

**Олимпиада школьников «Шаг в будущее. Инженерное дело»**

**Секция: Робототехника и комплексная автоматизация**

**Университетский лицей №1511 Предуниверситария НИЯУ МИФИ**

**г. Москва**

**Система разгона и торможения для  
магнитолевитационного транспорта с  
рекуперацией энергии. Создание программы,  
управляющей Arduino, для контролируемого  
разгона и торможения.**

Участники: Черепков Павел Александрович 11И класс

Гусев Степан Антонович 11В класс

Научный руководитель: Абин Дмитрий Александрович,  
инженер-исследователь НИЯУ МИФИ

**Москва, 2024 г.**

Система разгона и торможения для магнитолевитационного транспорта с рекуперацией энергии. Создание программы, управляющей Arduino, для контролируемого разгона и торможения.

## АННОТАЦИЯ

Проект направлен на создание системы разгона и торможения с рекуперацией энергии для макета магнитолевитационного транспорта, функционирующего по принципу взаимодействия постоянных магнитов дорожного полотна и стопок высокотемпературных сверхпроводящих (ВТСП) лент, закреплённых на транспорте.

В ходе работы были изучены статьи и литература по этой теме, разработана модификация макета транспортных путей и левитирующей тележки, спроектирована и реализована электрическая схема разгона-торможения и рекуперации, создана программа, управляющая Arduino, для контролируемого разгона и торможения.

## Содержание

<b>Введение.....</b>	<b>4</b>
<b>Основная часть.....</b>	<b>7</b>
<b>Заключение .....</b>	<b>16</b>
<b>Список литературы.....</b>	<b>17</b>

## Введение.

Магнитолевитационный транспорт – это инновационный вид транспорта, отличительными чертами которого являются высокая скорость, большой жизненный цикл, безопасность, энергоэффективность, комфортабельность и экологичность.



Рисунок 1 Фото магнитолевитационного поезда.

Поскольку подвижной состав, по сути, летит над дорожным полотном, удерживаемый силой электромагнитного взаимодействия, скорость движения может легко превышать 200 км/ч, а в теории достигать 500-600 км/ч. При подобных скоростях классическое торможение с использованием тормозных колодок и механического контакта невозможно. К тому же летящий поезд обладает огромной кинетической энергией, которую разумно собирать и повторно использовать, а не рассеивать и превращать в тепло в процессе торможения. Уже сейчас системы рекуперации энергии используются в железнодорожном транспорте. Энергия, возвращённая в сеть, расходуется на тягу поездов другими локомотивами, а также для привода вспомогательных

электрических машин, для освещения и отопления, повышая энергоэффективность перевозочного процесса. При наличии индукционного или кинетического накопителя энергии на станции, энергия торможения может быть собрана, а затем возвращена подвижному составу в процессе разгона.

В случае высокоскоростного магнитолевитационного транспорта отсутствует механический электрический контакт между подвижным составом и электросетью. Система разгона и торможения часто реализуется схожей с устройством линейного электродвигателя. В силу описанного выше, проектирование системы разгона и торможения с рекуперацией энергии представляет интерес для развития транспортной инфраструктуры.

Таким образом, научная и практическая значимость проекта заключается в исследовании магнитных и левитационных характеристик ленточных ВТСП композитов, практической реализации левитационного подвеса на основе полученных знаний, способного совершать контролируемое движение с рекуперацией энергии.

Кроме того, в настоящее время компания «РосМаглев» предлагает крупномасштабный инфраструктурный проект создания в перспективе новой Интегральной Транзитной Транспортной Системы (ИТТС), позволяющий решить в России проблему транспортной доступности регионов Сибири, Дальнего Востока, Крайнего севера, а так же Китая и территорий будущего Евразийского союза. Основными техническими компонентами ИТТС России станут элементы Российского «Вакумного Магнито-Левитационного Транспорта». Компания «РосМаглев» ждет признания своего проекта на государственном уровне и включение его в «Стратегию развития транспорта РФ на период до 2030 года»

### **Цель проекта:**

Создать систему разгона и торможения с рекуперацией энергии для макета магнитолевитационного транспорта, функционирующего по принципу взаимодействия постоянных магнитов дорожного полотна и стопок высокотемпературных сверхпроводящих (ВТСП) лент, закреплённых на

транспорте. Создание программы, управляющей Arduino, для контролируемого разгона и торможения.

**Задачи:**

- Изучение статей и литературы по теме проекта;
- Модификация макета транспортных путей и левитирующей тележки: размещение постоянного магнита на тележке; размещение массивов катушек индуктивности на дорожном полотне;
- Разработка управляющей схемы
- Проектировка и реализация электрической схемы разгона-торможения и рекуперации;
- Создание программы, управляющей Arduino, для контролируемого разгона и торможения;
- Проверка функционирования разгонно-тормозной системы и системы рекуперации.

## Основная часть

На базе института НИЯУ МИФИ разработан макет левитирующей тележки и транспортных путей, который представлен на рисунке 2.



Рисунок 2 Фото макета левитирующей тележки и транспортных путей.

Для разработки ВТСП подвеса были использованы ВТСП ленты второго поколения на основе материала  $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  производства Российской компании SuperOx. Основание подвеса изготовлено с использованием 3D печати и теплоизолирующих материалов. Экспериментальное исследование магнитных характеристик композитных ВТСП лент было выполнено с использованием методов сканирующей холловской магнитометрии. Сила левитации протяженных ВТСП элементов, являющихся частью конструкции подвеса, была

измерена при охлаждении жидким азотом с использованием специального экспериментального стенда и составляет 15 кг для данной левитационной платформы (рисунок 3).

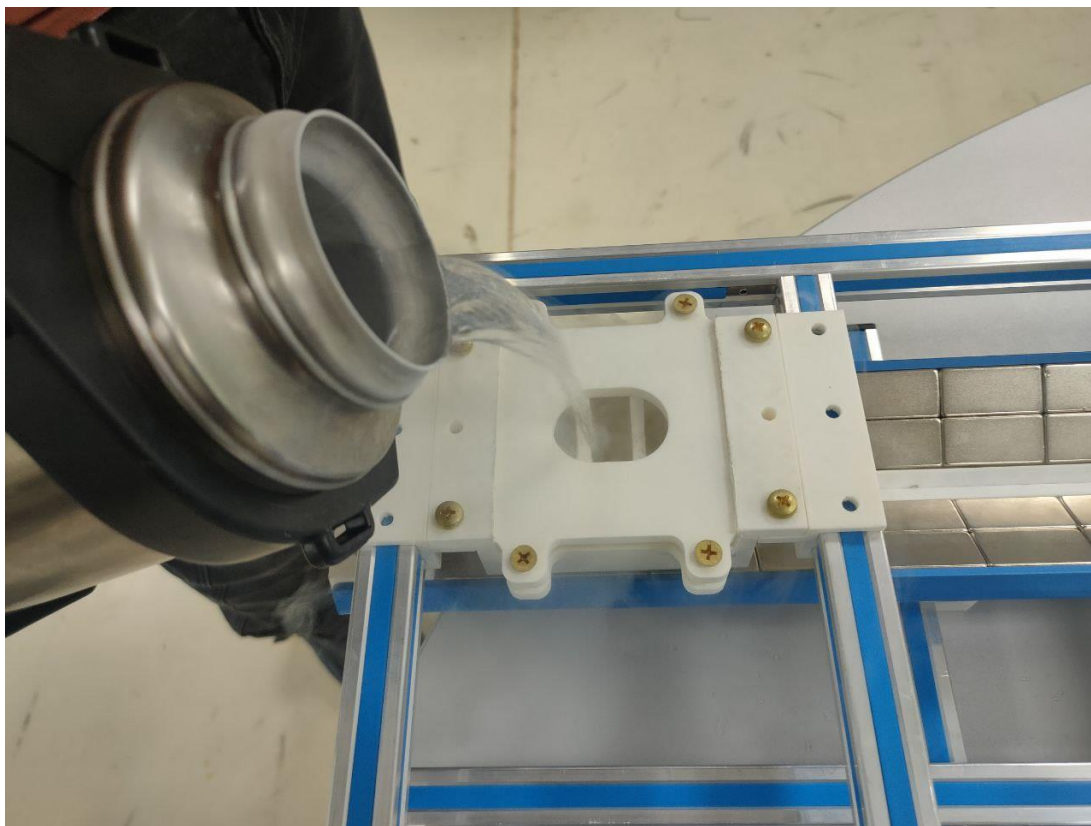


Рисунок 3 Фото процесса заливания жидкого азота.

Система работает за счет свойств сверхпроводимости. Сверхпроводимость - свойство некоторых материалов обладать строго нулевым электрическим сопротивлением при достижении ими температуры ниже определённого значения (критическая температура). Также сверхпроводники обладают еще одним исключительным свойством – они выталкивают магнитное поле из своего объема, поэтому на поверхность сверхпроводника не упадет помещенный над ним магнит, он будет парить на некоторой высоте. В силу квантовой природы сверхпроводящего состояния, магнит и сверхпроводник становятся «привязанными» друг к другу, независимо от перемещений относительно друг друга. Это явление называют магнитной левитацией (рисунок 4). На данный момент тележка левитирует неконтролируемо.



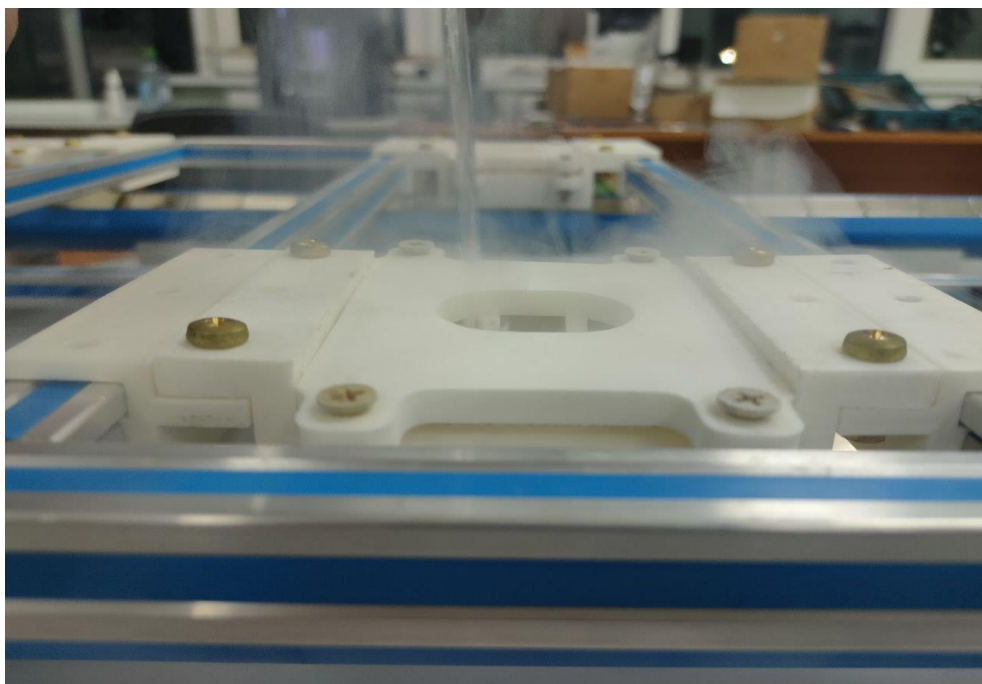


Рисунок 4 Фото процесса левитации.

Был проведен эксперимент в котором происходило подключение катушек и притягиванию магнита к ним в зависимости от направления силовых линий в катушках. При проведении эксперимента был использован кубический магнит со стороной 1 см из материала N42. Намагниченность перпендикулярна одной из плоскостей. Катушки установлены так, чтобы первая пара притягивала магнит, а вторая пара отталкивала магнит. Такое расположение было установлено экспериментально (таблица №1), так как именно с таким направлением достигается наибольшее ускорение магнита.

Таблица 1 Данные эксперимента.

Подключение катушек	Сила тока, которая подавалась(А)	Расстояние, на котором притягивается магнит от центра катушек(мм)
силовые линии со направлены и втягивают внутрь(рис №5)	50	35
силовые линии разно направлены	50	17
силовые линии со направлены и выталкивают магнит (рис№6)	50	35

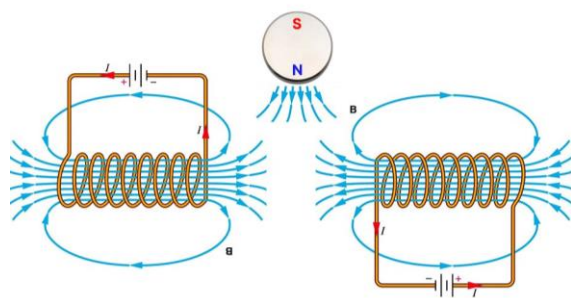


Рисунок 5 Притягивание магнита.

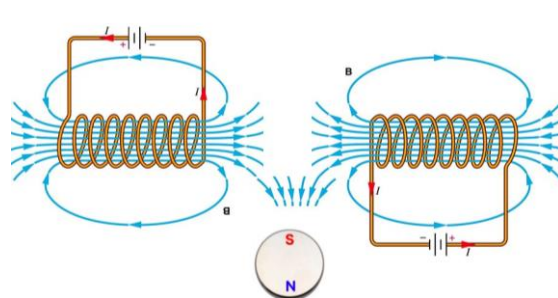


Рисунок 6 Отталкивание магнита.

Для разгона и торможения используются катушки, расположенные на транспортных путях (рисунок 7). Каждая из этих катушек подключена к источнику тока. На тележке находится постоянный магнит. Когда надо разгонять тележку, катушка, находящаяся спереди тележки подключена так, что постоянный магнит притягивается к ее южному полюсу, и отталкивается от северного полюса катушки сзади. За счет чего происходит разгон и торможение тележки.

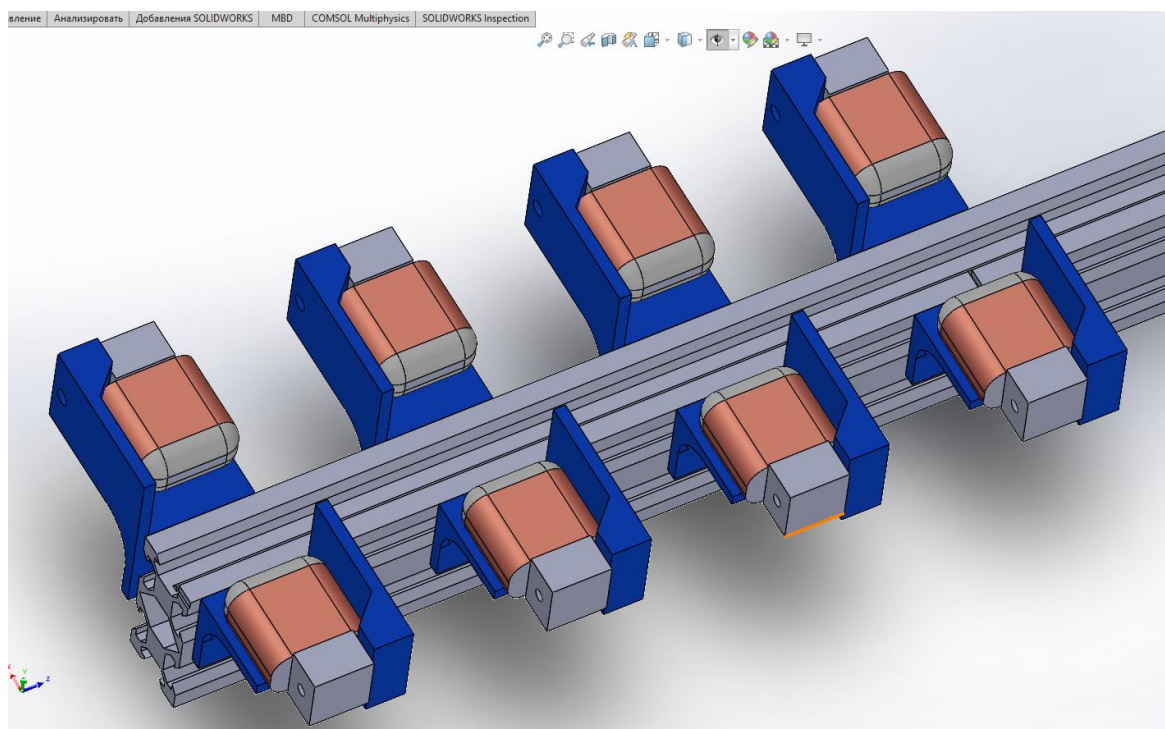


Рисунок 7 Схема системы катушек, расположенных вдоль транспортных путей.

Катушки работают по принципу электромагнетизма. Когда в катушке генерируется ток, линии магнитного потока концентрируются в сердечнике, что увеличивает индукцию катушки по сравнению с воздушным сердечником. Большая часть потока сосредоточена только в сердечнике, при этом некоторая часть потока появляется на концах катушки и небольшая часть потока появляется снаружи катушки. Магнитную силу можно увеличить, увеличив количество витков или силу тока в катушке. Магнитные поля катушек, расположенных на одной стороне сонаправлены и ориентированы перпендикулярно линии движения постоянного магнита.

Сама система состоит из пар рядов катушек, датчиков Холла и транзисторов, программируемой платы, источника энергии, накопителя энергии. Рассмотрим один элемент ускорительно-тормозной системы, состоящий из двух катушек, датчиков Холла, и транзисторов. (представлена на рис №8). Транзистор подключен средним выходом к катушке (черный толстый провод), правым (второй толстый черный провод, уходящий вниз) и левым к контактной платформе Arduino (тонкий голубой провод). Кроме того, в системе присутствует датчик Холла, левым проводом подключенный к питанию от Arduino (красный тонкий провод), средним провод – «земля» (тонкий черный провод), правый провод – аналоговый выход, подключен к одному из пинов на Arduino (белый тонкий провод). Принцип работы системы заключается в непрерывной проверке датчиком Холла значения магнитного поля в цифровом формате. При превышении установленного порога (определенного экспериментально и исходя из параметров расстояния между катушками и величины тока) сигнал подается на драйвер, и ток начинает подаваться в катушки. При уменьшении значения ниже установленного порога транзистор отключает подачу тока.

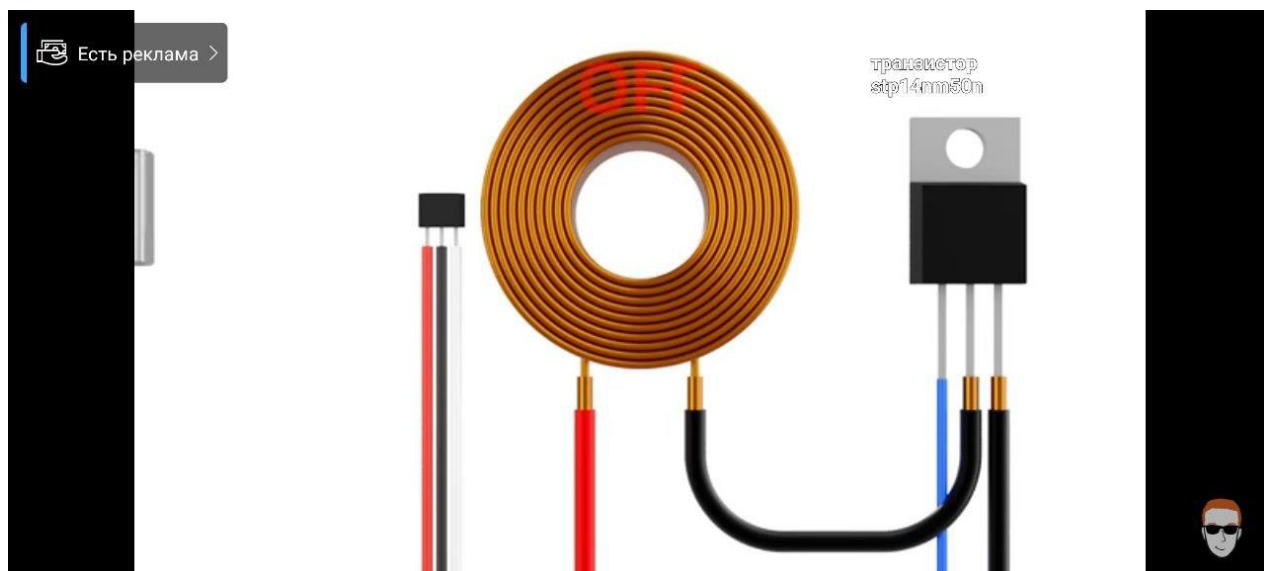


Рисунок 8 Подключение датчиков Холла и транзистора (также схема на рисунке 9).

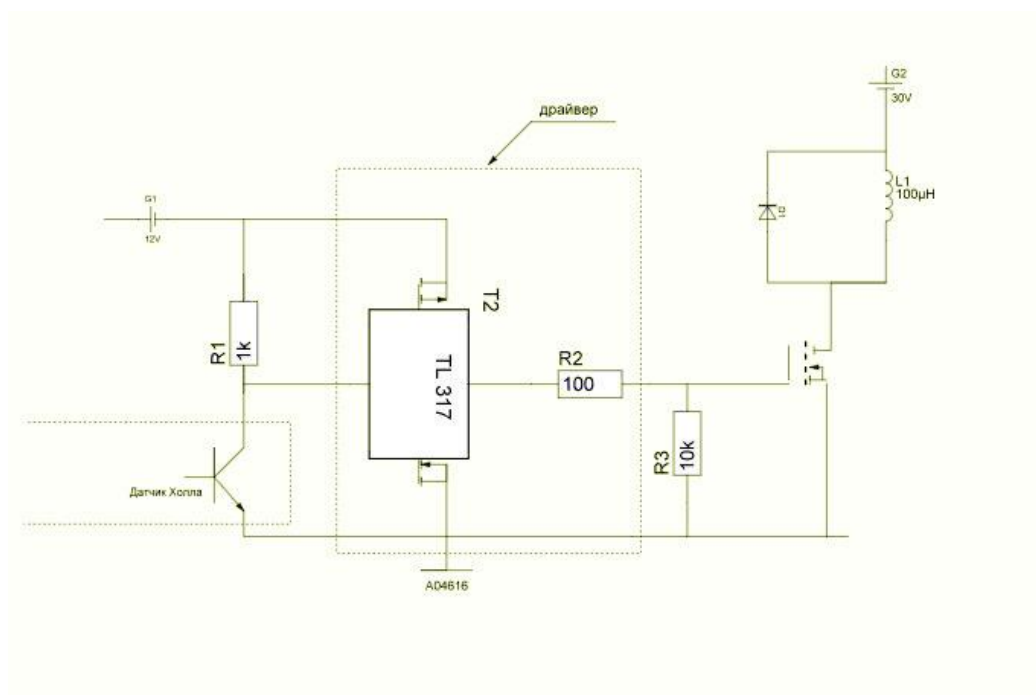


Рисунок 9 Схема для сборки каждой пары катушек.

Система будет работать в четырех режимах:

- 1) торможение при движении влево. (рисунок №11)
- 2) торможение при движении вправо. (рисунок №12)
- 3) ускорение при движении влево. (рисунок №13)
- 4) ускорение при движении вправо. (рисунок №14).

Геометрические параметры катушек и магнита изображены на рисунке №10.

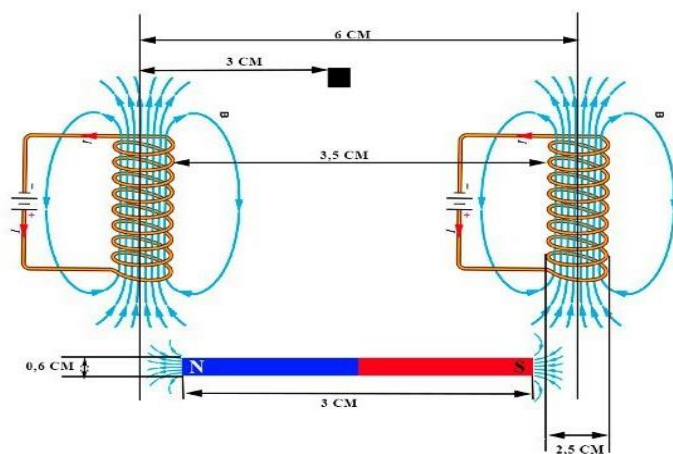


Рисунок 10 Геометрические параметры катушек и магнита

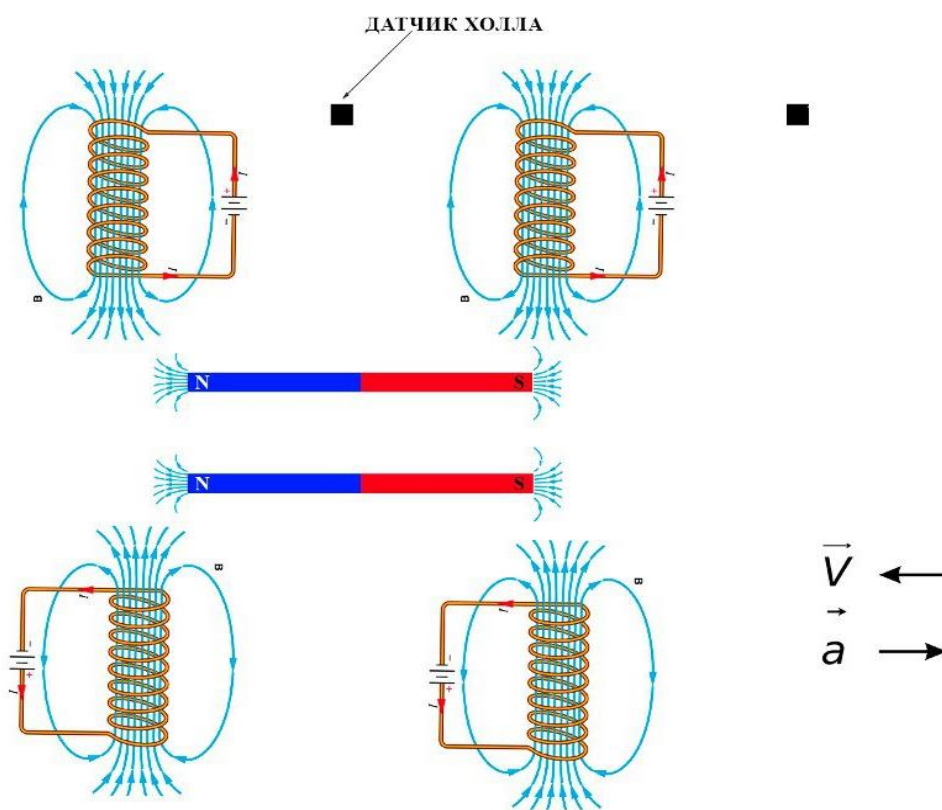


Рисунок 11 Движение влево. Торможение.

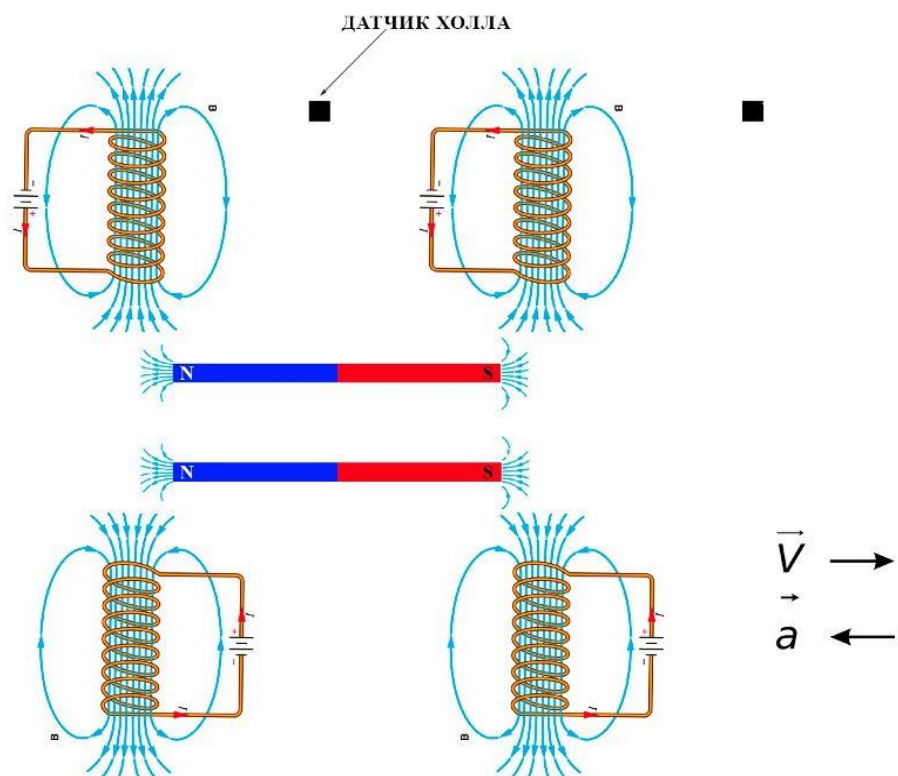


Рисунок 12 Движение вправо. Торможение.

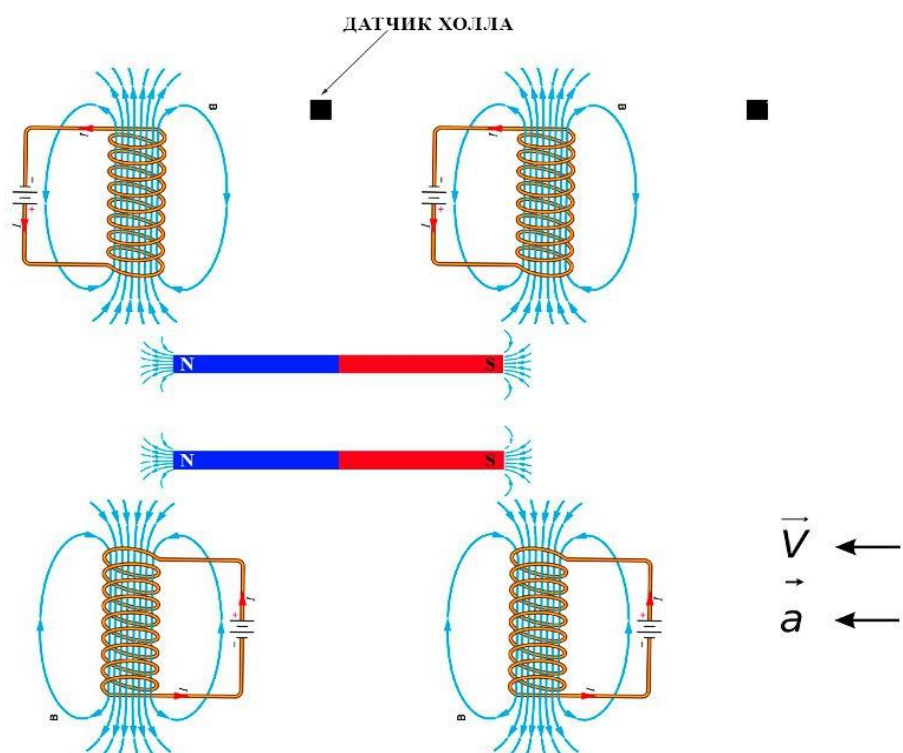


Рисунок 13 Движение влево. Ускорение.



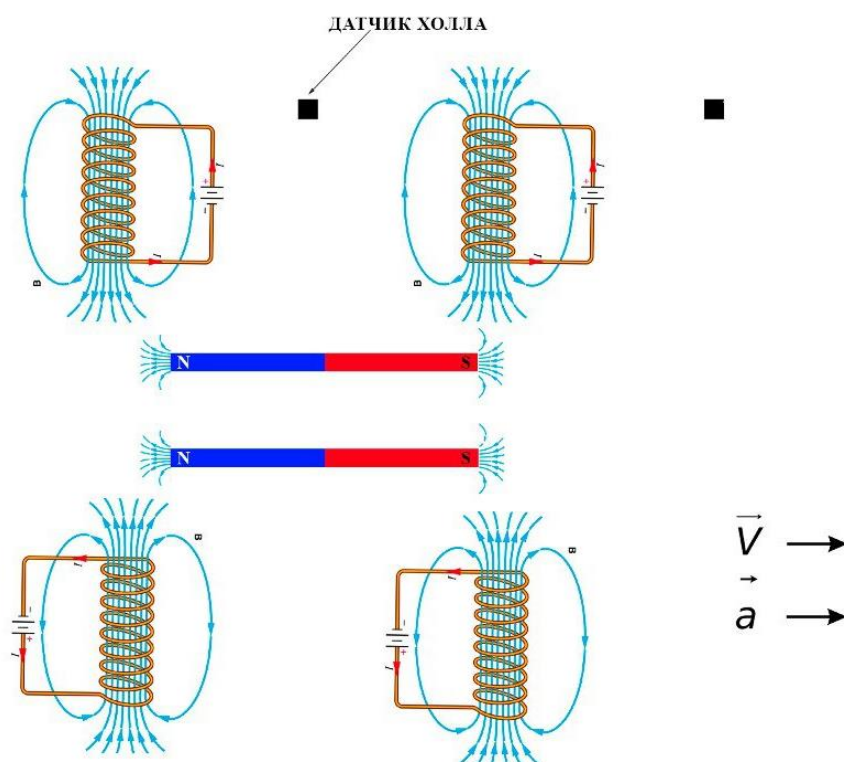


Рисунок 14 Движение вправо. Ускорение.

Рекуперация – это возвращение части энергии, расходуемой в том или ином процессе, для повторного использования в том же самом процессе. Как работает рекуперация? За счет взаимодействия постоянного магнита, закрепленного на тележке с катушками с медной обмоткой катушек, в которых будет наводиться электрический ток за счет того, что тележка будет часть энергии терять.

В момент торможения кинетическая энергия не рассеивается теплом, а преобразовывается в электрический ток, который используется для продолжения движения. Этот базовый принцип использован в проекте: при движении магнита над катушкой, а катушка это замкнутый контур, в катушке переменное поле движущегося магнита наводит ЭДС, ЭДС вызывает электрический ток в цепи.

Фрагмент кода программы (подключение и работа датчиков Холла) представлен ниже на рисунке 15.

```

int led = 13
int analogPin = A0; // с аналогового выхода датчика Холла
int digitalPin = 12; // с цифрового выхода датчика Холла
// int digitalPin2 = 11; // с цифрового выхода датчика Холла
int koef=600;
void setup() {
  pinMode(led, OUTPUT); //подключение на 13-ий пин
  pinMode(digitalPin, INPUT);
  Serial.begin(9600);
}

void loop() {
  int digitalValue = digitalRead(digitalPin); // считываем цифровое значение
  // Serial.println((String)digitalValue + "\t" + (String)analogValue);
  if(digitalValue>=koef or digitalValue2>=koef):
    | | digitalWrite(led, HIGH); // включение
  else:
    | | digitalWrite(led, LOW); // выключение
}

```

Рисунок 15 Фрагмент кода программы.

## Заключение

В данной работе спроектирована и реализована система контролируемого разгона и торможения для макета магнито - левитационного транспорта с рекуперацией энергии. Макет магнито - левитационного транспорта представлял собой платформу, содержащую внутри стопки из ВТПС лент, парящую над рельсами, выложенными из постоянных магнитов. На платформе был размещён постоянный магнит, а вдоль рельс выложены катушки медных электромагнитов. Платформа ускорялась и тормозила за счёт взаимодействия постоянного магнита и электромагнитов. Активация отдельных электромагнитов осуществлялась Arduino Mega. Параллельно лазерные датчики отслеживали положение платформы. Рекуперация энергии осуществлялась за счёт наведения тока постоянным магнитом на катушках, замкнутых на накопителе энергии.

Таким образом, было реализовано три режима работы магнито-левитационной системы: режим контролируемого разгона и торможения за счёт отслеживания положения тележки и активации соответствующих катушек; режим с активным разгоном и пассивным торможением, когда кинетическая энергия платформы уменьшается за счёт взаимодействия постоянного магнита и электромагнитов, замкнутых на накопитель энергии; гибридный режим, когда реализованы активный разгон, активное торможение и рекуперация энергии за



счёт отслеживания положения и скорости тележки и переключения режимов работы электромагнитов.

### **Список литературы**

1. Антонов Ю.Ф., Зайцев А.А., «Магнитолевитационный транспорт: научные проблемы и технические решения», 2015, 612 с., ISBN 978-5-9221-1627-
2. Давыдов С. К., «Тормозные режимы линейных двигателей для тяговых испытаний тракторов», 2014, Научный журнал КубГАУ, №98(04).
3. Пятин Ю.М., «Постоянные магниты справочник», 1980, Москва, «Энергия».