

**Автономная некоммерческая общеобразовательная  
организация "Физтех-лицей"  
(АНОО «Физтех-лицей» им. П.Л. Капицы)**

## **XX научно-практическая конференция**

### **«Старт в инновации»**

**Электродинамические системы на примере  
пушки Гаусса**

Выполнили:  
Пятанова Мария и Фролова Софья, 7А

Руководитель:  
Хорошилов А. А

Московская область, г. Долгопрудный

2021 г.

## Содержание

Введение	2
1. Теоретическая часть	3
• Устройство пушки Гаусса	3
• Рельсовая пушка	4
2. Экспериментальная часть	4
3. Практическое применение	5
Заключение	6
Список литературы	7
Приложения	8

## Введение

Применение электродинамических систем (будучи противопоставленным применению более традиционных аналогов) представляет большой интерес как с экономической, так и с экологической точек зрения: электрическая энергия является восполняемой и в большинстве случаев чистой, а также электричество может быть предпочтительным вариантом для труднодоступных и малонаселённых регионов. Уже известны примеры сфер деятельности, в которых использование электродинамических систем оказалось успешным (электромобили, поезда на магнитной подушке).

**Цель работы:** Исследовать электромагнитные ускорители масс, определить границы применимости электродинамических систем в промышленности, оценить плюсы и минусы использования этих технологий.

### Задачи:

- теоретический анализ рассматриваемых систем и их эффективности;
- сборка экспериментального образца пушки Гаусса и оценка на его примере конструкторских особенностей данной системы и потенциальных трудностей;
- анализ научно-технической литературы по теме и обзор существующих применений данных технологий.

## Теоретическая часть

### Устройство пушки Гаусса

Принципиальная схема пушки Гаусса, электромагнитного ускорителя масс, которому уделено наибольшее внимание в работе, показана на (Приложении 1). Стоит отметить, что эта схема отличается от реальной схемы любого рабочего образца и отражает лишь принцип, а не детали работы системы. Диод D1 нужен, чтобы превратить переменный ток из источника V1 в постоянный, поэтому эти два элемента могут быть заменены на источник постоянного тока. Ключ S1 имеет два положения: верхнее используется в режиме зарядки, т.е. когда конденсатор C1 заряжается от источника до напряжения V1. После этого ключ переводится в нижнее (рабочее) положение, в котором он размыкает участок цепи с источником тока и замыкает участок с катушкой L1. В результате этого конденсатор разряжается, и через катушку протекает кратковременный импульс тока большой величины. Под действием этого тока катушка создаёт сильное магнитное поле, которое приводит в движение металлический груз, расположенный в стволе пушки (ствол обозначен серым прямоугольником и проходит через центр катушки, может быть выполнен из любого непроводящего материала).

Рассчитать коэффициент полезного действия конкретной установки достаточно затруднительно: для этого нужны познания в электродинамике и векторной геометрии, сильно выходящие за пределы даже продвинутой школьной программы. Однако, произвести оценку можно, рассмотрев существующие расчёты по этой теме. Например, существуют свидетельства об инженерных разработках, использующих технологию пушки Гаусса и достигающих КПД в 17,4%. Для любительских установок КПД редко превышает 1-2%.

Учитывая, что ускорители масс других типов чаще всего основаны на огнестрельной или пневматической технологии, можно выделить следующие преимущества пушки Гаусса:

- максимальная скорость снаряда фактически ограничена лишь скоростью света, когда для аналогов существуют гораздо более узкие рамки (скорость звука в случае газовых технологий);
- возможность работы в любых условиях (в т.ч. космическом пространстве);
- в случае военного применения - гораздо меньший объём боекомплекта и отсутствие в нём взрывоопасных составляющих, а также возможность (почти) бесшумной стрельбы;
- в теории - гораздо более высокая износостойкость.

Тем не менее, как показано выше, даже самые совершенные на данный момент установки всё ещё дают невысокие результаты по эффективности. Также стоит отметить, что пушка Гаусса промышленного масштаба будет иметь довольно громоздкую конструкцию.

## Рельсовая пушка

Говоря об электромагнитных ускорителях масс, стоит также упомянуть так называемую рельсовую пушку (рельсотрон). Её конструкция представлена на схеме (Приложение 2).

Снаряд, также выполненный из проводящего материала, находится на паре металлических рельс, подключенных к источнику импульсного постоянного тока (конструкция подобного источника аналогична той, что используется в пушке Гаусса). Т.к. именно снаряд замыкает эту цепь, во время выстрела по нему (как и по рельсам) протекает ток. Пара рельс создаёт между собой мощное магнитное поле, вследствие чего снаряд разгоняется под действием силы Ампера.

Многие оценки, сделанные для пушки Гаусса, применимы и для рельсотрона. Поэтому при построении выводов в дальнейшем эти технологии будут рассматриваться вместе, несмотря на определённые технические детали, суть которых в данной работе будет опущена.

## Экспериментальная часть

В рамках работы был собран рабочий прототип пушки Гаусса. В качестве ёмкости использовались два конденсатора по 680 мкФ каждый. Катушка была намотана самостоятельно из медного провода. Большое внимание было уделено защите от импульсного тока (который возникает в цепи как во время выстрела, так и в самом начале зарядки конденсатора): в качестве ключа в установке используется специальный тумблер с соответствующими предохранениями. После сборки были произведены несколько пусков маленьких металлических снарядов.

Примерные измерения скорости снаряда на выходе позволяют сделать оценку для коэффициента  $\eta$  полезного действия этой установки, используя следующие формулы:

$$\eta = \frac{E_{\text{механическая}}}{E_{\text{конденсатора}}}$$
$$E_{\text{механическая}} = \frac{mv^2}{2}, \quad E_{\text{конденсатора}} = \frac{CU^2}{2}$$

, где  $m$  - масса снаряда (2-5 г),  $v$  - скорость на выходе (5-7 м/с),  $C$  - ёмкость используемого конденсатора (1,36 мФ),  $U$  - максимальное напряжение конденсатора (310 В). Расчёты показывают, что значение  $\eta$  в этих экспериментах не превосходит 0,2%. На взгляд авторов, такое значение не нуждается в последующем уточнении.

С конструкторской точки зрения основной трудностью при создании образца оказался выбор конденсатора: для получения достаточной ёмкости пришлось использовать

два одинаковых конденсатора, соединённых параллельно, а их стоимость составила более половины от суммарной стоимости установки. Также стоит отметить, что конденсаторы являются наиболее крупной частью установки. Если масштабировать эту пушку до промышленных размеров, это объясняет проблемы с громоздкостью системы, описанные в теоретическом параграфе.

Из соображений простоты конструкции в этом образце не были применены технологии оптимизации, которые тем не менее стоит вкратце описать: самое распространённое улучшение связано с динамическим отключением катушки во время пролёта снаряда через её середину. Это позволяет избавиться от тормозящей силы, которая возникает, когда катушка оказывается позади снаряда, но всё ещё генерирует магнитное поле. Также в промышленности часто используют системы из нескольких последовательно расположенных катушек, которые поочерёдно включаются по мере пролёта снаряда по стволу пушки. Помимо этого, существенно повысить эффективность пушки может использование сверхпроводников. Однако, доступные на данный момент технологии предполагают переход в сверхпроводящее состояние только при очень низких температурах, что приводит к большим издержкам, связанным с созданием и поддержкой системы охлаждения достаточной мощности.

### **Практическое применение**

Как было указано выше, двумя основными сферами применения электромагнитных ускорителей масс в данный момент являются военная и космическая промышленности. В военных целях пушка Гаусса и рельсотрон рассматриваются в качестве частичной замены реактивных и огнестрельных орудий крупного калибра, в т.ч. баллистических ракет высокой дальности. В дополнение к уже описанным трудностям при таком использовании данных систем возникает проблема с точностью стрельбы, а электромагнитные поля большой напряжённости, возникающие в пушке во время выстрела, серьёзно ограничивают возможность использования электроники внутри снаряда (к примеру, для самонаведения). Также существуют проекты, посвящённые использованию электромагнитных ускорителей для пуска грузов на орбиту. В этом случае также актуальна проблема создания подходящего конденсаторного блока: ёмкости такого уровня сложно достичь, а её использование приводит к крайне сложным в поддержке установкам.

Стоит также отметить, что определённые достижения науки, которые могут появиться в течение ближайших лет, дали бы серьёзный толчок к развитию этих технологий. Говоря конкретнее, такими достижениями могут стать исследования в области производства конденсаторов высокой ёмкости, а также развитие технологий получения сверхпроводящего состояния.

## **Заключение**

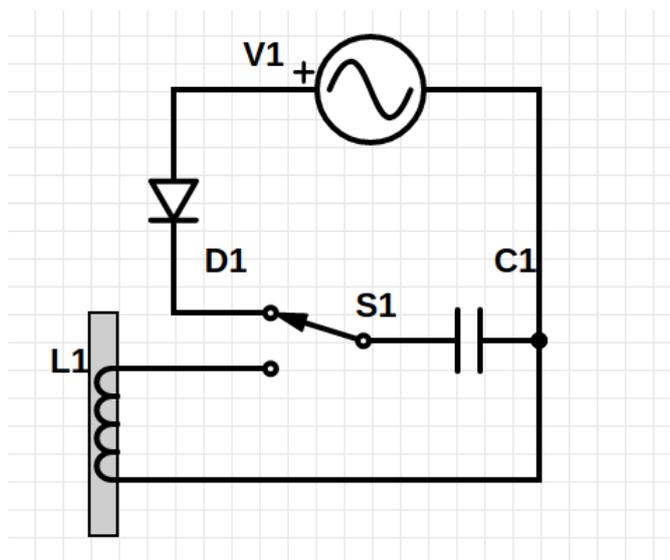
Нами были изучены принципы работы и особенности электромагнитных ускорителей масс - пушки Гаусса и рельсотрона. Анализ полученных данных показывает, что в данный момент использование этих систем носит скорее исследовательский, нежели промышленный характер, в первую очередь из-за низкой эффективности и сложностей при конструировании и поддержке установок. Тем не менее, электромагнитные технологии остаются перспективной областью научно-инженерных исследований, и в будущем ситуация с их применимостью в промышленности может серьёзным образом улучшиться.

## Список литературы

1. [Электронный источник], Electromagnetic Launch of Lunar Material, *William R. Snow and Henry H. Kolm, NASA SP-509*  
[web.archive.org/web/20160702092818/http://www.askmar.com/Massdrivers/Electromagnetic%20Launch.pdf](http://web.archive.org/web/20160702092818/http://www.askmar.com/Massdrivers/Electromagnetic%20Launch.pdf)
2. [Электронный источник], Sandia National Laboratories / Lockheed Martin  
Electromagnetic Missile Launcher, *M. S. Aubuchon, T. R. Lockner, B. N. Turman, G. Root, L. Basak, R. Gaigler, B. Skurdal, M. Floyd*  
[web.archive.org/web/20120323175839/http://www.webstracts.com/ppc2005/papers/10257.pdf](http://web.archive.org/web/20120323175839/http://www.webstracts.com/ppc2005/papers/10257.pdf)
3. [Электронный источник], Пушка Гаусса, *Википедия*  
[ru.wikipedia.org/wiki/Пушка\\_Гаусса](http://ru.wikipedia.org/wiki/Пушка_Гаусса)
4. [Электронный источник], Рельсотрон, *Википедия*  
[ru.wikipedia.org/wiki/Рельсотрон](http://ru.wikipedia.org/wiki/Рельсотрон)

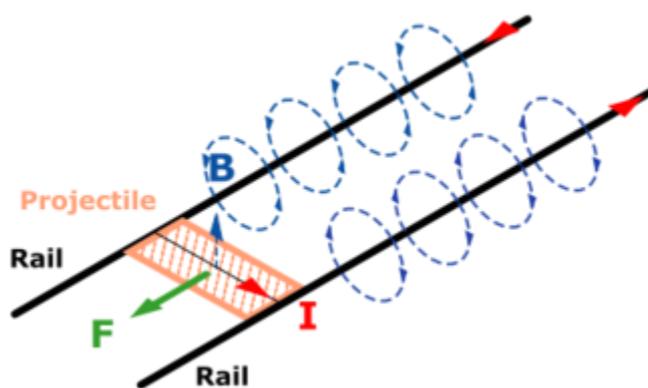
## Приложения

### Приложение 1

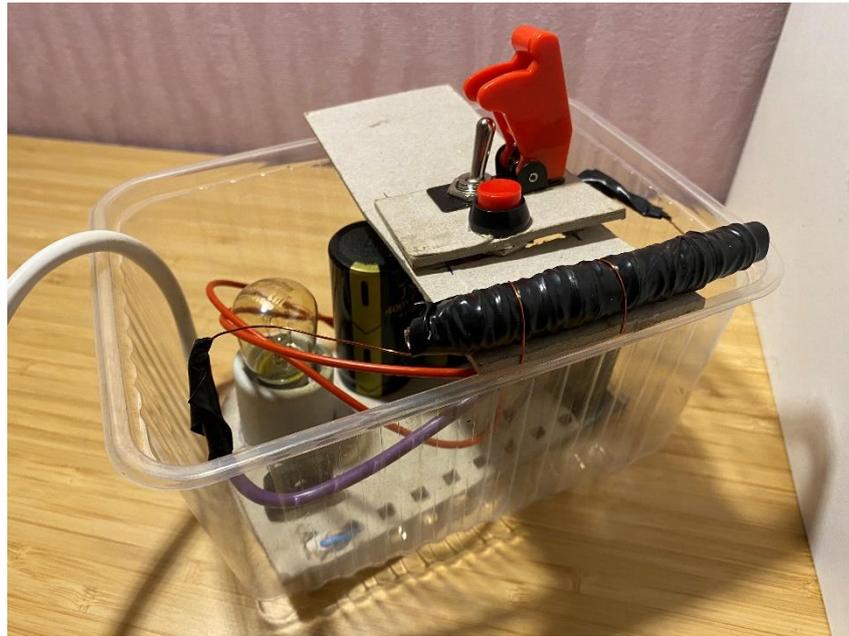


Принципиальная схема пушки Гаусса

### Приложение 2



Принципиальная схема рельсотрона



Рабочий прототип пушки Гаусса