

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации
МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

ВОПРОС ПО ВЫБОРУ
К ЭКЗАМЕНУ ПО ЭЛЕКТРИЧЕСТВУ И МАГНЕТИЗМУ

Исследование и оптимизация
конструкции пушки Гаусса

Работу выполнили
студенты ФЭФМ группы Б04-107 _____ Захаров А.В.

_____ Казиков С.П.

_____ Луговцов Г.С.

Аннотация

В работе исследован принцип работы пушки Гаусса, приведены и рассчитаны возможные способы оптимизации конструкции для достижения максимальной скорости снаряда. Для этого был создан прототип трёхступенчатой пушки Гаусса, принцип работы которой заключается во втягивании металлического сердечника в катушку, которая является частью RLC-контура. Полученные зависимости скорости от длины снаряда, начального напряжения и расстояния между центром катушки и центром масс снаряда позволили подтвердить теоретические расчёты по оптимизации для достижения максимальной скорости снаряда. Предложенная методика оптимизации позволяет разработать устройство, передающее большой импульс «снаряду».

Содержание

Введение	4
1 Методика	7
1.1 Расчёт колебательного контура	7
1.2 Сила втягивания стержня	8
1.3 Способы оптимизации	9
1.4 Экспериментальная установка	10
2 Результаты и их обсуждение	14
2.1 Зависимость скорости от длины снаряда	14
2.2 Зависимость скорости от напряжения на конденсаторах	15
2.3 Зависимость скорости от расстояния до центра катушки	16
Заключение	18
Список использованных источников	19
А Схема установки	20

Введение

Тroe физтехов пушку спаяли,
Один сгорел, двое – на экзамен попали.

Двоим попался препод строгий,
Остался в итоге физтех одинокий.

Последний физтех поглядел устало,
Пошел отчислился, и никого не стало.

«Десять физтехов», отрывок

Анна Зелёная

В механике частой задачей является создание возвратно-поступательного движения для ударной передачи энергии. Такое движение возникает, например, при забивании гвоздей. Импульс, сообщенный массивному телу (молоту) ударным способом передается гвоздю; при этом сообщенная кинетическая энергия расходуется на преодоление сил сопротивления и на разрушение тела, в которое гвоздь забивается.

Для ускорения этого процесса целесообразно *увеличивать импульс* молота; верхний предел здесь ограничивается прочностью материала гвоздя. Для механизации этого процесса используют монтажные пистолеты, где кинетическая энергия порохового взрыва передается дюбелю. Это открывает возможности забивать дюбели в материалы, в которые забивание гвоздей ручным молотом считалось ранее невозможным (например, в бетон или в сталь толщиной более 5 мм).

Тем не менее, использование энергии порохового взрыва нельзя назвать масштабируемым. В частности, для забивания железобетонных свай в грунт для формирования фундамента зданий этот способ был признан неподходящим в силу опасности производства работ, плохой контролируемости процесса, а также в силу разрушения материала свай из-за больших ударных нагрузок. Широко применяемый в современных копрах способ основан на взрыве малых объемов дизельного топлива. Конструкция рабочей части копра при этом представляет собой вертикальный толстостенный массивный стальной стакан, нижнее основание которого крепится к верхнему торцу сваи. Внутри этого стакана в верти-

кальном направлении может свободно перемещаться массивный цилиндрический поршень, выполненный, как правило, из цельной стальной болванки. В нижнем основании стакана предусмотрен фланец, через который подается топливо (мазут). В начале с помощью механического подъемного механизма (лебедки) поршень поднимается, а в объем стакана впрыскивается топливо. Затем поршень сбрасывается и падает на дно стакана, передавая импульс свае и воспламеняя топливо. Образовавшееся давление продуктов сгорания обеспечивает поднимание поршня до начального уровня; затем снова впрыскивается топливо и процесс повторяется. Останавливают процесс путем отключения впрыска горючего в рабочий объем копра.

Указанная конструкция копра является весьма дорогостоящей в эксплуатации. В добавление к издержкам, связанным с транспортированием массивной установки, добавляются накладные расходы, определяемые необходимостью частого освидетельствования, периодической чистки и замены золотникового механизма, изолирующего топливную магистраль и рабочий объем копра. Этот процесс является трудозатратным в полевых условиях эксплуатации установки. Несвоевременное обслуживание золотникового механизма, подверженного загрязнению продуктами сгорания и разрушению в процессе штатной работы из-за больших ударных нагрузок, может привести к возгоранию топлива в магистрали. Таким образом, частое проведение сервисного обслуживания приводит к простою установки и увеличению стоимости ее эксплуатации. Тем не менее, указанный тип установок до сих пор применяется в производстве, и издержки считаются приемлемыми в силу отсутствия других промышленных конструкций, которые были бы свободны от перечисленных недостатков.

В рамках настоящей работы был рассмотрен альтернативный способ, обеспечивающий ускорение массивного тела, *без использования взрывных техник*; этот способ основан на линейном ускорении тела с помощью магнитного поля. Преимуществом такого способа является отсутствие расходуемого топлива, а также необходимости частого сервисного обслуживания, что может существенно снизить себестоимость эксплуатации.

ции установки. Тем не менее, отсутствие промышленных образцов, основанных на указанном принципе, требует проведения анализа, при каких характеристиках установки будет обеспечена максимальная скорость вылета рабочего тела (поршня, снаряда). Этому анализу и посвящена настоящая работа.

Экспериментальная установка – Пушка Гаусса – состоит из соленоида, внутри которого находится ствол, как правило, из диэлектрика. В один из концов ствола вставляется снаряд, сделанный из ферромагнетика. При протекании электрического тока в соленоиде возникает электромагнитное поле, которое разгоняет снаряд, «втягивая» его внутрь соленоида. На концах снаряда при этом образуются полюса, ориентированные согласно полюсам катушки, из-за чего после прохода центра соленоида снаряд притягивается в обратном направлении, то есть тормозится. Для наибольшего эффекта импульс тока в соленоиде должен быть кратковременным и мощным. Как правило, для получения такого импульса используются электролитические конденсаторы большой ёмкости и с высоким рабочим напряжением.

Существующие конструкции пушки Гаусса обладают очень низким КПД и, соответственно, эффективностью. Эта работа направлена на исследование причин этого и построение оптимизированной конструкции.

1 Методика

Для того, чтобы проанализировать условия, при которых достигается максимальная кинетическая энергия вылета снаряда, была разработана установка, состоящая из цилиндрического электромагнита (соленоида), а также схема импульсного возбуждения магнитного поля. Скорость вылета снаряда здесь определяется как величиной магнитного поля, так и его градиентом, поэтому нужно анализировать как геометрию катушки, так и создать схему, обеспечивающую протекание как можно большего тока, который создал бы максимальное поле и при этом не привел бы к выгоранию катушки из-за выделения Джоулева тепла. Этого можно достичь при создании коротких импульсов тока, в течение которых энергия, требуемая для термического разрушения катушки, не успеет выделиться. Поэтому здесь было необходимо придумать радиотехническое решение, обеспечивающее выполнение указанных выше условий.

1.1 Расчёт колебательного контура

Для расчёта конечной скорости снаряда требуется знать параметры колебательного контура (рис. 1.1). Руководствуясь вторым правилом Кирхгофа запишем дифференциальное уравнение, решение которого будет описывать процессы, происходящие в контуре:

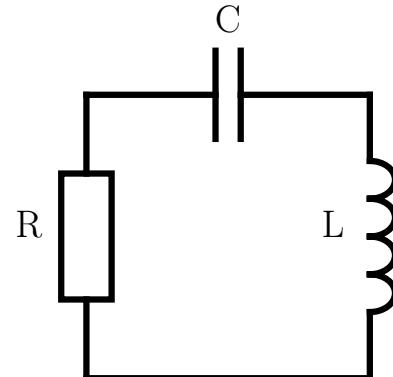


Рисунок 1.1 — RLC-контур

$$L \frac{dI}{dt} + IR + \frac{q}{C} = 0, \quad (1.1)$$

Вводя обозначения коэффициента затухания $\gamma = \frac{R}{2L}$, частоты колебаний $\Omega = \sqrt{\omega_0^2 - \gamma^2}$, начального заряда $q_0 = CU$ получаем зависимость заряда на конденсаторе и тока в цепи от времени [1]:

$$q(t) = q_0 e^{-\gamma t} (\cos \Omega t + \frac{\gamma}{\Omega} \sin \Omega t), \quad (1.2)$$

$$J(t) = \frac{dq}{dt} = -q_0 e^{-\gamma t} \left(\Omega + \frac{\gamma^2}{\Omega} \right) \sin \Omega t. \quad (1.3)$$

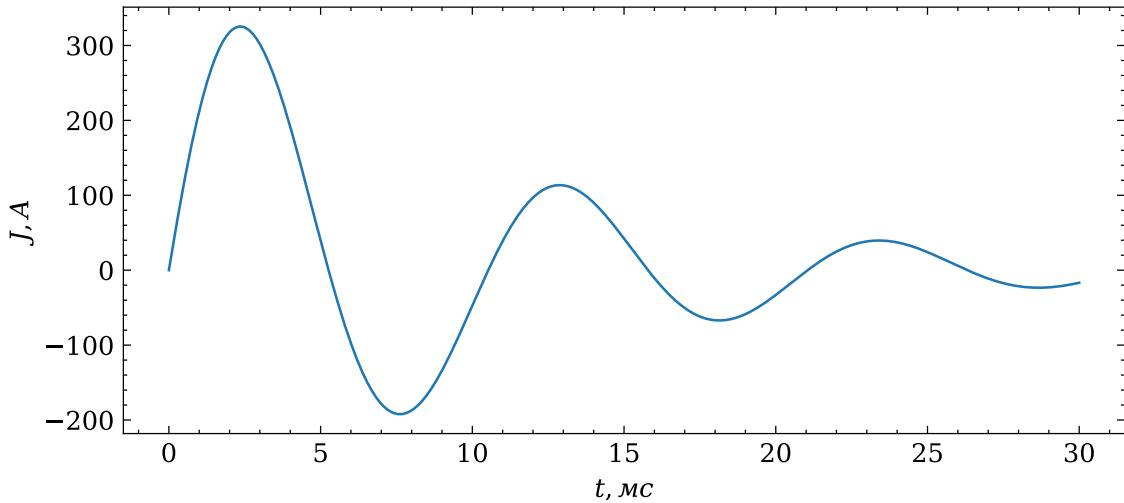


Рисунок 1.2 — Зависимость силы тока в колебательном контуре от времени

1.2 Сила втягивания стержня

Найдём силу, с которой втягивается в вакуумный соленоид длинный цилиндрический стержень с магнитной проницаемостью μ и площадью поперечного сечения S (рис. 1.3). Пусть по соленоиду, имеющему плотность намотки $n = N/l$, циркулирует ток J . Будем предполагать, что *ток в соленоиде неизменный*, так что для расчёта сил нужно использовать формулу

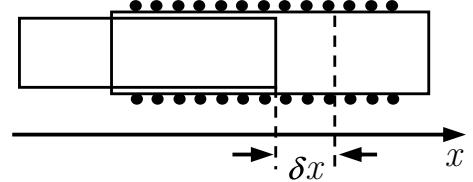


Рисунок 1.3 — Стержень из магнетика, введённый в соленоид, смещается вправо на малое расстояние δx

$$\delta A_{\text{поле}} = f \delta x = (dW)_{J,T}.$$

При смещении стержня на δx изменяется магнитный поток, поскольку часть объёма соленоида заполняется веществом с магнитной проницаемостью μ , и в этой части меняется индукция магнитного поля B . Согласно формуле $W = J\Phi/2c$ имеем

$$(dW)_{J,T} = Jd\Phi/2c = \frac{1}{8\pi n} Hd\Phi. \quad (1.4)$$

Найдём изменение магнитного потока при смещении стержня на dx :

$$d\Phi = n\delta x(BS)_{\text{стержень}} - n\delta x(BS)_{\text{вакуум}} = n\delta x(\mu - 1)HS, \quad (1.5)$$

где BS – поток через один виток. Совмешая 1.4 и 1.5 получаем итоговую формулу для силы, действующей на стержень:

$$f = \frac{(dW)_{J,T}}{\delta x} = \frac{\mu - 1}{8\pi} H^2 S. \quad (1.6)$$

Стоит также отметить, что в сильном поле катушки снаряды намагничиваются. На опыте было подтверждено, что скорость снаряда зависит от его намагниченности. Когда вектор намагниченности \mathbf{I} с направлен с полем \mathbf{H} , то, исходя из формулы $\mathbf{B} = \mathbf{H} + 4\pi\mathbf{I}$ итоговое поле в магнетике усиливается, а следовательно сила втягивания увеличивается.

1.3 Способы оптимизации

Длительность импульса

С помощью изменения длительности импульса мы можем регулировать момент завершения протекания тока через катушку. Наибольшая скорость снаряда достигается при отключении тока через соленоид в момент прохождения центра масс снаряда через центр катушки, так как, если отключить ток позднее, то снаряд будет втягиваться в противоположном направлении движению.

Напряжение

При увеличении напряжение на конденсаторах, увеличивается амплитуда тока, следовательно согласно формуле 1.6 больше сила втягивания снаряда.

Расстояние между ц.м. и центром катушки

Данная зависимость имеет явный максимум, поскольку при малых расстояниях снаряд будет разгоняться малое время, а значит на вылете будет иметь небольшую скорость. С другой стороны при больших расстояниях поле, создаваемое катушкой, в окрестности снаряда будет незначительным (рис. 1.4 [2]), а значит средняя сила втягивания будет меньше, чем при оптимальном расстоянии.

$$B(x) = \frac{2\pi Jn}{c} \left[\frac{L/2 - x}{\sqrt{(L/2 - x)^2 + R^2}} + \frac{L/2 + x}{\sqrt{(L/2 + x)^2 + R^2}} \right] \quad (1.7)$$

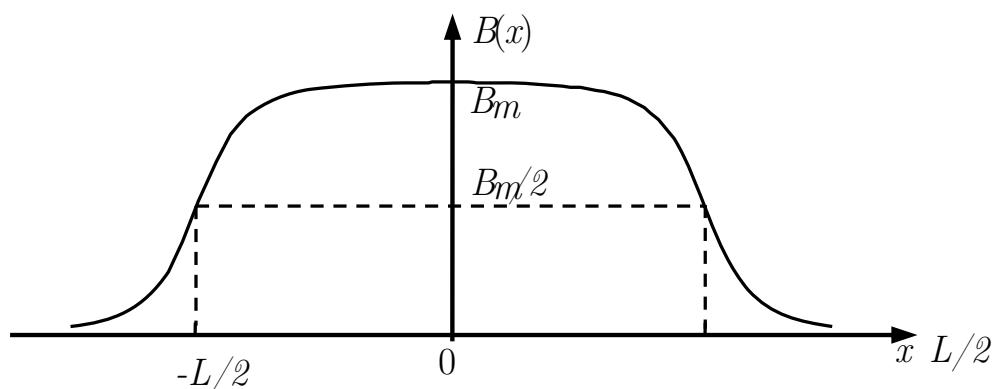


Рисунок 1.4 — Зависимость поля на оси длинного соленоида от координаты. График построен для $L/R = 10$. Поле в центре соленоида приблизительно равно $B_m = 4\pi nJ/c$, а на торцах составляет

$$\approx 0.5B_m = 2\pi nJ/c$$

Длина снаряда

Данная зависимость достаточно сложно описывается теоретически, поэтому в настоящей работе оптимальное значение будет найдено экспериментальным путем.

1.4 Экспериментальная установка

Описание прототипа

В качестве отправной точки мы взяли схему, показанную в Приложении А. Основной принцип работы схемы заключается в управлении

контуром и снятии данных с датчиков с помощью платформы Arduino. Исходный код приведен в [3]. Фотография установки изображена на рис. 1.5

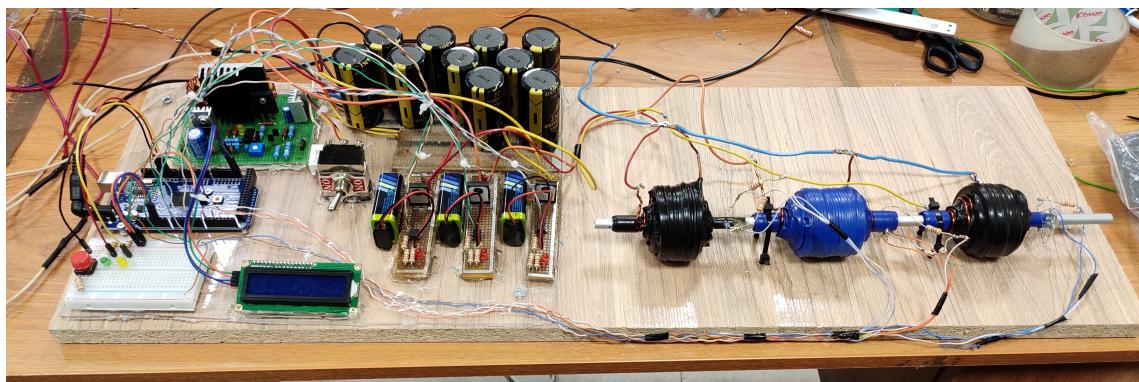


Рисунок 1.5 — Фотография экспериментальной установки

Микроконтроллер Arduino подает импульс на оптопару, которая открывает тиристор. Конденсаторы начинают разряжаться через катушку, в которой возникает магнитное поле. Ферромагнетик своим вектором намагниченности ориентируется по полю и втягивается в соленоид. Для измерения скорости мы используем оптическую схему - ИК-диод светит на фототранзистор. Пролетающий снаряд перекрывает ИК-излучение, и мы фиксируем этот момент с помощью Arduino.

Преобразователь напряжения

В первый момент времени когда, ключ открыт, ток от источника питания протекает через катушку индуктивности, в которой запасается энергия. Диод D при этом закрыт, цепь нагрузки отключена от источника питания, ключа и накопителя энергии. Напряжение на сопротивлении нагрузки поддерживается благодаря запасенной на конденсаторе энергии.

Затем ключ размыкают ЭДС самоиндукции суммируется с напряжением питания, запасенная энергия передается в нагрузку через открытый диод D. Полученное таким способом выходное напряжение превышает напряжение питания.

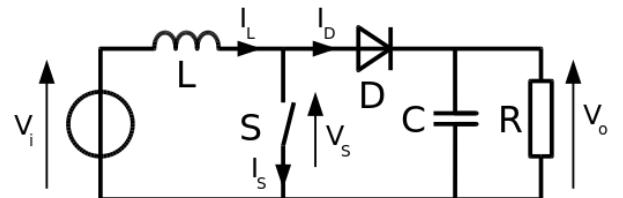
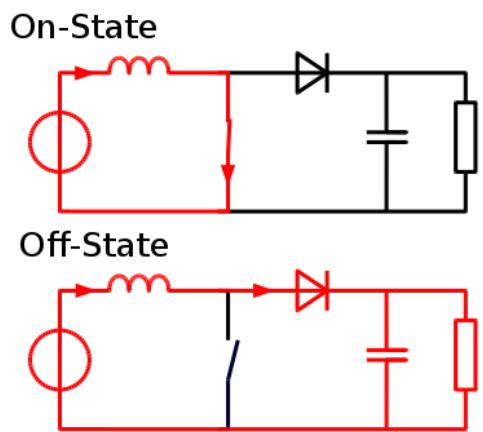
Возникшие проблемы

Проблемы с управлением катушками

В нашей схеме тиристор используется в качестве ключа в RLC-контуре, с помощью которого происходит разрядка конденсатора на катушке. Для достижения наибольшей эффективности системы возникает необходимость отключать ток через катушку, когда снаряд пролетает ее центр. Однако в нашей ситуации возникла проблема с закрытием тиристора - при прекращении подачи напряжения на gate тиристор закрывается только через некоторое время. Вследствие чего снятие зависимости скорости снаряда от длительности импульса не представляется возможным.

Шумы в цепи измерения скорости

В ходе измерений были замечены значительные флюктуации напряжения в данной цепи, что значительно уменьшало точность измерений. Поэтому мы использовали алгоритм цифровой обработки сигнала, вычисляя медианное значение последних 10 показаний.



(b) Схема преобразователя

(a) Принцип работы
преобразователя

Рисунок 1.6 — Импульсный преобразователь напряжения

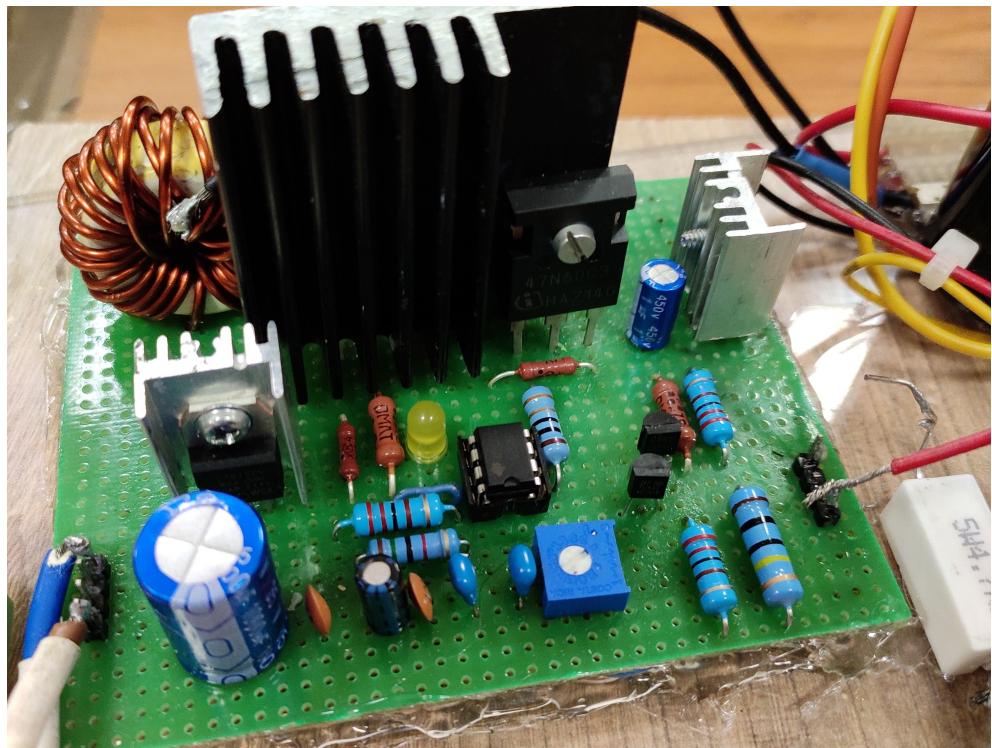


Рисунок 1.7 — Фотография преобразователя напряжения

2 Результаты и их обсуждение

2.1 Зависимость скорости от длины снаряда

Рассмотрим простейшую модель взаимодействия катушки и снаряда. Воспользовавшись формулой (1.6) и соотношениями кинематики, получим формулу для поля соленоида

$$H = \frac{4\pi N}{c L} J,$$

и формулу для скорости снаряда

$$V = at_{\text{н}} = \sqrt{2La} = \sqrt{\frac{2L \cdot f}{m}} = \sqrt{\frac{2fL}{\rho l}} \sim \frac{1}{\sqrt{l}}. \quad (2.1)$$

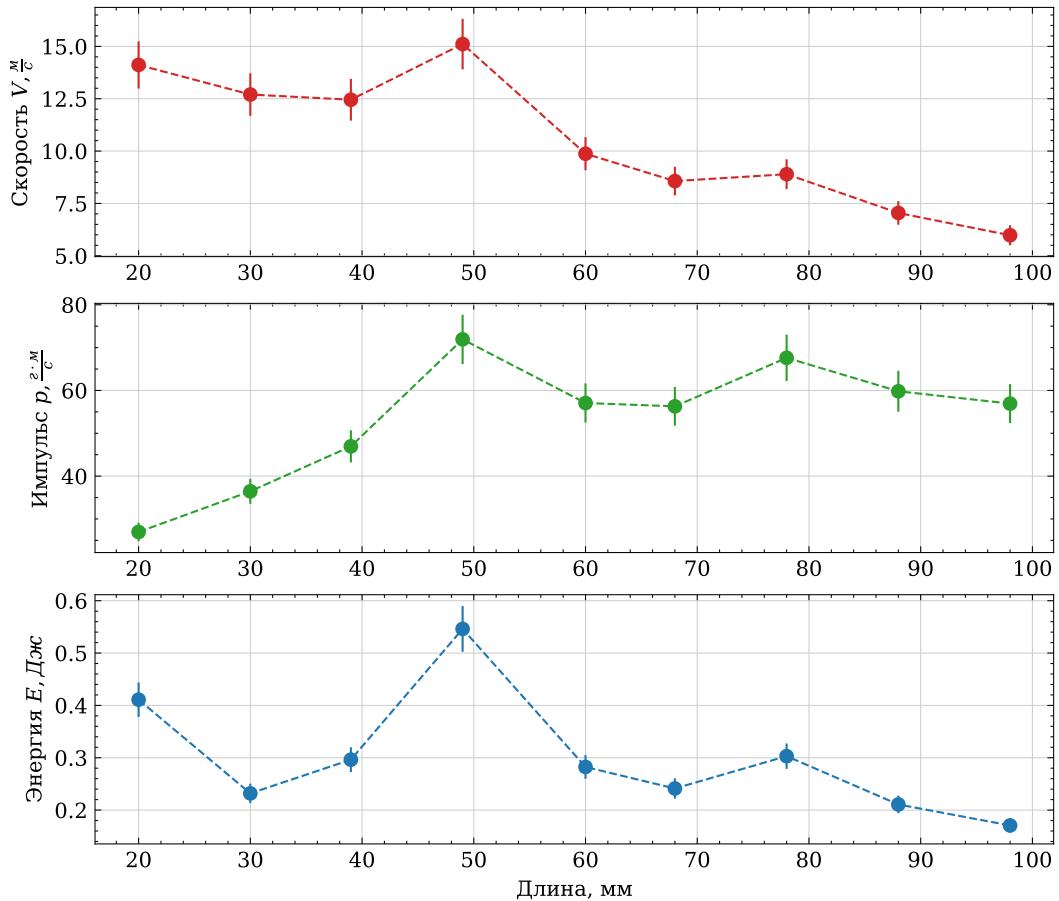


Рисунок 2.1 — Экспериментальная зависимость скорости, импульса и энергии снаряда при вылете из пушки от его длины для одной катушки

На графике виден нисходящий тренд, но он не согласуется с полученной в (2.1) асимптотикой $1/\sqrt{l}$. Это расхождение между теорией и экспериментом вызвано рядом причин:

- а) При описании модели ток через катушку считался постоянным и равным среднему значению;
- б) Не учтена зависимость поля катушки от координаты, которая задается формулой (1.7).

2.2 Зависимость скорости от напряжения на конденсаторах

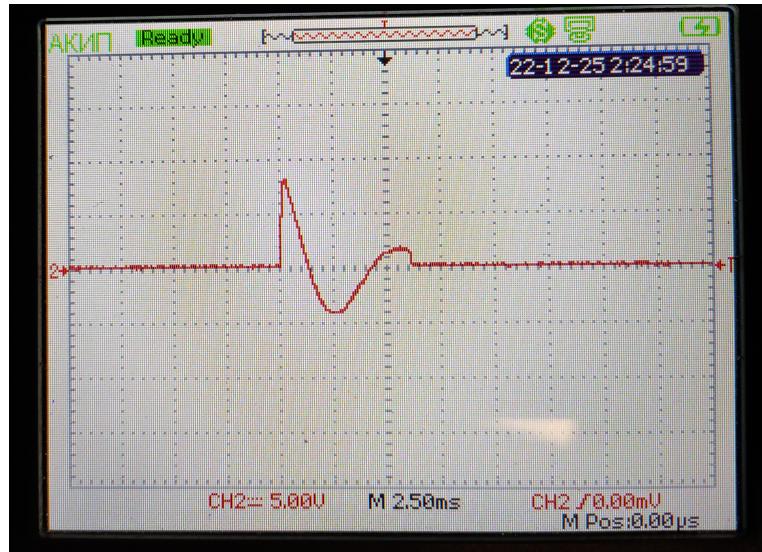


Рисунок 2.2 — Экспериментальная зависимость напряжения на конденсаторах от времени

Согласно формуле силы втягивания (1.6) видно, что сила пропорциональна квадрату силы тока в RLC-контуре. Зная зависимость силы тока от времени в контуре, можно сделать вывод, что амплитудное значение тока связано прямой зависимостью с напряжением, следовательно итоговая скорость снаряда прямо пропорциональна напряжению, подаваемому на конденсаторы:

$$F = \frac{2(\mu - 1)\pi N^2}{c^2 L^2} S \cdot J^2 = \alpha \beta^2 U_0^2, \quad (2.2)$$

где $\alpha = \frac{2(\mu - 1)\pi N^2}{c^2 L^2} S$ и $\beta = C \left(\Omega + \frac{\gamma^2}{\Omega} \right)$.

Подставляя полученное выражение в (2.1) получаем итоговую зависимость скорости от напряжения на конденсаторе:

$$V(U) = \sqrt{\frac{2l\alpha\beta^2 U_0}{m}} \sim U_0. \quad (2.3)$$

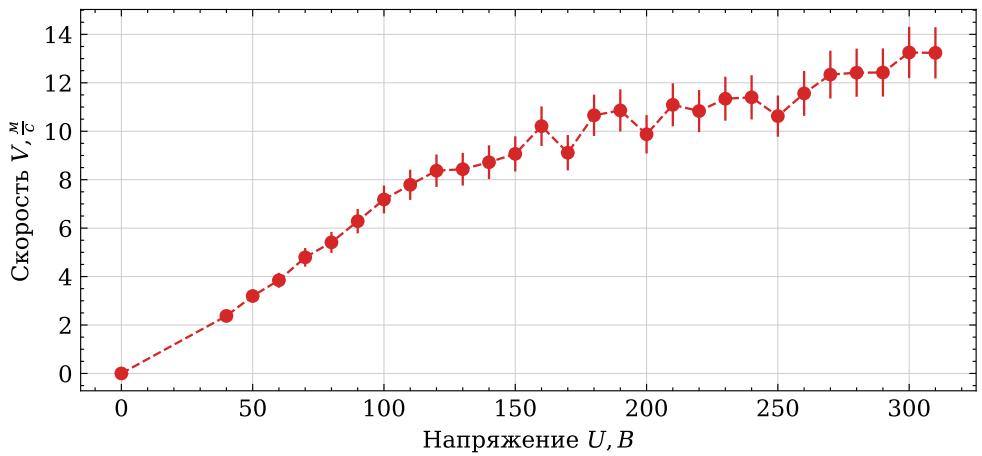


Рисунок 2.3 — Экспериментальная зависимость скорости снаряда при вылете из пушки от напряжения на конденсаторах для одной катушки

Полученные экспериментальные значения имеют ту же асимптотику прямой $V \sim U_0$. Но на практике мы получили расхождение углового коэффициента с теоретическим порядка 10. Это можно объяснить с тем, что силу нельзя считать постоянной.

2.3 Зависимость скорости от расстояния до центра катушки

В общем случае сила является функцией как времени, так и координаты $f = f(x, t)$. В нашем случае для оценки будем считать, что сила зависит только от координаты $f = f(x)$. Тогда, подставляя формулу (1.7) в формулу (1.6), можем получить среднее значение силы, действующей на снаряд:

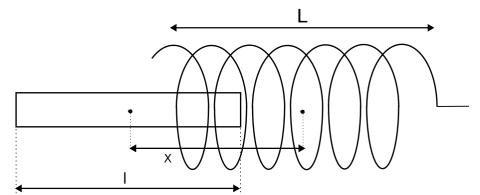


Рисунок 2.4 — Взаимное расположение катушки и снаряда

$$\langle f \rangle = \frac{\alpha}{L} \int_{x-l/2}^{x+l/2} \left(\frac{L/2 - z}{\sqrt{(L/2 - z)^2 + R^2}} + \frac{L/2 + z}{\sqrt{(L/2 + z)^2 + R^2}} \right)^2 I\{z \geq 0\} dz, \quad (2.4)$$

где I — функция-индикатор: $I = -1$ при $z < 0$ и $I = 1$ при $z \geq 0$, $\alpha = (\mu - 1)\pi^2 R^2 J^2 n^2 / 2c^2$.

Данный интеграл не выражается в элементарных функциях, поэтому приведем его численное решение в сравнении с экспериментально полученными данными (рис. 2.5).

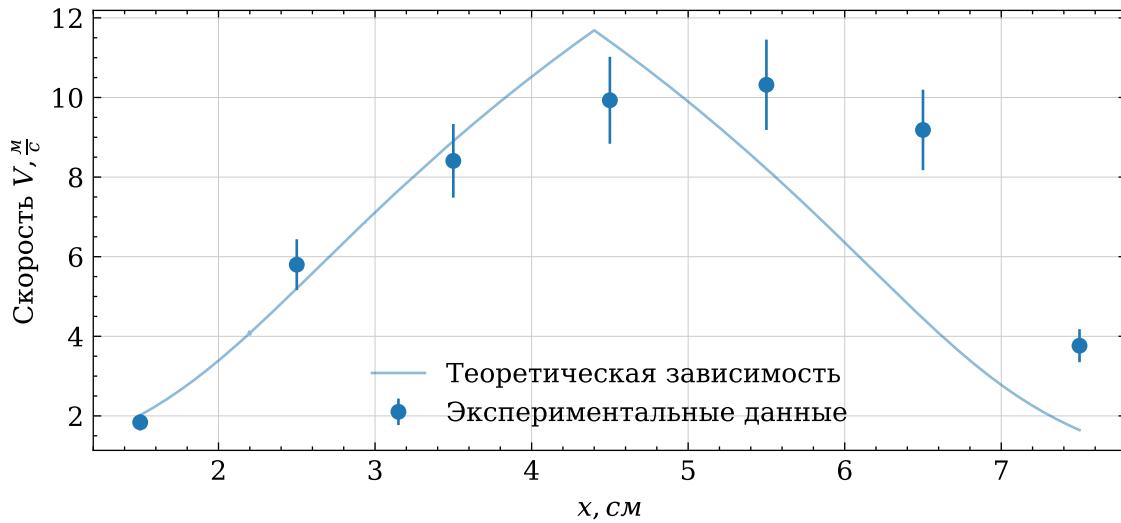


Рисунок 2.5 — Экспериментальная зависимость скорости снаряда при вылете из пушки от расстояния между центром соленоида и центром масс снаряда в сравнении с теоретически полученной кривой

Таким образом, данная зависимость имеет явный максимум и с точностью $\approx 15\%$ совпадает с теоретическим значением. Отклонение можно объяснить тем, что в модели не учитывается зависимость силы от времени.

Заключение

В ходе данной работы был исследован принцип работы пушки Гаусса. Рассмотрено влияние напряжения на конденсаторах, длины снаряда и взаимного расположения его центра масс по отношению к центру катушки на скорость снаряда на вылете. Были построены теоретические модели, описывающие данную систему, а так же установлены границы применимости этих подходов. Также был изучен принцип работы импульсного повышающего преобразователя напряжения и собран его прототип.

Правильный выбор геометрических параметров снаряда позволяет увеличить скорость до 2.3 раз, а энергию до 3.2 раз. Аналогично, правильный выбор напряжения на конденсаторах позволяет повысить скорость до 2 раз. Самым важным параметром для оптимизации оказалось расстояние между центрами катушки и снаряда. В оптимальном положении скорость увеличивается до 3 раз.

Список использованных источников

1. *Сивухин, Д.В.* Общий курс физики. Т. III. Электричество / Д.В. Сивухин. — Москва: Физматлит. — 656 с.
2. *Кириченко, Н.А.* Электричество и магнетизм / Н.А. Кириченко. — Долгопрудный: МФТИ. — 378 с.
3. *Луговцов, Г.С.* Исходный код микроконтроллера на экспериментальной установке. — 2022. <https://github.com/galera951/gauss-gun/tree/main/script>.

Приложение А Схема установки

