

### ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ

В настоящее время для высокоскоростного метания твердых тел в научных и практических целях, как правило, используют электромагнитные ускорители [1], в частности рельсовые ускорители. Их популярность объясняется относительной простотой конструкции ускорителя и возможностью получения высоких скоростей ускоряемого тела. Однако, применение рельсотронов для ускорения небольших объектов существенно ограничено, что связано со снижением эффективности ускорителей данного типа при уменьшении метаемых тел до размеров от 10 миллиметров и менее. Для устранения данного недостатка предлагается ввести внешнее магнитное поле в область ускорительного канала рельсового ускорителя.

**Описание работы ускорителя.** Рельсовый электромагнитный ускоритель позволяет ускорять объекты до сверхзвуковых скоростей посредством силы Ампера, возникающей при протекании импульсного тока по контуру рельс и проводящей перемычки, называемой якорем. В классических рельсотронах ширина межэлектродного пространства должна быть более 10 мм. При уменьшении расстояния между рельсами эффективность ускорения значительно снижается. Это связано с тем, что при ускорении небольших тел в начальный момент времени электроды испытывают большую токовую перегрузку и подвергаются катастрофической эрозии. При этом могут образоваться перемычки из расплава рельса или якоря, замыкающие часть тока на себя и тем самым уменьшающие выталкивающую силу. Таким образом, катастрофическая эрозия становится основным препятствием на пути создания рельсотрона, способного ускорять небольшие тела размером до 1 мм. В работе [2] приведен образец рельсового ускорителя, свободного от указанного недостатка и способного ускорять диэлектрические кубики со сторонами 1-2 мм и массой 1 - 10 мг. Авторам удалось преодолеть катастрофическую эрозию в начальный момент введением внешнего магнитного поля в межэлектродное пространство, которое создавалось системой подмагничивания рельсотрона (СПР), представляющей из себя дополнительную пару замкнутых электродов, расположенных по обе стороны от рельс. Применение подмагничивания в конструкции, описанной в работе [2], 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 и стабилизацией скользящего контакта якоря и рельсовых электродов, но и увеличением силы Ампера за счет добавления внешнего поля.

В статье приводится описание рельсотрона с модернизированной системой подмагничивания. Систему подмагничивания предлагается разделить на несколько независимых секций, что позволит увеличить плотность магнитного поля, создаваемого СПР в области нахождения якоря. Это достигается за счет уменьшения площади, охватываемой одним контуром системы подмагничивания, в области которого в данный момент времени находится якорь. При разделении СПР на отдельные секции появляется необходимость переключения контуров синхронно с движением ускоряемого объекта. Также предлагается применить резонансный разряд накопителей рельсотрона и СПР, при котором токи контуров носят характер затухающих колебаний. Такой режим коммутации позволяет существенно упростить электрическую схему ускорителя, поскольку не применяются меры по согласованию накопителя и нагрузки. Кроме того, достигается максимально доступная амплитуда тока, которую можно получить с помощью конденсаторного накопителя. На рис. 1 представлена электрическая функциональная схема, с помощью которой можно реализовать описанные выше условия работы рельсотрона и СПР. Для упрощения на схеме изображено два контура подмагничивания, однако число контуров может быть любым, а в самом простом случае можно использовать только один контур подмагничивания.

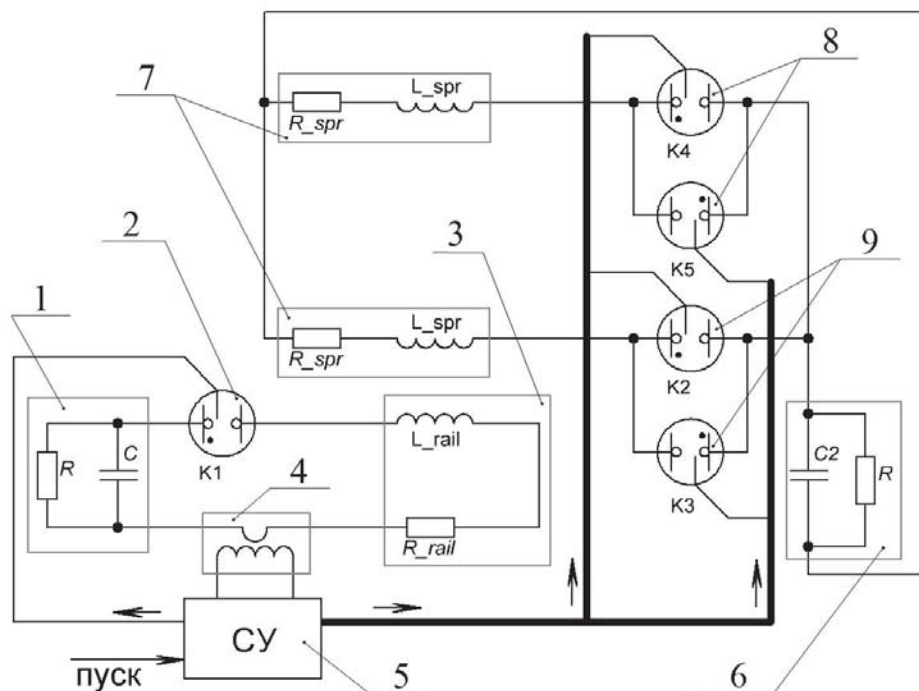


Рисунок 1 – Электрическая схема рельсотрона с модернизированной СПР:  
 1 – конденсаторный накопитель рельсотрона, 2 – униполярный коммутатор рельсотрона (разрядник типа тригatron), 3 – эквивалентное изображение рельсовых электродов, 4 – датчик тока контура рельс (пояс Роговского), 5 – система управления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

По сигналу «пуск» система управления генерирует поджигающий импульс на коммутатор положительной полуволны тока первого контура СПР, и по истечению 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 или через программируемую задержку. Информация о токе снимается с датчика тока, которым может служить пояс Роговского. Кроме того, система управления должна в реальном времени компенсировать задержки прохождения сигналов, иначе будет нарушаться условие синхронизации токов контуров по заранее рассчитанному алгоритму.

**Результаты моделирования.** Было проведено компьютерное моделирование первой ступени ускорителя с модернизированной системой подмагничивания. Параметры ускорителя представлены в таблице 1. Они соответствуют реальной разрабатываемой системе.

Таблица 1 – Параметры моделируемого ускорителя

масса тела [г]	0,07
геометрия канала [мм×мм]	3×3
начальное положение объекта по оси X [мм]	60
энергия накопителя рельсотрона [кДж]	110
энергия накопителя СПР [кДж]	25
ширина рельсовых электродов [мм]	40
длина рельсовых электродов [мм]	600
ширина 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

По результатам моделирования построены графики скорости (рис. 2) для одной и той же системы с применением подмагничивания и без него.

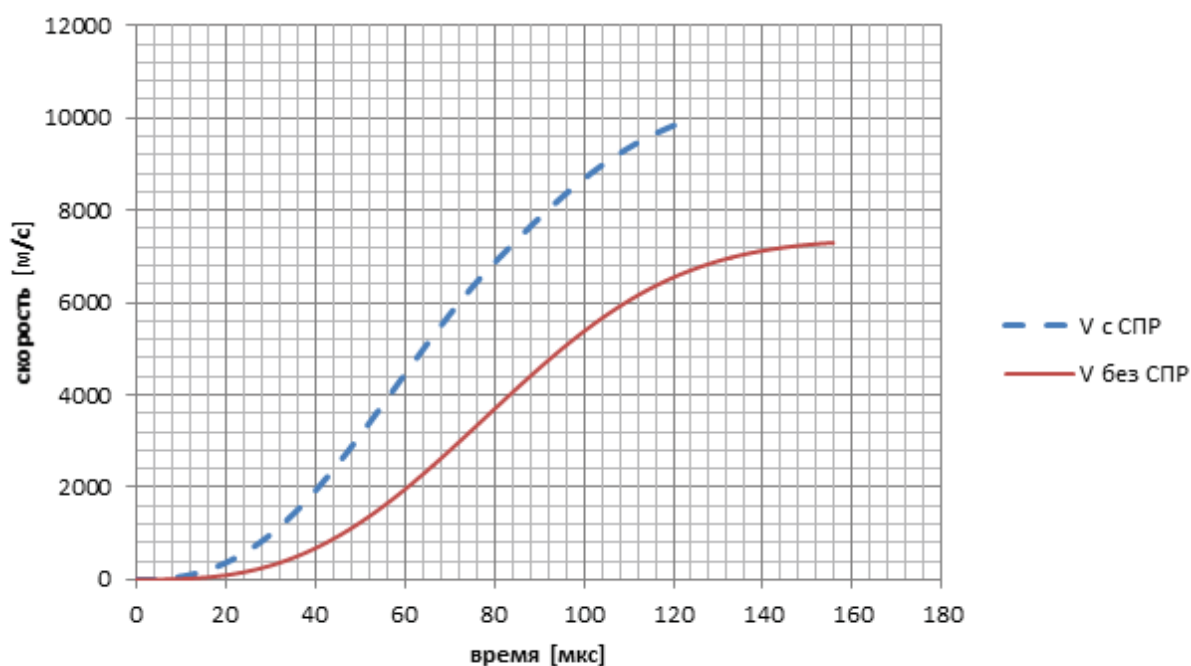


Рисунок 2 – Графики скорости якоря

На графике скорости видно положительное влияние применения СПР, которое вызвало увеличение скорости более чем на 2 км/с.

Таким образом, предложена улучшенная схема подмагничивания рельсотрона, в которой контур рельс и СПР работают в синхронном резонансном режиме. Это позволяет повысить конечную скорость якоря за счет увеличения тока контуров и магнитного поля непосредственно в области якоря, что подтверждается результатами моделирования работы первой ступени ускорителя.

#### Библиографический список

- 1 Сухачев К.И., Семкин Н.Д., Пияков А.В. Ускорители твердых тел. Физика волновых процессов и радиотехнические системы, 2014, №2, том 17. С. 49-58.
- 2 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 ЖТФ, 2013, том 39, выпуск 12.