

Аннотация

Объем 55 с., 35 рис., 5 табл., 20 источников, 2 прил.

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЙ СИНХРОННЫЙ УСКОРИТЕЛЬ, ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ, ПУШКА ГАУССА

Объектом разработки является установка для ускорения ферромагнетика магнитным полем.

Цель работы: изготовление действующего макета установки синхронного ускорения.

Задачи работы:

1. Обзор существующих решений
2. Разработка электрической принципиальной схемы
3. Разработка конструкции
4. Разработка программы
5. Изготовление макета установки
6. Экспериментальные исследования

Работа состоит из пяти глав, в которых решены упомянутые задачи.

Для написания программы использовалась среда разработки «Ардуино».

Степень внедрения: создан действующий макет установки для ускорения магнитным полем.

Областью применения данной работы является образование при обучении электротехническим специальностям.

На данный момент времени, созданный макет установки, может использоваться в качестве демонстрационного пособия.

Оглавление

Аннотация	2
Введение.....	4
1 Обзорная часть	5
2 Схемотехническая часть.....	8
3 Разработка конструкции.....	19
4 Программная часть	27
5 Исследовательская часть.....	33
Заключение	47
Список литературы	48
Приложение А	51
Приложение В	53

Введение

В настоящее время актуальна задача разгона твердого тела, в частности для кинетических оружий. Пневматическое и огнестрельное оружие используют для разгона снаряда давление газа. Механические оружия, такие как арбалет и лук, используют энергию, запасаемую при сгибании дуги. Помимо этого, существует способ сообщать энергию снаряду с помощью магнитного поля.

Данная работа будет посвящена разработке ускорителя, который будет синхронно сообщать энергию снаряду, с помощью магнитного поля. Установка в первую очередь будет предназначена как демонстрация физических эффектов, и как экспонат на выставках.

Целью работы является разработка и создание действующего ускорителя. Для достижения цели выполнили ряд задач:

- 1) Сделан обзор возможных конструкторских решений и выбор.
- 2) Сделан обзор схмотехнических решений и выбор.
- 3) Произведена разработка электрической схемы.
- 4) Разработана и изготовлена конструкция и схмотехническая часть установки.
- 5) Написана и отлажена программа.
- 6) Проведен ряд экспериментальных исследований.

1 Обзорная часть

Существуют устройства [1], [2], [3], в которых реализовано линейное ускорение, одно из которых показано на рисунке 1.1.



Рисунок 1.1 – Устройство, использующее магнитное поле для линейного ускорения снаряда

Данное устройство называется Пушкой Гаусса [4], и является электромагнитным ускорителем.

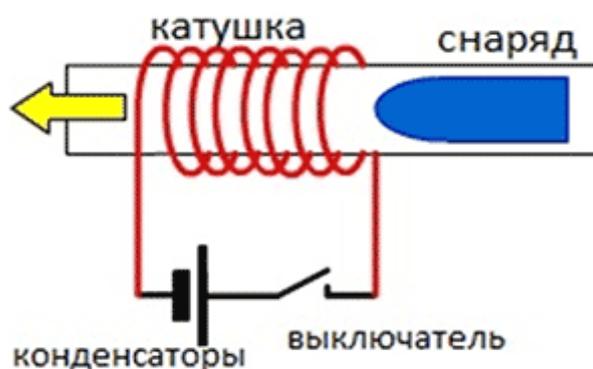


Рисунок 1.2 – Принцип электромагнитного ускорителя

Пушка Гаусса названа в честь немецкого ученого Карла Гаусса, который заложил основы теории электромагнетизма. Она состоит из

соленоида, диэлектрического ствола и ферромагнитного снаряда. При протекании тока по соленоиду, создается магнитное поле, втягивающее снаряд в более сильное поле, то есть ближе к центру соленоида. Однако после пролета снарядом центра соленоида, сила начнет прилагаться к нему в обратном направлении, и он будет тормозиться. Поэтому схема должна предусматривать падение индукции после пролета снарядом центра соленоида.

Энергия, запасенная в магнитном поле, определяется выражением[5]

$$W = \frac{V \cdot B^2}{2 \cdot \mu \cdot \mu_0}, \quad (1)$$

где V - объем поля, м^3 ;

B – магнитная индукция, Тл;

μ – магнитная проницаемость;

μ_0 – магнитная постоянная.

Т.к. магнитная проницаемость ферромагнетика довольно высока [6], он ускоряется по пути к более сильному полю, вбирая в себя энергию поля, накопленную в том объеме, куда он влетает, пропорциональную квадрату индукции. Индукция на начальном этапе, исходя из кривой намагничивания, возрастает линейно. Однако, при дальнейшем увеличении напряженности и индукции поля, магнитная проницаемость падает, и использование энергии поля становится не столь эффективным. Это хорошо видно на Рисунке 1.3.

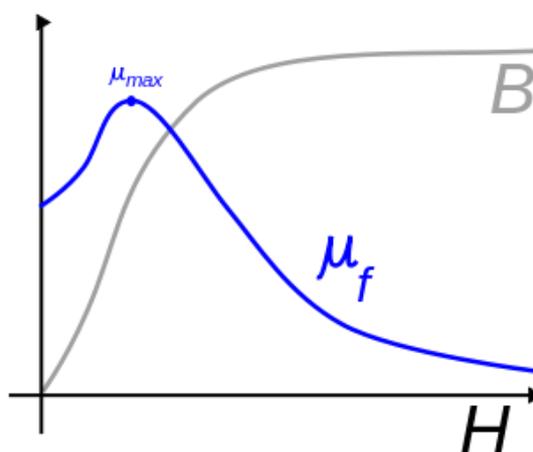


Рисунок 1.3 – Кривая намагничивания для ферромагнетиков и соответствующий ей график магнитной проницаемости

С целью увеличить сообщаемую энергию, в Пушке Гаусса используются несколько катушек.

Помимо этого, существует устройство, называемое синхротроном [7]. Синхротрон – резонансный циклический ускоритель. Представляет собой установку с вакуумной кольцевой камерой, в которой ускоряются частицы. Мощные электромагниты создают им кольцевую траекторию движения, тем самым позволяя контролировать весь процесс и достигать скорости, близкой к скорости света. В камере необходимо постоянно поддерживать сверхвысокий вакуум, чтобы частицы остаточного газа не мешали разгону. Частицы, пролетая через ускоряющую секцию, получают маленькую порцию энергии, которая гораздо меньше, чем их кинетическая энергия, однако, за счет большой частоты пролета через секцию, происходит сильное ускорение частиц.

Объединив идею электромагнитного ускорения ферромагнетика, реализованную в пушке Гаусса, и идею круговой траектории ускорения в синхротроне, удастся решить множество проблем, и новое устройство приобретет новые полезные свойства. Конструкцию удастся реализовать с одним соленоидом. Энергия ускоряемому телу будет сообщаться порциями при прохождении ускоряющей секции. Весь процесс будет происходить в замкнутом объеме, непрерывно, что будет очень наглядно.

Был проведен поиск похожих устройств, но подобного решения найти не удалось.

2 Схемотехническая часть

Блок схема устройства приведена на рисунке 2.1.

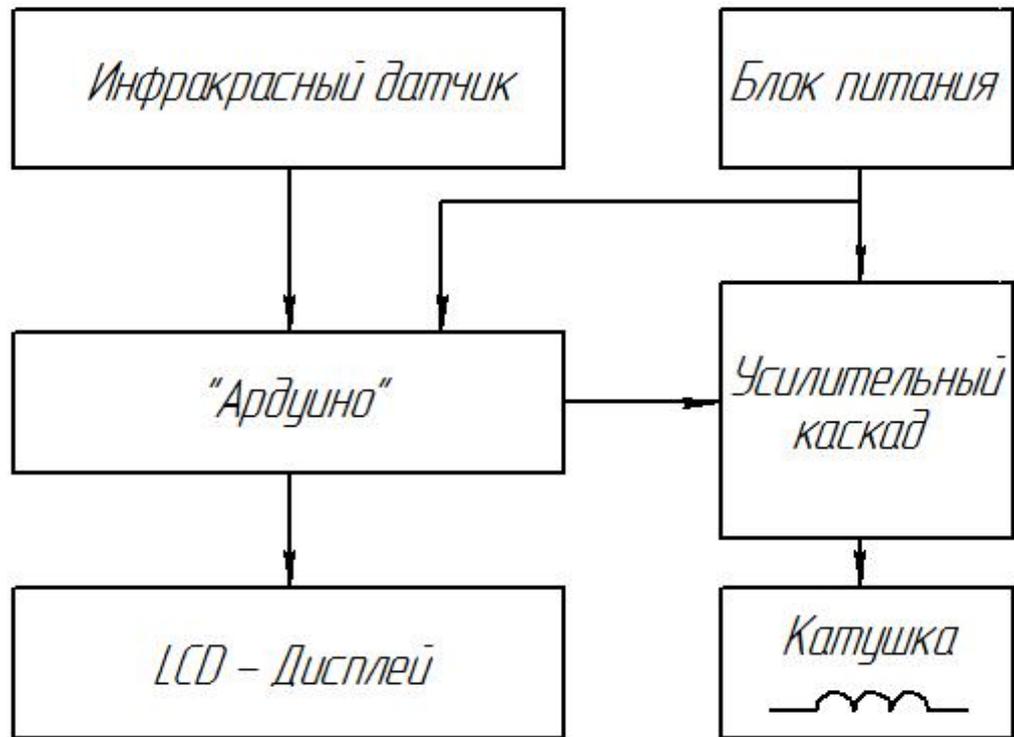


Рисунок 2.1 – Блок-схема схемотехнической части

Полная схема, разработанная в данном разделе, приведена на рисунке 2.2. Все элементы приведены в перечне элементов.

Главным электрическим элементом в конструкции является катушка. Внутри катушки и вокруг, под действием электрического тока, создается магнитное поле, которое будет притягивать ферромагнитный шарик. Возможны два варианта установки катушки: установить так, чтобы шарик прокатывался сквозь катушку или так, чтобы шарик прокатывался над ней (Рисунок 2.3).

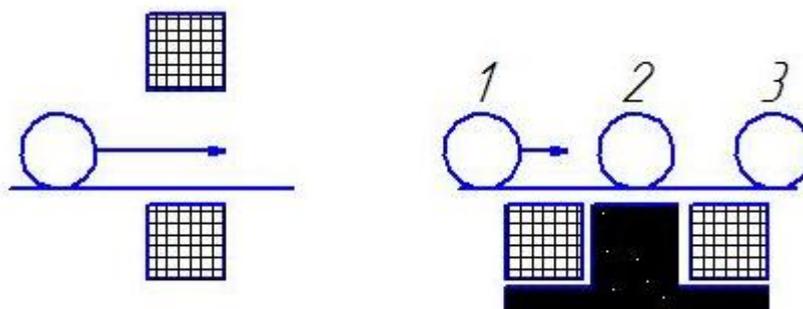


Рисунок 2.3 – Способы установки катушки

В первом случае шарик будет прокатываться через центр катушки, где индукция поля будет больше. Однако такую конструкцию будет сложнее собрать. Преимущество второго варианта в том, что он позволит установить магнитопровод в катушке и усилить магнитное поле. В связи с этим выберем второй вариант. На рисунке 2.4 показан вид сверху.

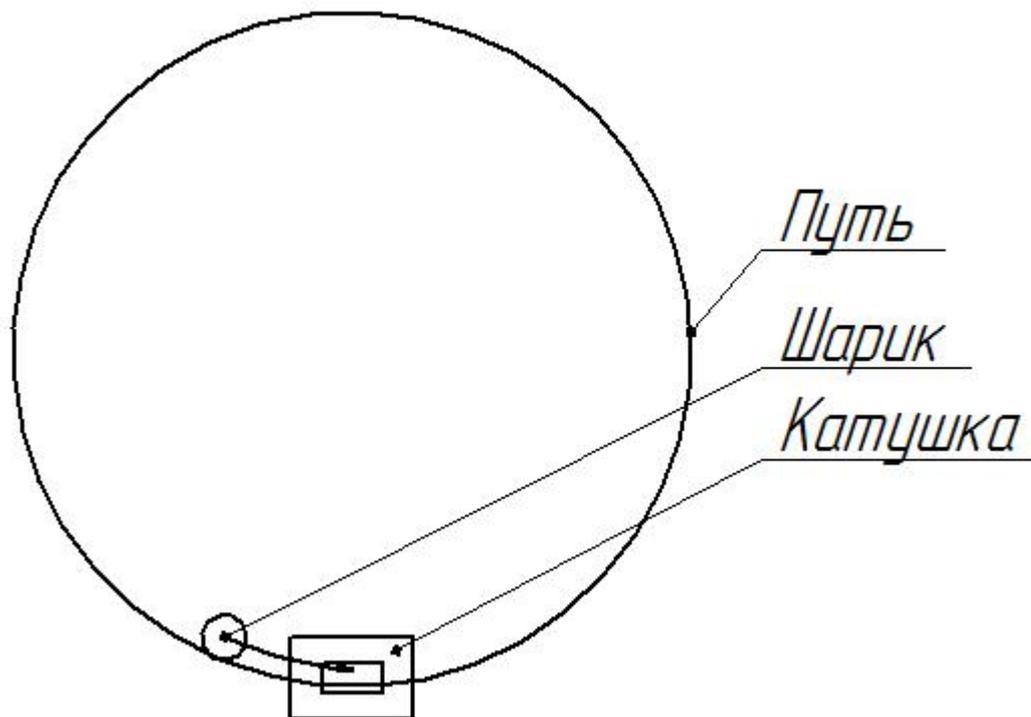


Рисунок 2.4 – Вид сверху

В распоряжении есть катушка сопротивлением 8 Ом, и индуктивностью 13,5 мГн. Индуктивность катушки определили в исследовательской части. При питании от 12 В ток катушки будет равен 1,5 А, что вполне приемлемо для наших условий.

По току, равному 1,5 А, и напряжению 12 В, выбрали блок питания LP20-W1V12 [8]. Данный блок защищен от перегрузки, перенапряжения и перегрева. Наличие встроенного EMI фильтра. Соответствует стандартам безопасности EN60950 GB9254 ENС. Частота входного напряжения: от 47 Гц до 63 Гц. Выходной ток: 1,7А.

Ускорение с помощью магнитного поля катушки предполагает своевременное выключение этого поля. Ферромагнетик втягивается в центр катушки и разгоняется только тогда, когда катится к центру. Достигнув центра, необходимо выключать катушку, чтобы не мешать разогнанному шарик у прокатываться дальше по инерции. Когда шарик откатится далеко, катушку необходимо снова включить, чтобы сообщить энергию шарик у,

когда он подкатится к ускоряющему отрезку вновь. Важнейшей задачей является, отслеживание момента, когда необходимо выключать катушку. Выключать нужно не раньше, чтобы сообщать шарика максимум энергии, и не позже, чтобы не останавливать его.

Отслеживать проход шарика над катушкой можно несколькими способами. Один из способов – это отслеживание влияния шарика на магнитное поле. Шарик в магнитном поле влияет на магнитный поток, изменение которого можно отслеживать, намотав дополнительные (следящие) витки, снимая с них сигнал. Поскольку магнитный поток будет изменяться, на дополнительных витках будет возникать ЭДС, по наличию которой, можно будет сказать о том, что пора выключать катушку. Так же, изменение магнитного потока можно измерить датчиком холла. Оба этих способа сложны в реализации.

Помимо этого, существует возможность отслеживать влияние шарика по изменению состояния самой катушки. В ходе эксперимента выяснили, что при влете шарика в поле, происходит изменение напряжения и тока катушки. Однако, это изменение получилось очень незначительное, и на практике сложно будет использовать его в качестве сигнала.

Наиболее точным и практичным оказалось применение оптических элементов – инфракрасного светодиода, и фотоприемника. Из двух вариантов: устанавливать их на просвет по обе стороны траектории пролета шарика, или на отражение, выбрали первое. Установка на просвет обеспечит лучшую точность. В данном варианте, когда шарик прокатывается над катушкой, а не сквозь нее, оптический датчик установим над катушкой по центру, и он будет срабатывать именно в тот момент, когда пора ее выключать.

Однако в работе рассматривался вариант, когда шарик должен был прокатываться сквозь катушку, и оптическим датчиком отследить пролет центра было бы невозможно. В этом случае, был предложен способ

установки датчика перед катушкой. С помощью него замерять время круга и, соответственно, среднюю скорость круга. Таким образом, зная длину круга, расстояние от датчика до центра катушки, и среднюю скорость шарика, можно было вычислить примерное время прохождения шариком центра и своевременно отключать катушку. Однако, в связи с тем, что был выбран способ установки катушки, при котором шарик прокатывается над ней (Рисунок 2.3), такой способ реализован не был.

Были куплены инфракрасный светодиод и фотоприемник. Документации на них отсутствует, в связи с этим провели ряд экспериментов, приведенных в исследовательской части данной работы, которые позволили настроить режимы их использования.

Включать катушку можно почти сразу, как только шарик откатился от нее. Но с целью экономии энергии, и уменьшения нагревания катушки, лучше будет ее включать как можно позже. Значит, нужно отслеживать время, когда шарик снова будет находиться близко к катушке. Предложенная система, с помощью оптического датчика может замерить время предыдущего круга, и вычислить приблизительно, время, когда шарик будет достаточно близко. Можно взять примерно 0,5...0,7 от времени предыдущего круга, и через это время включать катушку, с запасом, учитывая, что шарик разгоняется от круга к кругу.

Для питания светодиода и фотоприемника, обработки аналогового сигнала, отсчета времени, управления катушкой, будем использовать микроконтроллер. Сейчас широко используются платы «Ардуино» [9], [10] на базе AVR микроконтроллеров. Из линейки, предоставляемых компанией «Ардуино», плат, выбрана плата Uno, т.к. в ней достаточно цифровых и аналоговых выводов, а компактность особо не требуется. Разработка программы для микроконтроллера приведена в пункте 4.

Плата имеет кварцевый генератор 16 МГц, разъем USB, силовой разъем, на который мы будем подавать напряжение с блока питания, разъем

ICSP, кнопку перезагрузки. «Ардуино» Uno использует микроконтроллер ATmega328.

«Ардуино» Uno имеет 14 цифровых входов/выходов, 6 из них могут использоваться как выходы широтно-импульсной модуляции [11]. Каждый цифровой вывод может использоваться как вход или выход. Рабочее напряжение выводов 5 В. Режим настраивается с помощью функций `pinMode()`, `digitalWrite()`, `digitalRead()`. Каждый вывод имеет нагрузочный резистор 20-50 кОм, который отключен по умолчанию, и может пропускать до 40 мА.

Некоторые выводы имеют особые функции. Последовательная шина RX, TX используется для получения (RX) и передачи (TX) данных TTL. Выводы 2 и 3 – внешнее прерывание. Эти выводы могут быть сконфигурированы на вызов прерывания либо на младшем значении, либо на переднем или заднем фронте, или при изменении значения. Выводы 3, 5, 6, 9, 10 и 11 могут использоваться для широтно-импульсной модуляции, при помощи функции `analogWrite()`. Выводы SPI: 10 (SS), 11 (MOSI), 12 (MISO), 13 (SCK). С помощью данных выводов осуществляется связь SPI. Вывод 13 имеет встроенный светодиод, если на вывод подается сигнал, светодиод горит.

Плата имеет 6 аналоговых входов (обозначенных A0-A5), использующих аналого-цифровой преобразователь. Аналоговый вход обладает разрешением 10 бит, и может принимать 1024 значения, от 0 до 1023. Стандартно выводы имеют диапазон измерения до 5 В, однако, есть возможность изменить верхний предел с помощью вывода AREF и функции `analogReference()`. Выводы 4 (SDA) и 5 (SCL) осуществляют связь I2C (TWI).

Плата имеет следующие выводы питания: VIN – используется для подачи питания от внешнего источника, подача напряжения питания происходит через этот вывод, 5V – регулируемый источник напряжения,

используемый для питания микроконтроллера и компонентов на плате, 3V3 – дает напряжение 3,3 В, GND – заземление.

Дополнительно, на плате имеются выводы AREF, RESET. AREF используется для задания опорного напряжения для аналоговых входов. Используется совместно с функцией analogReference. Вывод RESET используется для перезагрузки микроконтроллера, при подаче низкого уровня сигнала на вывод. Обычно применяется для подключения кнопки перезагрузки в случае, если доступ к плате закрыт. Однако, в данной работе, несмотря на то, что доступ к плате закрыт, не будет использоваться данный вывод, т.к. есть возможность перезагружать плату с помощью выключателя.

Плата питается от напряжения 7-12 В, предельным напряжением является 20 В. При напряжении менее 7 В платформа будет работать нестабильно, а выводы на 5 В будут выдавать меньше напряжения. Постоянный ток через вход/выход 40мА. Тактовая частота определяется кварцевым генератором и равна 16 МГц.

Микроконтроллер ATmega328 имеет 32 кБ флэш памяти, 0,5 кБ используется для хранения загрузчика, 2 кБ ОЗУ, 1кБ EEPROM.

В данной работе, «Ардуино» питается от блока питания 12 В. От выводов GND и 5V микроконтроллера питаются инфракрасный диод и фотоприемник. Аналоговый сигнал с фотоприемника подается на аналоговый вход микроконтроллера A0. Цифровой выход D7 подключается в зеленому светодиоду, и сигнализирует о наличии шарика между диодом и приемником. В исследовательской части данной работы было установлено, что оптимальный режим работы фотоприемника достигается при его подключении последовательно с резистором на 5 кОм, при том, что инфракрасный светодиод подключен последовательно с резистором на 440 Ом. Для достижения данного сопротивления с помощью имеющихся резисторов на 220 Ом и 10 кОм, используется их последовательное и параллельное подключение, тем самым суммируя и деля их сопротивление.

Схема подключения микроконтроллера и светового датчика приведена на рисунке 2.2.

Микроконтроллер не может управлять питанием катушки напрямую, т.к. ток катушки должен быть большим. Для управления включением и выключением катушки используется цифровой выход микроконтроллера на 5 В, и быстродействующий МОСФЕТ транзистор IRL3705N [12], со встроенным стабилитроном. Транзистор выбран согласно рекомендациям [13], и приведен на рисунке 2.5.

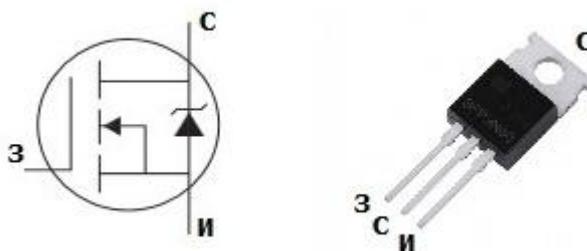


Рисунок 2.5 – Транзистор IRL3705N

Транзистор выполнен на корпусе ТО-220АВ. Напряжение пробоя сток-исток 55В. Максимальное напряжение затвора 16В. Сопротивление в открытом состоянии очень мало, всего 10 мОм. Напряжение на сопротивлении будет падать согласно формуле

$$U = I \cdot R = 1.5 \cdot 0.01 = 15 \text{ мВ}, \quad (2)$$

где I – ток через нагрузку в открытом состоянии транзистора, А;

R – сопротивление, Ом.

Максимальный ток стока 77А. Заряд затвора 65,3 нКл.

Транзистор, управляемый цифровым выводом микроконтроллера, коммутирует цепь катушки. При выключении транзистора, к катушке прикладывается обратное напряжение встроенного стабилитрона, что обеспечивает быстрое затухание тока. Транзистор подключим по схеме, согласно рекомендациям. Цифровой вывод «Ардуино», в рекомендациях подключен через резистор 100 Ом к затвору. Однако, в данной работе, подключили через имеющийся резистор на 220 Ом. Согласно

рекомендациям, в цепь подключен стягивающий резистор, между затвором и землей. Он необходим для того, чтобы удерживать низкий уровень на затворе транзистора, при отсутствии сигнала высокого уровня от «Ардуино». Это исключает самопроизвольное включение транзистора. Сопротивление резистора в рекомендациях берется 10 кОм, но можно взять и меньше. Возьмем 1кОм. Для индикации состояния включения катушки, последовательно этому резистору включен красный светодиод. Ток диода будет определяться по формуле

$$I = \frac{U - U_{VD}}{R} = \frac{5 - 2}{1000} = 3 \text{ мА}, \quad (3)$$

где U – напряжение цифрового выхода «Ардуино», В;

U_{VD} – напряжение, падающее на диоде, В;

R – сопротивление резистора, последовательного с диодом, Ом.

Ток, силой 3 мА, достаточен для работы диода. Схема включения транзистора приведена на рисунке 2.2.

Дополнительно, для отображения скорости, периода круга, количества пройденных кругов и времени с начала старта, используется LCD-дисплей, который может отображать 2 строчки по 16 символов. Дисплей управляется микроконтроллером. Информация о скорости, периоде круга и о количестве кругов обновляется один раз за круг, когда шарик пролетает датчик, а секундомер, отображающий время с начала старта, отображает время непрерывно. Дисплей имеет 16 выводов [14]: К, А, D0-D7, Е, RW, RS, V0, VDD, VSS. Необходимо подключить 12 выводов дисплея к микроконтроллеру, а выводы D0-D3, младшие биты восьмибитного интерфейса, оставить неподключенными. Схема подключения приведена на рисунке 2.2. Выводы К и А служат для питания подсветки дисплея. К – катод соединяется с землей, т.е. с выводом GND микроконтроллера. На вывод А – анод, через резистор 1 кОм подается постоянное напряжение 5 В. Данное сопротивление выбрано в связи с тем, что оно обеспечит достаточную яркость подсветки. Выводы D4-D7 дисплея подключаются к цифровым

выводам D2-D5. Е подключается к D10. Выводы дисплея RW, для чтения и записи, и вывод VSS, земля, подключаются к GND. VDD – питание, подключается к +5В. RS – выбор регистра, подключается к D12. Вывод V0, подключается к GND и служит для управления контрастностью. Для регулировки контрастности он обычно подключается через потенциометр, но подключим его через резистор 2 кОм, без возможности регулирования. Такое сопротивление обеспечит нужную контрастность.

Дополнительно, для отображения состояния оптического датчика, к цифровому выходу «Ардуино» подключается зеленый светодиод. Диод подключается через резистор 220 Ом, для того, чтобы обеспечить ток 10мА, согласно формуле

$$R = \frac{U - U_{VD}}{I} = \frac{5 - 2.5}{0.01} = 250 \text{ Ом}, \quad (4)$$

где U – напряжение с цифрового выхода «Ардуино», В;

U_{VD} – напряжение, падающее на диоде, В;

I – желаемый ток диода, А.

Рассчитаем мощности, выделяемые на резисторах, для их выбора. На резисторах R5, R7 (Рисунок 2.2) мощность определяется по формуле

$$P = \frac{U^2}{R} = \frac{5^2}{220} = 0.11 \text{ Вт}, \quad (5)$$

где R – сопротивление резисторов R5, R7, Ом.

Возьмем резисторы марки МЛТ, номинальной мощностью 0,125 Вт. На других резисторах выделяется меньше мощности, из-за большего сопротивления. В связи с этим, будем брать их с той же номинальной мощностью.

3 Разработка конструкции

Первоочередной задачей работы является демонстративность, поэтому конструкция должна быть наглядной, компактной, аккуратной и эстетичной.

Разработку конструкции следует начинать с трека для снаряда, обеспечивающего круговую траекторию разгона шарика. На начальном этапе были изготовлены треки из резинового шланга и металлопластиковой трубы.

Трек из шланга имел множество недостатков. Из-за мягкости шланга и из-за неоднородности формы его сечения по длине возникают большие потери кинетической энергии шарика, что приводит к невысокой максимальной скорости.

Трек из металлопластиковой трубы так же имеет массу недостатков. Одним из недостатков является невозможность согнуть его в диаметре меньшим, чем 30 см. В секторе для разгона, необходимо отчистить трубу от металла, чтобы он не мешал линиям магнитного поля. Помимо этого, необходимо вырезать канал вдоль всей трубы для того, чтобы было видно шарик. Из-за напряженности согнутой трубы, вырез канала приводит к деформации. Так же, вырезать канал аккуратно, оказалось очень сложно. Самой большой проблемой является стыковка двух концов трубы. Даже при самой аккуратной стыковке шарик теряет много энергии, преодолевая место стыка. Пробный трек из металлопластиковой трубы представлен на рисунке 3.1.

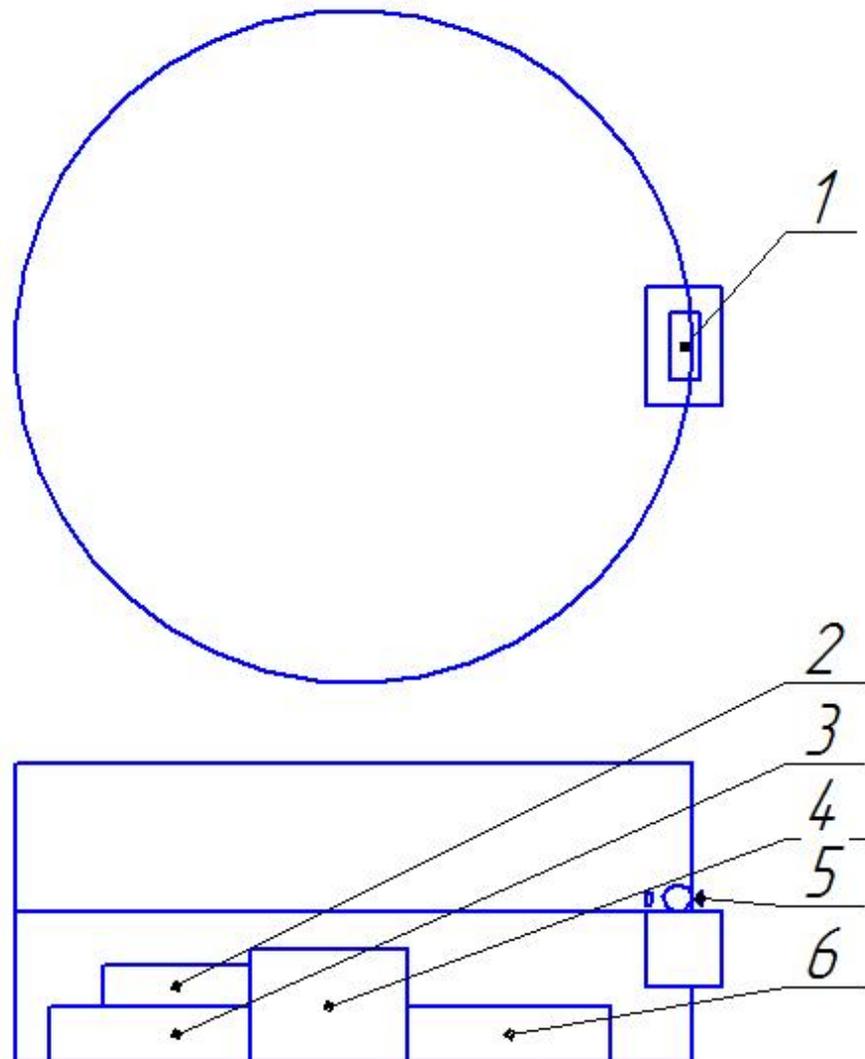


Рисунок 3.1 – Пробный трек из металлопластиковой трубы

Решением всех проблем является использование в качестве трека пластиковой коробки цилиндрической формы, выполненной из прозрачного пластика. Шарик прокатывается по внешней стенке коробки, встречая у себя на пути минимальное сопротивление. Для сохранения целостности трека, катушка располагается снизу дна, и снаряд прокатывается над ней, через линии магнитного поля.

Далее необходимо максимально компактно разместить электронику. Есть несколько способов размещения. Один из способов – разместить снаружи коробки на плоскости. Этот способ увеличит габариты конструкции. Второй способ – разместить в центре коробки так, чтобы электроника не мешала шарик, т.е. не перекрывала траекторию его движения. Это очень сложно в исполнении, в связи с тем, что в центре коробки мало места для блока питания.

Было выбрано оптимальное конструкторское решение – использование второй цилиндрической коробки, которая будет располагаться снизу первой, и в которой будет помещена вся электроника (Рисунок 3.2).



1 – Катушка, 2 – LCD-дисплей, 3 – Микроконтроллер,
4 – Блок питания, 5 – Датчик, 6 – Макетная плата.

Рисунок 3.2 – Конструкция ускорителя

В итоге, конструкция состоит из двух этажей. На нижнем этаже располагается электроника, На верхнем этаже разгоняется шарик, и располагается оптический датчик.

В центре нижнего этажа располагается блок питания, т.к. он имеет большую длину. По бокам от него располагаются микроконтроллер

«Ардуино», дисплей и макетная плата. Все это закреплено с помощью двухстороннего скотча. Фотография исполнения нижнего этажа приведена на рисунке 3.3, и отдельно приведена фотография платы «Ардуино» на рисунке 3.4.

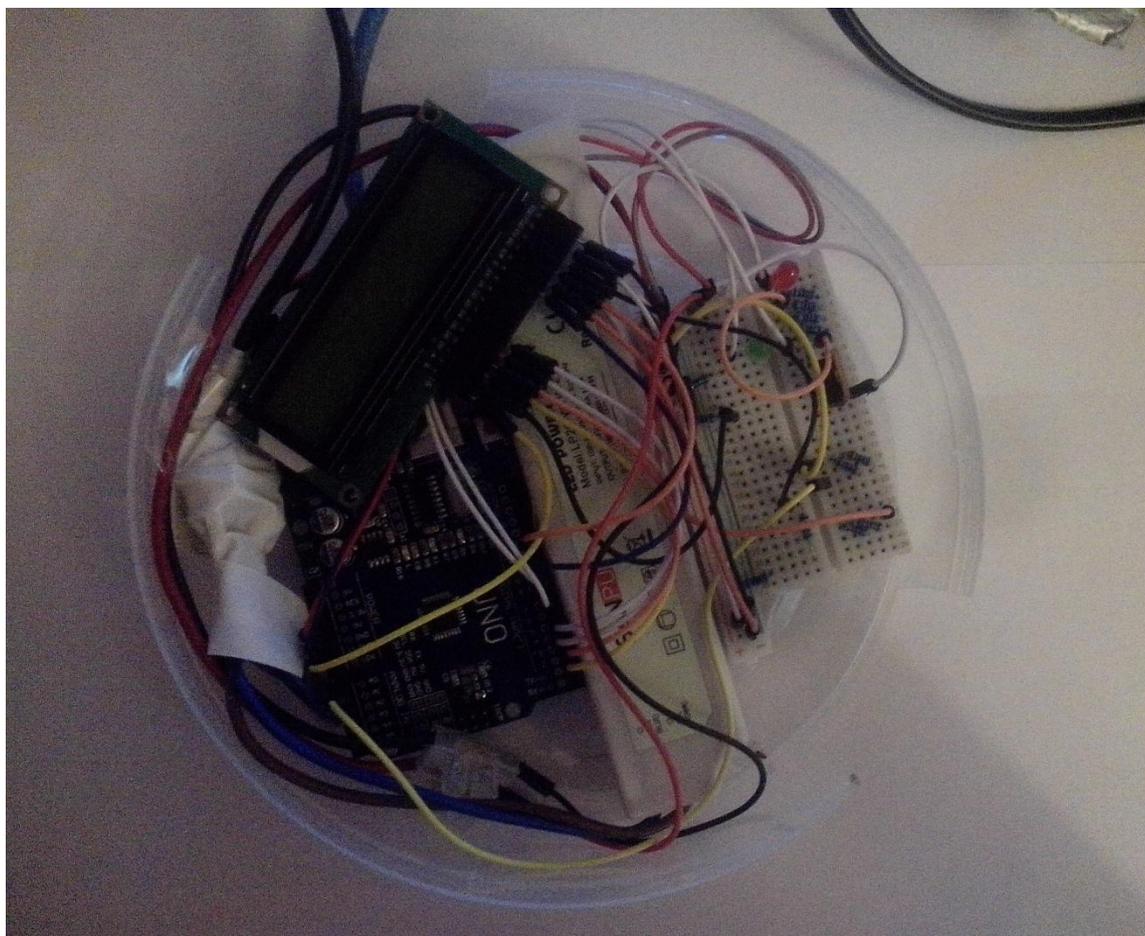


Рисунок 3.3 – Размещение элементов на нижнем этаже

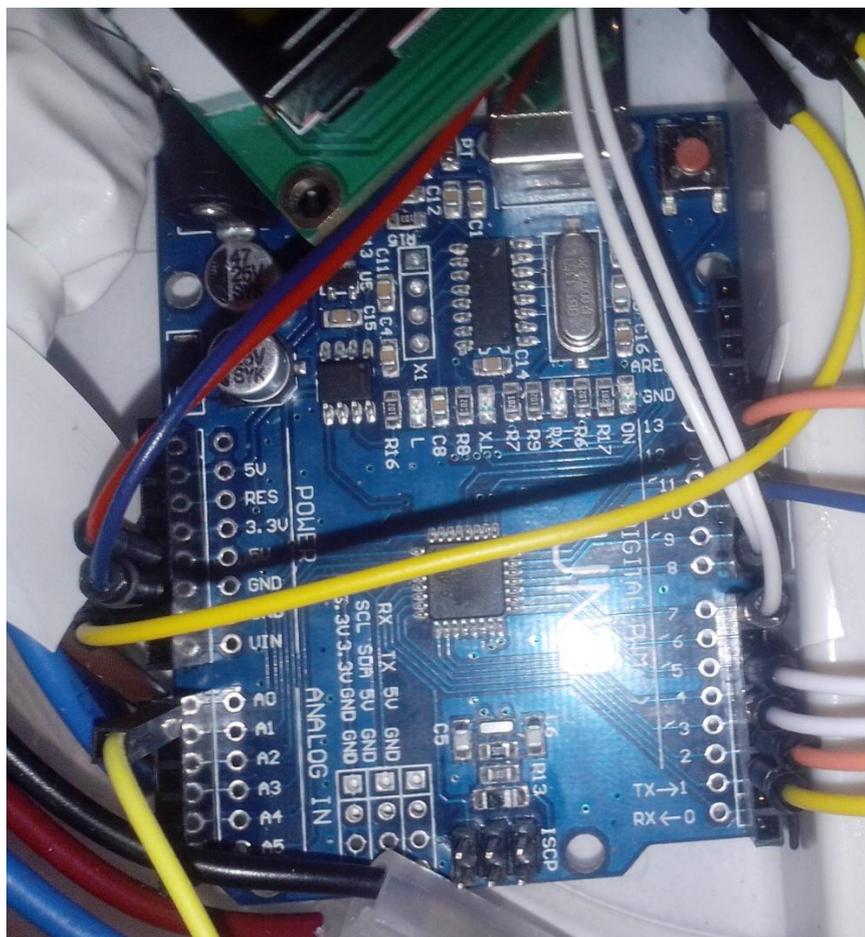


Рисунок 3.4 – Плата «Ардуино»

Катушка прикреплена ко дну верхнего этажа. Фотоприемник закреплен на дне верхнего этажа в центре катушки вблизи траектории пролета шарика. Инфракрасный диод закреплен на стенке напротив фотоприемника. Фотографии катушки вместе с оптическим датчиком приведены на рисунках 3.5, 3.6.

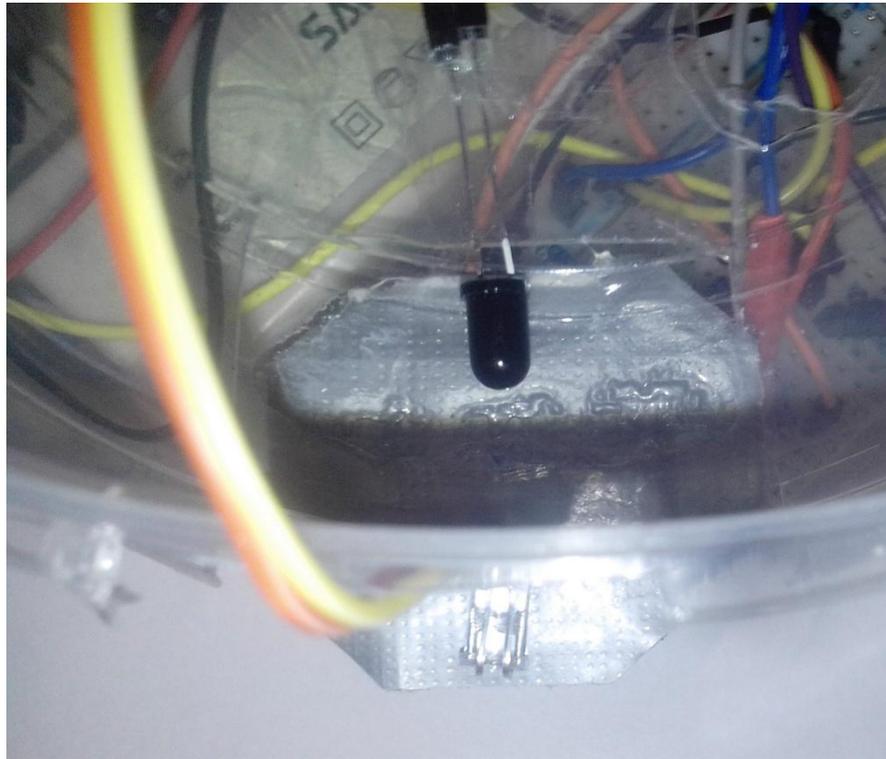


Рисунок 3.5 – Катушка и датчик, вид сверху



Рисунок 3.6 – Катушка и датчик, вид сбоку

В стенке нижнего этажа сделано отверстие для провода, ведущего от сети к блоку питания, а так же USB-провода для программирования «Ардуино». В дне верхнего этажа есть отверстие для проводов к датчику.

Все элементы схемы соединяются с помощью стандартных проводов, и макетной платы. Электронные компоненты, такие как транзистор, резисторы, светодиоды размещаются на макетной плате. Фотографии целиком собранной конструкции ускорителя приведены на рисунках 3.7, 3.8, 3.9. Инструкция по пользованию прибора в Приложении А.

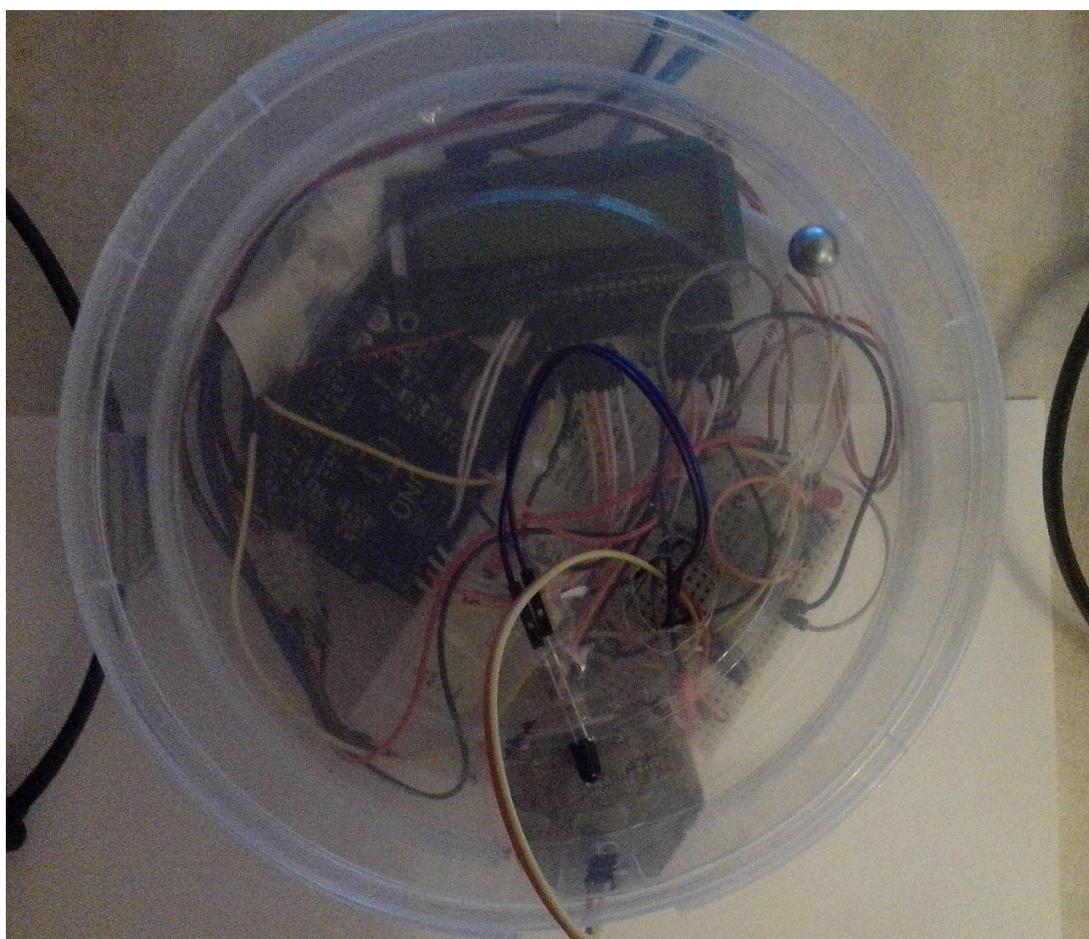


Рисунок 3.7 – Ускоритель, вид сверху, выключенный

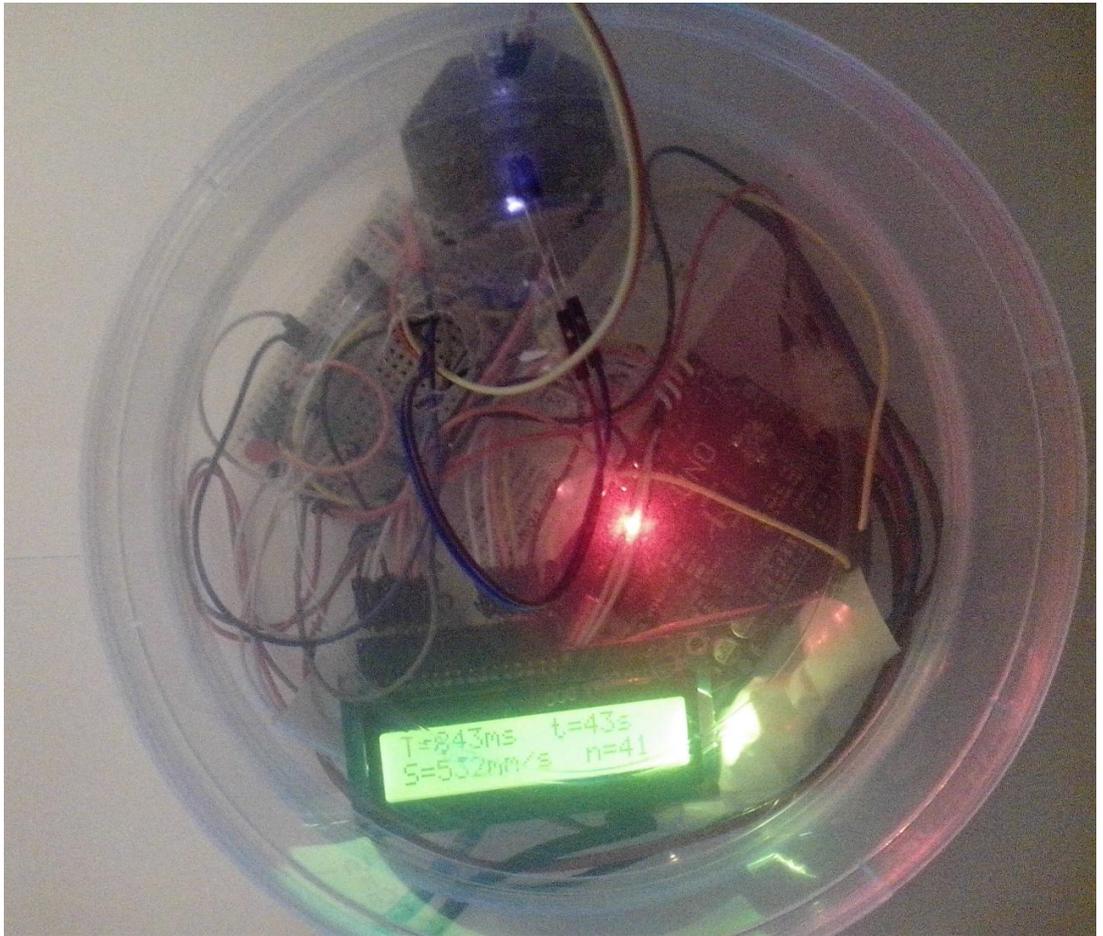


Рисунок 3.8 – Ускоритель, вид сверху, включенный

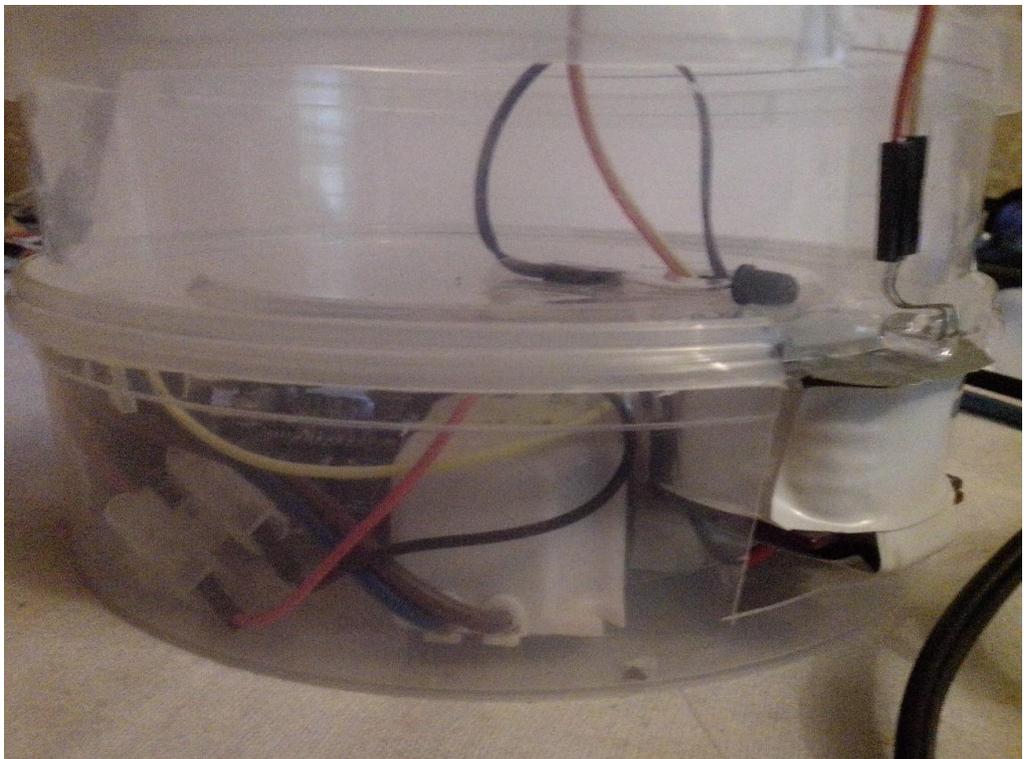
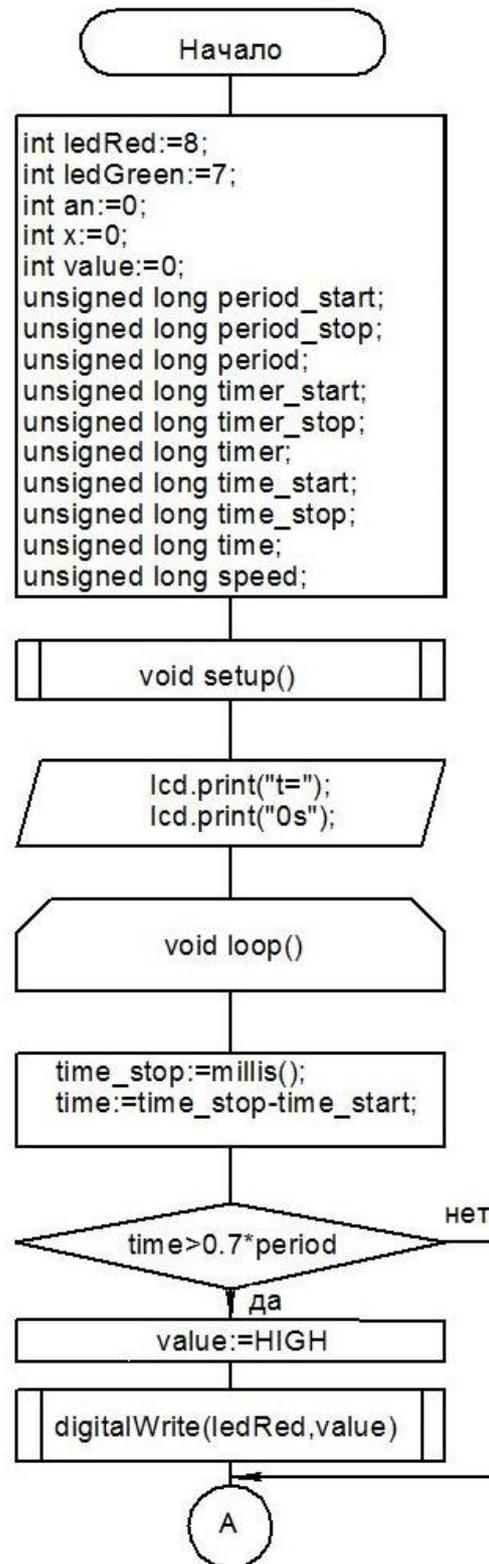
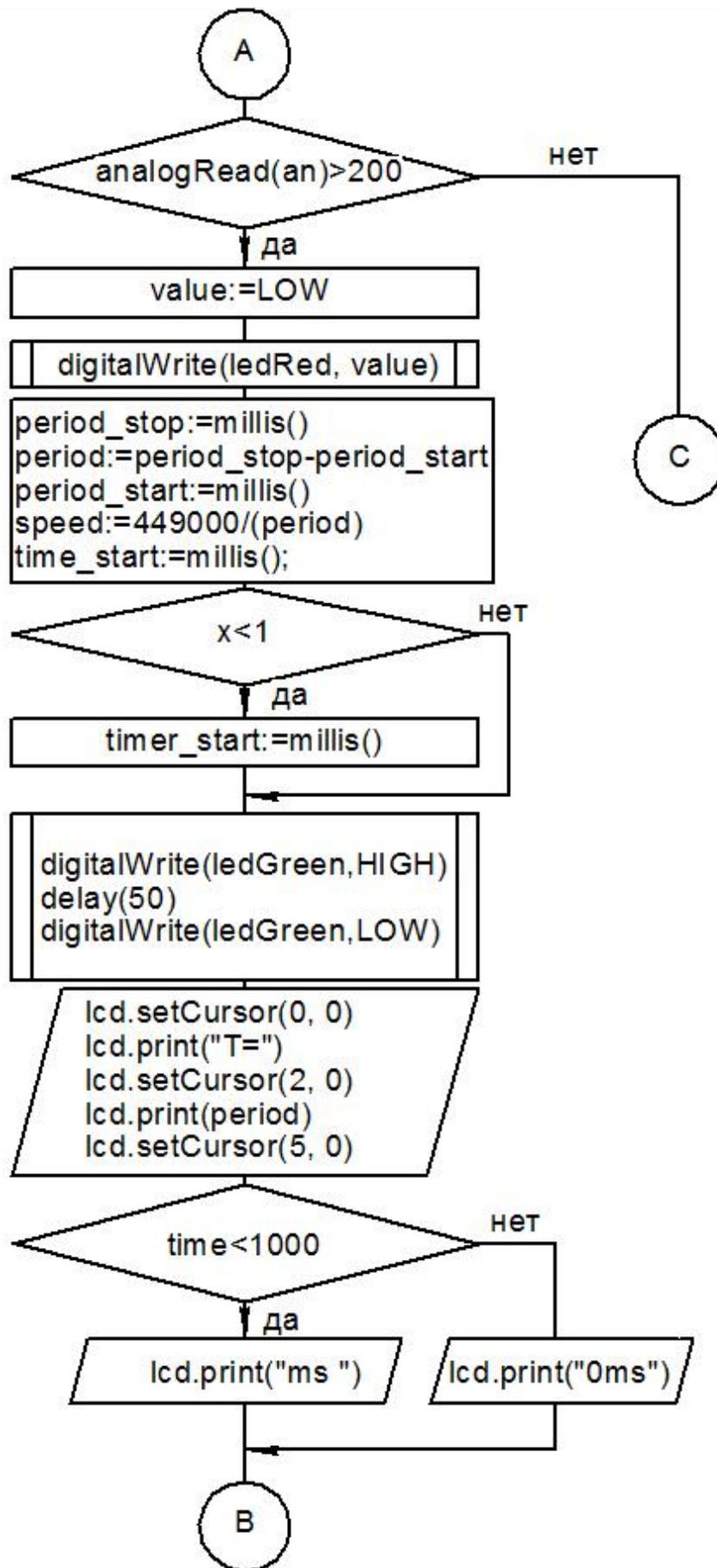


Рисунок 3.9 – Ускоритель, вид сбоку

4 Программная часть

На рисунке 4.1 представлена блок-схема алгоритма разработанной программы [15].





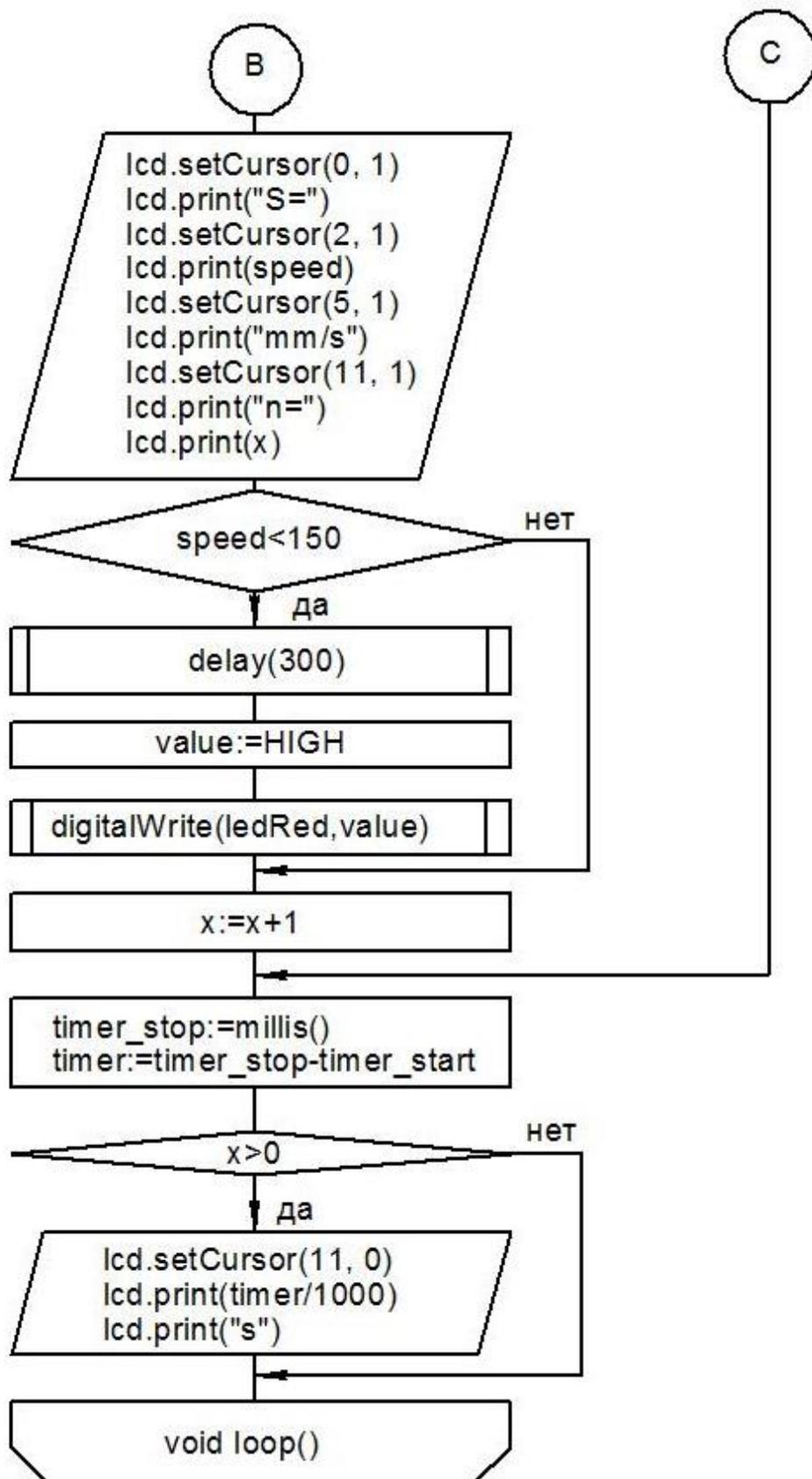


Рисунок 4.1 – Блок-схема алгоритма программы

Текст программы приведен в Приложении В. Программирование осуществляется в программе «Ардуино», которая находится в открытом доступе на официальном сайте [16]. Разрабатываемая программа должна выполнять следующие задачи:

- 1) Отсчитывать время
- 2) Управлять транзистором с помощью цифрового вывода
- 3) Считывать сигнал с фотоприемника, с помощью аналогового входа
- 4) Выводить информацию на дисплей.

В начале программы необходимо прикрепить библиотеку для работы с дисплеем `LiquidCrystal.h` [17], инициализировать дисплей и используемые переменные.

Переменная – это область памяти, хранящая некоторое значение, которое может использоваться в программе [18]. Для того, чтобы использовать переменные в программе, их необходимо объявить. При объявлении переменной нужно указать ее тип и, если это необходимо, начальное значение. Существует множество типов переменных. Переменная типа `byte` – восьмибитное целое число от 0 до 255. Переменная `char` хранит один символ и занимает 1 байт. Символ хранится в памяти как число, которое соответствует символу в таблице кодировки ASCII. ASCII – таблица, в которой некоторым распространённым печатным и непечатным символам сопоставлены числовые коды [19]. Над этим символом можно производить арифметические действия, т.к. он воспринимается программой как число. Тип `long` – переменная расширенного размера для хранения чисел, с размером 32 бита, и может хранить числа в диапазоне от -2 147 483 648 до 2 147 483 647. Для хранения информации о времени в нашей программе используется переменная типа `unsigned long`. Она отличается от `long` тем, что хранит только положительные числа от 0 до 4 294 967 295, при этом объем

занимаемой ею памяти не увеличивается. Переменная типа `float` служит для хранения вещественных чисел.

Для хранения переменных, номеров выводов и значения аналогового сигнала в программе используется переменная типа `int`. Она хранит шестнадцатитбитные значения и может хранить диапазон значений от -32768 до 32767.

Далее используется функция установки `void setup()`. Эта функция выполняется один раз при запуске программы, и в ней прописаны первоначальные установки нашей программы. Установка дисплея на 16 столбцов и две строки осуществляется с помощью оператора `lcd.begin(16, 2)`. Оператор `Serial.begin(9600)` иницирует последовательное соединение, и устанавливает скорость передачи данных. Установлена скорость 9600 бит/с. Далее происходит установка режимов работы выходов, с помощью оператора `pinMode`: первоначальное значение секундомера и первоначальное значение управляющего цифрового выхода.

На этом функция установки заканчивает свою работу, и начинает работать функция цикла `void loop()`. Эта функция является бесконечным циклом, и, каждый раз, доходя до конца, начинает выполняться сначала.

В начале каждого цикла засекается текущее время, с начала круга, с помощью переменной `time`, чтобы в дальнейшем его сравнивать с периодом и вовремя включать катушку.

Далее идет сравнение времени с периодом, если время с начала круга больше чем 70% от периода предыдущего круга, который был засечен в предыдущий раз, то программа считает, что шарик уже подкатился и пора включать катушку. Однако это условие не срабатывает на первом круге, т.к. срабатывает другое условие, которое будет описано ниже.

Далее идет сравнение аналогового сигнала. Параметры инфракрасного светодиода и фотоприемника подобраны таким образом, что при отсутствии шарика значение аналогового сигнала минимально, а при полном

перекрывании шариком датчика оно почти максимально. Это сделано для того, чтобы повысить точность срабатывания программы, устранить помехи. Помимо этого, это дает возможность с помощью программы настраивать момент выключения катушки, изменяя параметр аналогового сигнала, при котором происходит срабатывание. Если этот параметр уменьшать, катушка будет выключаться раньше, если увеличивать, то наоборот.

Как только сработал датчик, на цифровой выход, управляющий транзистором, подается ноль, и катушка выключается. В этот момент засекается период круга, вычисляется скорость. В случае, если это первое пересечение шариком датчика, то засекается общее время ускоряющего процесса.

Помимо этого, при срабатывании датчика, мигает зеленый светодиод, и происходит задержка в 50 мс. Она нужна для того, чтобы шарик успел откатиться от датчика, и программа не засчитала несколько кругов.

Далее выводится на экран период в миллисекундах, скорость в миллиметрах в секунду, и количество полных кругов, оно на одно меньше чем счетчик пересечений. Далее прибавляется счетчик пересечений.

Далее в программе, независимо от того, сработал датчик или нет, засекается и выводится на дисплей общее время ускоряющего процесса, которое начало отмеряться при первом пересечении шариком датчика.

В случае необходимости, можно изменить в данной программе рабочие выводы платы, не вникая в логику работы программы. Для изменения вывода, отвечающего за зеленый светодиод, в начале предложенной программы нужно изменить значение переменной `ledGreen`. Для изменения управляющего вывода, нужно изменить переменную `ledRed`. Для изменения вывода аналогового входа, нужно изменить переменную `an`. Для изменения выводов дисплея, нужно поменять значения второй строки программы – инициализации дисплея: `LiquidCrystal lcd(12, 10, 5, 4, 3, 2)`.

5 Исследовательская часть

Было идея отслеживать шарик по изменению состояния катушки. Для проверки этой идеи, провели ряд экспериментов по определению влияния влета ферромагнитного шарика в поле катушки на состояние самой катушки. Для исследования, была собрана простая цепь, представленная на рисунке 5.1, состоящая из последовательно соединенных элементов: источника питания на 5 В, шунта на 1 Ом, катушки.

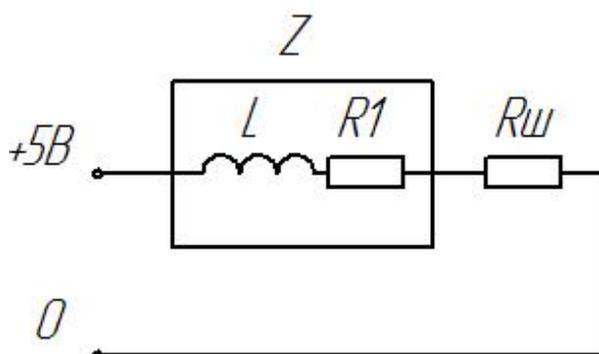


Рисунок 5.1 – Схема для экспериментального исследования катушки

Подключив осциллограф к шунту, была получена осциллограмма тока, в момент влета шарика, представленная на рисунке 5.2. На ней видно незначительное изменение тока катушки, которое можно использовать как сигнал о том, что шарик влетел в магнитное поле.

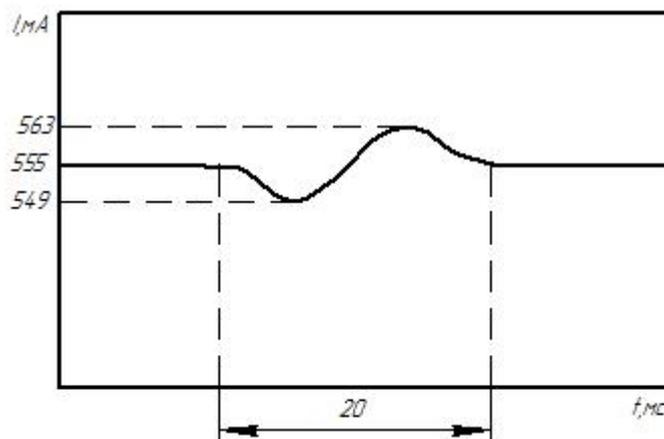


Рисунок 5.2 – Осциллограмма изменения тока катушки

Ток изменяется на 6-8 мА, сначала он падает, затем возрастает. Этот процесс длится в течении 20 секунд.

Согласно полученным данным, изменение тока составляет 1,4%, что будет тяжело отслеживать микроконтроллером, что может привести к ошибкам. Поэтому данный способ был признан не надежным. Для надежного отслеживания шарика был выбран способ с использованием инфракрасного светодиода и фотоприемника.

Провели ряд экспериментов по определению лучшего режима работы фотоприемника. Т.к. на инфракрасный диод и фотоприемник полностью отсутствует документация, вся информация об их подключении получена исключительно из экспериментальной части данной работы.

Инфракрасный диод прозрачный, фотоприемник черный. Фотография излучателя и приемника представлена на рисунке 5.3.

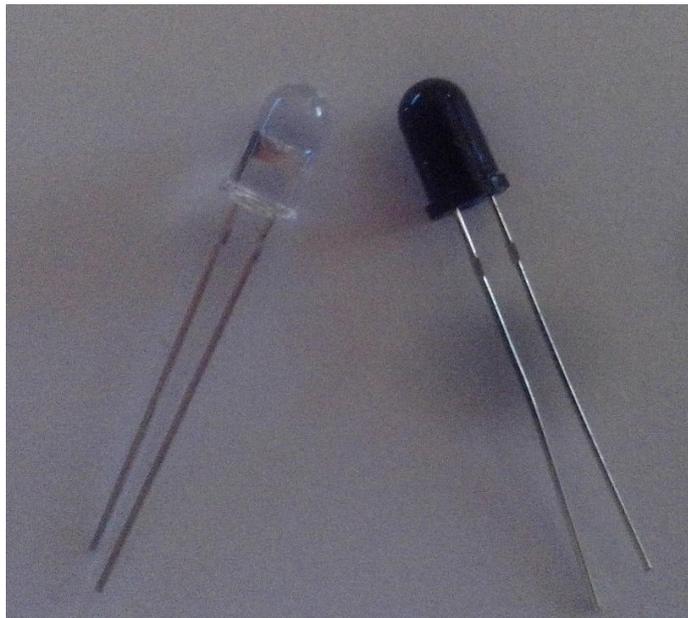


Рисунок 5.3 – Инфракрасный диод и фотоприемник

Массивный электрод излучателя следует подключать к земле. Фотоприемник имеет срезанную сторону, и на нее следует подавать плюс.

Подавая на излучатель через резистор напряжение 5 В, и изменяя сопротивление резистора от 110 до 440 Ом, сняли вольт-амперную

характеристику (ВАХ) с излучателя. Схема эксперимента приведена на рисунке 5.4.

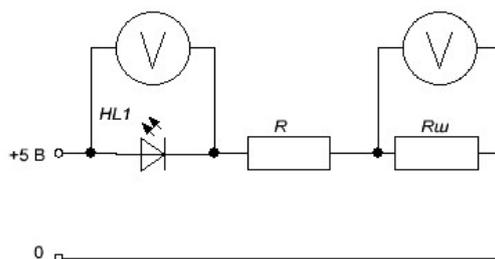


Рисунок 5.4 – Схема для снятия ВАХ излучателя

Напряжение снимали с диода, а ток с шунта. Замерили три точки, при сопротивлениях 110 Ом, 220 Ом и 440 Ом. При отсутствии тока, напряжение диода равно нулю, поэтому взяли четвертую точку ($U_{VD}=0$; $I_{VD}=0$). Результаты измерений свели в таблицу 5.1.

Таблица 5.1 – ВАХ инфракрасного светодиода.

R, Ом	U_{VD} , В	I_{VD} , мА
110	1,38	33
220	1,3	16,8
440	1,22	8,6
∞	0	0

По данным таблицы построили график, на рисунке 5.5.

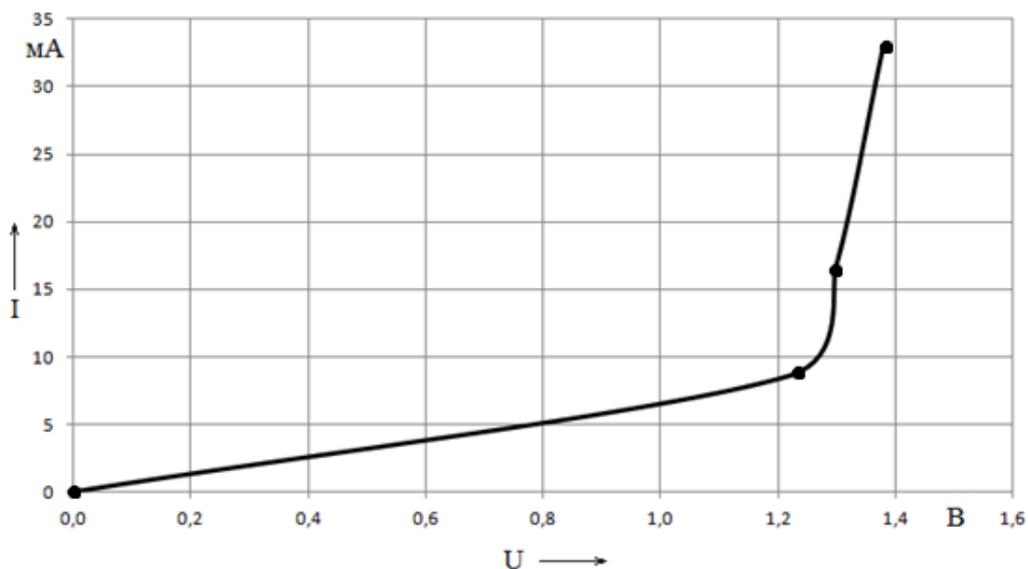


Рисунок 5.5 – ВАХ инфракрасного светодиода

Для снятия семейства ВАХ фотоприемника, излучатель и приемник направили друг на друга на расстоянии 4 см. На излучатель, через резистор R_1 , от источника питания 5В, подавали ток I_{VD} . Не срезанную сторону приемника подключили на землю, а срезанную сторону, через резистор R_n , подключили к +5 В. Выходной сигнал снимали с приемника (U_1 – свет проходит полностью, U_2 – световой поток перекрыт).

При $R_n=100$ кОм приемник реагирует на комнатное освещение, напряжение на нем меняется от 0.1 В (в комнате светло) до 4 В (в комнате темно). При $R_n=2.2$ кОм, изменение напряжения происходит от 4,3 В до 4,9 В.

Изменяя сопротивления R_1 и R_n , сняли ВАХ фотоприемника. Ток фотоприемника не будет измеряться экспериментально, т.к. его легко найти по известной формуле

$$I = \frac{5 - U_1}{R_n} = \frac{5 - 2,9}{2,2} = 0,955 \text{ мА}, \quad (6)$$

где 5 В – напряжения питания фотоприемника, В;

U_1 – напряжение на фотоприемнике при свободном прохождении света от инфракрасного диода, В.

Аналогичным образом, по формуле (6), нашли токи фотоприемника для других сопротивлений R_n . Результаты занесли в таблицы 5.2-5.4.

Таблица 5.2 – ВАХ фотоприемника при $R_1=440$ Ом

R_n , кОм	U_1 , В	U_2 , В	I , мА
2,2	2,9	4,9	0,955
3,4	1,8	4,9	0,941
4,6	0,8	4,9	0,913

Таблица 5.3 – ВАХ фотоприемника при $R_1=220$ Ом

R_n , кОм	U_1 , В	U_2 , В	I , мА
0,56	4	4,9	1,786

2,2	1,1	4,9	1,773
3,4	0,21	4,9	1,409
4,6	0,18	4,9	1.048

Таблица 5.4 – ВАХ фотоприемника при $R_1=110 \text{ Ом}$

$R_n, \text{кОм}$	$U_1, \text{В}$	$U_2, \text{В}$	$I, \text{мА}$
2,2	0,22	4,9	2,173
3,4	0,16	4,9	1,424

По данным таблиц 5.2-5.4 построили семейства ВАХ фотоприемника на рисунке 5.6.

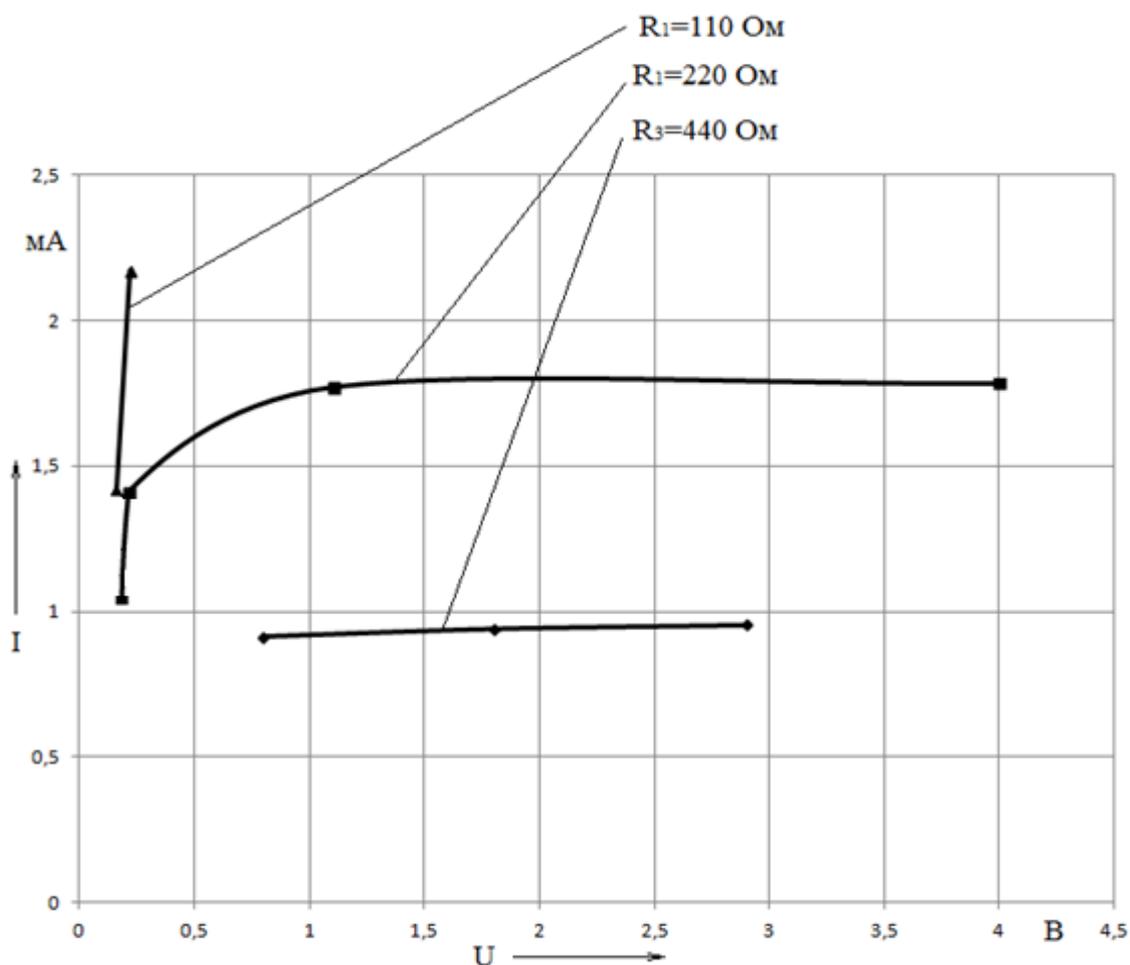


Рисунок 5.6 – Семейство ВАХ фотоприемника

Данные характеристики свойственны фотодиоду.

Если фотоприемник подключить к земле наоборот, спиленной стороной, то такой режим работы не корректный. Провели ряд измерений,

изменяя ток излучателя I_{VD} , и сопротивление, подключенное к приемнику R_n . При маленьком сопротивлении R_n , напряжение на фотоприемнике почти не менялось при прямом прохождении света от излучателя и при перегораживании света. Заметную реакцию фотоприемника на перекрывание излучателя удалось достичь лишь при больших значениях сопротивления R_n . Результаты измерений занесли в таблицу 5.5.

Таблица 5.5 – Неправильное подключение фотоприемника

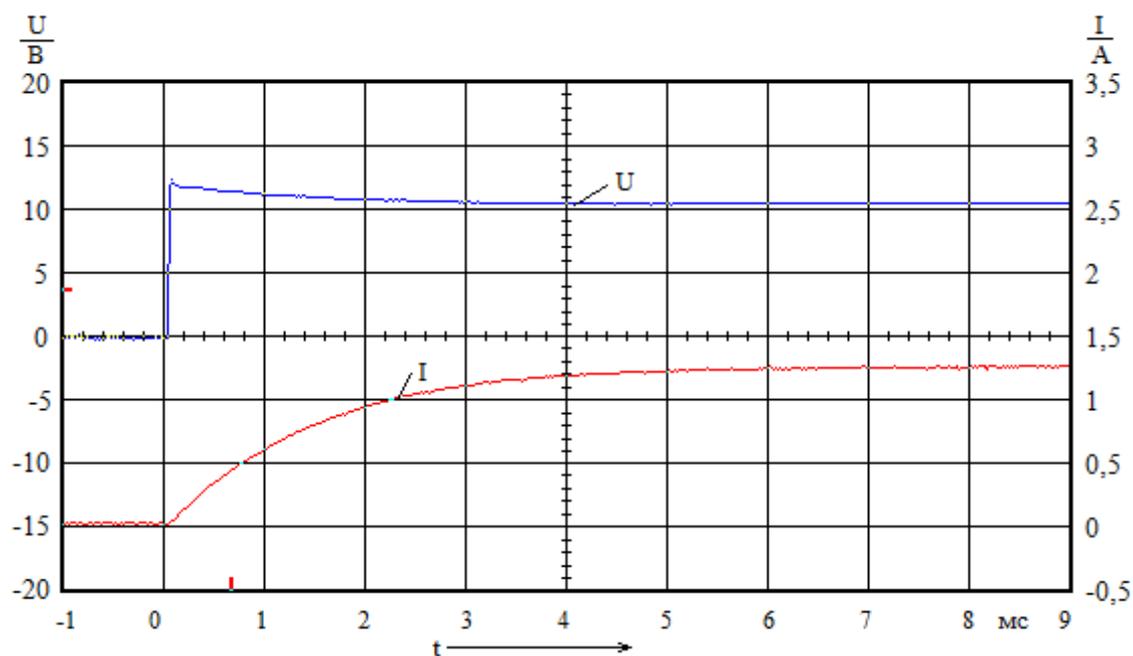
I_{VD} , мА	R_n , кОм	U_1 , В	U_2 , В
17	4,6	4,9	5
17	100	4,1	4,9
33	100	3,6	4,9
33	200	2,6	4,8

Для того, чтобы датчик обеспечивал логические уровни нуля и единицы, и обеспечивал максимальную помехоустойчивость, необходимо взять тот режим, при котором напряжение на фотоприемнике при прохождении света было минимальным, а при перекрывании света - максимальным.

По данным характеристикам, определяем оптимальный режим: ток излучателя 17 мА (подключение через 220 Ом), подключение фотоприемника через сопротивление 4 кОм. Тогда Напряжение U_1 будет близко к нулю, а U_2 близко к 5. В данной работе взят режим по экономнее: ток светодиода 8,6 мА (подключение через резистор 440 Ом), подключение фотоприемника через резистор 5 кОм.

Провели ряд экспериментов над установкой, в ходе которого получили осциллограммы напряжений и токов с разных элементов установки. Осциллограммы токов снимали с шунтирующего резистора 1 Ом.

Осциллограмма тока и напряжения на катушке при включении приведена на рисунке 5.7. По ней видно, что напряжение на катушке немного меньше напряжения питания. Ток стремится к 1,5 А.



U – напряжение на катушке, I – ток катушки, t - время

Рисунок 5.7 – Осциллограмма тока и напряжения на катушке при включении

По данной осциллограмме можно определить индуктивность катушки L, Гн, учитывая, что катушка имеет активное сопротивление $R=9$ Ом. Для начала определим постоянную времени L-R контура [20]. Для этого, от уровня установившегося тока I_{\max} нужно отложить вниз уровень, на $I_{\max}/2,7$ ниже чем I_{\max} . Пересечение этого уровня с линией тока дает постоянную времени τ на оси времени (см. Рисунок 5.8).

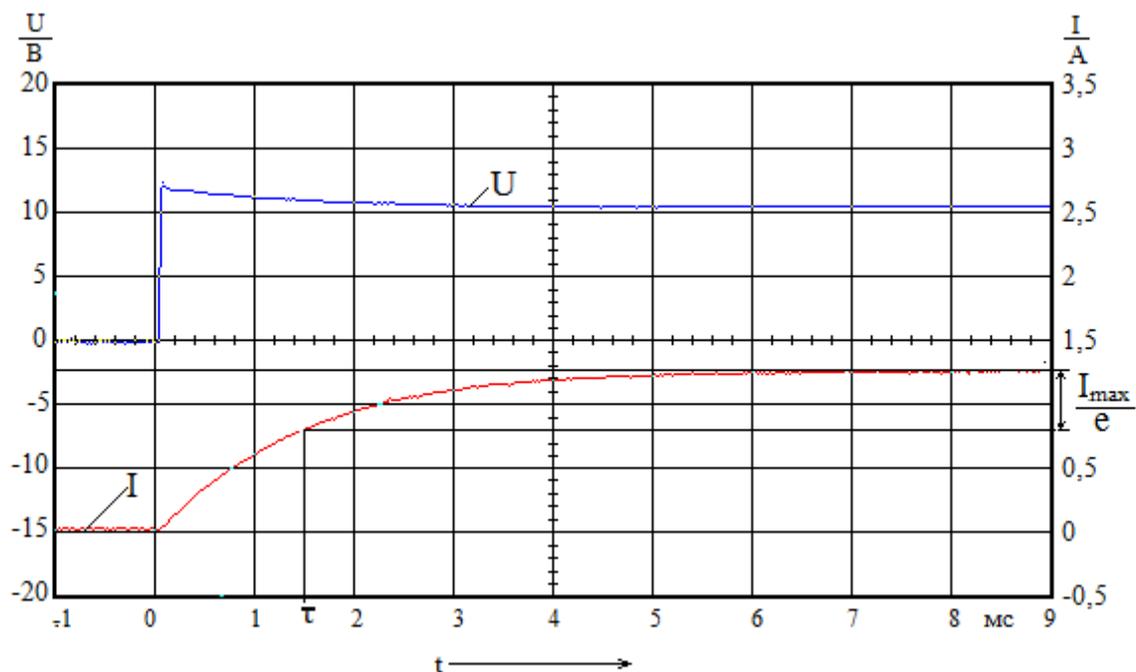


Рисунок 5.8 – Нахождение τ

Постоянная времени находится по формуле:

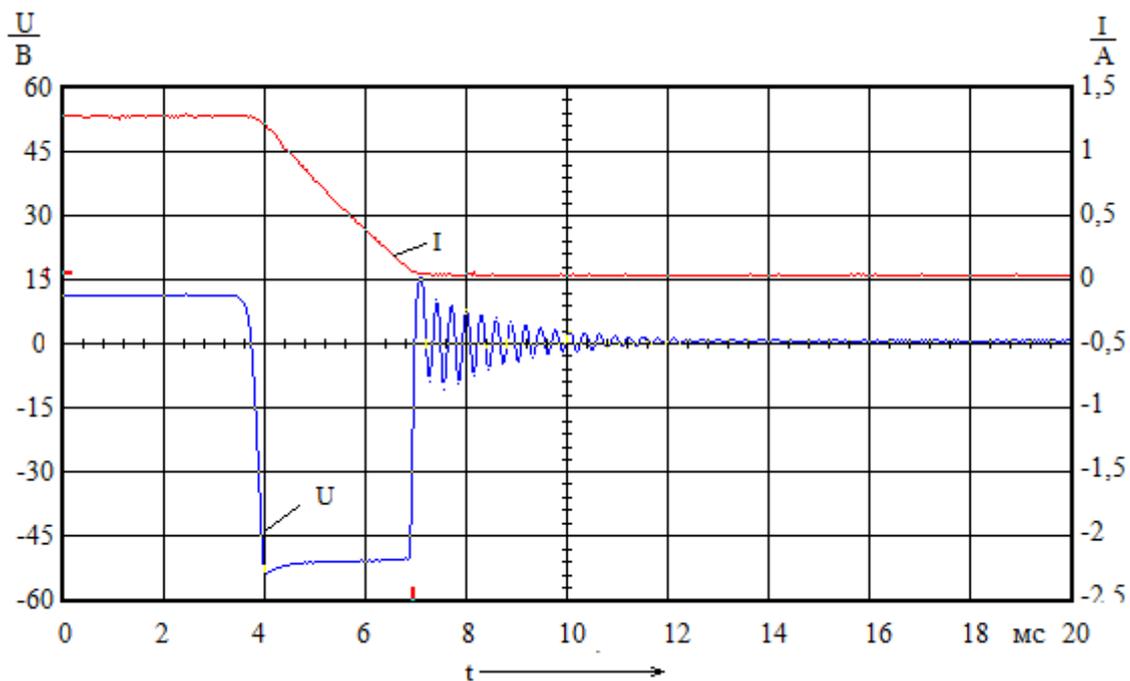
$$\tau = \frac{L}{R}. \quad (7)$$

Следовательно, находим индуктивность по формуле

$$L = \tau \cdot R = 1,5 \cdot 9 = 13,5 \text{ мГн}. \quad (8)$$

Сняли осциллограмму тока и напряжения на катушке при выключении (Рисунок 5.9).

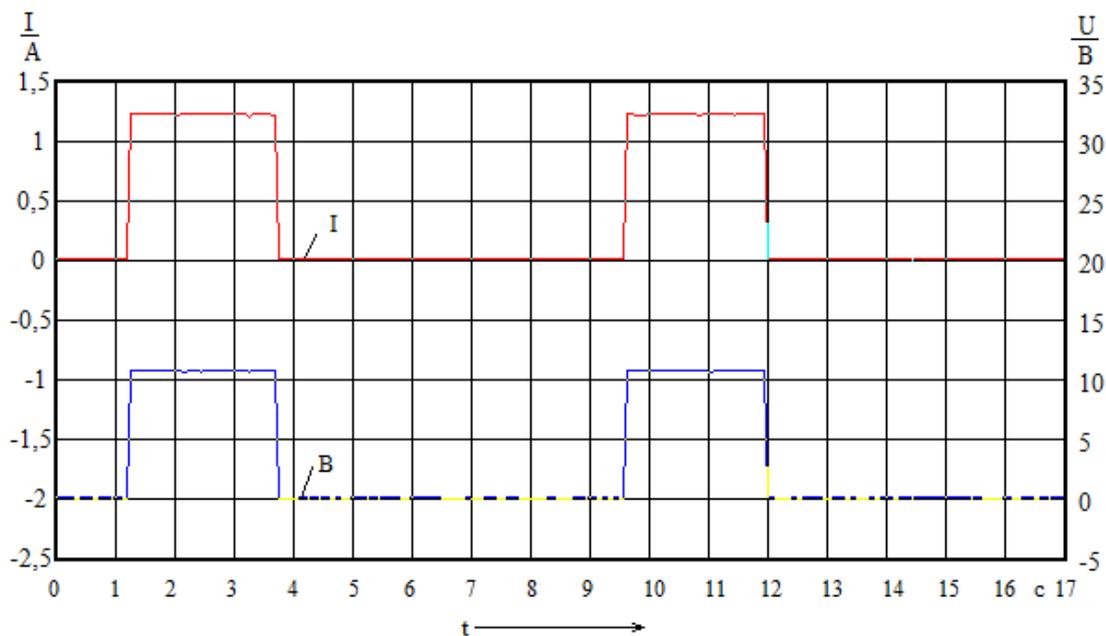
По осциллограмме можно заметить, что при выключении к катушке прикладывается большое напряжение. Это способствует быстрому уменьшению тока и уменьшению магнитного поля.



U – напряжение на катушке, I – ток катушки, t – время.

Рисунок 5.9 – Осциллограмма тока и напряжения катушки при выключении

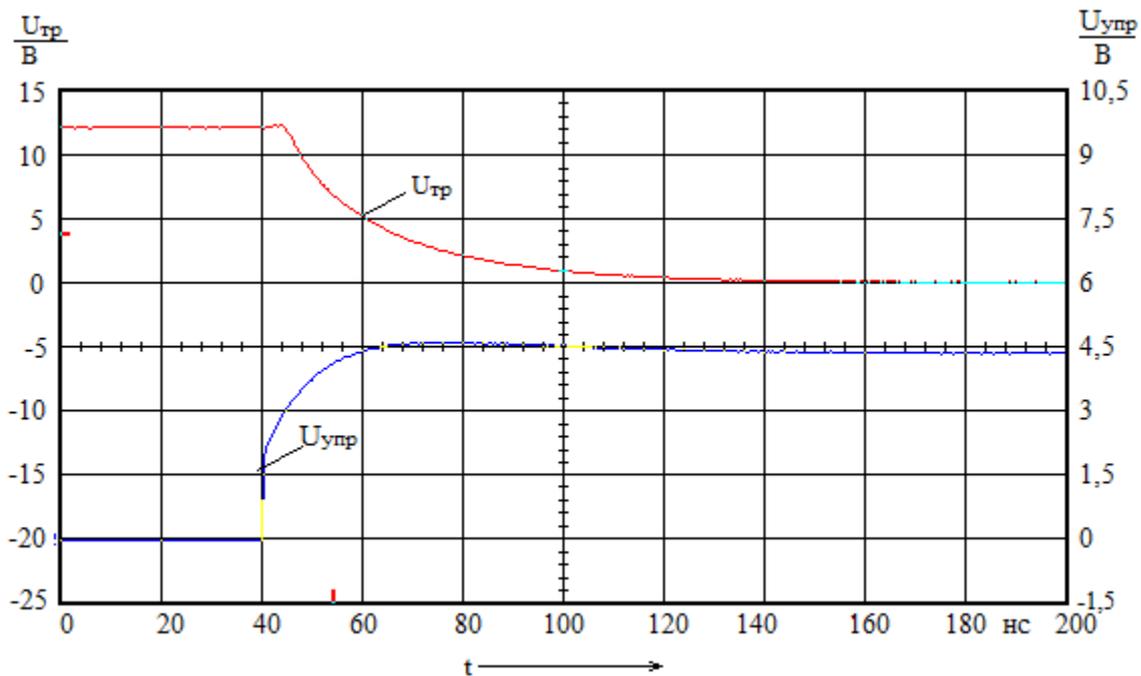
Сняли осциллограмму тока и напряжения включения и выключения катушки на протяжении нескольких кругов работы установки (Рисунок 5.10).



U – напряжение на катушке, I – ток катушки, t – время.

Рисунок 5.10 – Осциллограмма тока и напряжения на катушке в течение нескольких кругов

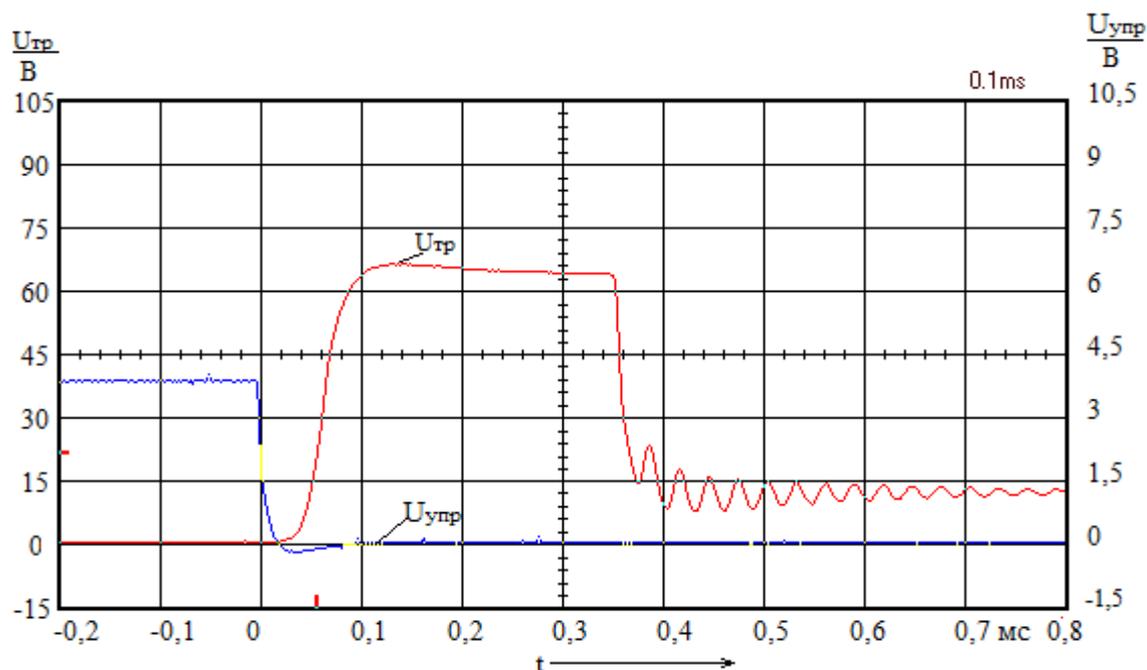
Сняли ряд осциллограмм напряжений на транзисторе и управления. На Рисунке 5.11 представлена осциллограмма напряжения транзистора и напряжения управления при включении.



$U_{тр}$ – напряжение на транзисторе, $U_{упр}$ – напряжение управления,
 t – время.

Рисунок 5.11 – Осциллограмма напряжения на транзисторе и напряжения управления транзистора при включении

На рисунке 5.12 представлена осциллограмма напряжения на транзисторе и напряжения управления при выключении.

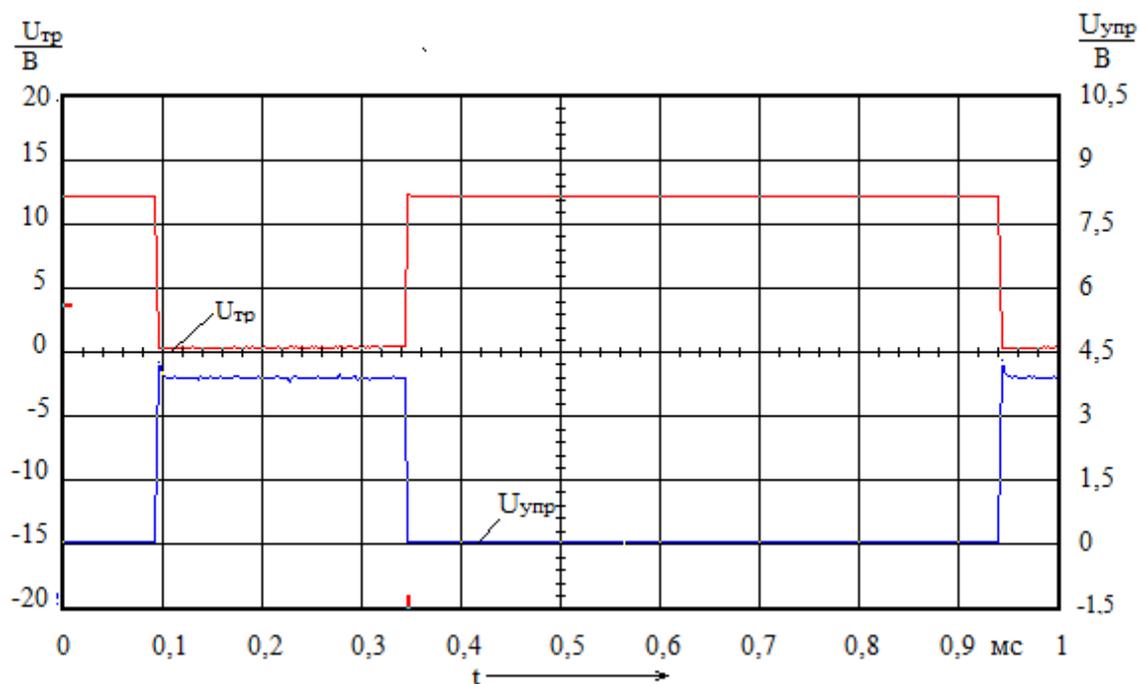


$U_{тр}$ – напряжение на транзисторе, $U_{упр}$ – напряжение управления,
 t – время.

Рисунок 5.12 – Осциллограмма напряжения на транзисторе и напряжения управления транзистора при выключении

На осциллограмме хорошо видно, что при выключении на обратном стабилитроне транзистора, в течение 4 мс, падает большое напряжение, более 60 В, необходимое для быстрого уменьшения тока катушки. После этого происходит колебательный процесс на уровне напряжения питания.

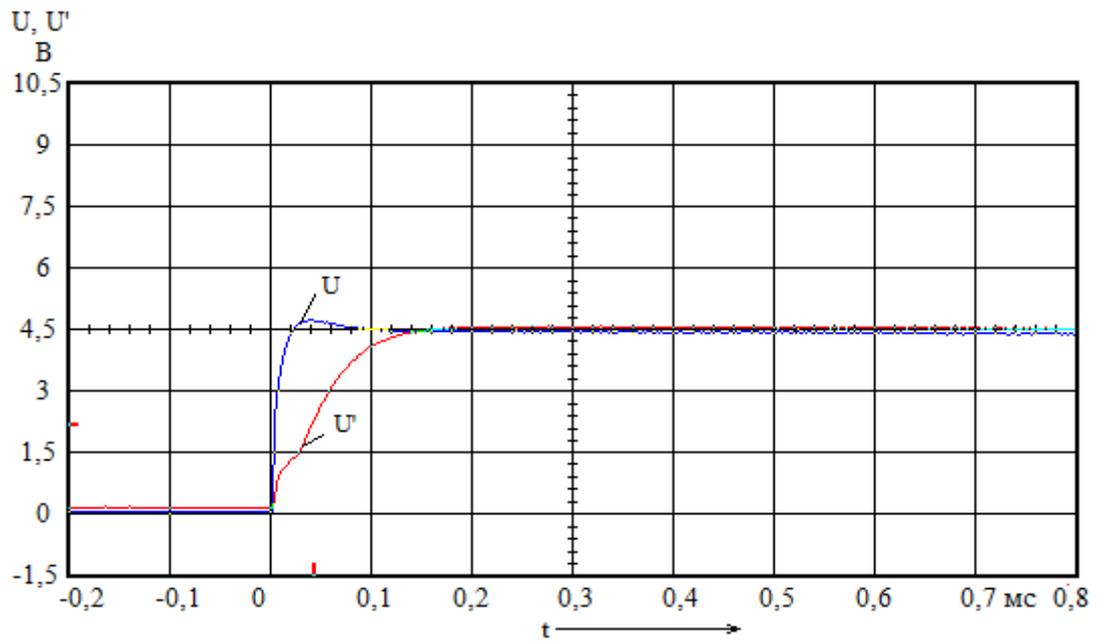
На рисунке 5.13 представлена осциллограмма импульсов напряжения транзистора и напряжения управления на большом временном интервале.



$U_{тр}$ – напряжение на транзисторе, $U_{упр}$ – напряжение управления,
 t – время.

Рисунок 5.13 – Импульсы напряжения на транзисторе и напряжения управления при включениях и выключениях

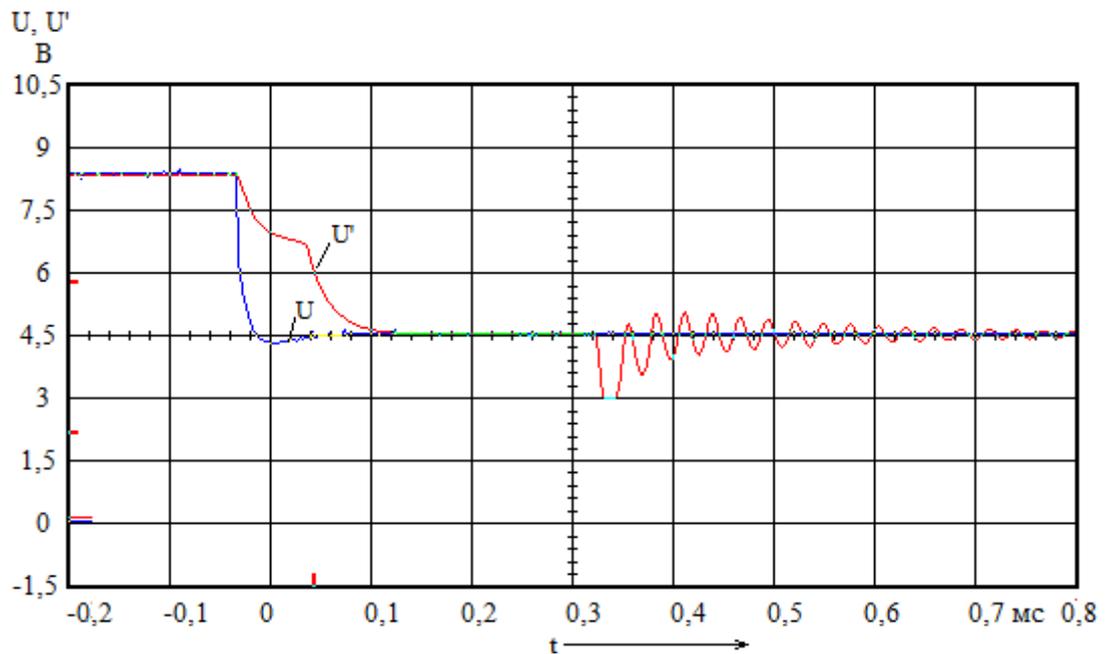
Для того чтобы оценить, какова задержка между управляющим импульсом с цифрового выхода платы и напряжением на затворе транзистора, сняли осциллограммы напряжений управления транзистора до затворного резистора и после. Осциллограммы напряжений при включении и выключении приведены на рисунках 5.14, 5.15.



U – напряжение управления до затворного резистора,

U' – напряжение управления после затворного резистора, t – время.

Рисунок 5.14 – Осциллограмма напряжений управления до затворного резистора и после него при включении



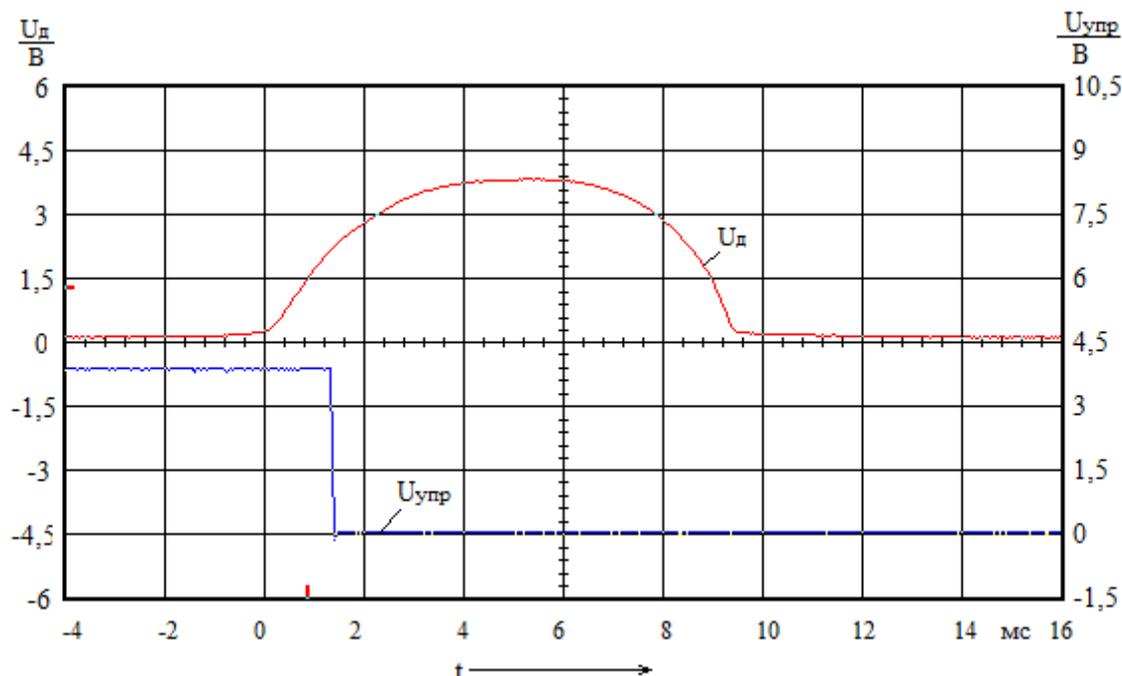
U – напряжение управления до затворного резистора,

U' – напряжение управления после затворного резистора, t – время.

Рисунок 5.15 – Осциллограмма напряжений управления до затворного резистора и после него при выключении

При выключении наблюдается колебательный процесс. Как видно из осциллограмм, затворный резистор дает некоторую задержку включения. Однако, эта задержка не велика, порядка 0,1 мс.

На рисунке 5.16 представлена осциллограмма аналогового сигнала с датчика и цифрового сигнала, управляющего транзистором.



U_d – напряжение на фотоприемнике,

$U_{упр}$ – напряжение цифрового сигнала управления, t – время.

Рисунок 5.16 – Осциллограмма сигнала с датчика и цифрового сигнала управления

По данной осциллограмме видно, что напряжение на датчике при свободном прохождении инфракрасного света минимально, а при пролете шарика равно 4 В. Это позволяет тонко регулировать с помощью программы момент выключения катушки. В данной программе выключение происходит при сигнале с аналого-цифрового преобразователя, равном 200 (нулю Вольт соответствует ноль, а пяти Вольтам соответствует сигнал, равный 1023). При увеличении этого показателя в программе, катушка будет выключаться позже, а при уменьшении – раньше. Такая регулировка может осуществляться в диапазоне 5 мс.

Заключение

В ходе данной работы был разработан демонстрационный прибор, для разгона ферромагнетика с помощью магнитного поля. Уникальность данного прибора в том, что траектория разгона шарика круговая, что отличается от подобных установок, и, теоретически, позволяет сообщать шарика больше энергии. В ходе разработки был решен ряд задач:

- 1) Обзор существующих решений
- 2) Выбор конструкции
- 3) Разработка электрической схемы
- 4) Выбор элементов схемы
- 5) Разработка системы отслеживания положения шарика
- 6) Разработка программы
- 7) Отладка программы
- 8) Изготовление действующей установки
- 9) Экспериментальные исследования

По результатам работы, можно сделать вывод, что для разгона ферромагнетика магнитным полем, перспективно использовать круговую траекторию ускорения. В качестве отслеживающих приборов рекомендуется использовать оптические датчики.

Результатом данной работы, является действующий ускоритель, предназначенный для демонстрации ускорения магнитным полем. Для ускорения до больших скоростей нужно более мощное питание и более мощные источники магнитного поля.

Ускоритель передан в дар кафедре «Промышленная электроника».

Работа была выполнена по рекомендациям [21].

Список литературы

- 1) Электромагнитный ускоритель масс или Гаусс пушка [Электронный ресурс]: Режим доступа: <http://radiomaster.com.ua/8969-elektromagnitnyy-uskoritel-mass-ili-gauss-pushka.html>
- 2) Электромагнитный ускоритель [Электронный ресурс]: Режим доступа: <http://cxem.net/tesla/tesla16.php>
- 3) Электромагнитные пушки: описание, виды [Электронный ресурс]: Режим доступа: <http://fb.ru/article/122232/elektromagnitnyie-pushki-opisanie-vidyi>
- 4) Пушка Гаусса [Электронный ресурс]: Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Пушка_Гаусса
- 5) Магнитомеханические явления [Электронный ресурс]: Режим доступа: <http://vunivere.ru/work23450/page9>
- 6) Магнитная проницаемость [Электронный ресурс]: Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Магнитная_проницаемость
- 7) Синхротрон [Электронный ресурс]: Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Синхротрон>
- 8) LP20-W1V серия [Электронный ресурс]: Режим доступа: http://www.dart.ru/cataloguenew/power_supply/lp-constant-voltage-water-proof/lp20-w1v.shtml
- 9) Arduino [Электронный ресурс]: Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Arduino>
- 10) Arduino [Электронный ресурс]: Режим доступа: <https://en.wikipedia.org/wiki/Arduino>
- 11) Arduino Uno [Электронный ресурс]: Режим доступа: <http://arduino.ru/Hardware/ArduinoBoardUno>
- 12) IRL3705N [Электронный ресурс]: Режим доступа: <http://www.irf.com/product-info/datasheets/data/irl3705n.pdf>

- 13) Arduino Uno урок 9 – Нагрузка [Электронный ресурс]: Режим доступа: <http://cxem.net/arduino/arduino11.php>
- 14) Arduino и LCD экран [Электронный ресурс]: Режим доступа: <http://audio.probudget.ru/arduino/arduino-i-lcd-ekran>
- 15) Блок-схемы алгоритмов. ГОСТ. Примеры [Электронный ресурс]: Режим доступа: <http://pro-prof.com/archives/1462>
- 16) Download the Arduino Software [Электронный ресурс]: Режим доступа: <https://www.arduino.cc/en/Main/Software>
- 17) Arduino's LiquidCrystal Library [Электронный ресурс]: Режим доступа: <http://playground.arduino.cc/Main/LiquidCrystal>
- 18) AVR&Arduino [Электронный ресурс]: Режим доступа: <http://atmel.ucoz.ru/publ/variabledeclaration/1-1-0-141>
- 19) ASCII [Электронный ресурс]: Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/ASCII>
- 20) Катушка индуктивности [Электронный ресурс]: Режим доступа: <http://radiolubitel.net/index.php/elektronika/261-katushka-induktivnosti>
- 21) Волынский В.А. и др. Электротехника /Б.А. Волынский, Е.Н. Зейн, В.Е. Шатерников: Учеб. пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 528 с., ил.
- 22) Касаткин А.С., Немцов М.В. Электротехника: Учеб. пособие для вузов. – 4-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 2003. – 440 с., ил.
- 23) Основы промышленной электроники: Учебник для неэлектротехн. спец. вузов /В.Г. Герасимов, О.М. Князьков, А.Е. Краснопольский, В.В. Сухоруков; под ред. В.Г. Герасимова. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 2006. – 336 с., ил.
- 24) Электротехника и электроника в 3-х кн. Под ред. В.Г. Герасимова Кн.1. Электрические и магнитные цепи. – М.: Высшая шк. – 1996 г.

25) Электротехника и электроника в 3-х кн. Под ред. В.Г. Герасимова
Кн.2. Электромагнитные устройства и электрические машины. – М.: Высшая
шк. – 1997 г.

Приложение А

Инструкция по работе с прибором. Прибор имеет два провода: черный и синий. Синий втыкается в USB порт компьютера для программирования. Черный провод втыкается в сеть 220 В, 50 Гц для работы установки. Не рекомендуется подключать сразу два провода.

Для начала работы, черный провод нужно воткнуть в сеть, и перевести выключатель в положение «включено», установка включится. После этого, нужно слегка катнуть шарик над катушкой. С первого же раза он получит достаточную скорость, и далее он будет ускоряться сам, пока не достигнет предельной скорости, при которой сила трения будет равна силе ускорения. Шарик будет кататься с постоянной скоростью, пока установка не будет выключена. Следует избегать длительной работы установки, для того, чтобы не давать катушке сильно перегреваться. После 5 минут работы установки, следует делать перерыв на 5 минут.

Помимо стандартного режима работы демонстрационного ускорителя, существует режим «маятника». Для того, чтобы его использовать, нужно, при работе установки, наклонить сторону, противоположную катушке, на определенный угол так, чтобы силы магнитного поля не хватало для преодоления шариком всего круга (3-7 см).

Шарик, оттолкнутый от катушки на некоторое расстояние, будет притягиваться гравитацией обратно к катушке, и, пролетая над ней, снова отталкиваться в другую сторону. Амплитуда колебаний зависит от угла наклона.

На дисплее будут отображаться следующие показатели: период круга, время с начала работы, текущая скорость, количество кругов. Когда катушка включена, горит красный светодиод, а когда шарик пролетает датчик, мигает зеленый светодиод.

Алгоритм работы с устройством:

1. Воткнуть черный провод в розетку
2. Переключить выключатель на проводе в положение «вкл»
3. Слегка катнуть шарик над катушкой

Для демонстрации режима «маятник» наклонить край установки, противоположный катушке на 3-7 см.

Приложение В

Текст программы в среде разработка «Ардуино».

```
#include <LiquidCrystal.h>
#include <LiquidCrystal.h>
LiquidCrystal lcd(12, 10, 5, 4, 3, 2);
int ledRed=8;
int ledGreen=7;
int an=0;
int x=0;
int value=0;
unsigned long period_start;
unsigned long period_stop;
unsigned long period;
unsigned long timer_start;
unsigned long timer_stop;я
unsigned long timer;
unsigned long time_start;
unsigned long time_stop;
unsigned long time;
unsigned long speed;
void setup() {
  lcd.begin(16, 2);
  Serial.begin(9600);
  pinMode(ledRed,OUTPUT);
  pinMode(ledGreen,OUTPUT);
  lcd.setCursor(9, 0);
  lcd.print("t=");
```

```

lcd.setCursor(11, 0);
lcd.print("0s");
value=HIGH;
digitalWrite(ledRed,value);
}
void loop() {
time_stop=millis();
time=time_stop-time_start;
if ((time>0.7*period)&(speed<550)) {
  value=HIGH;
  digitalWrite(ledRed,value);
}
if ((time>0.7*period)&(speed>550)) {
  value=HIGH;
  digitalWrite(ledRed,value);
}
if ((analogRead(an)>200)) {
  value=LOW;
  digitalWrite(ledRed,value);
  period_stop=millis();
  period=period_stop-period_start;
  period_start=millis();
  speed=449000/(period);
  time_start=millis();
  if (x<1) {
    timer_start=millis();
  }
  digitalWrite(ledGreen,HIGH);
  delay(50);
}

```

```

digitalWrite(ledGreen,LOW);
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print("T=");
lcd.setCursor(2, 0);
lcd.print(period);
lcd.setCursor(5, 0);
if (time<1000)
    lcd.print("ms ");
else
    lcd.print("0ms");
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print("S=");
lcd.setCursor(2, 1);
lcd.print(speed);
lcd.setCursor(5, 1);
lcd.print("mm/s");
lcd.setCursor(11, 1);
lcd.print("n=");
lcd.print(x);
if (speed<150) {
    delay(300);
    value=HIGH;
    digitalWrite(ledRed,value);
}
x=x+1;
}
timer_stop=millis();
timer=timer_stop-timer_start;
lcd.setCursor(11, 0);

```

```
if (x>0) {  
    lcd.print(timer/1000);  
    lcd.print("s");  
}  
}
```