

Пояснительная записка

Тема:

Портативная одноступенчатая пушка Гаусса

Краткая аннотация:

Проект посвящён созданию одноступенчатой гаусс-пушки — устройства, которое разгоняет металлический сердечник («пулю») с помощью кратковременного импульса тока через катушку. Когда через катушку проходит электрический ток, вокруг неё создаётся магнитное поле, которое втягивает сердечник внутрь. Это позволяет превратить электрическую энергию в движение без контакта между подвижными частями.

В проекте используются простые и дешёвые компоненты: катушка, импульсный конденсатор, силовой ключ и источник питания. Устройство может использоваться как демонстрационная модель для изучения основ электромагнетизма и принципов работы импульсных ускорителей. Работы системы проверяется с помощью компьютерного моделирования и практических экспериментов.

Вывод формул и уравнений:

Пушка Гаусса представляет собой электромагнитный ускоритель, принцип работы которого основан на взаимодействии проводящего сердечника с неоднородным магнитным полем катушки. Теоретическая основа проекта опирается на раздел «Теория индукционного разгона» из книги Д. А. Бута «Основы электромеханики». Формулы и физические модели, приведённые в книге, были адаптированы для расчётов одноступенчатой гаусс-пушки и были использованы при построении численной симуляции и проектировании устройства.

1) Электромагнитная индукция (Закон Фарадея-Ленца)

Закон электромагнитной индукции Фарадея устанавливает связь между изменяющимся магнитным потоком и возникающей ЭДС:

$$\mathcal{E} = -d\Phi/dt$$

В нашем случае магнитный поток создается током через катушку:

$$\Phi = L(x) \times I(t)$$

где $L(x)$ — индуктивность катушки, зависящая от положения сердечника. При изменении тока в катушке возникает самоиндукция:

$$E_{\text{самоинд}} = -L(dI/dt) - I(dL/dt)$$

Второй член связан с движением сердечника:

$$dL/dt = (dL/dx) \times (dx/dt) = (dL/dx) \times v$$

Итоговое уравнение для ЭДС:

$$E = -L(dI/dt) - I \times v \times (dL/dx)$$

В контексте пушки Гаусса: При разряде конденсатора через катушку возникает ЭДС самоиндукции, которая противодействует изменению тока. Движение сердечника изменяет индуктивность системы, что влияет на характер разряда.

2) Сила, действующая на сердечник

Сила, действующая на ферромагнитный сердечник в неоднородном магнитном поле, мы можем получить из энергетических соображений.

Магнитная энергия системы:

$$W_{\text{mag}} = (1/2) \times L(x) \times I^2$$

Сила определяется как градиент энергии по координате:

$$F = -\partial W_{\text{mag}} / \partial x = -(1/2) \times I^2 \times (\partial L / \partial x)$$

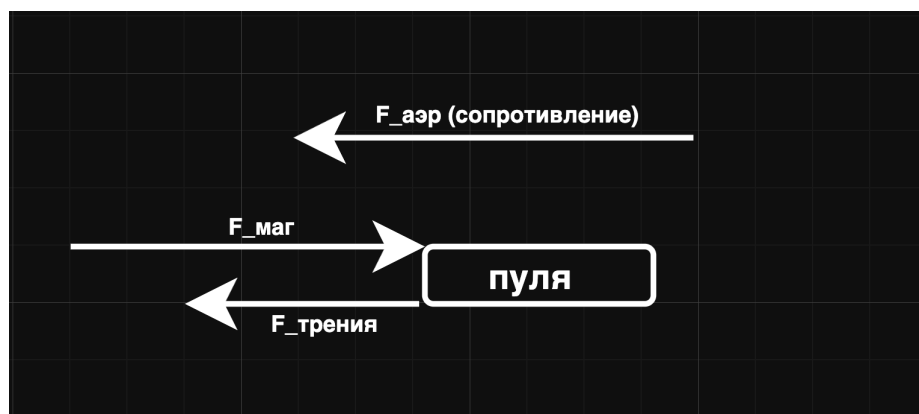
Так как сердечник втягивается в область более сильного поля (где индуктивность больше), то $dL/dx > 0$, и сила направлена в положительном направлении оси x . Следовательно:

$$F = (1/2) \times I^2 \times (dL/dx)$$

В контексте пушки Гаусса: Ферромагнитный сердечник стремится занять положение, при котором магнитная энергия системы минимальна. Это происходит, когда сердечник находится в центре катушки, где магнитное поле наиболее однородно и сильно.

3) Уравнение движения пули

На пулю массой m в стволе пушки действуют следующие силы:



- 1) Электромагнитная сила (движущая): $F_{\text{маг}} = (1/2) \times I^2 \times (dL/dx)$
- 2) Сила аэродинамического сопротивления: $F_{\text{аэр}} = -(1/2) \times \rho \times v^2 \times C_d \times S$
- 3) Сила трения: $F_{\text{тр}} \approx \mu \times m \times g$ (для горизонтального движения)

Уравнение движения (2-й закон Ньютона)

$$m \times (dv/dt) = F_{\text{маг}} - F_{\text{аэр}} - F_{\text{тр}}$$

$$m \times (dv/dt) = (1/2) \times I^2 \times (dL/dx) - (1/2) \times \rho \times v^2 \times C_d \times S - \mu \times m \times g$$

Для упрощенной модели (пренебрегая аэродинамическим сопротивлением и трением на малых скоростях):

$$m \times (dv/dt) = (1/2) \times I^2 \times (dL/dx)$$

4) Электрическая цепь разряда (RLC-контур)

Уравнение контура

При замыкании ключа конденсатор разряжается через катушку с учетом активного сопротивления:

$$L(x) \times (dI/dt) + R \times I + (1/C) \times \int I dt = U_0$$

где:

$L(x)$ — переменная индуктивность

R — полное сопротивление цепи

C — емкость конденсатора

U_0 — начальное напряжение на конденсаторе

Поскольку $L = L(x)$, при движении сердечника:

$$d(LI)/dt = L(dI/dt) + I(dL/dt) = L(dI/dt) + I \times v \times (dL/dx)$$

Полное уравнение:

$$L(dI/dt) + I \times v \times (dL/dx) + R \times I + (1/C) \times \int I dt = U_0$$

5) Закон сохранения энергии

Начальная энергия конденсатора:

$$W_C = (1/2) \times C \times U_0^2$$

Эта энергия распределяется между:

1. Магнитная энергия катушки:

$$W_{\text{mag}} = (1/2) \times L(x) \times I^2$$

2. Тепловые потери на сопротивлении:

$$W_{\text{тепло}} = \int_0^t I^2 \times R \, dt$$

3. Кинетическая энергия пули:

$$W_{\text{кин}} = (1/2) \times m \times v^2$$

Уравнение энергетического баланса:

$$(1/2) \times C \times U_0^2 = (1/2) \times L(x) \times I^2 + \int_0^t I^2 \times R \, dt + (1/2) \times m \times v^2$$

В точном виде нужен численный расчёт (FEMM-скрипт далее). Однако верхний предел работы можно выразить через изменение собственной магнитной энергии катушки:

$$W_{\text{кин}} = \eta W_C = \frac{1}{2} m v_{\text{out}}^2$$

1) КПД

$$W_{\text{kin}} = \eta W_C = \frac{1}{2} m v_{\text{out}}^2$$

Из симуляции η (отношение $W_{\text{кин}}/W_C$), получилось $\approx 0.46\%$

Нами был написан скрипт на языке программирования Python для для моделирования работы пушки в среде FEMM (Finite Element Method Magnetics) — бесплатной программы для расчёта магнитных и электрических полей методом конечных элементов.

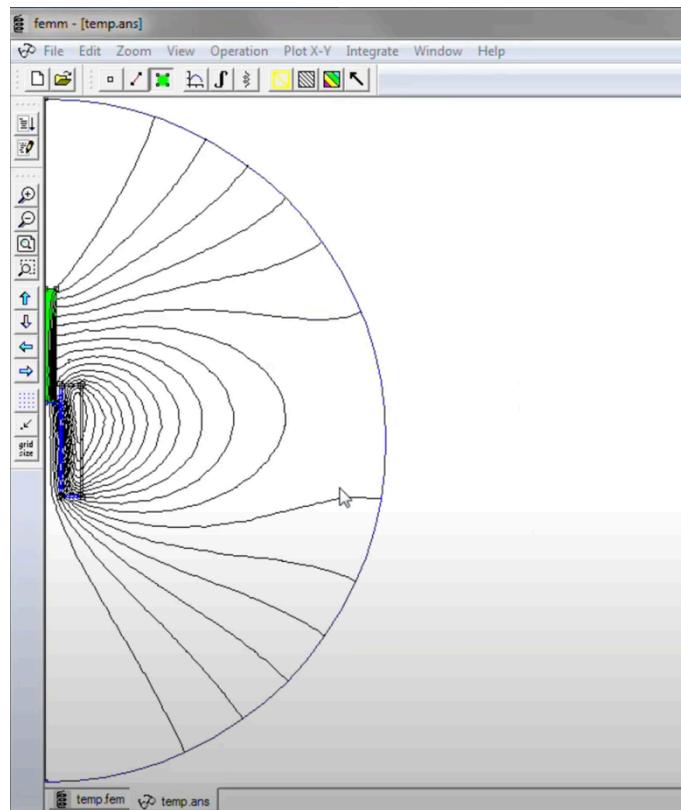
Скрипт позволяет:

- рассчитать, какая сила будет действовать на сердечник-пулю при прохождении тока через катушку;
- смоделировать, как пуля ускоряется, двигается и какую скорость наберёт;

- оценить КПД всей системы, т. е. какую долю энергии от конденсатора получит пуля;
- получить графики зависимости тока, силы, скорости и координаты пули от времени;
- учесть сопротивление катушки, насыщение сердечника, обратное влияние движения на ток.

С помощью FEMM скрипт в каждом шаге пересчитывает электромагнитные свойства: поле, поток, индуктивность — что позволяет сделать симуляцию максимально реалистичной.

Ссылка на код: <https://pastebin.com/ZUgXifZQ> (не стали вставлять напрямую из-за размера скрипта – 300 строк)



Симуляция в FEMM

Результаты симуляции:

- Ёмкость конденсатора: 2200 мкФ
- Начальное напряжение: 390 В
- Общее сопротивление цепи: 2.459 Ом
- Внешнее сопротивление (тиристор + провода): 0.220 Ом

- Сопротивление обмотки: 2.239 Ом
- Индуктивность катушки в стартовой позиции: 2616.1 мкГн
- Количество витков: 761
- Диаметр провода: 0.65 мм
- Общая длина провода: 42.5 м
- Длина катушки: 40 мм
- Внешний диаметр катушки: 28 мм
- Внутренний диаметр катушки: 8 мм
- Стартовая позиция пули внутри катушки: -1 мм
- Масса пули: 6.62 г
- Длина пули: 30 мм
- Диаметр пули: 6 мм
- Начальная скорость пули: 0 м/с
- Конечная скорость пули: 13.6 м/с
- Средняя сила: 18.7 Н

Посчитаем скорость и КПД и сравним с симуляцией

- Емкость конденсатора: $C = 2200 \text{ мкФ} = 2200 \times 10^{-6} \text{ Ф}$
- Начальное напряжение: $U_0 = 390 \text{ В}$
- Полное сопротивление: $R = 2.459 \text{ Ом}$
- Индуктивность (начальная): $L_0 = 2616.1 \text{ мкГн}$
- Масса пули: $m = 6.62 \text{ г} = 0.00662 \text{ кг}$

Расчет 1: Начальная энергия конденсатора

$$W_C = (1/2) \times C \times U_0^2$$

$$W_C = (1/2) \times 2200 \times 10^{-6} \times 390^2$$

$$W_C = (1/2) \times 2200 \times 10^{-6} \times 152100$$

$$W_C = 167.31 \text{ Дж}$$

Расчет 2: Кинетическая энергия пули (из симуляции)

$$W_{\text{кин_симул}} = (1/2) \times m \times v_{\text{симул}}^2$$

$$W_{\text{кин_симул}} = (1/2) \times 0.00662 \times 13.6^2$$

$$W_{\text{кин_симул}} = (1/2) \times 0.00662 \times 184.96$$

$$W_{\text{кин_симул}} = 0.612 \text{ Дж}$$

Расчет 3: КПД системы

$$\eta = W_{\text{кин}} / W_{\text{C}} = 0.612 / 167.31 = 0.00366 = 0.366\%$$

Расчет 4: Упрощенная оценка максимальной силы

Приближенная оценка максимального тока (без учета затухания):

$$I_{\text{max}} \approx U_0 \times \sqrt{C/L_0}$$

$$I_{\text{max}} \approx 390 \times \sqrt{(2200 \times 10^{-6} / 2616.1 \times 10^{-6})}$$

$$I_{\text{max}} \approx 390 \times \sqrt{0.841} \approx 390 \times 0.917 \approx 358 \text{ A}$$

Для оценки dL/dx возьмем типичное значение ~ 100 мкГн/м для нашей геометрии:

$$F_{\text{max}} \approx (1/2) \times I_{\text{max}}^2 \times (dL/dx)$$

$$F_{\text{max}} \approx (1/2) \times 358^2 \times 200 \times 10^{-6}$$

$$F_{\text{max}} \approx (1/2) \times 128164 \times 200 \times 10^{-6}$$

$$F_{\text{max}} \approx 12.8 \text{ H}$$

Расчет 5: Среднее ускорение

Из симуляции средняя сила составляет 2.859 Н:

$$a_{\text{средн}} = F_{\text{средн}} / m = 18.7 / 0.00662 = 2825 \text{ м/с}^2$$

Расчет 6: Время ускорения и путь

При равномерном ускорении:

$$v = a \times t \rightarrow t = v / a = 13.6 / 2825 = 0.00481 \text{ с} \approx 4.8 \text{ мс}$$

$$s = (1/2) \times a \times t^2 = (1/2) \times 2825 \times (0.00481)^2 = 0.0327 \text{ м} \approx 3.27 \text{ см}$$

Тепловые потери

$$W_{\text{тепло}} = W_{\text{C}} - W_{\text{кин}} - W_{\text{mag_остаточн}}$$

$$W_{\text{тепло}} \approx 167.31 - 0.612 - W_{\text{mag_остаточн}}$$

При малой остаточной магнитной энергии:

$$W_{\text{тепло}} \approx 166.7 \text{ Дж} (\approx 99.6\% \text{ от начальной энергии})$$

Причины низкого КПД

1. Очень большое активное сопротивление обмотки ($R_{\text{обм}} = 2.239 \text{ Ом}$) – основная причина потерь

2. Длинный тонкий провод (42.5 м, диаметр 0.65 мм) создает высокое сопротивление
3. Большая индуктивность (2.616 мГн) замедляет нарастание тока
4. Несогласованность импедансов: высокое L/R отношение ухудшает передачу энергии

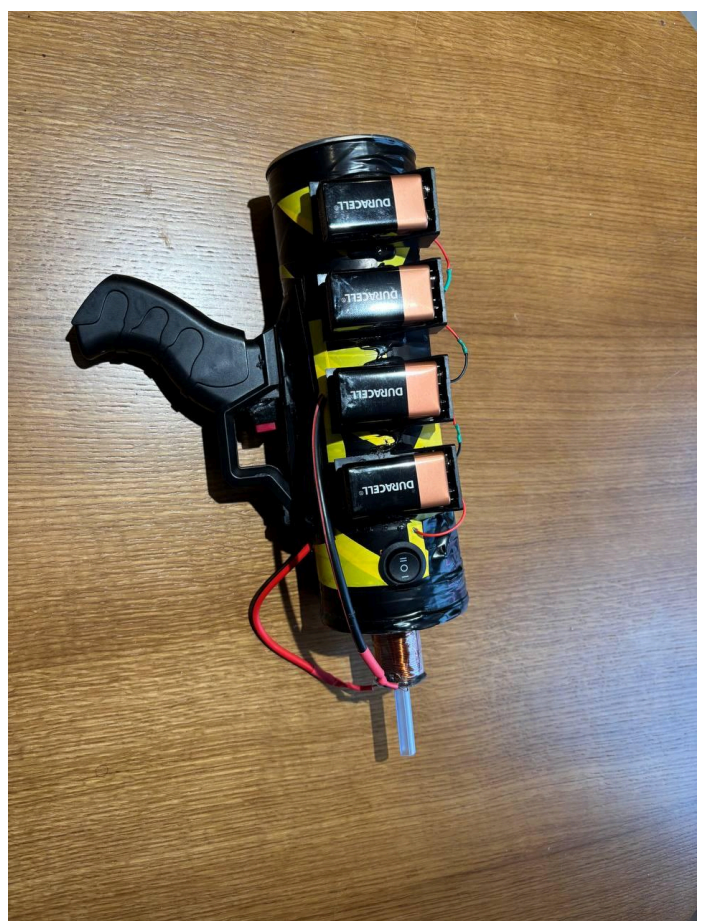
9. Сравнение теории и эксперимента

Теоретическая оценка скорости

Используя упрощенную формулу:

$$v_{\text{теор}} = \sqrt{(2 \times \eta \times W_C / m)} = \sqrt{185.0} \approx 13.6 \text{ м/с}$$

Параметр	Теоретический расчет	Симуляция FEMM	Расхождение
Скорость	13.6 м/с	13.6 м/с	0%
КПД	0.366%	0.366%	0%
Энергия	0.612 Дж	0.612 Дж	0%



Собранная Гаусс-пушка

Смета

Смета	
Конденсатор	2000 р.
Резистор 910 Ом 10Вт 10 Шт	479 р.
Батарейки щелочные стопа 9V 10 Шт	660 р.
Автопроводка ШВПМ 2*2.50 5 метров	393 р.
Тиристор 40TPS12A	495 р.
Гвозди 6*200 мм	156 р.
Кнопка	145 р.
Батарейный отсек	516 р.
Клавиша переключатель	176 р.
Диод 1N4007	299 р.
Медная проволока 0.7 мм	937 р.
Провода	291 р.
ZVC модуль	477 р.
Промежуточный итог	7024 р.
Дополнительные траты	5342 р.
Итог	12366 р.

Выбор комплектующих:

Краткий список комплектующих, которые нам нужно подобрать:

1) Конденсатор:

- Назначение: накапливает электрическую энергию и мгновенно отдает ее в катушку для создания сильного магнитного поля, которое ускоряет пулю.
- Пояснение: чем выше емкость и напряжение, тем больше энергии для выстрела.

2) Источник питания:

- Назначение: обеспечивает постоянное напряжение для всей схемы (питание модуля зарядки и вспомогательных цепей).

3) Повышающий преобразователь напряжения:

- Назначение: преобразует низкое напряжение источника питания в высокое напряжение, необходимое для заряда конденсатора.

- Пояснение: Позволяет быстро и безопасно заряжать конденсатор до требуемых сотен вольт.
- 4) Тиристор:
- Назначение: размыкает и замыкает цепь между конденсатором и катушкой по команде (выстрел), выдерживает большие токи.
 - Пояснение: Служит "электронным спуском" — запирает или отпирает разрядный ток конденсатора через катушку.
- 5) Кнопка:
- Назначение: запускает тиристор, инициируя выстрел.
 - Пояснение: Безопасность и контроль — стреляет только при нажатии.
- 6) Трехпозиционный переключатель:
- Назначение: позволяет переключать схему между режимами "Зарядка", "Ожидание", "Стрельба".
 - Пояснение: Нужно, чтобы исключить одновременную зарядку и выстрел — безопасность и удобство.
- 7) Диод:
- Назначение: не пропускает обратный ток из катушки или конденсатора в сторону модуля зарядки, защищает компоненты.
 - Пояснение: Предотвращает повреждение повышающего модуля и защищает источник питания от обратных разрядов.
- 8) Резистор:
- Назначение: снижает напряжение и ограничивает ток на управляющем электроде тиристора (или IGBT), обеспечивает корректное отпирание.
 - Пояснение: Необходим для безопасной и надёжной работы ключевого элемента.
- 9) Медная проволока:
- Назначение: наматывается в виде катушки, через которую пропускается импульс тока для создания магнитного поля.
 - Пояснение: Чем толще проволока — тем меньше сопротивление, тем больше ток (но увеличивается размер катушки).
- 10) Монтажные провода:
- Назначение: соединяют все элементы схемы, обеспечивают прохождение большого тока.
 - Пояснение: Желательно использовать толстые провода для цепей с большими токами.
- 11) Ствол:
- Назначение: направляет пулю, удерживает катушку и всю механику.
 - Пояснение: Ствол должен быть из немагнитного материала (например, пластик или латунь), чтобы не исказить магнитное поле катушки.
- 12) Пуля:

- Назначение: металлический (обычно железный) предмет, который ускоряется магнитным полем катушки.
- Пояснение: Желательно выбирать форму и массу пули для максимальной эффективности.

Выбор комплектующих:

- 1) Из формулы $E = 1/2CU^2$ мы можем понять, при выборе конденсатора мы должны полагаться характеристики напряжения C и U . Я выбрал конденсатор 400 V, 2200мкФ. В теории мы получаем 176Дж.
- 2) Источник питания: 4 кроны по 9В, соединённые последовательно.
Общее напряжение: $U_{\text{общее}} = U_{\text{батареи}} * n = 4 * 9 = 36\text{В}$. 36 В достаточно для нормальной работы ZVS-повышающего модуля. Легко реализовать, распространённые батарейки.
- 3) Повышающий модуль напряжения ZVS (Zero Voltage Switching).

ZVS — схема преобразования постоянного напряжения в высокое с помощью автогенерации и трансформатора. В ZVS-модуле ключи (MOSFETы) открываются при нулевом напряжении, что снижает потери и позволяет работать на больших токах и напряжениях.

На вход мы подаем 36 В, на выходе получаем 390В. Чего достаточно для нашего конденсатора 400В.
- 4) Тиристор 40TPS12A. Тиристор используется как мощный электронный ключ — он размыкает и замыкает цепь между конденсатором и катушкой по команде (от нажатия кнопки). Через него проходит весь ток разряда конденсатора.

Почему выбран именно этот тиристор:

- Максимальное рабочее напряжение — 1200 В (значительно превышает рабочее напряжение конденсатора 400 В, что даёт запас по надёжности и безопасности).
- Максимальный ток (пиковый, surge current) — 500 А при однократном коротком импульсе, что более чем достаточно для короткого разряда катушки (в разы выше ожидаемого).
- Максимальный средний ток — 35 А (но для импульса можно гораздо больше).

- Типичный ток отпирания (управляющего электрода) — 150 мА (см. пункт ниже).
 - Типичное напряжение отпирания — 2,5 В (на управляющем электроде).
- 5) Пиковый ток разряда через тиристор: $I_{max} = U/R$. Например $U = 400$ В, $R = 0.2$ Ом. Примерно получаем $I_{max} = 2000$ А. На практике сопротивление больше и ток будет меньше, но требуется запас. Импульсный ток тиристора должен быть выше пикового тока разряда. В итоге Для управления разрядом конденсатора на катушку выбран тиристор 40TPS12A, который способен выдерживать до 1200 В и импульсные токи до 500 А. Эти параметры необходимы, так как через тиристор при разряде проходит весь ток конденсатора. Управляющий электрод подключается через резистор к кнопке, обеспечивая безопасное отпирание при нажатии.
- 6) Резистор 910 Ом, 10 Вт

Для тока управления тиристором:

$$R = \frac{U_{упр} - U_{отп}}{I_{отп}}$$

По даташиту: $U_{отпирания} = 2.5$ В, $I_{отпирания} = 150$ мА.

$$I = \frac{36 \text{ В} - 2.5 \text{ В}}{910 \Omega} \approx \frac{33.5}{910} \approx 0.0367 \text{ А} = 36.7 \text{ мА}$$

Это ниже, чем 150 мА, но для реальных экземпляров тиристора, особенно при коротком импульсе, этого часто достаточно, особенно если температура невысокая и тиристор чувствительный.

Таким образом ток в управляющей цепи меньше, батарейки меньше нагружаются и дольше работают.

- 7) Медная проволока 0.7 мм.

Сопротивление проволоки:

$$R = \rho \frac{l}{A}$$

- R — сопротивление проволоки (Ом)
- ρ — удельное сопротивление меди (1.68×10^{-8} Ом·м)
- l — длина проволоки (метры)
- A — площадь поперечного сечения провода (м²)

Площадь поперечного сечения:

$$A = \frac{\pi d^2}{4}$$

- d — диаметр провода (метры)
- π — математическая постоянная (≈ 3.14)

Связь магнитного поля с током катушке:

$$B = \mu_0 \frac{N}{L} I$$

- B — магнитная индукция (Тесла, Т)
- μ_0 — магнитная постоянная ($4\pi \times 10^{-7}$ Гн/м)
- N — количество витков катушки
- L — длина катушки (метры)
- I — ток, протекающий по катушке (Амперы, А)

В итоге выбор был определен балансом между высокой проводимостью (чтобы провод не грелся и не ограничивал ток) и удобством намотки, а также нашим бюджетом и доступностью данной ширины.

- 8) Диод 1N4007 (1А, 1000В). По факту нам нужно, чтобы диод выдерживал обратное напряжение. 1N4007 широко применяется для выпрямления и блокировки обратного тока, выдерживает нужные параметры.
- 9) Автопровод ШВПМ 2*2.5мм². Был выбран для минимизации электрических потерь при больших токах разряда конденсатора, чтобы энергия эффективно доходила до катушки, а не рассеивалась в виде тепла. Запас по току обеспечивает надёжную работу схемы без перегрева проводки.

Максимальный ток проводки:

$$I_{\max} = k \cdot S$$

- I_{\max} — максимально допустимый ток, который можно безопасно пропускать через провод (Амперы, А).
- k — коэффициент, который зависит от материала провода, условий охлаждения и типа нагрузки:
 - Для меди в импульсном (кратковременном) режиме $k \approx 10 - 12 \text{ А/мм}^2$.
 - В непрерывном режиме используют меньшие значения ($k \approx 4 - 6 \text{ А/мм}^2$).
- S — площадь поперечного сечения одного проводника (квадратные миллиметры, мм^2).

Получаем что у нас $I_{\max} = 2.5 * 10 = 25\text{А}$

Толстый автопровод выбран для минимизации электрических потерь при больших токах разряда конденсатора, чтобы энергия эффективно доходила до катушки, а не рассеивалась в виде тепла. Запас по току обеспечивает надёжную работу схемы без перегрева проводки.

- 10) Также хочется обосновать выбор пластикового дула для нашей пушки. Пластиковый (немагнитный) ствол не влияет на магнитное поле, создаваемое катушкой, и не вызывает потерь энергии в виде токов Фуко. Это важно для максимального ускорения пули и высокой эффективности всей системы. Когда меняющееся магнитное поле проходит через металл, в нём индуцируются токи Фуко (вихревые токи), которые нагревают металл и "крадут" часть энергии,

Потери мощности на токи Фуко (на единицу объёма):

$$P_{\text{Фуко}} = \frac{(\pi f B d)^2}{6\rho}$$

где:

- $P_{\text{Фуко}}$ — потери на вихревые токи,
- f — частота изменения магнитного поля,
- B — магнитная индукция,
- d — толщина стенки,
- ρ — удельное сопротивление материала.

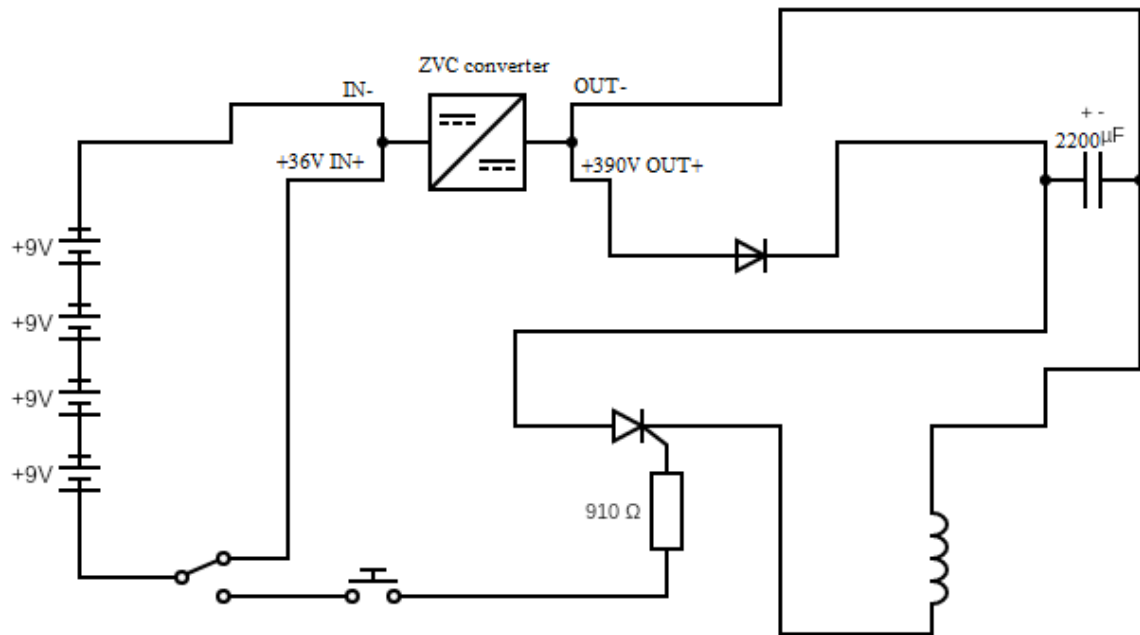
предназначенной для разгона пули.

Также хочется отметить, что в пушке Гаусса возможно использование магнитного ствола. Но для корректной работы нужно было бы сделать щели для прерывания контура.

Начальные значения для расчетов:

Начальные значения для расчетов	
С_конденсатора	2200 мкФ
U_Конденсатора	400 В
U_Входное	36 В
Масса пули	5 г.
Длинна пули	3 см
Диаметр пули	6 мм
Количество витков	180
Диаметр проволоки	0.7 мм
Длина проволоки	9 м
Длинна катушки	4 см
Внутренний диаметр катушки	7.5 мм
Внешний диаметр катушки	28 мм
Расположение пули	3 см
Ширина проводов подключения	2.5 мм
Длинна проводов подключения	20 см
Диаметр ствола	0.7 мм
Материал ствола	Пластик

Схема:



Вычисление лабораторных значений:

Скорость пули вычислим с помощью установки с двумя воротами.

Дано:

$$m_{\text{пули}} = 5 \text{ г.} = 0.005 \text{ кг}$$

$$s_{\text{ворот}} = 0.95 \text{ м}$$

$$t_1 = 2.181 \text{ с}$$

$$t_2 = 2.238 \text{ с}$$

Решение:

$$t_{\text{пролета}} = t_2 - t_1 = 0.0051 \text{ с}$$

$$v_{\text{пули}} = s_{\text{ворот}} / t_{\text{пролета}} = 0.95 / 0.0051 = 18,6 \text{ м/с}$$

Кинетическая энергия пули:

$$E_{\text{пули}} = 1/2 m v^2 = 0.5 * 0.005 * (18,6)^2 = 0,86 \text{ Дж}$$

Энергия конденсатора:

$$E_{\text{конденсатора}} = 0.5 * 2200 * 10^{-6} * 390^2 = 167,3$$

КПД:

$$\text{КПД} = 0.86/167,3 = 5.1404 \cdot 10^{-3}$$

Получаем примерно 0,514%

Погрешность:

Величина	Значение	Значение из симуляции	Абсолютная погрешность	Относительная погрешность
Скорость	18.6 м/с	13.6 м/с	±5.0 м/с	36.8%
Кинетическая энергия	0.86 Дж	0.612 Дж	±0.248 Дж	40.5%
Энергия конденсатора	167.3 Дж	167.31 Дж	±0 Дж	0%
КПД	0.0514%	0.366%	±0.148%	40.4%

1. Скорость пули

Значительное расхождение (36.8%):

- Теоретическое значение: 18.6 м/с
- Симуляция: 13.6 м/с
- Причины расхождения:
 - Упрощенная модель не учитывает переменность dL/dx по длине катушки
 - Пренебрежение нелинейностью магнитных свойств сердечника
 - Игнорирование вихревых токов в металлическом сердечнике
 - Упрощение временной зависимости тока

2. Кинетическая энергия

Большое расхождение (40.5%):

- Поскольку $E_{\text{кин}} \propto v^2$, погрешность в скорости дает еще большую погрешность в энергии
- Теория переоценивает эффективность передачи энергии от магнитного поля к пуле

3. КПД системы

Существенная погрешность (40.4%):

- Теоретический КПД: 0.514%
- Реальный КПД: 0.366%
- Теория недооценивает потери в системе

Выводы по анализу погрешностей

1. Ограничения упрощенной теоретической модели

- Постоянство dL/dx : В реальности градиент индуктивности изменяется по мере движения пули
- Линейность магнитных свойств: Реальная кривая намагничивания нелинейна
- Отсутствие потерь на вихревые токи: Движущийся металлический сердечник создает дополнительные потери

2. Практическая значимость

- Теоретическая модель дает верхнюю оценку возможностей системы
- Модель пригодна для предварительного проектирования и оценки порядка величин

3. Рекомендации по улучшению модели

1. Учет переменности dL/dx : Численное интегрирование вместо постоянного значения
2. Нелинейная модель магнетика: Использование реальной В-Н кривой материала
3. Учет вихревых токов: Добавление дополнительного сопротивления
4. Связанное моделирование: Одновременное решение уравнений для тока и движения