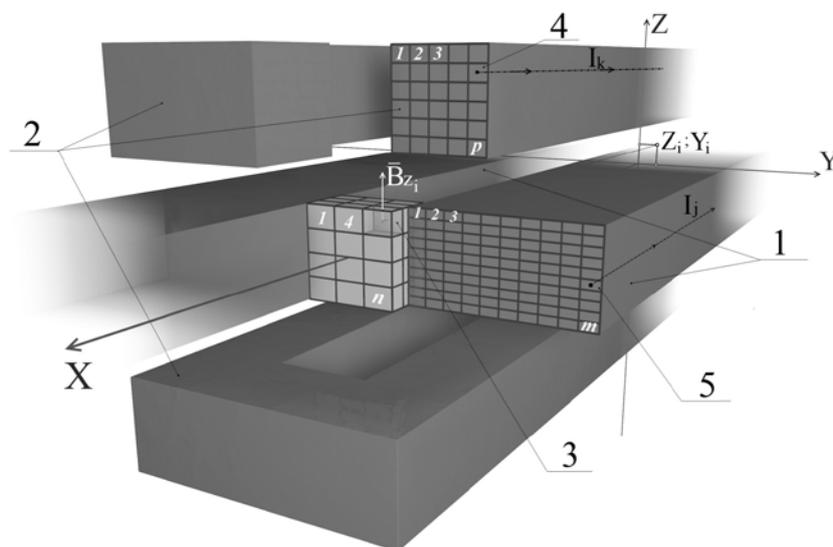


Рис. 4. Модель рельсотрона с модернизированной СПР:
 1 – рельсовые электроды, 2 – электроды СПР, 3 – i -й элемент объёма якоря,
 4 – k -я ячейка электродов СПР, 5 – j -я ячейка рельсовых электродов

Величина магнитного поля $\bar{B}_{z_i}(t)$ находится как сумма всех проекций векторов магнитной индукции на ось z в i -й области якоря, создаваемых элементарными токами жгутов, на которые разбиты рельсовые электроды и электроды СПР. Магнитное поле рельс и СПР считается отдельно, что необходимо для расчёта баланса энергии (9).

$$\bar{B}_{z_{i \text{ rail}}}(t) = \sum_{j=1}^m \frac{\mu_0}{4\pi} I_{\text{rail}}(t) J_j \int_0^{x_{\text{arm}}(t)} \left(\frac{\sqrt{(Y_j - Y_i)^2 + (Z_j - Z_i)^2}}{\left[(Y_j - Y_i)^2 + (Z_j - Z_i)^2 + (X_i - l)^2 \right]^{3/2}} + \frac{\sqrt{(Y_j + Y_i)^2 + (Z_j - Z_i)^2}}{\left[(Y_j + Y_i)^2 + (Z_j - Z_i)^2 + (X_i - l)^2 \right]^{3/2}} \right) dl, \quad (11)$$

где μ_0 – магнитная постоянная; X_i, Y_i, Z_i и Y_j, Z_j – соответственно координаты i -й области якоря и j -й ячейки рельсовых электродов; J_j – весовой коэффициент плотности тока j -й ячейки рельсовых электродов; $I_{\text{rail}}(t)$ – суммарный ток, протекающий по рельсам в данной временной итерации.

Индукция магнитного поля $\bar{B}_{z_{i \text{ spr}}}(t)$, создаваемая СПР в той же точке пространства и времени, находится аналогичным образом, что и индукция магнитного поля рельс (11). Существенным отличием является то, что пределы интегрирования определяются не положением якоря, а геометрическими размерами электродов СПР. Результирующая величина z составляющей вектора магнитной индукции в i -й области якоря равна сумме z составляющих индукции магнитного поля рельс и СПР:

$$\bar{B}_{z_i}(t) = \bar{B}_{z_{i \text{ rail}}}(t) + \bar{B}_{z_{i \text{ spr}}}(t). \quad (12)$$

Условием перехода от одного контура СПР к следующему является вхождение якоря в область контура, в противном случае контур не подключается к накопителю и расчёт данного контура не

Для вычисления вектора магнитной индукции используется закон Био-Савара

$$[8]: d\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{d\mathbf{l} \times \mathbf{r}}{r^3} I.$$

После адаптации данной формулы для нахождения вектора магнитной индукции рельс согласно рассматриваемой модели, она примет вид:

Критериями остановки вычислений являются: выход якоря из области рельс, разряд накопителя рельсотрона, превышение заранее заданного количества временных итераций.

Таким образом, представленная модель позволяет получить оценку процесса ускорения якоря в канале рельсотрона с системой подмагничивания, работающей на синхронном колебательном процессе разряда накопителя рельсотрона и СПР. При этом модель расширяема путём введения дополнительных динамических параметров, пересчитывающихся на каждом временном шаге. Модель позволяет получить на выходе зависимости любого рассчитываемого динамического параметра от времени и срезы поля области якоря с заданной координатой по оси X в любой момент времени. На рис. 5 приведён срез поля якоря на сетке: $200 \times 200 \times 1$, создаваемый отдельно токами рельс и СПР, равных 1 А. (Все электроды разбивались на сетку, состоящую из 50 элементов).

На рис.5 по осям nY и nZ отложены шаги сетки, разбивающей область якоря по ширине и высоте соответственно. Как видно из графика, по ширине и высоте неоднородность поля примерно одинакова и для обоих контуров не превышает 7%.

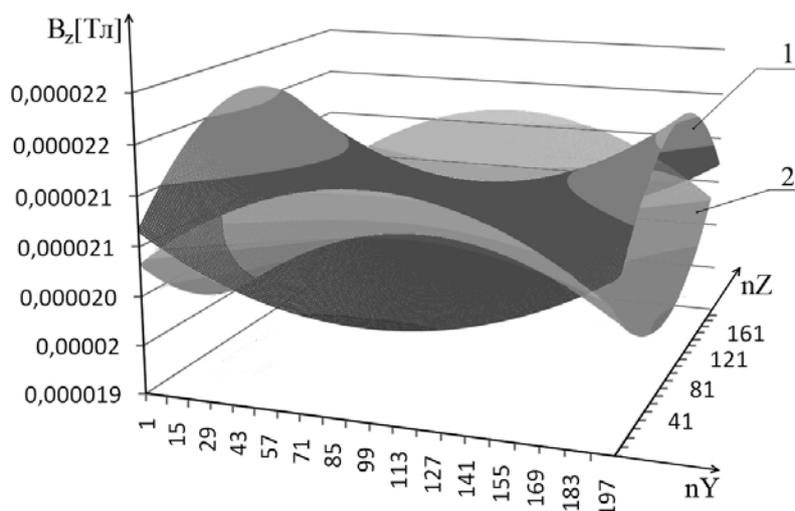


Рис. 5. Индукция магнитного поля в плоской области якоря при токах контура рельс и СПР, равных 1А:
1 – магнитное поле, создаваемое рельсами; 2 – магнитное поле СПР

Перед началом моделирования необходимо выбрать шаг сетки, на котором проводится расчёт. Для этого ограничим временную шкалу двумя итерациями и проведём расчёт суммарной силы, действующей на якорь, при разном количестве разбиений якоря и электродов при прочих равных начальных условиях. За такое малое число итераций ток в контурах существенно не изменится и ошибка, связанная с низкой плотностью сетки, не успеет накопиться. Из анализа получено, что при дальнейшем разбиении якоря более, чем на 500 объёмов, и электродов рельс и СПР более, чем на 100, суммарная сила, действующая на объект, изменяется менее, чем на 1%. Анализ справедлив для расстояния между рельсами менее 5 мм. Влияние количества разбиений оценивается для значения силы, так как это последняя переменная в модели, которая рассчитывается по сетке, а нахождение остальных переменных, таких как ускорение или скорость, сводится к одномерной задаче. Для дальнейших расчётов якорь разбивался на 600 объёмных элементов, а каждый электрод – на 100 ячеек. Допущение о симметрии системы относительно оси X позволяет сократить вычисления в 4 раза за счёт вычисления поля только в одном квадранте объёма якоря.

Результаты моделирования

Для описанной математической модели было проведено моделирование для тел разного размера. В табл. 1. приведены отличающиеся параметры рельсотронов, которые моделировались. Остальные исходные данные, одинаковые для всех вычислений, представлены в табл.2. Конструктивные параметры и параметры накопителей были выбраны исходя из того, что в дальнейшем будет проведён эксперимент на ускорителе с техническими параметрами, максимально приближенными к представленным исходным данным моделей.

По начальным данным (табл.1, 2) проведено моделирование процесса ускорения для разных по объёму и массе якорей. На рис. 6 приведены зависимости ускоряющей силы для двух идентичных систем ускорителя с СПР и без неё, на рис. 7 приведены зависимости скорости для тел разной массы.

На рис.7 каждый график обозначен номером, соответствующим номеру моделирования согласно табл.1. Как видно из графиков, независимо от массы ускоряемого тела добавление системы подмагничивания даёт увеличение конечной скорости объекта, обусловленное увеличением ускоряющей силы и более рациональным использованием энергии накопителя.

Таблица 1. Отличающиеся исходные данные моделирования

№ моделирования	Масса тела, г	Геометрия канала, мм×мм	Начальное положение объекта по оси X, мм	СПР
1	0,32	5×5	100	нет
2	0,32	5×5	50	есть
3	0,16	4×4	50	нет
4	0,16	4×4	50	есть
5	0,07	3×3	50	нет
6	0,07	3×3	50	есть

Таблица 2. Одинаковые исходные данные моделирования

Энергия накопителя рельсотрона, кДж	110
Энергия накопителя СПР, кДж	25
Ширина рельсовых электродов, мм	40
Длина рельсовых электродов, мм	600
Длина электродов СПР, мм	10
Высота электродов СПР, мм	10
Длина электродов СПР, мм	500
Расстояние от рельс до СПР, мм	10
Начальная температура всех электродов, °С	20
Начальная скорость якоря, м/с	0
Материал электродов	медь
Материал якоря	алюминий

Таким образом, результаты моделирования можно считать совпадающими с результатами экспериментальных работ [4, 5]. Предложенная система питания рельсотрона и система подмагничивания позволяет добиться скорости до 10 км/с для объекта массой 70 мг, и она обладает более простой конструкцией по сравнению с аналогами.

Заключение

1. Разработана математическая модель, описывающая совместную работу рельсотрона и системы подмагничивания с учётом неоднородности плотности тока в электродах и якоре. Математическая модель построена по принципу временных итераций и может быть в дальнейшем расширена за счёт введения новых динамических переменных.

2. Применение системы подмагничивания позволяет увеличить силу, действующую на якорь, без повышения токовой нагрузки на рельсы и позволяет снизить их эрозию, что увеличивает конечную скорость якоря при сохранении длины и ресурса рельсотрона.

3. Применение многоконтурной СПР целесообразно для больших рельсотронов с длиной электродов от нескольких метров. Это связано с тем, что длина электродов должна быть много больше размеров якоря, поскольку в противном случае влияние конечной длины проводника вызовет снижение магнитного поля в области ускоряемого тела. Поэтому для небольших ускорителей, подобных рассмотренному в статье, следует ограничиться одним резонансным контуром СПР.

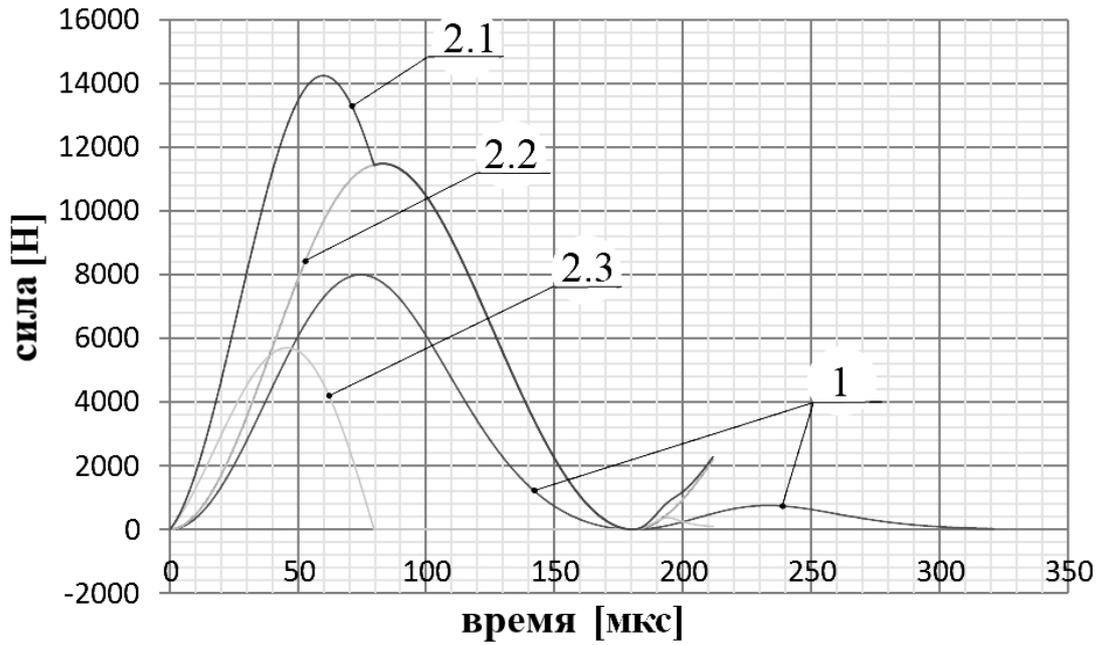


Рис. 6. Графики ускоряющей силы:
 1 – сила, действующая на якорь в моделировании №1 (табл.1);
 2.1, 2.2, 2.3 – силы, действующие на якорь в моделировании №2 (табл.1):
 суммарная сила, сила со стороны рельсотрона и сила со стороны СПР соответственно

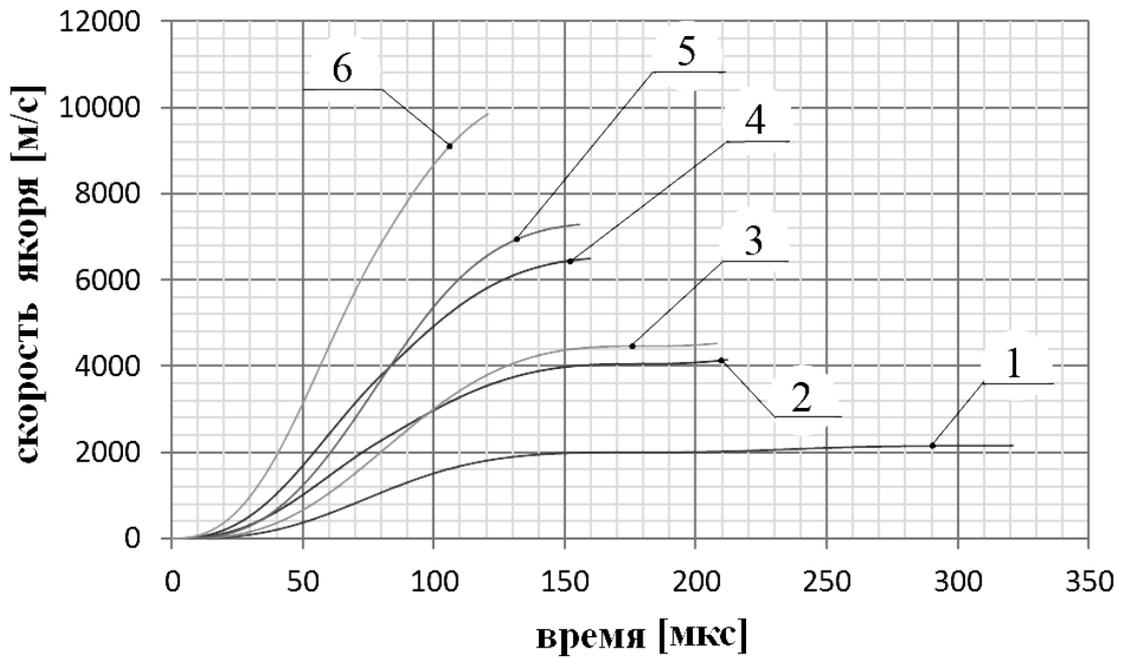


Рис. 7. Графики скорости якоря

Библиографический список

1. Сухачёв К.И., Сёмкин Н.Д., Пияков А.В. Ускорители твёрдых тел // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2014. Т. 17, № 2. С. 49-58.
2. Postnikov V.V., Fomichev V.P., Fomin V.M. Two-Stage Railgun Pinched Plasma Armature // 11th EML Symposium, Sain-Louis, France. 2002. May 14-17.
3. Fowler C.M., Peterson D.R., Caird R.S., Erickson D.J., Freeman B.I., King J.C. Explosive flux compression for railgun power sources // IEEE Transaction on Magnetics. 1982. V. 18, no. 1. P 64.
4. Жуков Б.Г., Куракин Р.О., Сахаров В.А., Бобашев С.В., Поняев С.А., Резников Б.И., Розов С.И. Малогабаритный рельсовый ускоритель диэлектрических твердых тел мм-размера // Письма в Журнал технической физики. 2013. Т. 39, № 12. С. 63-70.
5. Rashleigh S.C., Marshall R.A. Electromagnetic accelerator of macroparticles to high velocities // Journal of Applied Physics. 1978. V. 49, no. 4. P. 2540-2542. doi: 10.1063/1.325107
6. Сухачёв К.И., Сёмкин Н.Д. Анализ возможностей катушечного электромагнитного ускорителя для разгона ферромагнитных частиц // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2013. № 3(41), ч. 1. С. 235-247.
7. Носов Г.В. Определение параметров рельсотронов. Ч. 1. Расчет при постоянной плотности тока // Известия Томского политехнического университета 2013. Т. 322, № 4. С. 65-69.
8. Парселл Э. Электричество и магнетизм. М.: Наука, 1983. 439 с.

Информация об авторе

Сухачёв Кирилл Игоревич, аспирант кафедры конструирования и технологии электронных систем и устройств, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика

С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: kir.sukhachev@gmail.com. Область научных интересов: физика ускорителей.

RAIL ELECTROMAGNETIC ACCELERATORS WITH AN EXTERNAL MAGNETIC FIELD

© 2015 K. I. Sukhachev

Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation

The main problems of using electromagnetic rail accelerators to accelerate solid bodies of the millimeter range are outlined in the paper. A modernized system of biasing a rail gun is presented, its operating principle is described. Mathematical modeling of the rail gun system with and without bias for accelerated bodies of different mass is carried out. The influence of the bias system on the basic parameters of electromagnetic rail accelerators is analyzed. The acceleration forces acting on the object from the main loop and the bias circuit are plotted, as well as armature velocities and magnetic field induction in the object accelerated. The limits of applicability of the model described are given. Several variants of the design of rail gun bias systems including a multi-stage one are presented. The effect of some of the initial conditions on the acceleration of an object in the channel of the rail electromagnetic accelerator is analyzed. The effectiveness of introducing an external magnetic field in the channel of the accelerator making it possible to increase the speed of the lifter more than twice, while maintaining the resource of rail electrodes, is shown.

Electromagnetic rail accelerator, system bias, railgun, resonant acceleration principle, simulation acceleration force in railgun, railgun efficiency of the system bias.

References

1. Sukhachev K.I., Syomkin N.D., Piyakov A.V. Solid bodies accelerators. *Physics of wave processes and radio systems*. 2014. V. 17, no. 2. P. 49-58. (In Russ.)
2. Postnikov B.V., Fomichev V.P., Fomin V.M. Two-Stage Railgun Pinched Plasma Armature. *11th EML Symposium, Sain-Louis, France*. 2002. May 14-17.
3. Fowler C.M., Peterson D.R., Caird R.S., Erickson D.J., Freeman B.I., King J.C. Explosive flux compression for railgun power sources. *IEEE Transaction on Magnetics*. 1982. V. 18, no. 1. P 64.
4. Zhukov B.G., Kurakin R.O., Sakharov V.A., Bobashev S.V., Ponyaev S.A., Reznikov B.I., Rozov S.I. Synchronous acceleration of two millimeter-sized bodies up to hypersonic velocities in a multichannel railgun. *Technical Physics Letters*. 2013. V. 39, no. 12. P. 1057-1059. doi: 10.1134/S1063785013120146
5. Rashleigh S.C. and Marshall R.A. Electromagnetic accelerator of macroparticles to high velocities. *Journal of Applied Physics*. 1978. V. 49, no. 4. P. 2540-2542. doi: 10.1063/1.325107
6. Sukhachev K.I., Syomkin N.D. Analysis of potentialities of coil electromagnetic accelerators for the accelerating of ferromagnetic particles. *Vestnik of the Samara State Aerospace University*. 2013. No 3 (41), part 1. P 235-247. (In Russ.)
7. Nosov G.V. Defining the parameters of the railgun. Part 1. Calculation at constant current density. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*. 2013. V. 322, no.4. P. 65-69. (In Russ.)
8. Purcell E. *Elektrichestvo i magnetizm* [Electricity and Magnetism]. Moscow: Nauka Publ., 1983. 439 p.

About the author

Sukhachev Kirill Igorevitch, post-graduate student, the Department of Design and Technology of Electronic Systems and Devices, Samara State Aerospace University,

Samara, Russian Federation. E-mail: kir.sukhachev@gmail.com. Area of Research: physics of accelerators.