

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

ИНСТИТУТ ЭНЕРГЕТИКИ И ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

Кафедра «Промышленная электроника»

11.03.04 Электроника и наноэлектроника
(код и наименование направления подготовки, специальности)

Промышленная электроника
(наименование профиля, специализации)

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

на тему Система управления ускорителя ферромагнитных масс

Студент

Д.П. Кислов

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

А.К. Кудинов

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Консультант

О.Н. Брега

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Допустить к защите

Заведующий кафедрой к.т.н., доцент А.А. Шевцов

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

(личная подпись)

« » 20 г.

Тольятти 2017

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

ЭНЕРГЕТИКИ И ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

(институт)

Промышленная электроника

(кафедра)

УТВЕРЖДАЮ

Зав. кафедрой «Промышленная электроника»

А.А. Шевцов

(подпись)

(И.О. Фамилия)

« _____ » _____ 20__ г.

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной бакалаврской работы

Студент Кислов Денис Павлович

1. Тема Система управления ускорителя ферромагнитных масс
2. Срок сдачи студентом законченной выпускной квалификационной работы 30 мая 2017 г.
3. Исходные данные к выпускной квалификационной работе Напряжение питания: 12 В. Минимальное количество ступеней: 3. Частота срабатывания: 1 раз в секунду. Основные измеряемые параметры: коэффициент полезного действия устройства, индуктивность, ток катушек индуктивности, скорость снаряда, время задержки срабатывания ступени с момента запуска устройства.
4. Содержание выпускной квалификационной работы (перечень подлежащих разработке вопросов, разделов) Введение. 1. Состояние вопроса. 1.1. Формулирование задания ВКР. 1.2. Описание разрабатываемой системы. 1.3. Обзор аналогов. 1.4. Задачи работы. 2. Основная часть. 2.1. Расчёт схемы устройства. 2.2. Конструкторская часть. 2.3. Методика измерения параметров. 2.4. Методика настройки системы. 3. Экономическое обоснование работы. Заключение. Список использованных источников.
5. Ориентировочный перечень графического и иллюстративного материала 1. Общий вид установки ускорителя. 2. Система управления ускорителя ферромагнитных масс. Схема электрическая принципиальная. 3. Обзор аналогов. 4. Сборочный чертёж печатного узла. 5. Печатная плата. 6. Функциональная схема.
6. Консультанты по разделам: нет
7. Дата выдачи задания « 15 » февраля 2017 г.

Руководитель выпускной
квалификационной работы

А.К. Кудинов

(подпись)

(И.О. Фамилия)

Задание принял к исполнению

Д.П. Кислов

(подпись)

(И.О. Фамилия)

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

ЭНЕРГЕТИКИ И ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

(институт, факультет)

Промышленная электроника

(кафедра)

УТВЕРЖДАЮ

Зав. кафедрой «Промышленная электроника»

А.А. Шевцов

(подпись)

(И.О. Фамилия)

« ____ » _____ 20__ г.

КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН

выполнения выпускной бакалаврской работы

Студента Кислова Дениса Павловича

по теме «Система управления ускорителя ферромагнитных масс»

Наименование раздела работы	Плановый срок выполнения раздела	Фактический срок выполнения раздела	Отметка о выполнении	Подпись руководителя
Аннотация	10.03.2017	15.03.2017	Выполнено	
Введение	20.03.2017	24.03.2017	Выполнено	
Состояние вопроса	05.04.2017	11.04.2017	Выполнено	
Основная часть	30.04.2017	3.05.2017	Выполнено	
Экономическое обоснование работы	04.05.2017	05.05.2017	Выполнено	
Оформление пояснительной записки	13.05.2017	15.05.2017	Выполнено	
Оформление чертежей	24.05.2017	29.05.2017	Выполнено	

Руководитель выпускной
квалификационной работы

(подпись)

А.К. Кудинов

(И.О. Фамилия)

Задание принял к исполнению

(подпись)

Д.П. Кислов

(И.О. Фамилия)

Аннотация

Тема данной бакалаврской работы – «система управления ускорителя ферромагнитных масс».

В бакалаврскую работу входит введение, состояние вопроса, основная часть, экономическое обоснование работы и заключение по написанным разделам.

Во введении указывается цель и актуальность работы, раскрывается объект и предмет исследования, формулируется гипотеза.

В состоянии вопроса обосновывается выбор исходных данных работы, рассматриваются существующие решения по теме работы, проводится их анализ и на его основе формируется электрическая принципиальная схема ускорителя. Также формулируются конкретные задачи, необходимые для выполнения работы.

В основной части производится расчёт параметров элементов электрической принципиальной схемы, деталей устройства. Описываются методы измерения основных параметров ускорителя, характеризующих его работу. Описываются методы настройки системы управления ускорителя, которые необходимы для корректировки работы устройства. Производится расчёт размеров электронных и конструкционных деталей.

В экономическом обосновании работы выполняется подсчёт общей стоимости изготовления опытного образца исходя из стоимости выбранных деталей.

В заключении подводятся итоги выполнения работы, анализируются полученные характеристики и описываются нерешённые проблемы.

Ключевые слова: ферромагнетик, соленоид, ступень, сердечник, ключ, импульс, магнитное поле, ускорение.

Данная бакалаврская работа состоит из пояснительной записки на 72 страницы и 6 чертежей формата А1. В пояснительной записке размещены 24 рисунка и 11 таблиц. При написании работы использовалось 32 источника, из которых 7 на иностранном языке.

Abstract

The topic of this graduation work is "Control system of the accelerator of ferromagnetic masses".

This work includes the introduction, the state of the matter, the main part, the business case and the conclusion on the written sections.

The introduction indicates the aim and relevance of the work, the object and the subject of research are revealed, a hypothesis is formulated.

In the state of the issue, the choice of the initial data of the work is justified, the existing solutions are considered, and their analysis is carried out. On its basis an electrical schematic diagram of the accelerator is formed. Also the concrete tasks necessary for the performance of the work are formulated.

In the main part, the calculation of the elements' parameters of the electrical circuit, and the details of the device are performed. Methods for measuring the main parameters of an accelerator characterizing its operation are described. Methods for tuning the accelerator control system, which are necessary for correcting the operation of the device, are described. Calculation of the dimensions of electronic and structural parts is made.

In the business case of the work, the total cost of manufacturing the prototype based on the cost of the selected parts is calculated.

In conclusion, the results of the work are summed up, the received characteristics are analyzed and unresolved problems are described.

Key words: ferromagnet, solenoid, step, core, key, impulse, magnetic field, acceleration.

This graduation work consists of an explanatory note for 72 pages and 6 drawings of the A1 format. In the explanatory note there are 24 figures and 11 tables. When writing the work 32 sources were used, of which 7 are in a foreign language.

Содержание

Введение.....	7
1. Состояние вопроса	9
1.1 Формулирование задания ВКР	9
1.2 Обзор аналогов	9
1.3 Описание разрабатываемой системы	35
1.4 Задачи работы	35
2. Основная часть	37
2.1 Расчёт схемы устройства	37
2.2 Конструкторская часть	42
2.3 Методика измерения параметров	45
2.4 Методика настройки системы.....	47
3. Экономическое обоснование работы	48
Заключение	49
Список использованных источников	50

Введение

Цель данной работы – рассчитать и спроектировать систему управления ускорителя ферромагнитных масс, который использует принципиально новый метод ускорения твёрдых тел. Данное устройство в перспективе может решить ряд прикладных задач в различных отраслях жизнедеятельности человека.

Данная система применяется в ускорителе ферромагнитных масс, в котором ферромагнитный сердечник магнитным полем последовательно ускоряется по мере его движения. Имеет смысл говорить о **новизне** данной работы, так как приборы, трансформирующие энергию магнитного поля в кинетическую энергию движущегося тела, на текущий момент, по тем или иным причинам, на практике не нашли широкого применения.

Актуальность работы обусловлена тем, что электромагнитные ускорители могут быть применены для решения ряда прикладных задач на производстве, в космической отрасли, а также в прочих областях жизни людей. В связи с развитием современной электроники совершенствуются и удешевляются методы изготовления электронных компонентов и источников электрической энергии и системы на основе электромагнитов заменяют механические, пневматические аналоги.

В перспективе подобные устройства могут быть применены в строительном инструменте, в особенности в нейлерах (гвоздезабивных пистолетах). Также возможно применение подобных систем для запуска лёгких, устойчивых к перегрузкам спутников на орбиту. В патенте США US5168939 описано подобное устройство (Ускоряемая электромагнитным полем ударная дрель для бурения нефтяных скважин) [1] для бурения нефтяных скважин с ударником ускоренным электромагнитным полем. Устройство, содержит множество модулей (ступеней) катушек, отделенных друг от друга только прокладками и уложенными друг на друга в несущей конструкции. Ударник вставляется вручную в верхней части устройства. Построение катушки в виде множества независимых модулей, позволяет контролировать

электромагнитное усилие, создаваемое каждым модулем. В ближайшем будущем с развитием компактных источников энергии, возможно применение подобных устройств и в спортивном оружии.

Объектом исследования проекта является устройство - электромагнитный ускоритель ферромагнитных масс. Оно осуществляет последовательное, линейное ускорение твёрдого предмета с ферромагнитными свойствами.

Предметом исследования является «система управления ускорителя ферромагнитных масс». Данная система электрическими сигналами осуществляет управление коммутирующими элементами катушек индуктивности.

Гипотеза: возможно ли спроектировать систему ускорителя ферромагнитных масс, при минимальном количестве полупроводниковых ключей?

1. Состояние вопроса

1.1 Формулирование задания ВКР

Решено проектировать стационарное устройство, питаемое от бытовой сети переменного синусоидального тока со среднеквадратичным значением напряжения 220 В и частотой 50 Гц. Для питания системы управления из номинального ряда было выбрано напряжение 12 В, из-за его универсальности. Данное напряжение укладывается в диапазон напряжений питания большого количества интегральных схем, что упрощает подбор элементной базы.

Для полноты раскрытия выбранной темы и большего охвата темы проекта задан минимальным количеством ступеней равным 3. Максимальное количество ступеней ограничивается эффективностью ускорения сердечника последней ступенью.

Для решения большего числа прикладных задач система должна быть достаточно быстродействующей. Для этого система должна быть рассчитана таким образом, чтобы она могла срабатывать не реже 1 раза в секунду.

Основными параметрами, характеризующими работу устройства, являются индуктивность тяговых соленоидов, их ток, скорость снаряда (сердечника), время задержки срабатывания ступеней с момента запуска устройства.

1.2 Обзор аналогов

Топологии ускорителей ферромагнитных масс с питанием каждой катушки индуктивности от одного блока конденсаторов.

1.2.1.1 Ускоритель ферромагнитных масс на незапираемых ключах (рисунок 1.2.1).

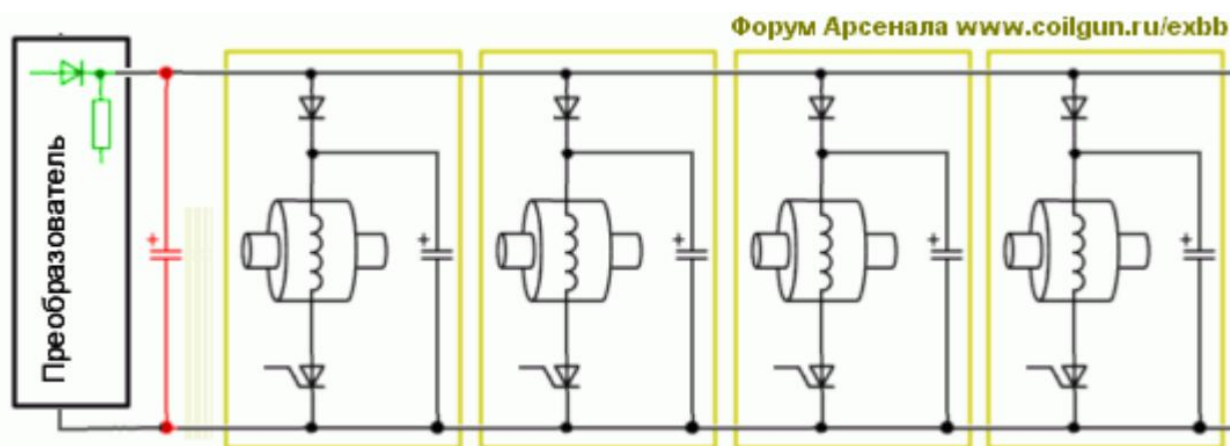


Рисунок 1.2.1 – Схема ускорителя ферромагнитных масс на однооперационных тиристорах.

Из рисунка видно, что в этой простейшей топологии на отдельную ступень применяется один незакрываемый ключ (однооперационный тиристор). Так как подключение нескольких тиристорov параллельно не может быть признано эффективным решением, то далее будет рассматриваться вариант только одного ключа на отдельной ступени. В реальности эта конструкция устроена несколько сложнее, чем показано на рисунке. Дело в том, что в процессе разряда конденсатора на катушку напряжение на нем может стать отрицательным, что провоцирует выход конденсатора из строя. Произойдет эта смена полярности напряжения или нет – во всех отдельных случаях зависит от соотношения ёмкости батареи конденсаторов, индуктивности катушек и активного сопротивления цепи, но практика показывает, что в настоящих системах ускорителей подобная ситуация встречается очень часто, особенно для последних ступеней ускорения, имеющих небольшое активное сопротивление. Для защиты от инверсии напряжения конденсаторы обычно защищают встречными диодами подключёнными катодами к положительному выводу конденсатора. Встречные диоды, как и главные коммутирующие элементы (в данном случае – тиристоры), должны выдерживать токи такого же порядка.

Таким образом, можно считать, что этой конфигурации ускорителя на каждую ступень приходится 2 силовых полупроводниковых прибора, т.е. общее

количество мощных полупроводников будет $2N$, где N – количество ступеней ускорения. Данная топология многоступенчатого ускорителя пользуется популярностью у конструкторов из-за своей простоты и невысокой требовательности тиристоров к качеству открывающего сигнала (например, их управляющие цепи часто напрямую подключают к индуктивным датчикам положения снаряда). К сожалению, эффективность ускорения снаряда здесь невелика, потому что в любой конструкции с незакрываемыми ключами присутствует эффект инверсного втягивания – продолжительное спадание тока в катушке приводит к торможению снаряда на выходе из ступени, вследствие чего он теряет часть кинетической энергии. Кроме того, такая конструкция не позволяет достичь высоких скоростей снаряда из-за наличия у конденсаторов активного сопротивления (ESR). Эта величина приблизительно обратно пропорциональна ёмкости, а поскольку суммарная ёмкость конденсаторов здесь поделена по отдельным конденсаторам каждой ступени, то ESR получается достаточно большим, уменьшая и так низкий КПД ускорения (особенно на последних ступенях, где ESR сравнивается и становится больше активного сопротивления ускоряющих обмоток).

1.2.1.2 Многоступенчатый ускоритель ферромагнитных масс на закрываемых ключах (рисунок 1.2.2).

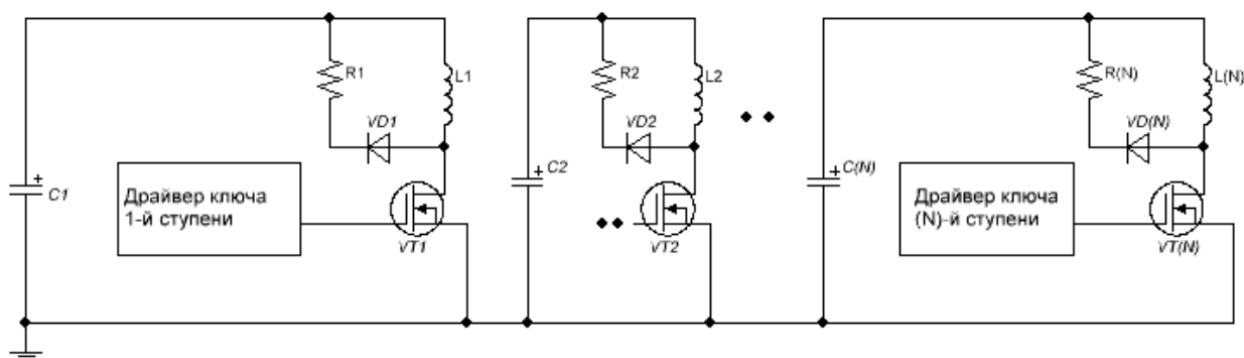


Рисунок 1.2.2 - Схема многоступенчатого ускорителя ферромагнитных масс на закрываемых ключах.

Данная конструкция является аналогом рассмотренной ранее, за

исключением того, что вместо тиристоров ток коммутируется запираемыми ключами – обычно силовыми MOSFET (при относительно малых напряжениях) или IGBT (при относительно высоком напряжении) транзисторами. В данном случае ключи чаще всего закрываются до момента перезаряда конденсатора в обратную полярность, но мощные диоды в всё же требуются, потому как они используются в демпфирующих RD-цепях. В ускорителях подобной структуры за счёт ускоренного снижения тока, обратное втягивание в значительной мере подавляется, поэтому КПД ускорения получается выше примерно в 1.35 раза, чем в схеме на рисунке 1.2.1. Амплитудные токи разряда конденсаторов тоже получается немного меньше, чем для тиристорного ускорителя (поскольку за одно и то же время одинаковая ёмкость разряжается не до конца, а лишь на определённую часть), по этой причине влияние собственного активного сопротивления конденсаторов также немного снижается.

Большим препятствием для применения этой конструкции в ускорителе является её высокая стоимость и массогабаритные параметры. Всё дело в том, что нагрузочная способность IGBT по току приблизительно на порядок уступает таковой для тиристора эквивалентной цены и рабочего напряжения. Для низковольтных MOSFET это соотношение может быть близко к единице, но при снижении напряжения для сохранения мощности необходимо соответствующим образом увеличивать ток. Вследствие чего, для получения соразмерной с простейшей схемой на тиристорах силы, оказываемой на снаряд, необходимо брать на гораздо больше коммутирующих элементов, причём обеспечивая все ступени собственной, сложной управляющей системой (например, довольно регулярно для надежного управления ключами требуется двуполярное питание). В результате портативные системы с высоким числом ступеней по данной топологии почти никогда не строятся. В дальнейшем соотношение тока, развиваемого в схеме конкретного ускорителя, и предельного тока запираемых силовых ключей, будет обозначаться коэффициентом k . То есть во всех цепях, коммутирующих ток ускоряющих катушек, должен быть установлен запираемый ключ из k транзисторов,

подключённых параллельно. Таким образом, суммарное количество силовых ключей (включая полупроводниковые диоды) в конфигурации ускорителя на отдельных закрываемых ключах на все ступени, будет $(k + 1) \cdot N$. Таким образом, данным набором конструкции ускорителей с питанием от отдельных ёмкостей и ограничиваются. Существуют разные виды ускорителей, в которых использована схема для запираания тиристоров, или ускорители, в которых взамен RD-цепочки для снижения ЭДС самоиндукции используются элементы наподобие варисторов, но все они могут быть отнесены к той или иной из приведённых двух категорий.

Топологии ускорителей ферромагнитных масс с питанием каждой катушки индуктивности от общей батареи конденсаторов.

Переходя к топологиям ускорителей ферромагнитных масс с общей питающей батареей конденсаторов, сразу следует отметить, что использование в них только незапираемых ключей естественным образом исключено – батарея конденсаторов полностью разрядится на одну из катушек индуктивности, как только включится коммутирующий её тиристор, и на питание других катушек индуктивности не останется заряда. Разные топологии, использующие схемы принудительного закрытия тиристоров не рассматриваются, т.к. они, в основном, не опробованы на практике, а их конструктивная сложность сводит на нет все преимущества перед топологиями с управляемыми ключами. Однако, из-за своей низкой стоимости и высокой нагрузочной способности, тиристоры применяются в комбинации с запираемыми ключами в некоторых конструкциях, которые детально описаны далее. Помимо прочего, все схемы с питанием от ёмкости обладают большим преимуществом над схемами с отдельным питанием каждой ступени – оно связано с низким «ESR» большой ёмкости и, как следствие, возможностью получения больших импульсных токов и энергии снаряда. Присутствует и недостаток – в течение снижения заряда конденсатора для сохранения неизменной мощности приходится наращивать ток катушек индуктивности, другими словами ключи,

используемые на последних ступенях ускорения, должны быть существенно более мощные, чем для первых ступеней. Например, если конденсатор при выстреле тратит 75 % накопленной энергии, то напряжение на конечных ступенях будет составлять половину от начального, соответственно, ток должен быть увеличен вдвое.

1.2.2.1 Ускоритель с отдельными ключами на каждой ступени (рисунок 1.2.3).

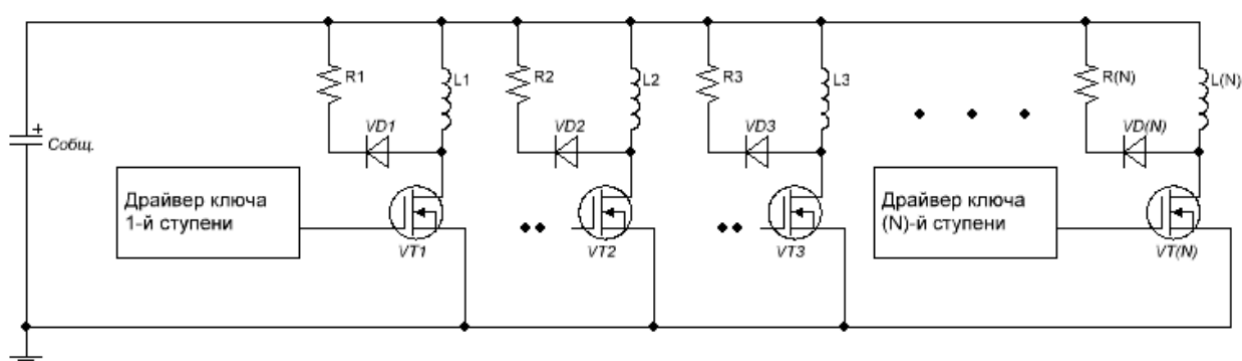


Рисунок 1.2.3 - Схема ускорителя с отдельными закрываемыми ключами на каждой ступени.

Из рисунка 1.2.3 видно, что эта схема аналогична схеме на рисунке 1.2.2, лишь с той разницей, что питание всех ступеней осуществляется от одной батареи конденсаторов. У этой простейшей схемы присутствует и основной недостаток своего аналога – большие массогабаритные показатели и высокая стоимость, связанные с необходимостью параллельного подключения большого числа коммутирующих элементов на всех ступенях ускорителя. Суммарное число силовых полупроводниковых приборов (включая диоды) в данной топологии $(k + 1) \cdot N$.

1.2.2.2 Схема с комбинированными коммутирующими элементами.

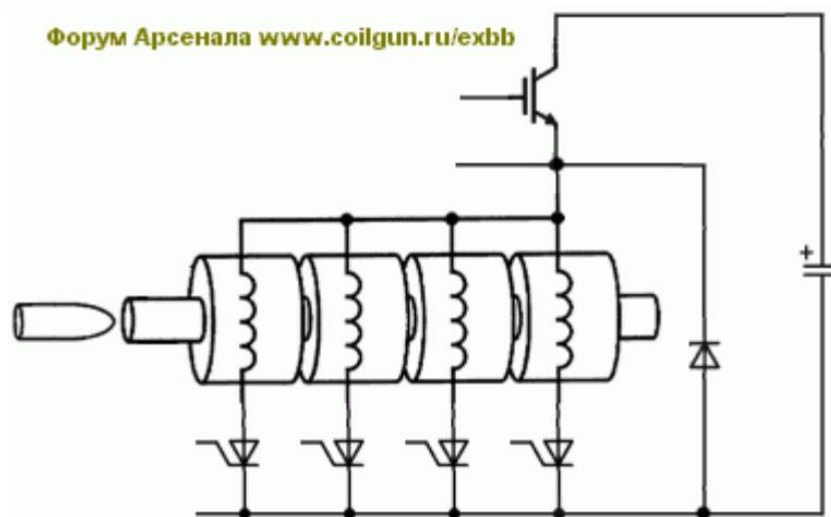


Рисунок 1.2.4 – Схема ускорителя с комбинированными коммутирующими элементами.

Такая конфигурация была предложена с целью уменьшения стоимости конструкции, описанной в предыдущем пункте. Как видно, в ней используется один транзистор на все ступени, и отдельный дешевый не закрываемый ключ на каждую ступень.

Данная схема, с первого взгляда, кажется перспективной, так как можно сделать достаточно мощный транзисторный ключ, в частности, за счёт подключения нескольких транзисторов параллельно. Но эта схема имеет существенный недостаток, связанный с инерционностью тиристоров: после выключения транзистора необходимо выждать определённое время до его следующего открытия, они должны быть выключены на время около 50-150 мкс для надежного запираения. Предполагается, что за данное время ток в выключенной ступени плавно снизится до нуля, далее следует выждать ещё 50-100 мкс для уверенного закрытия тиристора. Если этого не сделать, при последующем включении транзистора, до этого запертый тиристор заново самопроизвольно откроется. По этой причине, требуется размещать ступени на стволе не вплотную, а с большими промежутками, это может привести к увеличению общей длины ускорителя в несколько раз. На самом деле, описанная проблема серьезнее, чем кажется. Дело в том, что в конфигурации, изображенной на рисунке 1.2.4, ток катушки при отключении транзистора

спадает экспоненциально, по соотношению:

$$i(t) = i_0 \cdot e^{\frac{-tR}{L}}, \text{ где} \quad (1.2.1)$$

i_0 – начальное значение тока;

R и L – активное сопротивление и индуктивность цепи.

Обычно соотношение $\frac{L}{R}$ (индуктивная постоянная времени цепи) лежит в пределах 100...1000 мкс, а значение начального тока i_0 порядка 100 А. Силовые тиристоры, применяемые в ускорителях, имеют ток удержания $i_{уд}$ (т.е. минимальное значение тока, поддерживающее тиристор в открытом состоянии) порядка 100 мА. Получается, что даже при минимальном значении индуктивной постоянной 100 мкс для того, чтобы ток уменьшился от i_0 до $i_{уд}$, требуется время:

$$100 \text{ мкс} \cdot \ln \frac{i_0}{i_{уд}} \approx 691 \text{ мкс}. \quad (1.2.2)$$

Данное время следует просуммировать с вышеуказанной длительностью интервала, который необходим для уверенного закрытия тиристора. В итоге выходит, что все ступени могут быть активированы после того как пройдет примерно 800 мкс после отключения предшествующей ступени. При скоростях ферромагнитного сердечника порядка $100 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ расстояние от одной ступени до следующей должно составлять примерно 80 мм, что совершенно неприемлемо для портативного ускорителя. В качестве решения этой трудности, можно использовать взамен RD-цепочки особый полупроводниковый прибор, уже упомянутый выше – варистор. По принципу работы варистора, его можно охарактеризовать как высоковольтный стабилитрон высокой мощности, которые могут рассеивать в тепло большое количество энергии – что и нужно для катушек индуктивности ускорителей. Их особенностью является способность удерживать приблизительно постоянное падение напряжения в большом диапазоне токов. В результате ток катушки затухает не по соотношению (1.2.1), а по более простой линейной зависимости:

$$i(t) = i_0 - \frac{U \cdot t}{L}, \text{ где} \quad (1.2.3)$$

U – напряжение по паспорту, при котором срабатывает варистор.

В теории, при достижении времени $t = i_0 \cdot \frac{L}{U}$ ток в цепи затухает, и выдержав заданные 100 мкс, можно запускать следующую ступень ускорения. К сожалению, в реальности этот интервал оказывается всё-таки больше, поскольку в любой схеме присутствуют паразитные элементы – индуктивности и ёмкости, которые приводят к возникновению различного вида колебаний в цепи и мешают тиристорам надёжно закрыться. Поэтому, даже с применением варисторов, в этой схеме придётся размещать катушки индуктивности ускорителя с большим расстоянием между собой, что мешает создать компактный ускоритель по данной топологии. Реальные ускорители, созданные по этой схеме, на текущий момент отсутствуют.

1.2.2.3 Матричная схема коммутации.

Как средство борьбы с описанными выше недостатками, можно применять такой метод: использовать несколько запираемых ключей коммутирующие несколько «ветвей» цепи, каждая из которых разделяется на ступени, также управляемые отдельными коммутирующими элементами. Другими словами, полупроводниковые ключевые приборы осуществляют управление «строками» и «столбцами» матрицы катушек индуктивности. Эта идея описана в патенте US 5763812 от 1998 г [2]. Далее приведён рисунок структуры схемы устройства из этого патента:

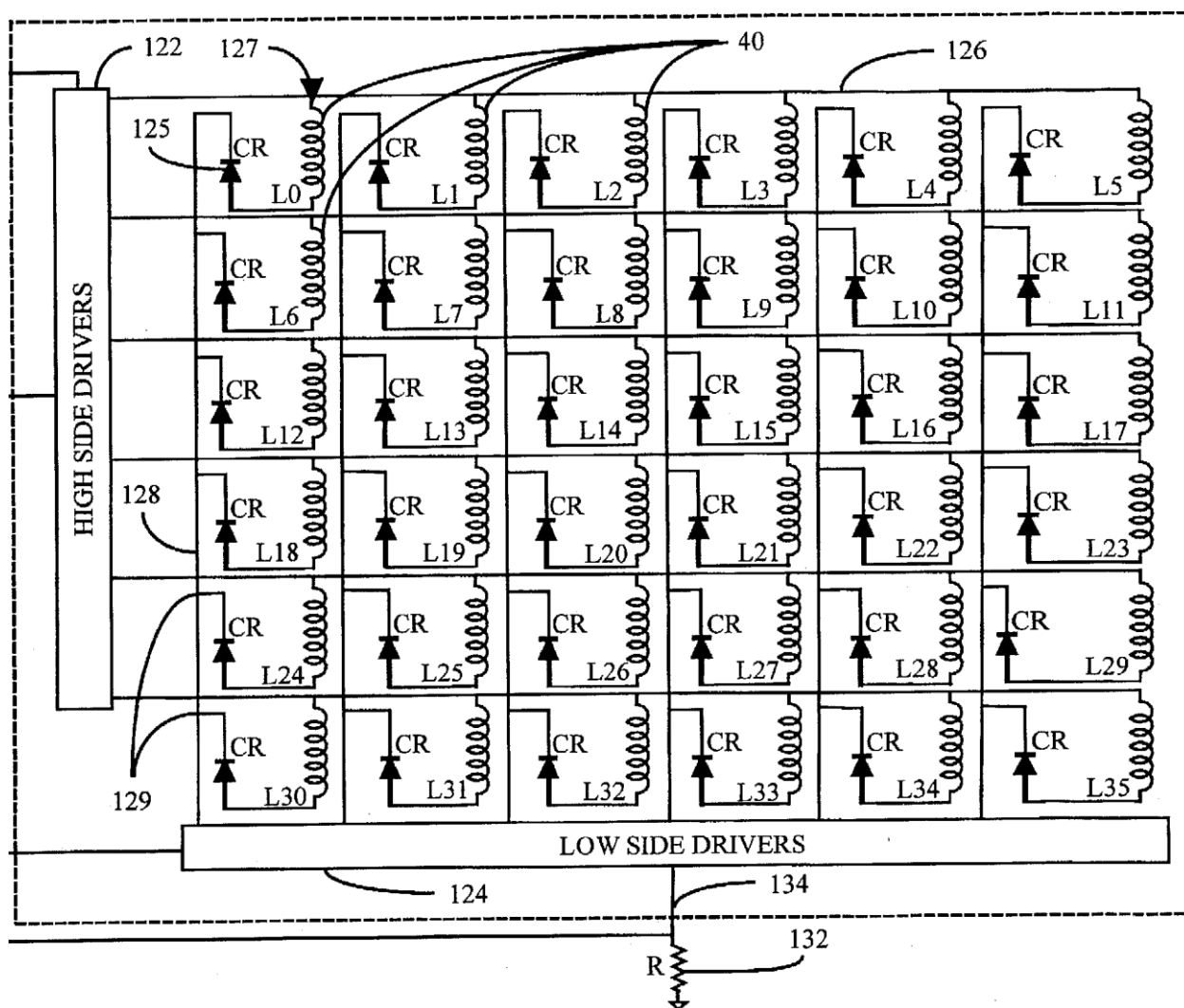


Рисунок 1.2.5 - Принципиальная схема матричного драйвера коммутации катушек индуктивности ускорителя ферромагнитных масс.

Легко показать, что в такой конфигурации минимальное количество коммутирующих элементов обеспечивается при одинаковом количестве «столбцов» и «строк» матрицы, которое равно $2 \cdot N^{\frac{1}{2}}$ (квадратный корень из N для группы «строковых» и «столбцовых» ключей). То есть для управления 9 степенями необходимо 6 ключей, 36 степенями – 12. С первого взгляда, может показаться, что у данной конфигурации ускорителя явное преимущество над всеми прочими конфигурациями, в части экономии количества ключей. К сожалению, в этой конфигурации присутствуют очень серьёзный недостаток. Во-первых, как ясно из приведенного примера, преимущество матричной схемы реализуется при очень большом количестве ступеней (несколько

десятков), которое не достигается в портативных конструкциях. При более реалистичном количестве катушек около 10, количество ключей ничуть не меньше, чем в других конфигурациях ускорителей. Во-вторых, из схемы на рисунке выше видно, что схема содержит большое количество механических соединений, поэтому устройство оказывается достаточно крупногабаритной. При этом, для управления «верхними» ключами приходится использовать специальные драйверы, что дополнительно повышает сложность схемотехники. Наконец, если принять во внимание коэффициент нагрузочной способности транзисторов k , о котором говорилось выше, то общее количество силовых полупроводниковых приборов в матричной топологии ускорителя будет равняться $2 \cdot k \cdot N^{\frac{1}{2}} + N$ (последнее слагаемое учитывает один разделительный диод на ступень). КПД ускорения в такой конструкции неплохой, как и в любой схеме с закрываемыми ключами.

1.2.2.4 Матричная схема с комбинированными ключами.

Для снижения стоимости и массогабаритных параметров ускорителя матричной топологии, ключи одной из групп могут быть заменены тиристорами (см. рисунок 1.2.6). В итоге образуется топология, объединяющая две предыдущие.

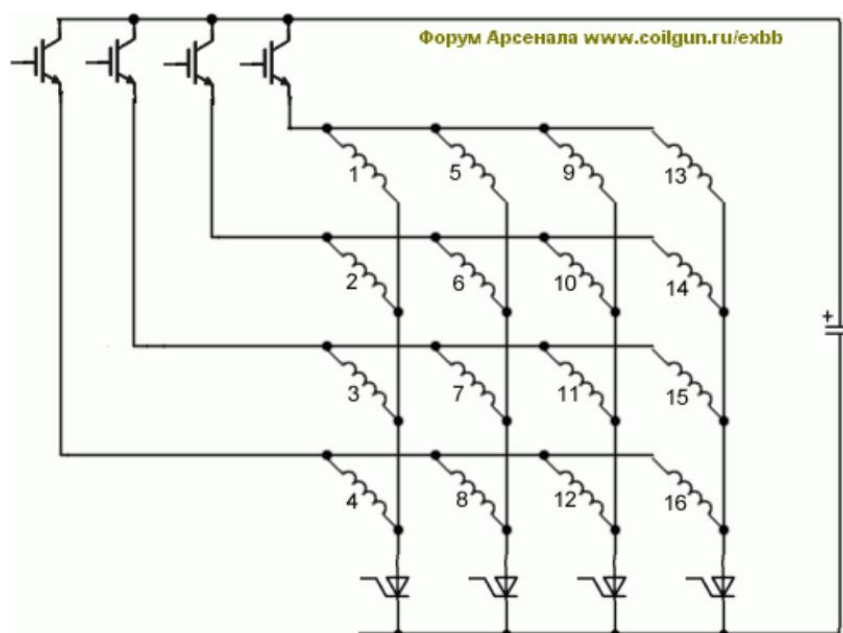


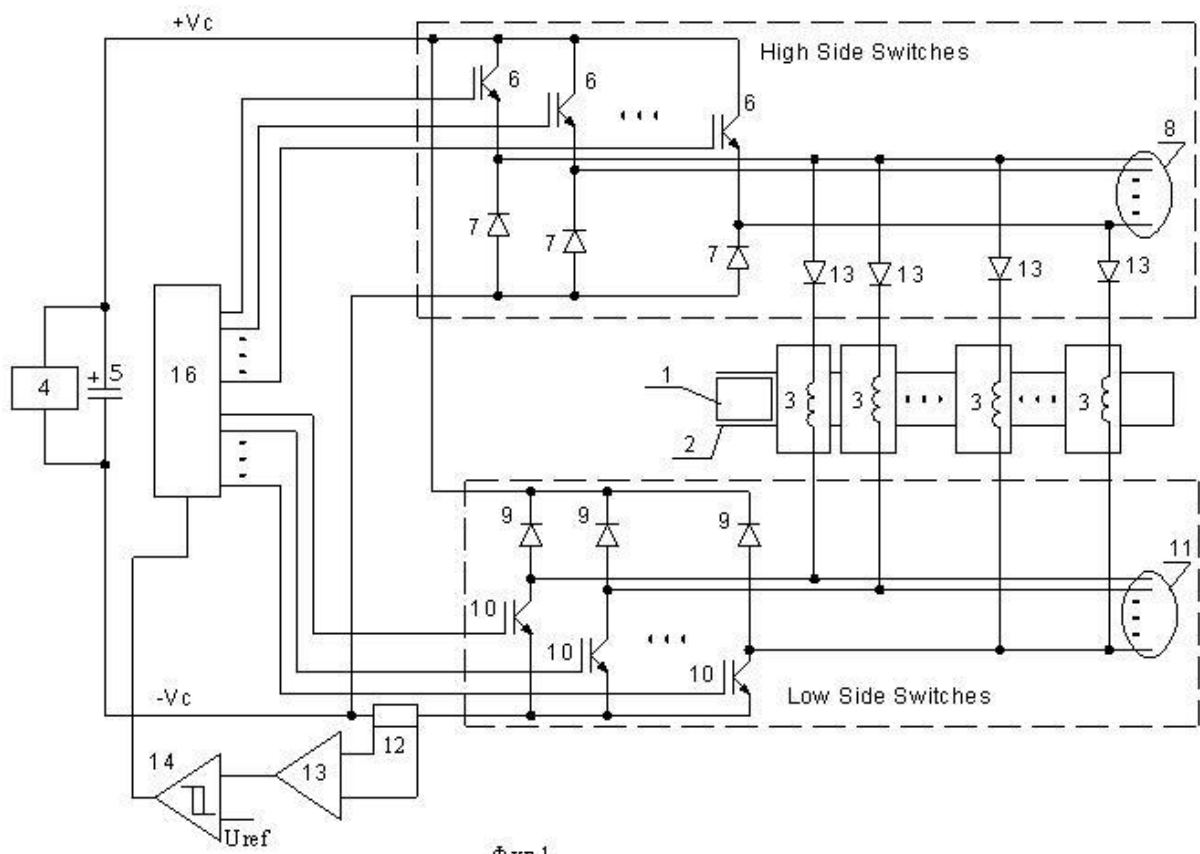
Рисунок 1.2.6 – Схема матричного ускорителя ферромагнитных масс с комбинированными ключами.

Здесь тиристор будет закрываться за счёт выключения соответствующих управляемых ключей. Так как количество «строк» может быть сделано большим, то снимается проблема с интервалом времени, необходимым для запираания тиристора, поскольку смежные катушки ускорителя управляются различными ключами (т.е. принадлежат разным «строкам»). При этом за счёт хорошей нагрузочной способности тиристора количество ключей, управляющих «столбцами», может быть снижено до $N^{\frac{1}{2}}$, а общее количество силовых полупроводников в схеме равно $(k + 1) \cdot N^{\frac{1}{2}} + N$.

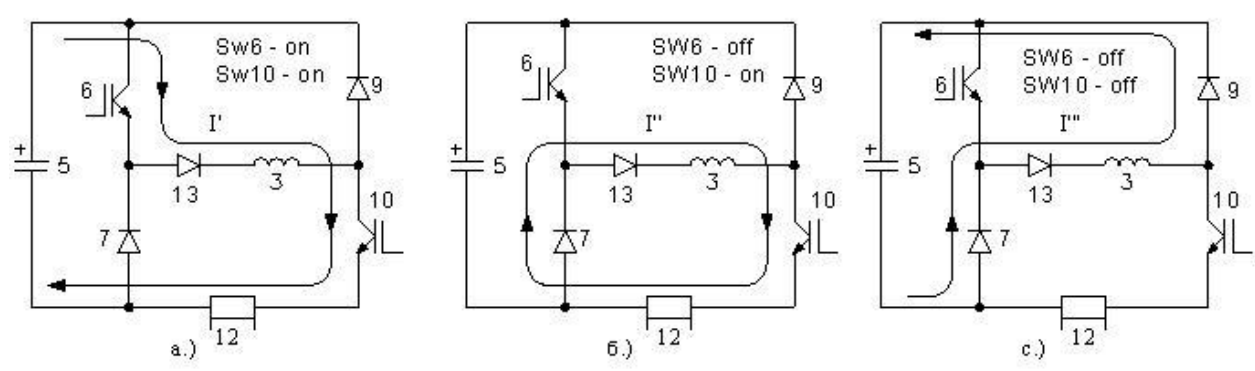
1.2.2.5 Схемы с рекуперацией энергии.

Эти схемы конструктивно самые сложные, но и самые эффективные с точки зрения КПД ускорения топологии ускорителей. Их особенность состоит в том, что за счёт перекоммутации силовых ключей часть энергии магнитного поля катушки возвращается в конденсатор, а не рассеивается в тепло, как в описанных ранее конструкциях с RD-цепочками и варисторами. Эффективность такой рекуперации, может достигать 50% и выше. Кроме всего прочего, в рекуперативных схемах спад тока в катушках происходит быстрее, чем в конструкциях с варисторными или RD – демпферами, он больше имеет линейный характер, так как при переключении коммутирующих элементов, напряжение питающей батареи конденсаторов прикладывается к катушке в обратной полярности. Поэтому в подобных конфигурациях выгодно применять комбинированные тиристорные-транзисторные ключи (см. ниже).

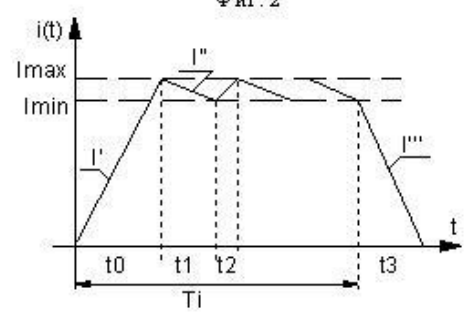
Проще всего рекуперация электрической энергии происходит в матричной топологии. В этом случае добавляется всего один диод на ключ каждой «строки» и «столбца». На рисунке ниже приведена иллюстрация такой топологии, реализованной участником форума [3]:



Фиг. 1



Фиг. 2



Фиг. 3

Рисунок 1.2.7 - Иллюстрация структуры и функционирования ускорителя ферромагнитных масс DJ6, построенного по матричной схеме с рекуперацией энергии

Как нетрудно показать, общее количество силовых полупроводниковых приборов здесь будет $2 \cdot (k + 1) \cdot N^{\frac{1}{2}} + N$. К сожалению, как уже было сказано ранее, высокий КПД этой топологии обеспечивается ценой чрезвычайно сложной схемотехники и конструкции.

Рекуперация электрической энергии осуществима и в топологии с комбинированными транзисторно-тиристорными ключами. Для этого необходимо добавить в схему управляемый коммутирующий ключ, который будет обеспечивать изменение направления тока из катушки индуктивности в батарею конденсаторов, а также добавить ещё по одному диоду к каждому ключу, по аналогии с вышеприведенной схемой. Схема получившегося устройства приведена на рисунке ниже (рисунок 1.2.8).

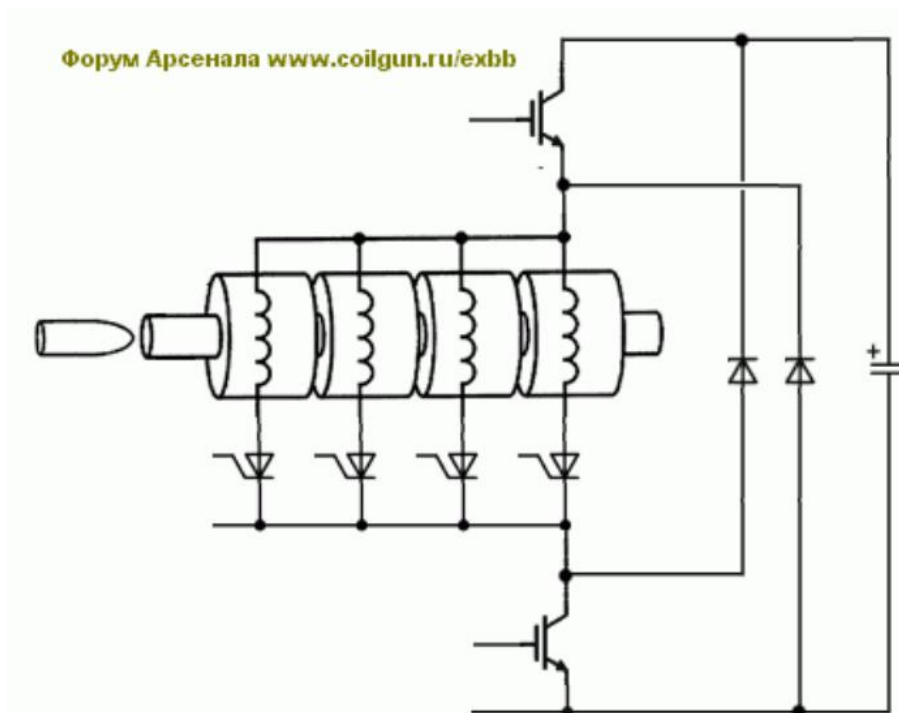


Рисунок 1.2.8 - Схема ускорителя ферромагнитных масс с комбинированными ключами («косой мост») и рекуперацией электрической энергии.

У этой топологии также присутствует проблема инерции тиристорных ключей, избавиться от которой возможно переходя к матричной схеме коммутации, то есть применением двух и более ветвей, коммутируемых

отдельными транзисторами, в которых включение и отключение отдельных катушек индуктивности осуществляется тиристорными ключами. В этом случае смежные катушки индуктивности принадлежат различным ветвям. Например, в случае матрицы из двух «строк» все нечётные ступени коммутируются одним ключом, а все чётные – другим. В тот момент, когда снаряд пролетает нечётную ступень, тиристор, управляющий предыдущей чётной катушкой, должен успеть запереться. Количество силовых полупроводниковых элементов в данной схеме будет зависеть от того, какое количество ветвей она содержит, которые коммутируются закрываемыми ключами. Для экономии на количестве ключей и упрощения схемотехники устройства, следует минимализировать количество таких ветвей до двух, обеспечивая необходимое число ступеней за счёт соответствующего увеличения количества тиристорных («столбцов» матрицы). В этом случае общее количество силовых полупроводниковых приборов в конструкции будет равно $2 \cdot (2 \cdot k + 2) + N$ (множитель в скобках соответствует количеству транзисторов и диодов в каждой «строке» ускорителя, последнее слагаемое – количество тиристорных, которое равно количеству коммутируемых ими ступеней ускорения).

Схемы с комбинированным питанием.

Предложены также топологии ускорителей, в которых используются небольшое количество отдельных конденсаторов, при этом каждый такой накопитель питает несколько ступеней. С одной стороны, данное решение позволяет сохранить приемлемый (а в случае организации рекуперации электрической энергии – даже высокий) КПД, а с другой – сделать проще схемотехнику устройства в сравнении со схемами с матричной организацией ступеней. Так, Васильев Е.В. в патенте РФ N2324249 на "Многоступенчатый ускоритель с бегущим переключением соленоидов" [4] описал топологию ускорителя, приведённую ниже, на рисунке 1.2.9:

Рекуперативная цепь выполнена на базе варистора с пробойным напряжением, немного большим, чем изначальное напряжение на батарее конденсаторов. Напряжение самоиндукции катушки индуктивности отключённой ступени ограничивается цепью рекуперации в пределах суммы пробойного напряжения варистора и напряжения на батарее конденсаторов. Удержание напряжения самоиндукции катушки индуктивности в районе напряжения, более чем двукратно превышающем изначальное напряжение на батарее конденсаторов, является причиной ускоренного снижения тока в выключенной катушке индуктивности, избавляя от явления замедления ферромагнитного сердечника остававшимся магнитным полем отключаемой катушки индуктивности.

Благодаря последовательному включению 2-х групп катушек индуктивности между запуском ступеней в каждой группе обеспечивается временной промежуток, достаточный для отключения тиристоров в ступенях 1-й группы в течение времени работы ступеней 2-й группы. Благодаря этому, катушки индуктивности можно расположить на стволе практически вплотную друг к другу, не оставляя заметных промежутков.

В дальнейшем вышеописанные процессы, контролируемые устройством управления, повторяются, с тем отличием, что для последующих ступеней фиксированное время, требуемое для придания ускорения ферромагнитному сердечнику, снижается. Последовательное включение ступеней ускорителя совершается автоматически, благодаря включению тиристора каждой последующей ступени сигналом с добавочной обмотки предшествующей ступени при её отключении.

Следует отметить две особенности данной схемы: во-первых, за счёт приложения к катушкам индуктивности большого обратного напряжения при закрывании (падение на варисторах в сумме с потенциалом заряженной ёмкости) может быть достигнуто быстрое затухание тока, что теоретически позволяет ограничиться всего двумя ветвями цепи (т.е. двумя группами управляемых ключей). Во-вторых, за счёт частичной рекуперации энергии КПД

ускорения такой конструкции довольно хороший (хотя и не такой высокий, как в схемах с «полной» рекуперацией, описанной в п. 1.2.2.5). Количество силовых полупроводниковых приборов в этой конфигурации равно $2 \cdot k + N$ (два независимых закрываемых ключа из k транзисторов каждый плюс по одному тиристор на каждую ступень ускорения, варисторные цепи в расчёт не берутся).

Другим примером является конструкция, двухступенчатого ускорителя «ЕМ-2» [5] (рисунок 1.2.10). Эта конфигурация, которую можно назвать «биступенчатой». Её основным достоинством является то, что она содержит всего один запираемый ключ, управляющий всеми ступенями. Количество силовых элементов в ней равно $k+1.5 \cdot N$.

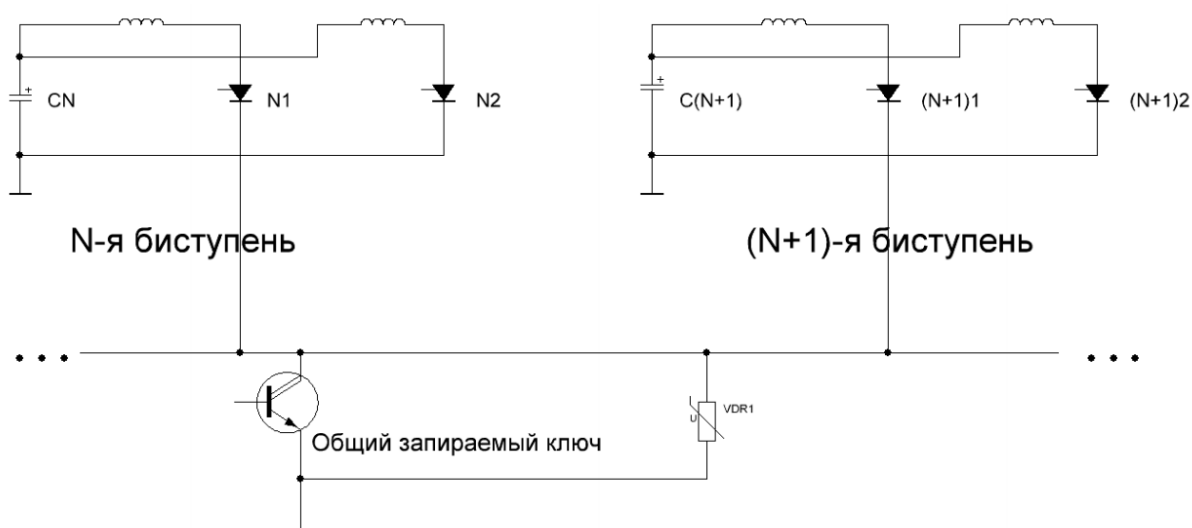
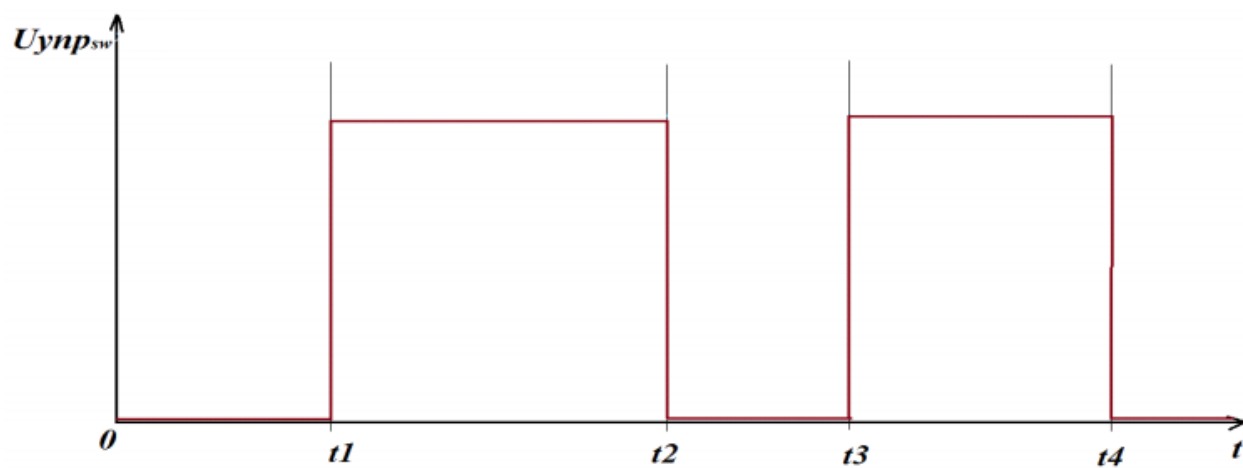
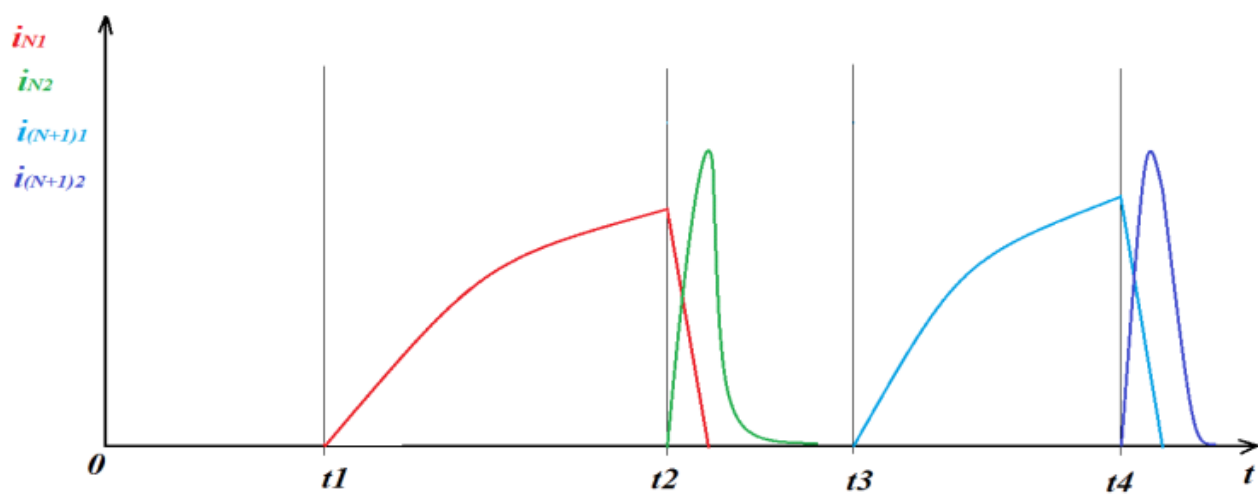
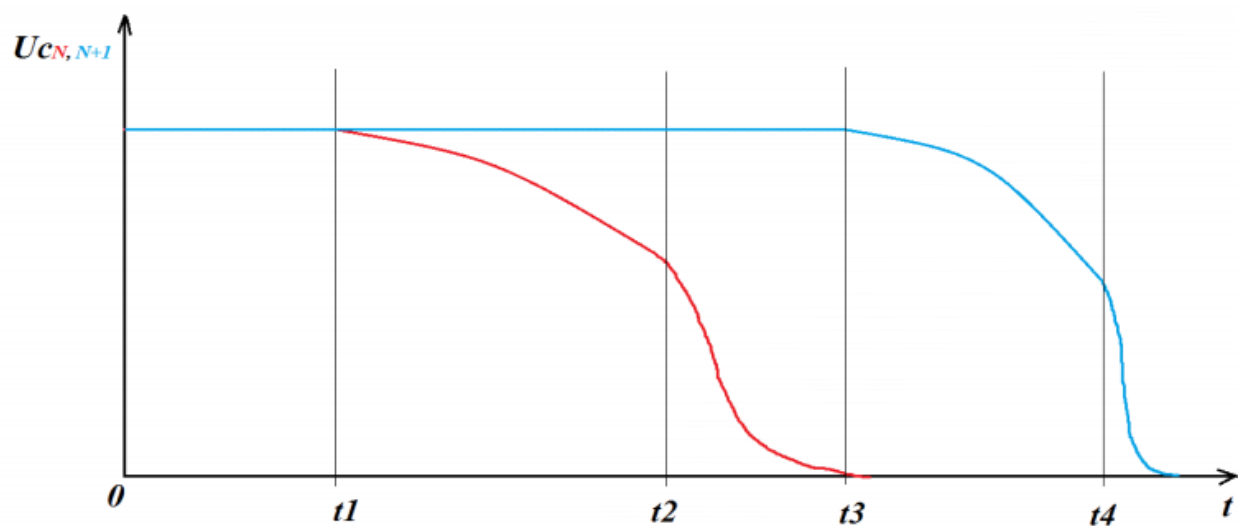


Рисунок 1.2.10 - Схема ускорителя ферромагнитных масс «биступенчатой» конфигурации.

У этой схемы есть некоторые преимущества в сравнении с прочими рассматриваемыми схемами. Основным, из которых является то, что удаётся применить лишь единственный управляемый коммутирующий элемент во всей схеме. В таком случае получается, например, после прохождения снарядом первой катушки в биступени с номером N , транзистор закрывается, и открывается тиристор $N2$, подключающий к соответствующему конденсатору

C_N вторую катушку. В течение времени, когда транзистор заперт, снаряд пролетает эту катушку, а батарея конденсаторов полностью разряжается. К моменту, когда снаряд приближается к следующей биступени (с номером $N+1$), транзистор снова включается одновременно с тиристором $(N+1)1$, коммутирующим первую катушку индуктивности биступени $N+1$, и процессы повторяются заново. В таком случае не имеет значения, успел ли запереться тиристор $N1$ или нет, так как батарея конденсаторов C_N к данному времени уже разряжена. Это значит, что в этом случае скорость снаряда значения не имеет, и биступени возможно размещать непосредственно друг за другом, что уменьшает массогабаритные показатели устройства. По причине принудительного закрывания половины ступеней, КПД ускорителя получается больше, чем у схемы с незапираемыми ключами, но меньше, чем в схемах, коммутирующими элементами в которых являются транзисторы. Тем не менее, в сравнении со схемами, описанными в подразделе 1.2.1.2, в данной схеме батареи конденсаторов отдают гораздо больше энергии, так как после запуска ускорителя все батареи конденсаторов становятся практически полностью разряженными. Процесс разряда батареи конденсаторов всех биступеней начинается происходить с одного и того же напряжения, это даёт возможность понизить ток управляемого ключа до минимального значения при одновременном сохранении удовлетворительной мощности. Благодаря этому биступенчатая конфигурация ускорителя выгодно отличается от остальных конфигураций, применяющих для питания катушек индуктивности одну общую батарею конденсаторов. Тем не менее, энергия каждой батареи конденсаторов рассредоточивается по двум катушкам индуктивности, потери конденсаторов на активном сопротивлении остаются малыми, это позволяет применять биступенчатую конфигурацию для получения больших скоростей ферромагнитного снаряда ($100 \frac{м}{с}$ и более). На рисунке ниже показана диаграмма работы участка биступенчатого ускорителя (рисунок 1.2.11).



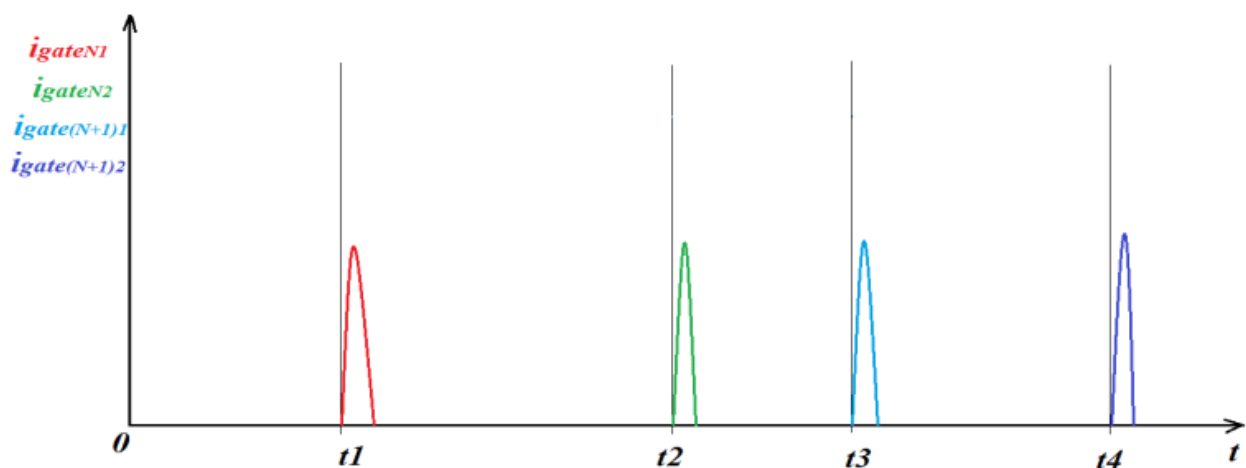


Рисунок 1.2.11 – Временные диаграммы работы участка ускорителя биступенчатой конфигурации (N-я и N+1-я ступени). Сверху вниз: напряжение на ёмкостях C_N и C_{N+1} , токи через тиристорные ключи, управляющее напряжение на затворе общего запираемого ключа, управляющие токи тиристорных ключей.

Анализ

В этом разделе проводится анализ топологий ускорителей, приведенные выше. При этом для построения графиков зависимостей использовано округление количества силовых полупроводниковых приборов до ближайшего целого значения. Для топологии биступенчатого ускорителя, данные приведены только для четного количества ступеней, что следует из её устройства. В таблицу 1.3 сведены все соотношения для количества ступеней в разных топологиях ускорителей.

Таблица 1.3 Результаты анализа различных схем ускорителей ферромагнитных масс.

№ п/п	Конфигурация ускорителя		Уровень конструктивной сложности	Количество силовых полупроводниковых вентилях на N количество ступеней ускорителя	КПД
1	Питание от	На незапираемых	Низкий	$2 \cdot N$	Низкий

	отдельных конденсаторов	ключах (тиристорах)			
2	на каждую ступень	С отдельными запираемыми ключами на каждую ступень	Средний	$(k + 1) \cdot N$	Средний
3	Питание всех ступеней от общей батареи конденсаторов	Матричная	Высокий	$2 \cdot k \cdot N^{\frac{1}{2}} + N$	Средний
4		Матричная с комбинированным и ключами	Высокий	$(k + 1) \cdot N^{\frac{1}{2}} + N$	Средний
5		Матричная рекуперативная	Высокий	$2 \cdot (k + 1) \cdot N^{\frac{1}{2}} + N$	Высокий
6		Матричная рекуперативная с комбинированным и ключами	Высокий	$2 \cdot (2 \cdot k + 2) + N$	Высокий
7		С бегущим переключением соленоидов	Средний	$2 \cdot k + N$	Высокий
8	Комбинированное питание	Биступенчатая	Средний	$k + 1.5 \cdot N$	Средний
9					

Графики количества силовых элементов в зависимости от числа ступеней (с ограничением сверху на уровне 50 шт., что разумно для портативного ускорителя) для каждой конфигурации ускорителя приведены на рисунке 1.2.12 и 1.2.13. При этом рассматриваются несколько значений коэффициента k : $k = 1$, $k=2$, $k = 5$ и $k = 10$. Данный коэффициент устанавливается в зависимости от силы тока, который развивается в катушках индуктивности ускорителя. Так, если подразумевать мощные транзисторы на основе кремния при напряжении питания катушек индуктивности ускорителя в несколько сотен вольт, то этот случай соответствует сравнительно маломощным ускорителям с предельными токами порядка 100 А. Диапазон $k = 2..5$ представляется более реалистичным для портативных ускорителей с

приемлемой энергией и скоростями ферромагнитных сердечников на выходе ускорителя до $100...150 \frac{м}{с}$. Значение $k = 10$ выбрано как максимальное для очень мощных устройств с токами ступеней более 1000 А (количество ключей для большинства конфигураций ускорителей в этом случае будет превышает все разумные границы).

Оценить порядки значений тока в катушках индуктивности ускорителя можно, если известна длина ускорителя, требуемая скорость ферромагнитного сердечника и приблизительный КПД ускорения.

Из графиков можно сделать некоторые выводы. Во-первых, простой ускоритель на отдельных незапираемых ключах на каждую ступень даёт хорошую экономию силовых полупроводниковых приборов (за исключением случая слабых токов с $k = 1$). В сочетании с простой схмотехникой это позволяет предположить, что при создании несложных ускорителей (например, с образовательными целями, для отработки каких-то дизайнерских решений или сборке настольных стендов) эта конфигурация по-прежнему будет пользоваться популярностью. Во-вторых, переходя к анализу более «продвинутых» конструкций с повышенным КПД, сразу следует отметить, что их достоинства с точки зрения минимизации количества силовых элементов различны при разных значениях коэффициента нагрузки. То есть выбирая ту или иную структуру ускорителя на стадии проектирования, учитывать величину тока, которая будет в нём развиваться. Так, ускоритель ферромагнитных масс с отдельными закрываемыми ключами на каждую ступень имеет в этом смысле наихудшие характеристики. При относительно больших токах ($I \geq 500 \text{ А}$), необходимые для получения скоростей снаряда более $100 \frac{м}{с}$, число силовых полупроводниковых приборов в этой конфигурации превышает сотню уже при количестве ступеней менее 20, что осложняет создание компактного ускорителя по такой схеме.

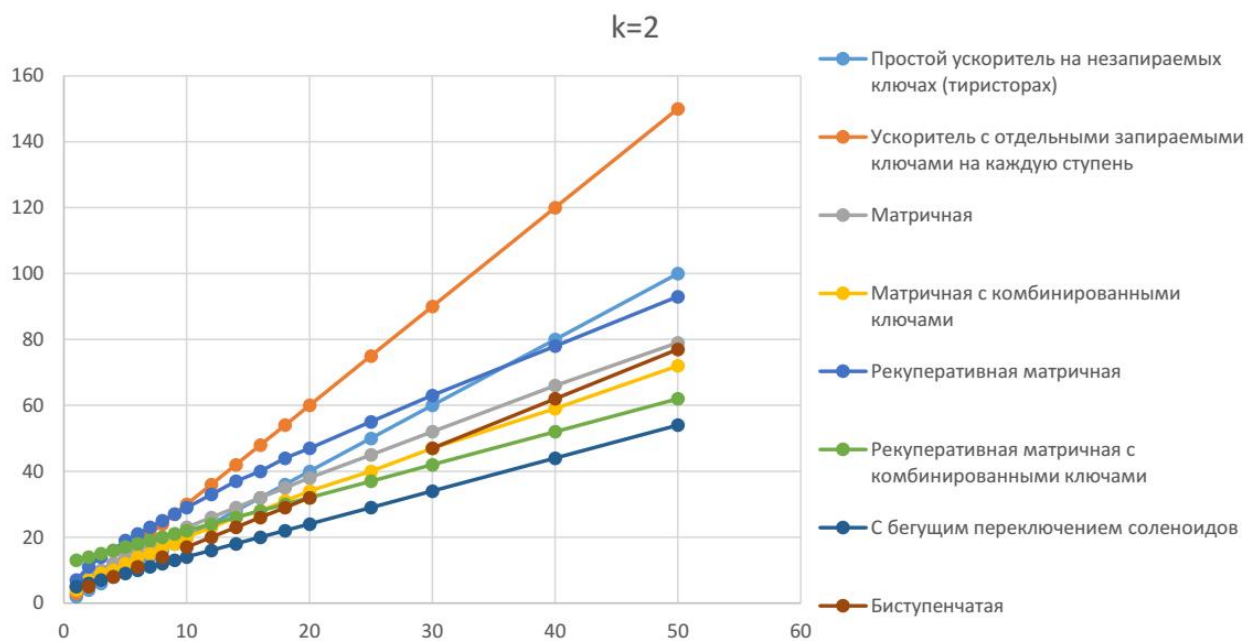
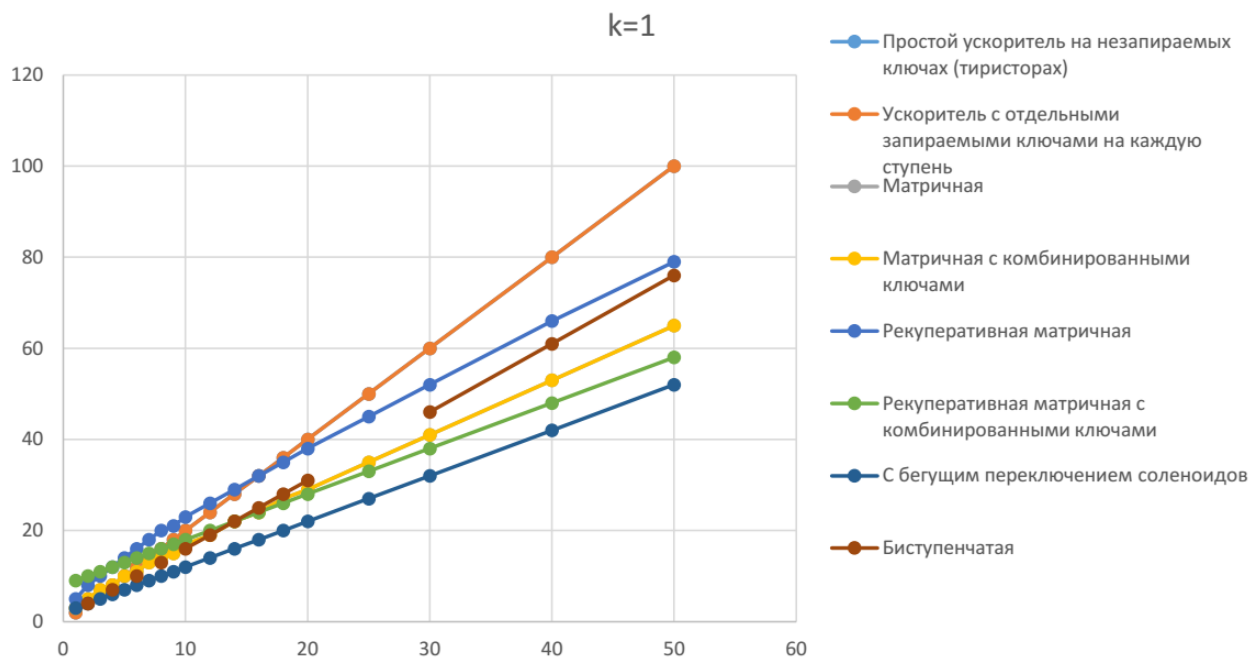


Рисунок 1.2.12 – График зависимости количества силовых полупроводниковых приборов от числа ступеней для разных топологий ускорителей (нагрузочные коэффициенты $k = 1$ и $k = 2$).

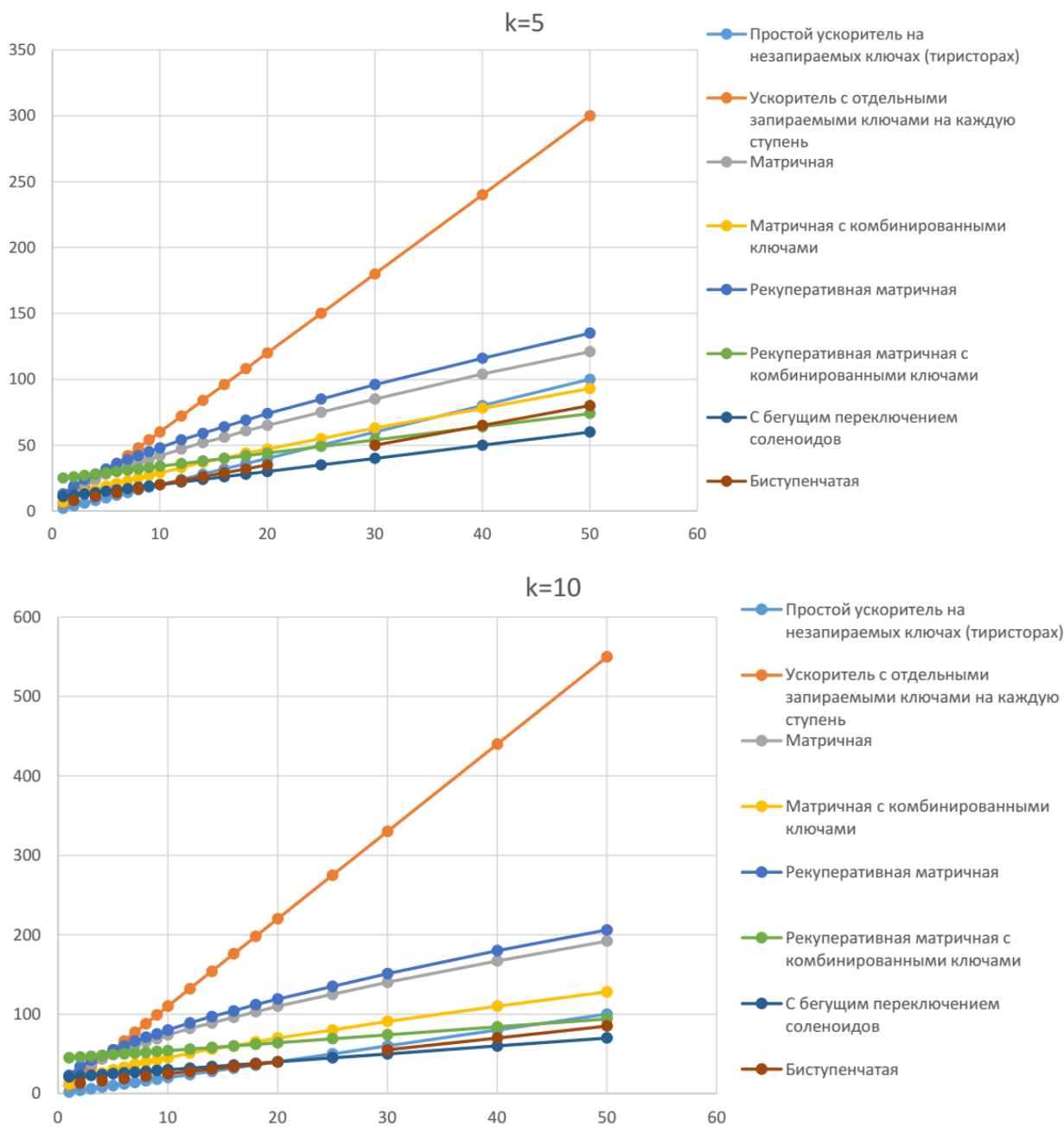


Рисунок 1.2.13 – График зависимости количества силовых полупроводниковых приборов от количества ступеней для разных топологий ускорителей (нагрузочные коэффициенты $k = 5$ и $k = 10$).

Тем не менее, данное следствие было предвидимым и спрогнозировано ещё при первом анализе этой топологии (см. выше). Неожиданным является то, что на втором месте по количеству элементов оказывается матричная схема с рекуперацией. Данный результат справедлив при любом значении k , причём для ускорителей с небольшими токами данная топология оказывается одной из

лучших в диапазоне числа ступеней от 4 до 16, а для сильноточных ($k = 10$) количество полупроводниковых вентилях становится более 100 при росте числа ступеней более 15. Такая ситуация ставит под вопрос сложившееся в среде конструкторов ускорителей представление об этой топологии как наиболее оптимальной для портативных многоступенчатых ускорителей. Наиболее «экономичными» оказываются топологии с комбинированными ключами, причём в той из них, в которой обеспечивается рекуперация, количество элементов почти совпадает с аналогичной топологией без рекуперации электрической энергии. Так как рекуперация электрической энергии кардинально повышает КПД ускорителя, то целесообразнее отдать предпочтение топологии с рекуперацией. Примечательно также, что в последней топологии обеспечивается минимальное изменение числа силовых полупроводниковых приборов в зависимости от числа ступеней ускорения – что может являться существенным в случае необходимости в удлинении ускорителя без значительного усложнения и увеличении стоимости его конструкции (в случае, если скорость на выходе будет меньше расчётной). Наконец, максимально «экономичными» являются конфигурации с бегущим переключением соленоидов и биступенчатая. Даже в ускорителях с большими расчётными токами (с количеством ступеней не более 20) эти конфигурации имеют рациональное количество элементов – не более 40.

В заключение следует отметить, что все приведенные выводы справедливы для элементов с типовыми характеристиками, построенными на основе кремния. Освоение новых материалов силовой полупроводниковой электроникой приведёт к существенному увеличению нагрузочной способности транзисторов. В результате значения коэффициента k могут уменьшиться вплоть до единицы.

Исходя из проведённого анализа, я выбрал за основу схему ускорителя ферромагнитных масс с бегущим переключением соленоидов.

1.3 Описание разрабатываемой системы

Взял за основу схему «многоступенчатого ускорителя с бегущим переключением соленоидов» с комбинированными ключами (раздел 1.2.3, рисунок 1.2.9). Схема ускорителя не в масштабе представлена на рисунке ниже:

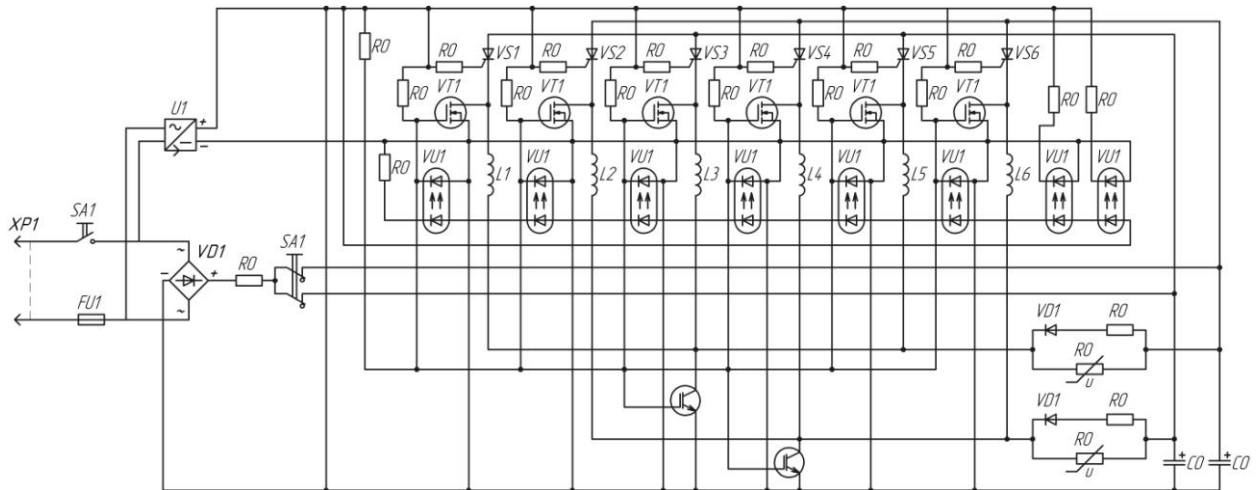


Рисунок 1.2 - Схема ускорителя ферромагнитных масс с бегущим переключением соленоидов

Принцип работы ускорителя схож с взятой за основу, за тем отличием, отсутствуют RD цепи, коммутирующий сигнал ключа каждой ступени формируется фотодиодом в составе делителя напряжения и оптопары с открытым оптическим каналом, пересечение снарядом, которого, прерывает поток инфракрасного излучения на фотодиод, и тот закрывается. Благодаря гораздо более высокому сопротивлению закрытого фотодиода чем резистора в составе делителя напряжения, падение напряжения на фотодиоде открывает групповой и коммутирующий (в цепи с управляющим электродом тиристора) транзисторы. Коммутирующий транзистор в свою очередь подаёт сигнал на управляющий электрод тиристора. К тиристоры прикладывается прямое напряжение с конденсаторной батареи, и он отрывается. Для измерения скорости снаряда, на выходе ускорителя предусмотрены две оптопары.

1.4 Задачи работы

Для выполнения цели работы необходимо выполнить ряд задач:

Провести поиск и изучение научной литературы по теме проекта, чтобы сформировать теоретическую базу, необходимую для расчёта и проектирования исследуемого устройства;

Провести анализ существующих устройств из доступных источников информации, и на его основе сделать выбор разрабатываемой электрической принципиальной схемы, при необходимости выполнить модернизацию;

Провести расчёт параметров и элементов схемы, выбрать электронные компоненты;

Опираясь на проведённые расчёты в предыдущем пункте разработать конструкцию устройства, выбрать радиаторы и конструктивные элементы из имеющихся в продаже;

Оценить общую стоимость затрат на изготовление опытного образца спроектированного устройства.

2. Основная часть.

2.1 Расчёт схемы устройства

2.1.1 Расчёт источника питания устройства

Задался ёмкостью каждого блока конденсаторной батареи 1 мФ, так как при большей ёмкости габариты питающей части будут несравненно больше остальной части устройства, что затрудняет применение данной системы в портативной установке в соответствие с текущим уровнем развития электроники.

Выбрал 2 электролитических конденсатора ЕСАР (K50-35), 470 мкФ, 400 В, 105°C [6] и 2 ЕСАР (K50-35), 560 мкФ, 400В, 35x50, В43504-А9567-М [7].

Так как батареи конденсаторов заряжаются от бытовой сети, то необходимо использовать диодный мост для выпрямления тока, а также ограничивающий ток диодного моста элемент в цепи заряда, чтобы избежать выход его из строя, а также предотвратить снижение качества электроэнергии питающей сети. Выбрал диодный мост КВРС5012F с номинальным током 50 А [8].

Для выполнения условия задания, необходимо чтобы батарея конденсаторов заряжалась быстрее 1 секунды. Временем полной зарядки было принято время $t = 10 \cdot \tau$, поэтому τ составляет 100 мс. На этом уровне можно считать, что конденсаторы полностью зарядились до напряжения 311 В (амплитудное напряжение бытовой сети). Применение дросселя в цепи заряда для ограничения тока недопустимо, из-за колебательного характера заряда конденсаторов. Напряжение на выходе имеет вид двуполупериодных пульсаций синусоиды, и в замыкание цепи заряда в произвольный момент времени может привести к непредсказуемому значению напряжения на батарее конденсаторов. Поэтому для ограничения тока в цепи заряда будет использован резистор повышенной мощности. Исходя из этого максимальное сопротивление

резистора в цепи заряда конденсаторов определяется по формуле:

$$R_{C.макс} = \frac{\tau}{C \cdot 2} = \frac{0.1}{0.002} = 50 \text{ Ом, где} \quad (2.1)$$

C – ёмкость одной батареи конденсаторов (1 мФ).

Минимальное же сопротивление определяется исходя из максимального тока диодного моста по закону Ома:

$$R_{C.мин} = \frac{U_d}{50 \text{ А}} = \frac{311 \text{ В}}{50 \text{ А}} = 6.22 \text{ Ом, где} \quad (2.2)$$

U_d – амплитудное напряжение сети.

По результатам расчётов выбрал керамический цементный резистор 10W47RJ [9].

Перед диодным мостом и адаптером переменного тока, поставил керамический предохранитель на 50 А [10] для предотвращения аварийного отключения сети или оплавления проводки, в случае короткого замыкания на схеме.

В качестве источника стабилизированного постоянного напряжения на 12 В выбрал модуль питания переменного/постоянного тока IRM-60-12 60W 12V 5A [11]

2.1.2 Расчёт ступеней

Выбрал IGBT транзистор IRGPS60B120KDP в компактном корпусе TO-274AA [12]. Основные параметры, по которым осуществлялся выбор:

- Максимальный импульсный ток: 240 А;
- Максимальный средний ток при температуре 25 °С: 105 А;
- Максимальное напряжение коллектор эмиттер: 1200 В;
- Максимальное пороговое напряжение затвора: 6 В.

Выбрал тиристор TYN825 в компактном корпусе TO-220AB [13]. Основные параметры, по которым осуществлялся выбор:

- Максимальный импульсный ток при температуре 25 °С и

длительности импульса 8.3 мс: 314 А;

- Максимальный средний ток при 100 °С: 16 А;
- Максимальное напряжение: 800 В;
- Ток управляющего электрода: от 4 мА до 40 мА.

Выбрал варисторы FNR-14K471, 470 В, 80 Дж [14] по максимальному напряжению и максимальной поглощаемой энергии.

Расчёт параметров ступеней проводится, опираясь на условную скорость $90 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ и КПД устройства 10 %. Энергия передаваемая снаряду катушками индуктивности примерно равна, поэтому скорость снаряда при прохождении каждой ступени увеличивается примерно на $15 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. Разряд батареи конденсаторов на последней ступени не должен быть полным, так как для обеспечения необходимой энергии магнитного поля понадобится быстро увеличивать ток до большого значения, что сильно увеличивает потери на активном сопротивлении и может привести к выходу из строя тиристора в связи с локальным перегревом полупроводника. В связи с чем ограничил уровень разряда батареи конденсаторов на уровне $\frac{1}{9}$ от начального значения, в этом случае напряжение на батарее составит $\frac{1}{3}$ от начального значения (103.67

В) без учёта рекуперации. Энергия каждой ступени вычисляется по формуле:

$$\frac{4 \cdot C \cdot U_0^2}{27} = \frac{4 \cdot 10^{-3} \cdot \Phi \cdot 311 \text{ В}^2}{27} \approx 14.33 \text{ Дж, где} \quad (2.3)$$

U_0 – начальное напряжение на батареях конденсаторов.

Расчёты ступеней были проведены в программе Mathcad Prime 4.0 и результаты занесены в таблицу 2.1.

Процесс разряда батареи конденсаторов на катушку представляет собой затухающие колебания тока в последовательной RLC цепи. Активное сопротивление создаётся медной обмоткой катушки индуктивности.

Для катушек индуктивности был выбран медный обмоточный лакированный провод ПЭВ-1. Параметры провода приведены на сайте [15].

Таблица 2.1 – полученные расчётные данные.

№ Ступени	1	2	3	4	5	6
Индуктивность катушки, мкГн	12228	2161	681.33	311.11	183.89	183.89
Активное сопротивление, Ом	8.91	1.42	0.57	0.97	0.89	0.89
Затраченная энергия, Дж	14.28	14.46	13.97	14.2	10.11	8.03
Остаток энергии в катушке, Дж	4.54	9.82	10.31	6.73	4.19	3.88
Напряжение на батарее в начальный момент времени, В	311	325.27	296.07	312.83	269.38	278.72

Повышение энергии катушек индуктивности последних ступеней было затруднено возрастанием тока до величин, превышающих нагрузочные способности IGBT транзисторов по максимальному импульсному току, который был ограничен на уровне 220 А – 230 А.

Математические компьютерные расчёты в Mathcad Prime 4.0 приведены в приложении А

2.1.3 Расчёт элементов в цепях фотодатчиков

В качестве изучающих диодов оптопары выбрал ИК (инфракрасные) диоды TSAL4400 [16]. В качестве фотодиодов выбрал SFH2030F [17] исходя из спектральной характеристики выбранных ИК диодов. Для уменьшения потерь подключил ИК диоды последовательно к источнику питания 12 В, и поставив ограничивающий резистор, так как в данном случае общее напряжение питания диодов близко к 12 В, и используется всего 1 резистор. По ВАХ (вольтамперной характеристике) (Рисунок 2.1) определил рабочую точку ИК диодов и вычислил сопротивление ограничивающего резистора по

определённому току и напряжению:

$$R_d = \frac{U_n - n_d \cdot U_d}{I_d} = \frac{12 \text{ В} - 8 \cdot 1.2 \text{ В}}{0.02 \text{ А}} = 120 \text{ Ом, где} \quad (2.4)$$

U_n – напряжение питания (12 В);

n_d – количество диодов (8);

U_d – падение напряжения на одном диоде (1.2 В);

I_d – ток диодов (20 мА).

Был выбран резистор M.F.R. 1/4 W, 1%, 120, C2-23 резистор 0.25 Вт, 1%, 120 Ом [18].

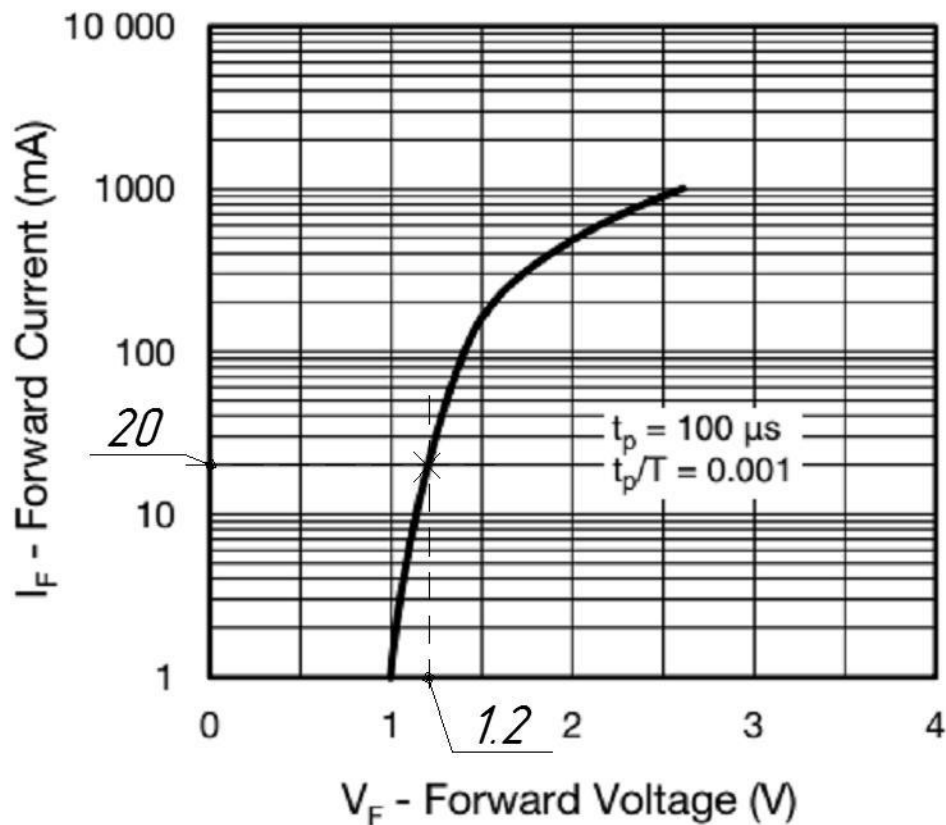


Рисунок 2.1 - ВАХ ИК диода с определённой рабочей точкой

Фотодиод присутствует в составе делителя напряжения и коммутирует сразу 2 транзистора при перекрытии оптического канала. Также фотодиод присутствует в составе делителя напряжения на выходе ствола. Сопротивление закрытого фотодиода (100-1000 МОм) намного порядков выше сопротивления

резистора в составе делителя, и на несколько порядков меньше сопротивления резистора, если фотодиод открыт (100-1000 Ом). Задал значение сопротивления резисторов в составе делителей напряжения с фотодиодом 100 кОм и выбрал метало-оксидный резистор 2 Вт 100 кОм (MOF, 2W, 100K) [19], при котором должно обеспечиваться нулевое падение напряжение на фотодиоде при открытом канале и падение напряжения источника питания при перекрытии канала непрозрачным телом.

Подобрал MOSFET транзистор BS170 [20], коммутирующий тиристор по следующим параметрам:

- Максимальный ток стока: 500 мА;
- Максимальное напряжение сток-исток: 60 В;
- Максимальное напряжение затвор исток: ± 20 В;
- Максимальное пороговое напряжение затвора: 3 В;
- Сопротивление открытого канала 5 Ом.

Для предотвращения выхода из строя тиристора в цепи с управляющим электродом необходимо поставить ограничивающий ток резистор. Его минимально сопротивление можно вычислить по формуле:

$$R_T = \frac{U_{\pi}}{I_{GT}} - R_{VT-T.ON} - R_{VS.L} = \frac{12 \text{ В}}{0.04 \text{ А}} - 5 \text{ Ом} - 33 \text{ Ом} = 262 \text{ Ом}, \text{ где} \quad (0)$$

R_T – сопротивление ограничивающего резистора в цепи коммутации тиристора;

I_{GT} – максимальный ток управляющего электрода тиристора;

$R_{VT-T.ON}$ – сопротивление открытого канала коммутирующего тиристор транзистора;

$R_{VS.L}$ – сопротивление между катодом и управляющим электродом тиристора.

Был выбран выводной резистор 290 Ом 0,5 Вт. [21]

2.2 Конструкторская часть

Сердечник (снаряд) имеет цилиндрическую форму произвольно выбранного диаметра 6 мм, с полусферическим наконечником для уменьшения влияния аэродинамического сопротивления воздуха, уменьшения отклонений

от нормальных режимов работы системы и повышения КПД устройства.

Для максимального использования ствола ускорителя длину катушки индуктивности следует принять приблизительно равной длине ускоряемого сердечника. Принял длину сердечника, равной 2 см.

Для предотвращения оптических помех в работе фотодатчиков, ствол ускорителя и корпуса фотодатчиков необходимо выполнять из непрозрачного материала для инфракрасного излучения ближнего диапазона.

Результаты расчётов габаритных параметров катушек индуктивностей, произведённых в Mathcad Prime 4.0 Приведены в таблице 2.2. Размеры катушек индуктивности указаны на рисунке 2.2.

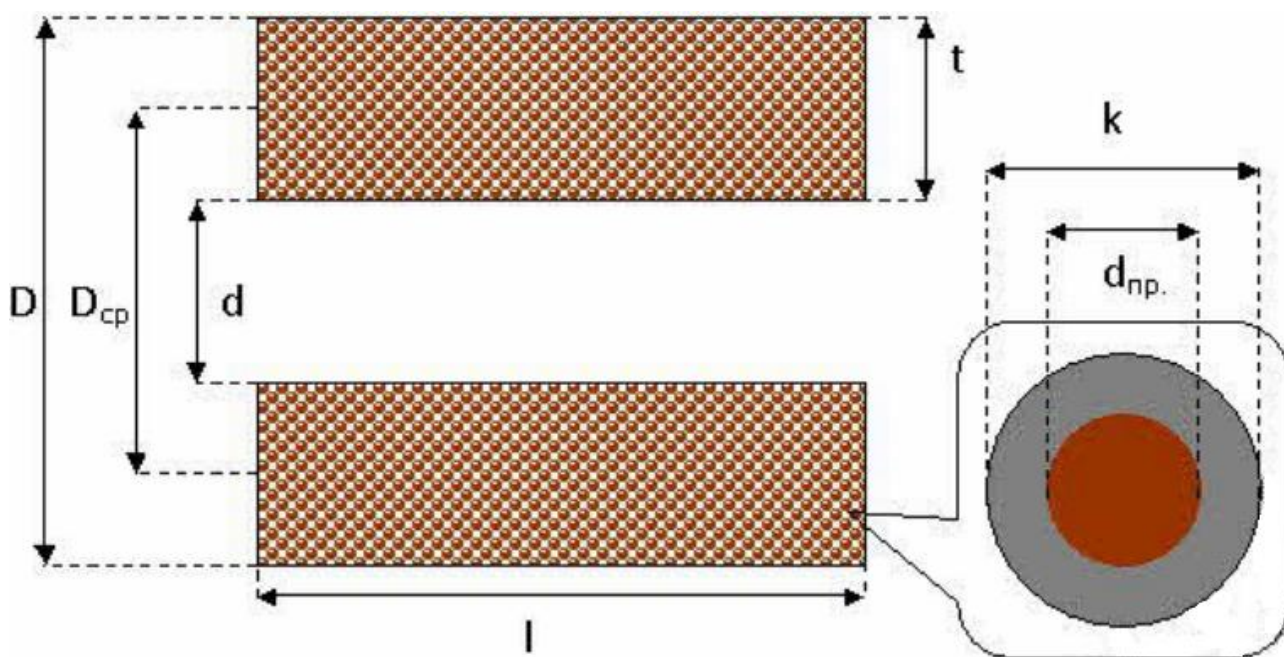


Рисунок 2.2 – Размеры катушки индуктивности

Таблица 2.2 – Рассчитанные размеры катушек индуктивностей

№ Ступени	1	2	3	4	5	6
Внешний диаметр D , мм	36	36	30	15	12	12
Диаметр проводника $d_{пр}$, мм	0.44	0.72	0.82	0.48	0.43	43

Фрагмент чертежа печатной платы системы приведён на рисунке 2.3.
Фрагмент чертежа сборочного чертежа печатного узла системы приведён на рисунке 2.4

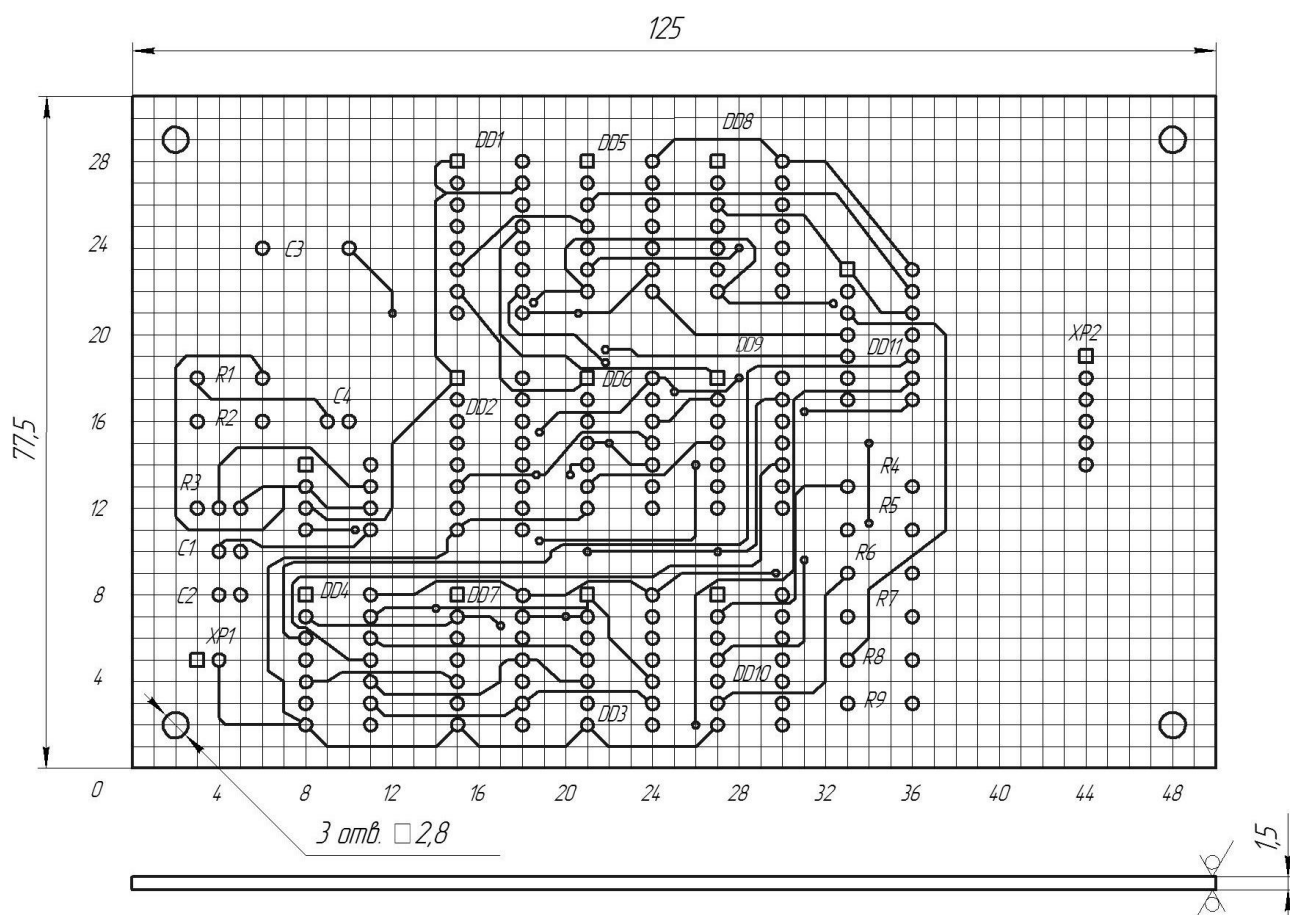


Рисунок 2.3 – Фрагмент чертежа печатной платы системы

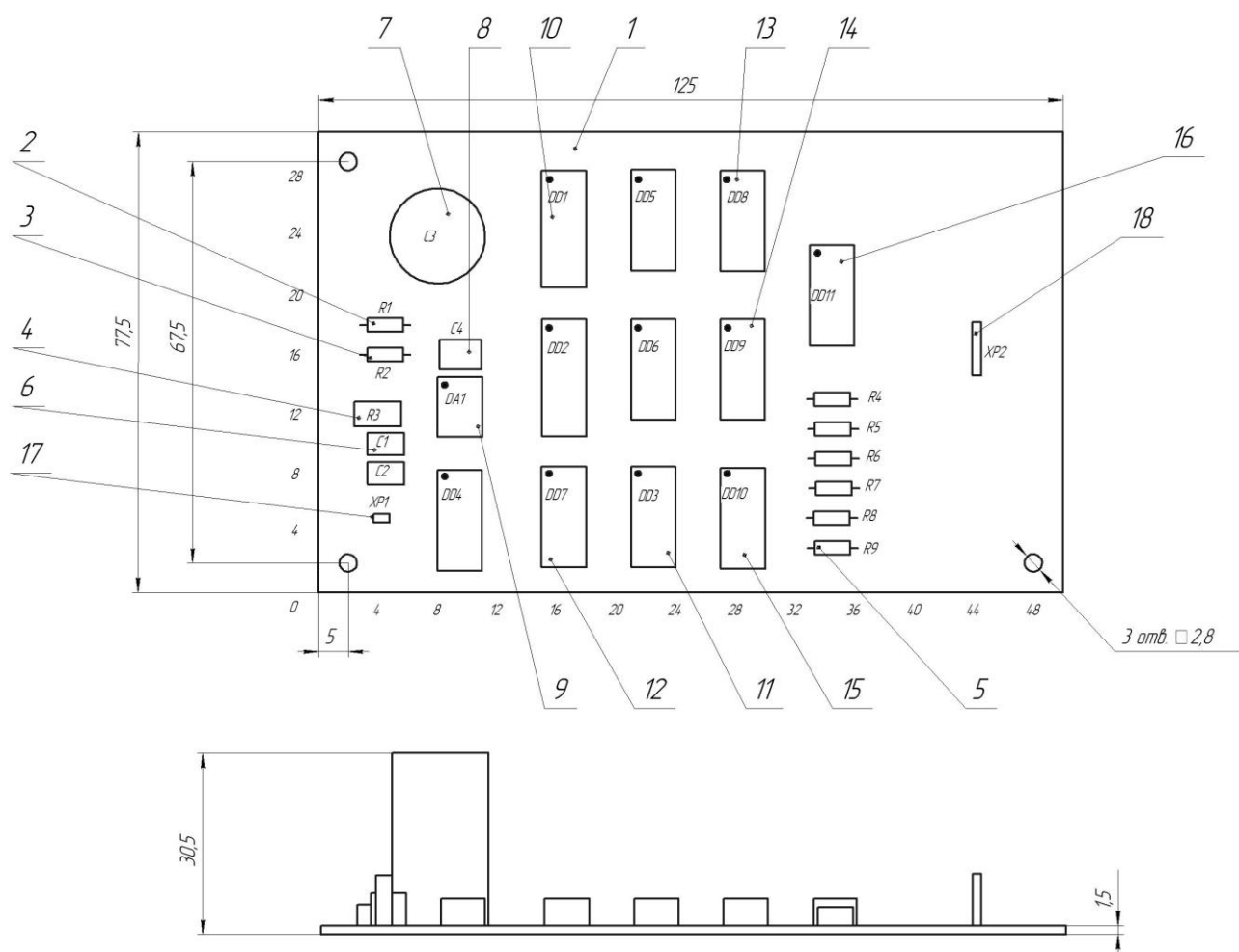


Рисунок 2.4 - Фрагмент чертежа сборочного чертежа печатного узла системы

2.3 Методика измерения параметров

Чтобы определить скорость ферромагнитного сердечника, необходимо подключить два синхронизированных канала осциллографа к шунтам в цепи фотодиодов оптопар на выходе ствола, запустить установку, вычислить разность времени характерных точек сигналов осциллограммы и поделить расстояние между оптопарами на полученное время.

Для измерения времени задержки срабатывания ступени с момента запуска системы необходимо подключить два синхронизированных канала осциллографа к фотодиодам. Первый канал осциллографа подключается к фотодиоду первой ступени. Второй канал подключается к фотодиоду ступени, у которой необходимо определить время задержки срабатывания с момента запуска системы. Искомое время будет являться разностью между

характерными точками сигналов по оси времени. При этом общий провод осциллографа подключается к аноду фотодиода.

Для измерения КПД (коэффициента полезного действия) необходимо энергию снаряда поделить на затраченную электрическую энергию устройства. Источником энергии устройства считаются батареи конденсаторов. Если вычесть исходную энергию, накопленную конденсаторами и энергию конденсатора, оставшуюся после запуска устройства можно вычислить затраченную электрическую энергию:

$$\frac{c \cdot (U_0^2 - U_2^2)}{2}, \text{ где} \quad (2.5)$$

U_2 – напряжение на батарее конденсаторов после запуска системы.

Измерив скорость и массу снаряда, его кинетическую энергию можно вычислить по формуле:

$$\frac{m \cdot v^2}{2}, \text{ где} \quad (2.6)$$

m – масса снаряда;

v – скорость снаряда на выходе ствола;

Массу снаряда можно измерить бытовыми граммовыми весами. В итоге КПД устройства можно вычислить по формуле:

$$\frac{m \cdot v^2}{2} \cdot \left(\frac{c \cdot (U_0^2 - U_2^2)}{2} \right)^{-1} \quad (2.7)$$

Измерение индуктивности необходимо для экспериментальных исследований системы, её настройке и корректировке промежуточных расчётов. Для измерения индуктивности необходим омметр, осциллограф, источник постоянного напряжения и шунт известного сопротивления. Осциллограф подключают к выводам катушки индуктивности с заранее измеренным сопротивлением постоянному току. Подают напряжение на выводы катушки индуктивности, и отслеживают изменение уровня напряжения на шунте, фиксируют постоянную времени и находят Индуктивность по формуле:

$$L = \tau \cdot (R_L - B), \text{ где} \quad (2.8)$$

R_L – активное сопротивление катушки индуктивности;

$R_{ш}$ – сопротивление шунта (можно пренебречь если несоизмеримо мало).

Измерение тока необходимо по тем же причинам, что и измерение индуктивности, её настройке и корректировке промежуточных расчётов. Измерение тока производится осциллографом с шунта, предварительно разорвав цепь, в которую включается шунт. Ток находится по закону Ома:

$$I = \frac{U_{ш}}{R_{ш}}, \text{ где} \quad (2.9)$$

2.4 Методика настройки системы

Методика настройки системы включает в себя регулирование момента вытягивания снаряда изменением положения оптических датчиков (оптопар) изменением положения катушек индуктивности и оптопар вдоль общей оси. А также изменение индуктивности катушек путём отмотки провода или замена батарей конденсаторов. После внесения изменений в конструкцию необходимо сделать перерасчёты основных параметров.

3. Экономическое обоснование работы.

Общая стоимость электронных компонентов:

Количество и стоимость закупленных элементов и материалов сведены в таблицу 3.1

Таблица 3.1 – Стоимость электронных компонентов.

Наименование	Стоимость 1 шт., руб.	Количество	Общая стоимость, руб
Резистор 120 Ом	5	1	5
Резистор 290 Ом	8	6	48
Резистор 100 кОм	12	10	120
Резистор 47 Ом, 10 Вт	37	1	37
ИК Диод TSAL4400	15	8	120
Фотодиод SFH2030F	30	8	240
Адаптер питания 12 В, 5 А	1350	1	1350
Конденсатор 560 мкФ-400В	155	2	310
Конденсатор 400 мкФ-400В	130	2	160
Транзистор BS170	6	6	36
IGBT Транзистор IRGPS60B120KDP	420	2	840
Тиристор TYN825	150	6	900
Варистор	18	2	36
Предохранитель 50 А	3	1	3
KN3(B)-101AA-A1, Тумблер	80	1	80
1321 -Тумблер двухпозиционный 5- 10-15 А 220 В	210	1	210
Медный эмалированный обмоточный провод ПЭВ-1, 100 м	50	1	50
Общая стоимость, руб.			4545

Заключение

В итоге можно отметить тот момент, что многоступенчатый ускоритель ферромагнитных масс с фотодатчиками на каждой ступени в отличие от своего аналога, взятого за основу, имеет более стабильные характеристики скорости и эффективности (КПД), за счёт наличия обратной связи с катушками индуктивности. Эффективность ускорения снаряда также возможно увеличить добавлением ступеней при одновременном снижении энергии каждой ступени. Отличительной особенностью данного ускорителя является то, что по сравнению с прочими аналогами, обеспечивается частичная рекуперация энергии катушек индуктивности. Также фотодатчики в отличие от индукционных датчиков обладают устойчивостью к электромагнитным помехам, однако чувствительны к помехам, создаваемым световым и близким к свету по длине волны излучениям. Применение предложенной схемы допускает снижение количества транзисторов до 1-го на каждую группу катушек индуктивности, позволяя выполнять последовательное подключение и отключение всех катушек индуктивности многоступенчатого ускорителя, избавляя от цепей принудительного запираания тиристоров, обладающих большой инерционностью, что в свою очередь тоже повышает КПД ускорителя.

Список использованных источников.

- 1) Патент США US5168939 [Электронный ресурс] URL: https://www.google.dk/patents/US5168939?dq=5168939&hl=ru&sa=X&ved=0ahUK Ewi8_qyVpbrUAhVHXRQKHQ23CQAQ6AEIJjAA (дата обращения 08.04.2017).
- 2) Компактный персональный рельсовый пистолет [Электронный ресурс] URL: <http://www.google.com/patents/US5763812> (дата обращения 08.04.2017).
- 3) Ускоритель ферромагнитных масс «DJ6», построенный по матричной схеме с рекуперацией энергии [Электронный ресурс] URL: <http://future-weapons.ru/forum/viewtopic.php?f=26&t=2567> (дата обращения 08.04.2017).
- 4) Многоступенчатый ускоритель с бегущим переключением соленоидов [Электронный ресурс] URL: <http://www.freepatent.ru/patents/2324249>. (дата обращения 09.04.2017).
- 5) Двухступенчатый ускоритель «EM-2» с комбинированным питанием [Электронный ресурс] URL: http://coilgun.ucoz.ru/index/kojlgan_em_2_s_pitaniem_ot_quot_krony_quot/0-11 (дата обращения 11.04.2017).
- 6) Электролитический конденсатор ЕСАР (К50-35), 470 мкФ, 400 В, 105°С [Электронный ресурс] URL: http://oootrion.ru/index.php?route=product/product&product_id=2018239 (дата обращения 25.04.2017).
- 7) Электролитический конденсатор ЕСАР (К50-35), 560 мкФ, 400В, 35x50, В43504-А9567-М [Электронный ресурс] URL: <http://www.voltmaster.ru/cgi-bin/qwery.pl/id=854396191> (дата обращения 25.04.2017).

- 8) Диодный мост KBPC5012F [Электронный ресурс] URL:
<http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/190942/WTE/KBPC5012.html> (дата обращения 25.04.2017).
- 9) Резисторы керамические цементные [Электронный ресурс] URL:
<http://asenergi.com/catalog/rezistory-moshchnye/keramicheskiy-cementnyu.html#more> (дата обращения 25.04.2017).
- 10) AUB, 50 А, 500 В, 10x38 мм, Предохранитель керамический [Электронный ресурс] URL: <https://lib.chipdip.ru/328/DOC000328126.pdf> (дата обращения 25.04.2017).
- 11) Модуль питания переменного/постоянного тока IRM-60-12 60W 12V 5A [Электронный ресурс] URL:
<http://www.meanwellusa.com/productPdf.aspx?i=687> (дата обращения 26.04.2017).
- 12) IGBT транзистор IRGPS60B120KDP в корпусе TO-274AA [Электронный ресурс] URL:
<http://www.infineon.com/dgdl/irgps60b120kdp.pdf?fileId=5546d462533600a40153565a56b824a1> (дата обращения 29.04.2017).
- 13) Тиристор TYN 825 в корпусе TO-220AB [Электронный ресурс] URL:
<http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/31/43/3a/c0/47/33/4a/64/CD00002272.pdf/files/CD00002272.pdf/jcr:content/translations/en.CD00002272.pdf> (дата обращения 29.04.2017).
- 14) Варистор FNR-14K471, 470 В, 80 Дж [Электронный ресурс] URL:
<http://item365.ru/fnr-14k471-470-v-80-dzh-varistor-00-00111591/> (дата обращения 29.04.2017).
- 15) Медный обмоточный провод ПЭВ-1 [Электронный ресурс] URL:
<http://isobol.ru/mednyj-obmotochnyj-provod-marki-pjev1-i-pjev2.html> (дата обращения 30.04.2017).
- 16) Инфракрасные диоды TSAL4400 [Электронный ресурс] URL:
<https://www.vishay.com/docs/81006/tsal4400.pdf> (дата обращения 29.04.2017).

17) Фотодиод SFH2030F [Электронный ресурс] URL: http://pdf.datasheetcatalog.com/datasheets/208/486461_DS.pdf (дата обращения 29.04.2017).

18) M.F.R. 1/4 W, 1%, 120, C2-23 резистор 0.25 Вт, 1%, 120 Ом [Электронный ресурс] URL: <http://www.platan.ru/cgi-bin/qwery.pl/id=27741> (дата обращения 30.04.2017).

19) Резистор 2 Вт 100 кОм (MOF, 2W, 100K) [Электронный ресурс] URL: <http://dalincom.ru/goods-7181.html> (дата обращения 31.04.2017).

20) Транзистор MOSFET BS170 [Электронный ресурс] URL: <https://www.onsemi.com/pub/Collateral/BS170-D.PDF> (дата обращения 01.05.2017).

21) Выводной резистор 290 Ом 0.5 Вт [Электронный ресурс] URL: <https://radiostore.com.ua/p448917066-rezistor-290-05vt.html> (дата обращения 02.05.2017).