

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

Институт машиностроения

(наименование института полностью)

Кафедра «Промышленная электроника»

(наименование)

11.03.04 Электроника и нанoeлектроника

(код и наименование направления подготовки / специальности)

Электроника и робототехника

(направленность (профиль) / специализация)

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)**

на тему Система питания кодоимпульсного сейсмоисточника на LSM

Обучающийся

А. А. Подоров

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

к. т. н., доцент, А. В. Прядилов

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Консультант

О. А. Головач

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Аннотация

Выпускная квалификационная работа посвящена разработке системы питания кодоимпульсного сейсмоисточника на линейном синхронном двигателе (LSM). Пояснительная записка разделена на 4 раздела, в которых описывается процесс разработки структурной схемы системы питания электромеханического устройства, его конструктивной схемы, схемотехнического решения с выбором элементной базы, проектирование печатной платы, математическое моделирование формирователя тока возбуждения, а также мероприятия по достижению электромагнитной совместимости.

К пояснительной записке прилагаются следующие иллюстративные материалы:

1. Конструктивная схема сейсмоисточника;
2. Структурная схема системы питания;
3. Схема электрическая принципиальная генератора тока;
4. Временные диаграммы работы математической модели;
5. Чертеж печатной платы;
6. Сборочный чертеж;
7. Перечень элементов;
8. Спецификация.

Abstract

The title of the graduation project is «Power-supply system of code pulse seismic source on the LSM».

Explanatory note consists of an introduction, confirming the relevance of the chosen topic, the main part, consisting of five chapters, which detail the development process, the conclusion, reflecting the results of the work, list of references including foreign sources and the graphic part on 6 A1 sheets.

The aim of the work is to give some information about the process of the development of the power-supply system.

The graduation work may be divided into several logically connected parts which are: analysis of existing analogs; existing structure analysis; development of the electro-mechanical device functioning algorithm; making the component list and creating the electrical scheme; PCB layout; electromagnetic compatibility.

We first discuss what analogs already exist and what parameters they have. Then we analyze what modules we need for device functionality and choose the components to make an electrical scheme. Also we outline the process of the PCB layout.

Finally, we present PCB drawing, construction drawing and also complete electrical scheme.

In conclusion we'd like to stress this work is relevant in solving the technical problem of LSM-driven electrical device.

Содержание

Введение.....	6
1 Состояние вопроса	7
1.1 Принцип действия линейного синхронного двигателя (LSM).....	8
1.2 Описание конструкции и работы кодоимпульсного сейсмоисточника на LSM.....	11
1.3 Задачи работы.....	18
2 Обзор схемотехнических решений формирователя тока возбуждения	19
2.1 Схема на основе тиристора и конденсатора.....	19
2.2 Схема с шунтированием обмотки и принудительной коммутацией тиристора.....	20
2.3 Схема с разделенной обмоткой электромагнита	21
2.4 Схема с неразделенной обмоткой электромагнита	22
2.5 Схема с импульсными трансформаторами.....	23
3 Система питания обмотки якоря	27
3.1 Генератор тока для питания подвижной катушки.....	30
3.1.1 Требования, предъявляемые к генератору тока.....	30
3.1.2 Подбор электронной компонентной базы	30
3.1.3 Расчет катушки.....	39
3.1.4 Схема источника питания ГТ.....	43
3.1.5 Схема питания подвижной катушки LSM на основе ГТ	43
3.2 Математическое моделирование схемы ГТ.....	51
4 Обеспечение электромагнитной совместимости	57
4.1 Источники электромагнитных помех	58
4.2 Устройства и мероприятия по обеспечению электромагнитной совместимости.....	59
4.2.1 Пассивные помехоподавляющие и защитные компоненты	60
4.2.2 Экранирование	61
4.2.3 Применение защитной конструкции.....	62

Заключение	65
Список используемой литературы и используемых источников.....	66
Приложение А Перечень элементов к схеме электрической принципиальной генератора тока.....	70
Приложение Б Спецификация к сборочному чертежу печатной платы	72

Введение

Сейсморазведка является основным из геофизических методов изучения строения недр Земли с целью поиска полезных ископаемых, в том числе нефтяных и газоносных структур [4, 10]. Повышение эффективности сейсморазведочных работ имеет важное значение как для инженерной геофизики, так и для народного хозяйства.

За последние 30 лет сейсмоисточники невзрывного типа приобрели интенсивный характер развития [1, 2, 10, 15]. В связи с этим был создан новый научный вектор, направленный на расширение не только области применения невзрывных методов сейсмической разведки, но также и на создание новых электромеханических устройств с различным типом привода.

Анализ современных технических источников показывает, что в подавляющем большинстве случаев очень малое количество времени уделяется вопросам, связанным с так называемой «электрической составляющей» устройства: электрическая система, магнитная система, электромагнитный расчет, тепловой расчет, математическое моделирование и т.д. Система питания играет решающую роль в обеспечении надежной и эффективной работы сейсмоисточника. Вследствие этого необходимо отметить, что данному вопросу следует придать особое значение.

Целью данной работы является разработка системы питания кодоимпульсного сейсмоисточника на линейном синхронном двигателе (LSM).

Актуальность и значимость работы заключаются в том, чтобы показать потенциальную возможность применения линейного синхронного двигателя в качестве силового привода кодоимпульсного сейсмоисточника.

1 Состояние вопроса

За время практики создания сейсмических источников было опробовано множество различных технических решений: гидравлические, пневматические, а также иные вариации электромеханических [16, 25, 26].

Наиболее распространенным в сейсморазведке является вибратор на основе гидравлического двигателя. Такой тип привода известен тем, что способен создавать очень большие усилия на грунт, однако особенность «гидравлики» накладывает нежелательные ограничения на вибратор. Помимо этого, имеется внутренняя нелинейность гидравлической системы, являющаяся одной из причин гармоник. В зависимости от конструктивных особенностей электрогидравлического вибратора, расход гидравлической жидкости может ограничивать выходную мощность вибратора на низких частотах. На высоких частотах мощность также ограничена в связи со сжимаемостью гидравлической жидкости. Кроме того, максимальное перемещение реакционной массы, необходимое для генерации для низких частот и объем, и давление в гидравлическом двигателе напрямую связаны.

В связи с подобными недостатками гидравлического двигателя возникает необходимость разработки сейсмоисточника с большим ходом для получения большей мощности на низких частотах, а также системой, которая не имеет внутренних ограничений гидравлической системы. Оптимальным решением данного вопроса является использование линейного синхронного двигателя (LSM).

1.1 Принцип действия линейного синхронного двигателя (LSM)

Линейный синхронный двигатель (linear synchronous motor / LSM) – это электродвигатель, который можно представить в виде развернутого синхронного двигателя с постоянными магнитами (рисунок 1). Принцип его работы заключается в преобразовании электрической энергии в линейное движение без использования вращающегося ротора.

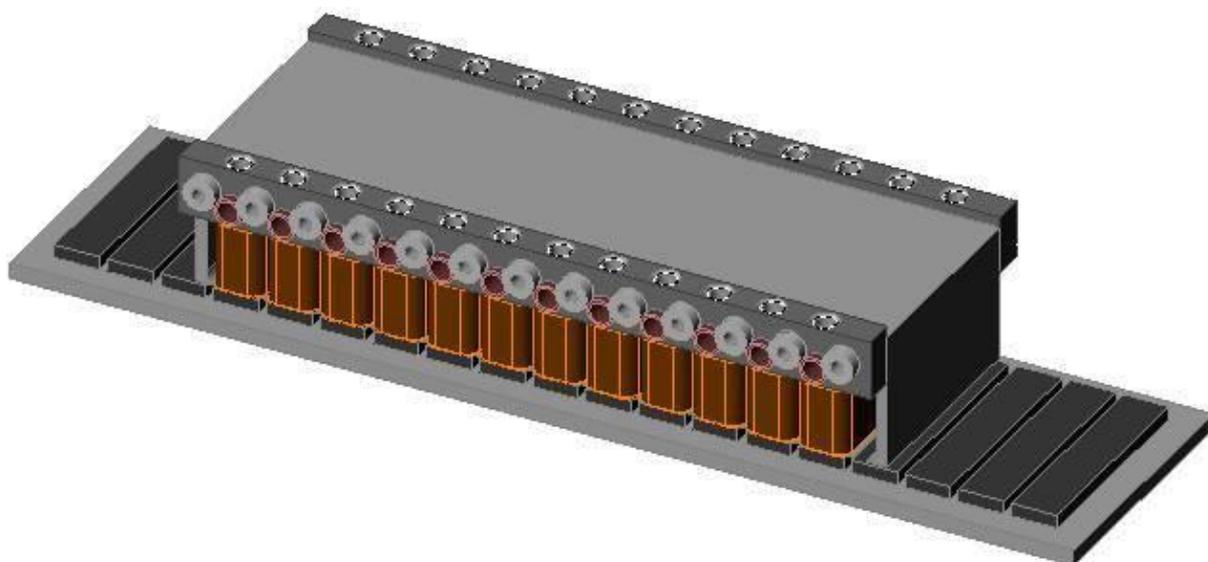


Рисунок 1 – Линейный синхронный двигатель (LSM)

Линейный синхронный двигатель состоит из подвижной части – якоря, а также магнитной дороги – статора. Якорь содержит магнитопровод, уложенной в пазы обмоткой, залитой теплопроводящим компаундом. Статор состоит из наклеенных на стальную пластину редкоземельных магнитов чередующейся полярности [8].

Усилие передается непосредственно через воздушный зазор между статором и якорем, то есть в данном типе сервопривода отсутствует механическая передача. Это обеспечивает высокие точностные параметры двигателя, ускорение и скорость перемещения, надежность всей системы привода в целом [8].

В конструкции LSM скорость перемещения магнитного поля контролируется, как правило, электронным способом, для отслеживания движения ротора. По соображениям экономики в линейных синхронных двигателях редко используются коллекторы, поэтому ротор часто содержит постоянные магниты или мягкое железо. Примеры включают спиральные пистолеты и двигатели, используемые в некоторых системах поездов на магнитной подушке, а также многие другие линейные двигатели. В высокоточной промышленной автоматизации линейные двигатели обычно комплектуются магнитным статором и подвижной катушкой. Датчик эффекта Холла прикреплен к ротору для отслеживания магнитного потока статора. Электрический ток обычно подается от стационарного сервопривода к подвижной катушке по движущемуся кабелю внутри держателя кабеля. [9]

Линейные синхронные двигатели развивают равномерное линейное усилие за счет взаимодействия магнитного поля якоря с постоянными магнитами статора [8].

Отличительная особенность линейного синхронного двигателя перед другими линейными системами заключается в отсутствии механической передачи (прямой привод) [8].

Основной областью применения синхронных двигателей, где их преимущества проявляются особенно сильно, является высокоскоростной электрический транспорт. Дело в том, что по условиям нормальной эксплуатации такого транспорта необходимо иметь сравнительно большой воздушный зазор между подвижной частью и вторичным элементом. Асинхронный линейный двигатель имеет при этом очень низкий коэффициент мощности ($\cos\varphi$), и его применение оказывается экономически невыгодным. Синхронный линейный двигатель, напротив, допускает наличие относительно большого воздушного зазора между статором и вторичным элементом и работает при этом с $\cos\varphi$, близким к единице, и высоким КПД, достигающим 96% [9].

Применение линейных синхронных двигателей в высокоскоростном

транспорте сочетается, как правило, с магнитной подвеской вагонов и применением сверхпроводящих магнитов и обмоток возбуждения, что позволяет повысить комфортабельность движения и экономические показатели работы подвижного состава [9].

Таким образом, у линейного синхронного двигателя можно выделить следующие достоинства:

- Имеет достаточно высокую точность позиционирования;
- Обладает высокой скоростью и ускорением;
- Обладает высоким КПД;
- Имеет прямой привод (нет редуктора, зубчатого ремня и т.д.), иначе говоря, отсутствует механическая передача;
- Имеет практически полное отсутствие износа механических частей.
- Имеет легкую подвижную часть (якорь), что положительно сказывается на динамических свойствах как привода устройства.

1.2 Описание конструкции и работы кодоимпульсного сейсмоисточника на LSM

Для демонстрации практичности кодоимпульсного сейсмоисточника на LSM была выбрана компактная конструкция, не включающая прижимную массу. Таким образом, конструктив устройства упрощается и уменьшается количество возможных элементов, способствующих искажению сигнала. Недостатком конструкции является то, что создаваемая механическая сила ограничивается весом реакционной массы.

В прототипе кодоимпульсного сейсмоисточника находятся три группы LSM. На рисунке 2 показана упрощенная конструкция прототипа кодоимпульсного сейсмоисточника в горизонтальной проекции. Конструктивная схема одной группы LSM представлена на рисунке 3.

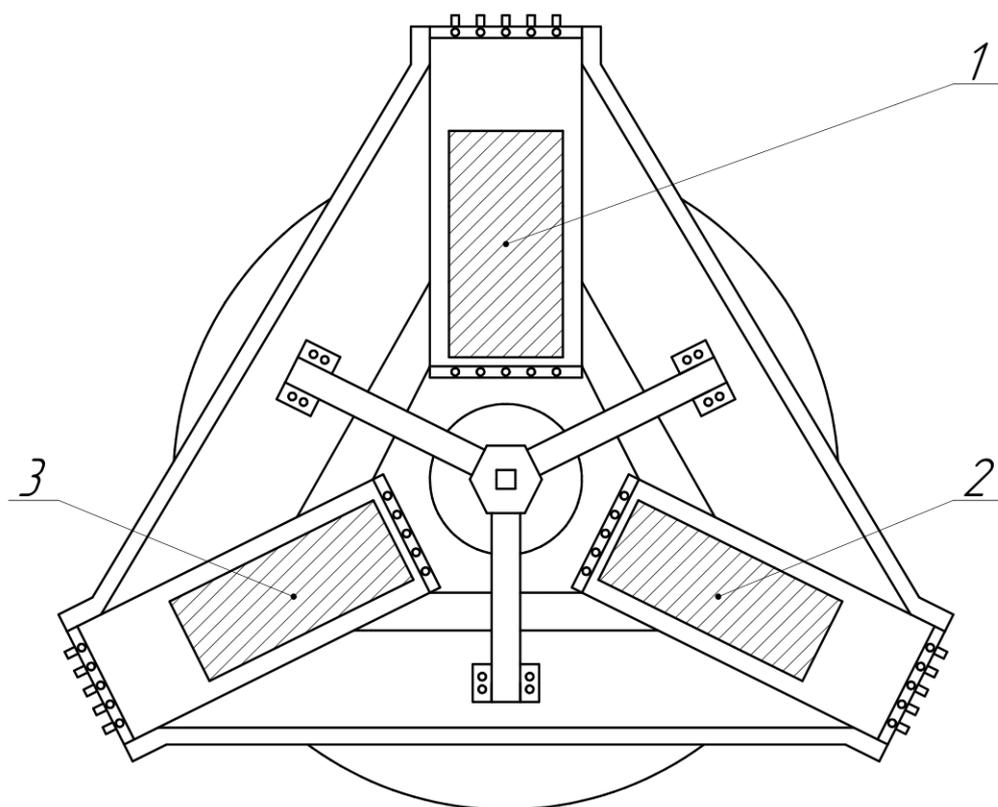


Рисунок 2 – Упрощенная конструкция прототипа кодоимпульсного сейсмоисточника на LSM

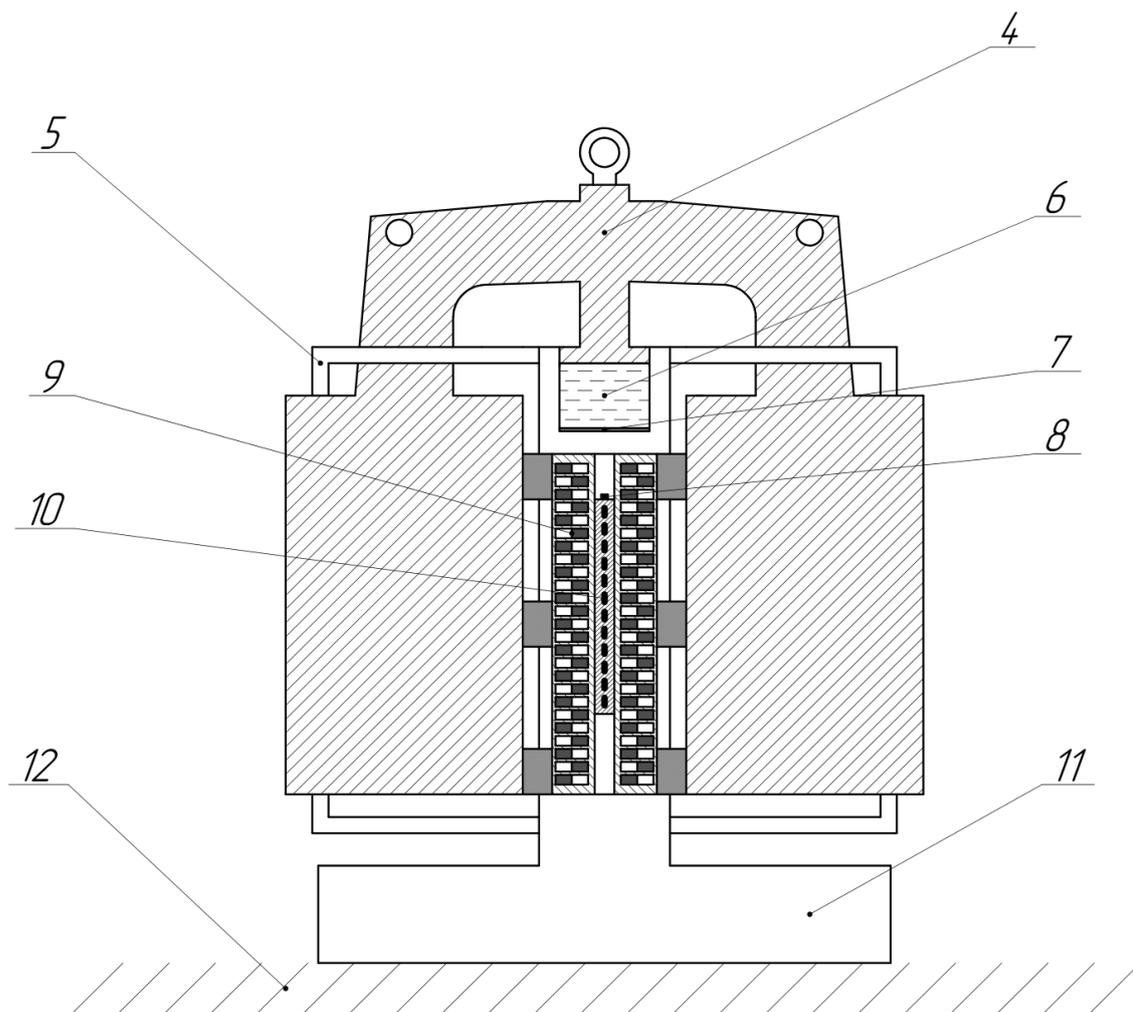


Рисунок 3 – Упрощенная конструктивная схема кодоимпульсного сейсмоисточника на LSM

На рисунках 2 и 3 представлены различные зоны электромеханического преобразователя (ЭМП).

Цифрами и числами обозначены следующие элементы ЭМП:

- 1 – первая группа LSM;
- 2 – вторая группа LSM;
- 3 – третья группа LSM;
- 4 – реакционная масса;
- 5 – листовые рессоры;
- 6 – воздушная пружина;
- 7 – рефлектор;
- 8 – ультразвуковой датчик;
- 9 – постоянные магниты;
- 10 – катушки индуктивности;
- 11 – излучательная плита;
- 12 – поверхность грунта.

Помимо излучательной плиты 11, реакционной массы (пригруза) 4 и самих LSM 1,2,3, сейсмоисточник содержит также и несколько листовых рессор 5. Воздушная пружина 6 выполняет роль поддержки реакционной массы, как бы значительно уменьшая общую необходимую механическую силу. Листовые рессоры выполняют функцию подвески, ограничивая движения реакционной массы до минимального градуса степени свободы, поддерживая реакционную массу в вертикальном направлении. Применение листовых рессор также обеспечивает экономичный способ направления пригруза без дополнительного трения.

Источник сейсмических волн содержит три секционных группы LSM. В зависимости от требуемой механической силы несколько LSM должны работать параллельно. Все двигатели не могут быть размещены в центре сейсмоисточника, а это значит, что они будут создавать статический момент относительно центра тяжести. В данном прототипе сейсмоисточника двигатели расположены симметрично, из чего следует, что если они создадут одинаковое механическое воздействие на грунт, то все моменты силы аннулируются, и останется только вертикальная составляющая силы.

В рабочем положении ЭМП устанавливается излучательной плитой на землю. В сейсмоисточник установлены три группы LSM, в каждой из которых расположены якорь и индуктор. Срабатывание кодоимпульсного сейсмоисточника происходит при подаче от системы питания силового токового импульса в обмотку возбуждения в заданной кодовой последовательности. От источника постоянного тока по обмотке возбуждения в прерывистом режиме работы протекает постоянный ток, создающий магнитный поток. Равномерно распределенный по магнитопроводу поток, пересекая воздушный зазор, создает в нем постоянное магнитное поле, при этом силовые линии магнитного поля замыкаются по контуру воздушного зазора. Формирователь тока создает в якорной обмотке переменный ток требуемой частоты. Под действием электромагнитной силы создается механическое воздействие возвратно-поступательного движения на грунт посредством излучательной плиты, формируя в нем сейсмическую волну.

«Преимущество LSM перед электромагнитным двигателем состоит в том, что ему не требуется какого-либо определенного начального положения или неподвижности индуктора и якоря, идентичность силовых воздействий обеспечивается только амплитудой тока в обмотке. Кроме того, он обладает меньшими габаритами и массой. Магнитная система устроена таким образом, что в ней расположены высокоэнергетические постоянные магниты, способные создавать магнитное поле такой же величины, что и электромагнитный двигатель. За счет того, что полюса в нем не такие большие, как в электромагнитном двигателе, ярмо LSM делается более тонким и вес всей магнитной системы становится существенно меньше. Таким образом, при тех же силовых воздействиях вес LSM оказывается во много раз меньше, чем у электромагнитного двигателя. Такое преимущество оказывается весьма важным для перевозимого устройства.

LSM, используемый в качестве электромагнитного привода, состоит из U-образной неподвижной части – рельса с постоянными магнитами (индуктор) и подвижной части – катушек, скользящих по рельсу (якорь) (рисунок 4) [27]. Сейсмоисточник содержит несколько LSM, закрепленных якорями на излучающей плите, а индукторами – на пригрузе. Благодаря такой геометрии пригруз может перемещаться на любое необходимой расстояние, поэтому сейсмоисточник с приводом на LSM может генерировать как низкие частоты при большом ходе, так и высокие частоты при относительно небольшом ходе. Каждый LSM имеет три фазы, т.е. три группы обмоток. Разрез активной зоны LSM приведен на рисунке 5» [13].



Рисунок 4 – Иллюстративный пример LSM

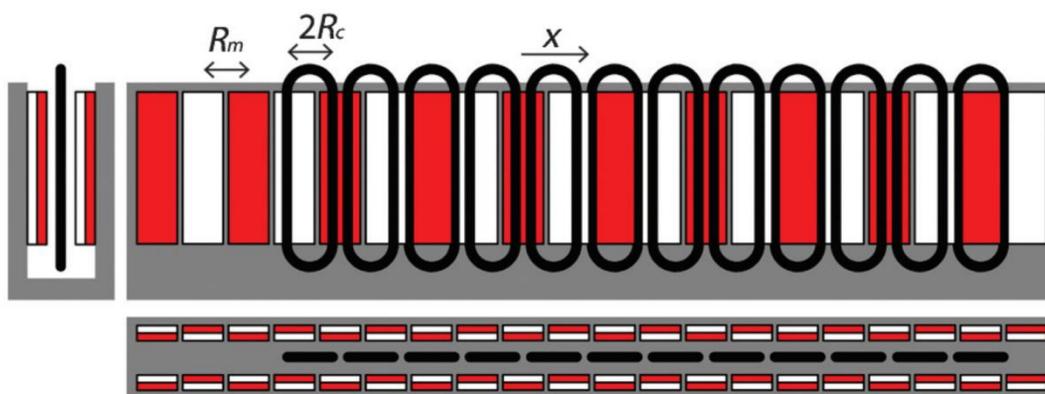


Рисунок 5 – Внутренняя структура LSM

«Катушки фаз располагаются на расстоянии $\frac{2}{3}R_m$ друг относительно друга. Шаг постоянных магнитов в полюсной системе составляет R_m . $2R_c$ – ширина катушки. Следует отметить, что $2R_c = R_m$. Направление движения катушки обозначено буквой x , оно может быть двусторонним.

Для создания механического воздействия на грунт используются три образованных группы катушек, суммарная сила которых составляет» [13]

$$\vec{F}(i_1, i_2, i_3, x) = nG \left[i_1 \cos\left(\frac{\pi x}{R_m}\right) + i_2 \cos\left(\frac{\pi x}{R_m} + \frac{2\pi}{3}\right) + i_3 \cos\left(\frac{\pi x}{R_m} + \frac{4\pi}{3}\right) \right], \quad (1)$$

где n – количество катушек в группе,

G – постоянная, зависящая от напряженности магнитного поля и формы катушки.

Создаваемая сила получается независимой от того, в каком месте будут находиться подвижные катушки, если токи в обмотках будут распределяться по следующему закону питания фаз LSM [28].

$$i_1 = I \cos\left(\frac{\pi x}{R_m}\right),$$

$$i_2 = I \cos\left(\frac{\pi x}{R_m} + \frac{2\pi}{3}\right),$$

$$i_3 = I \cos\left(\frac{\pi x}{R_m} + \frac{4\pi}{3}\right), \quad (2)$$

где i_1, i_2, i_3 – токи, подаваемые в разные фазы,

I – ток, определяющий электромагнитную силу,

x – координата, определяемая положением катушки относительно полюсной системы,

R_m – шаг постоянных магнитов.

Если подставить уравнения (2) в уравнение (1), то общая сила, создаваемая двигателем, будет зависеть только от заданного тока I » [13].

$$F(I) = \frac{3}{2}nGI = KI, \quad (3)$$

где K – так называемая «постоянная двигателя».

1.3 Задачи работы

Задачами выпускной квалификационной работы являются:

- 1) Проработка упрощенной конструктивной схемы кодоимпульсного сейсмоисточника;
- 2) Разработка структурной схемы системы питания кодоимпульсного сейсмоисточника;
- 3) Разработка системы возбуждения двигателя, построенная на последних достижениях в области преобразовательной техники;
- 4) Разработка математической модели формирователя тока возбуждения, получение временных диаграмм работы;
- 5) Исследование электромагнитной совместимости составных элементов электромеханического устройства.

Таким образом, в этом разделе были сформулированы цель и задачи работы, проработана упрощенная конструктивная схема кодоимпульсного сейсмоисточника, а также приведена описательная часть по конструктиву линейного синхронного двигателя, принципу работы и его особенностям системы электропитания.

2 Обзор схемотехнических решений формирователя тока возбуждения

2.1 Схема на основе тиристора и конденсатора

Одним из простейших вариантов формирователя тока в обмотку возбуждения электромагнита является тиристорно-конденсаторная схема, представленная на рисунке 6. [7, 24]

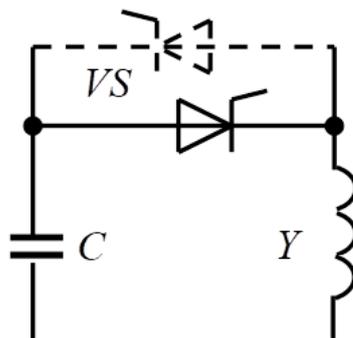


Рисунок 6 – Схема формирователя тока на базе тиристора и конденсатора

Явным преимуществом данной схемы является рекуперация энергии магнитного поля из обмотки электромагнита Y непосредственно в емкостной накопитель C .

Эта схема имеет следующие недостатки:

- конденсаторный накопитель C работает в двухполярном режиме, а в этом случае его ресурс значительно снижается;
- управлять длительностью импульса тока можно лишь изменением числа витков обмотки или величины ёмкости накопителя C , что ограничивает оперативность управления;
- после срабатывания схемы накопитель C оказывается заряженным в обратной полярности по сравнению с исходной, что усложняет подготовку схемы к следующему срабатыванию [17].

Если дополнить схему ещё одним тиристором, включенным встречно тиристор VS , то заряд накопителя C можно выполнять после каждого второго импульса. В этом случае амплитуда тока первого импульса,

формируемого при включении первого тиристора, больше формируемого при включении второго тиристора. Этот недостаток несущественен для устройств, у которых идентичность повторных срабатываний не является обязательной, например в виброуплотнителях бетонной смеси [17].

2.2 Схема с шунтированием обмотки и принудительной коммутацией тиристора

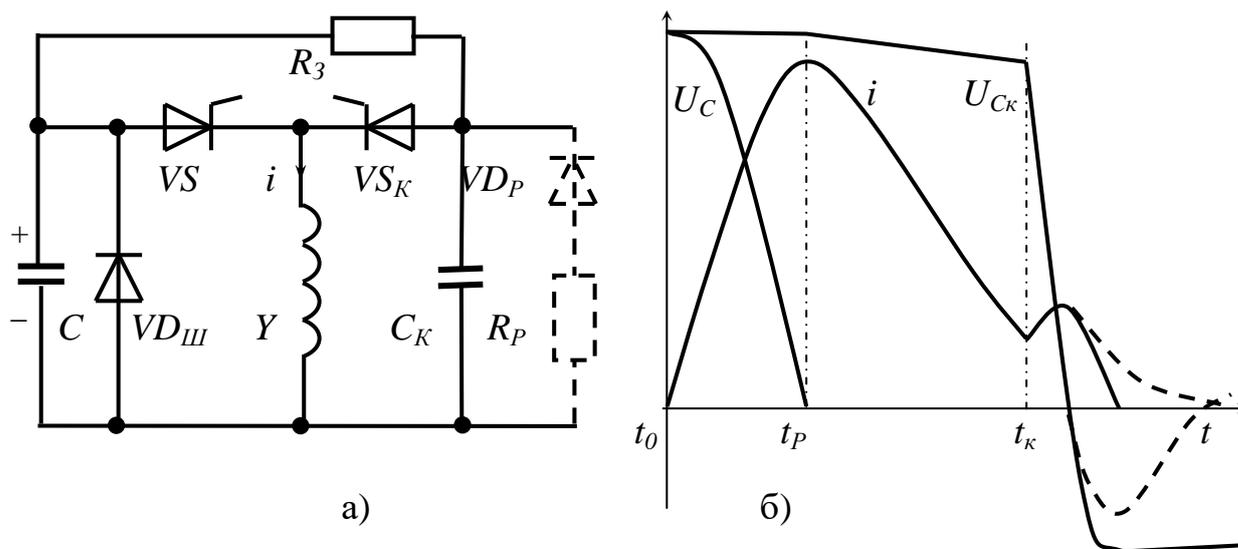


Рисунок 7 – Схема формирователя тока с шунтированием обмотки и принудительной коммутацией тиристора:

а) схема; б) диаграммы работы

В докоммутационный период времени схема находится в состоянии покоя, однако перед ее запуском внешним устройством до одинакового напряжения заряжаются конденсаторы C и C_K . В период времени $t_0 - t_p$ в схеме протекают следующие переходные процессы: заряженный до некоторого значения напряжения конденсатор C начинает разряжаться, т.е. напряжение начинает падать, а ток i при этом возрастает примерно с такой же скоростью. В момент t_p конденсатор C практически полностью разряжается, а обмотка Y шунтируется током ветви $VD_{III} - VS$. В интервале времени ток i начинает уменьшаться, достигая момента t_k , а затем включается тиристор VS_K и конденсатор C_K начинает разряжаться на обмотку

Y через тиристор VS_K , формируя при этом резкий фронт тока i . Почти сразу же тиристор VS начинает запирается в связи приложенным напряжением обратной полярности конденсатора C_K . Рекомендацией к схеме приведено небольшое дополнение пунктирной линией в виде диодно-резисторной цепи. Такое преобразование позволяет уменьшить величину обратного напряжения запираения тиристора, а также увеличить длительность протекания тока в обмотке.

2.3 Схема с разделенной обмоткой электромагнита

Схема, в которой обмотка электромагнита разделена на две части, приведена на рисунке 8.

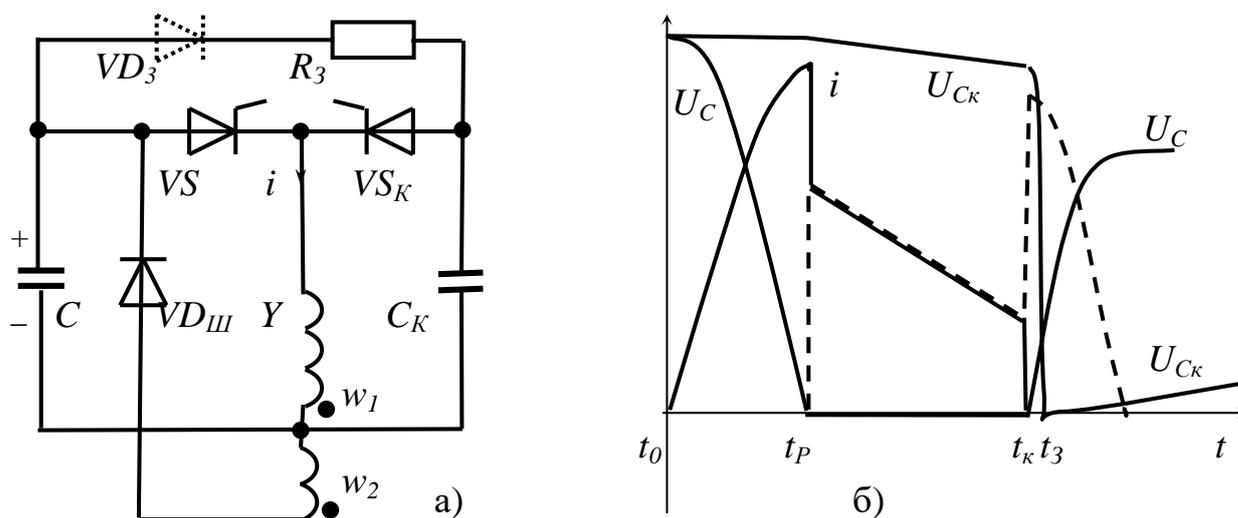


Рисунок 8 – Схема формирователя тока с разделенной обмоткой:
а) схема; б) диаграммы работы

Как и в предыдущей схеме, конденсаторы C и C_K предварительно заряжаются до напряжения некоторой величины. В момент времени t_0 конденсатор начинает разряжаться, формируя при этом фронт тока i , коммутируя тиристор VS . Тиристор VS шунтирует верхнюю часть обмотки w_1 . В наступление момента времени t_P конденсатор начинает перезаряжаться до значения напряжения открытия диода VD , и в это время ток претерпевает перехват ветвью $VD - VS$ и скачком уменьшается. Напряжение конденсатора

C не изменяется вплоть до момента времени t_K . Когда этот момент наступает, к тиристор VS начинает прикладываться напряжение обратной полярности с конденсатора C_K , который заряжен через резистор R_3 . Пока конденсатор C_K разряжается, тиристор VS начинает постепенно отключаться, и ток i , протекающий через нижнюю часть обмотки w_2 и VD , начинает заряжать конденсатор C в такой же полярности, как было первоначально. Для предотвращения снижения напряжения на конденсаторе C_K может использоваться диод VD_3 , показанный пунктиром на рисунке. Резистор R_3 в схеме используется для плавного нарастания напряжения в конденсаторе C_K в моменте паузы между срабатываниями сейсмоисточника.

2.4 Схема с неразделенной обмоткой электромагнита

Схема с неразделенными накопителем и обмоткой, приведенной на рисунке 9, имеет конфигурацию моста из вентилей, в одну диагональ которого включен накопитель C , заряжаемый от внешнего устройства, а в другую – обмотка электромагнита Y .

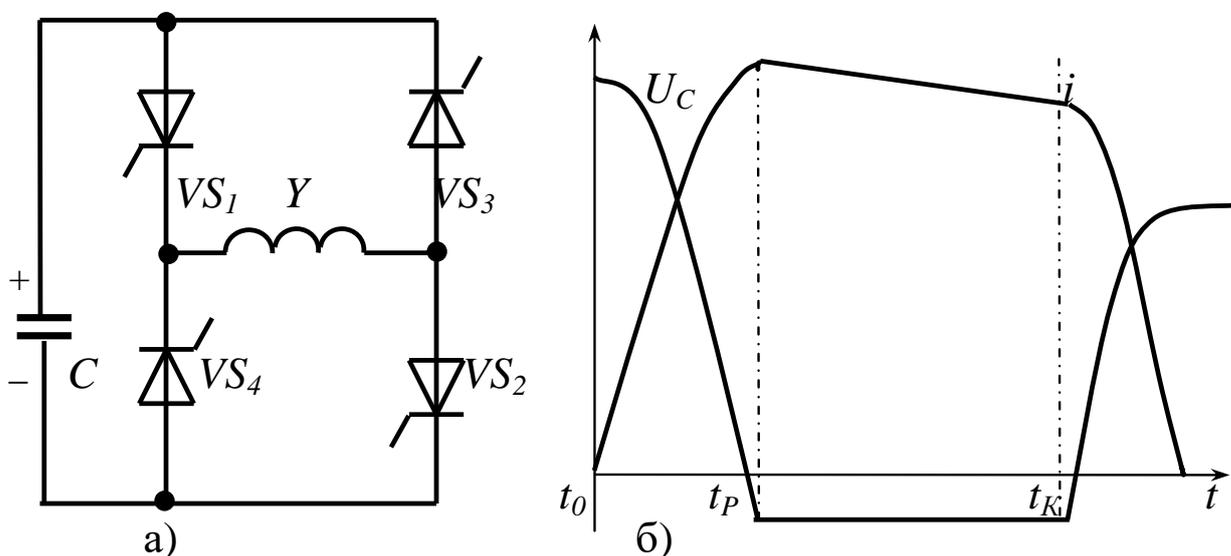


Рисунок 9 – Схема формирователя тока с неразделенной обмоткой:

а) схема; б) диаграммы работы

Формирование тока i начинается с одновременного включения схемой управления силовых тиристоров VS_1, VS_2 в момент t_0 . Напряжение накопителя C уменьшается, а ток в обмотке Y растет. После перезарядки накопителя до некоторого напряжения, необходимого для последующей коммутации тиристоров, в момент t_P тиристор VS_3 может быть включен схемой управления. Когда он открывается, то обратным напряжением на C коммутируется тиристор VS_2 , после чего ток нагрузки i течет по цепи $VS_1 - VS_3$, а напряжение накопителя C неизменно. В момент t_K включением схемой управления тиристора VS_4 к тиристорам VS_1 прикладывается обратное напряжение накопителя C , тиристор VS_1 выключается и ток нагрузки замыкается через VS_3, VS_4 , заряжая накопитель в исходной полярности.

Этот тип схем более рассмотренных ранее приспособлен для регулирования длительности импульса. Из-за большего, чем в предыдущих схемах, количества силовых тиристоров и вызванного этим усложнения схемы управления такие варианты схем в основном применяются в более сложных кодоимпульсных и вибрационных устройствах при работе с неполным выбором зазора и большой величиной энергии, циркулирующей между накопителем и обмоткой [17].

2.5 Схема с импульсными трансформаторами

Пример формирователя с трансформаторами приведен на рисунке 10, а диаграммы его работы – на рисунке 11.

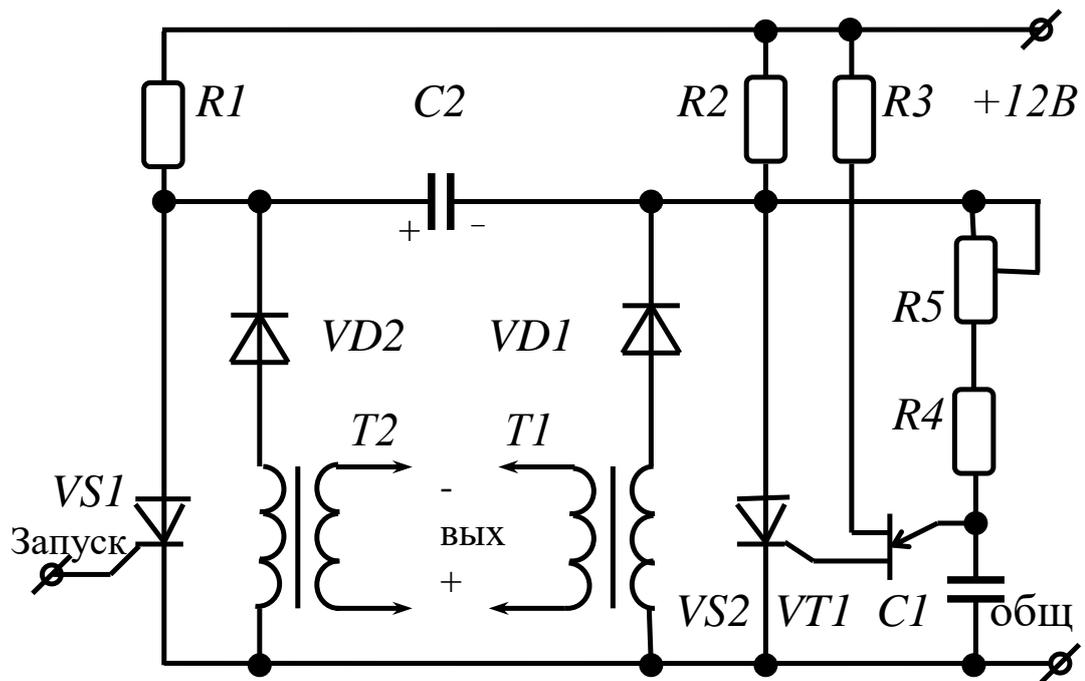


Рисунок 10 – Схема формирователя тока с импульсными трансформаторами

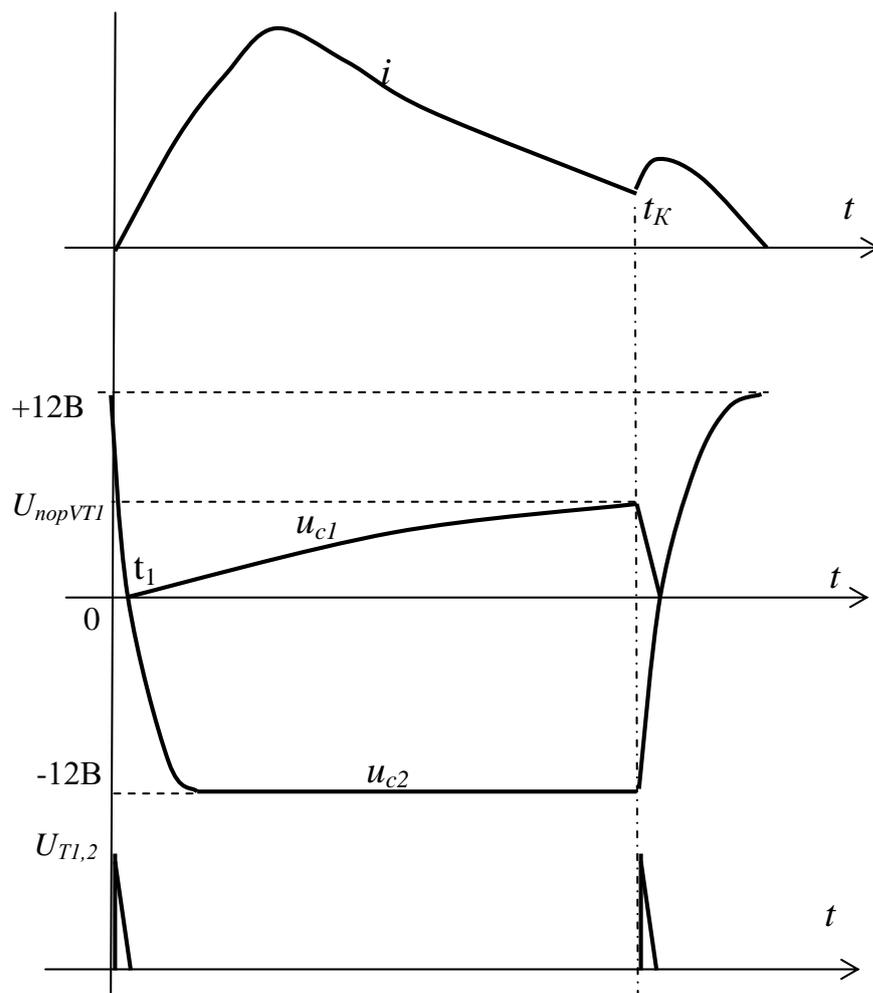


Рисунок 11 – Диаграммы работы формирователя тока

В момент коммутации схемы (подачи однополярного напряжения +12 В) схема работает следующим образом: конденсатор $C1$ начинает заряжаться через резисторы $R2$, $R4$, $R5$ до некоторого порогового напряжения транзистора $VT1$. Затем емкость $C1$ начинает разряжаться через этот же транзистор $VT1$ для открытия тиристора $VS2$ через его управляющий переход. Когда тиристор $VS2$ находится в открытом состоянии, параллельно ему заряжается конденсатор $C2$ вплоть до напряжения питания +12 В через резистор $R2$, находящийся в анодной ветви тиристора $VS2$. Далее схема меняет свое подготовительное состояние на ждущее.

В тот момент, когда тиристор $VS1$ переходит из закрытого состояния в открытое, конденсатор $C2$ начинает разряжаться через ветвь с диодом $VD1$ на первичную обмотку трансформатора $T1$. В это же время на вторичной обмотке происходит формирование токового импульса, который начинает управлять тиристором VS в схеме питания источника сейсмических волн. В то время, когда заряд на конденсаторе $C2$ начинает падать, тиристор $VS2$ начинает закрываться пропорционально скорости приложенного конденсатором $C2$ обратного напряжения. В наступление момента времени t_1 происходят следующие переходные процессы: в момент полной разрядки конденсатор $C2$ начинает процесс перезарядки до напряжения питания, но уже не через диодно-резисторную ветвь, а через тиристорно-резисторную ветвь, а именно $R2 - VS1$. Схема снова возвращается в режим ожидания. Как только наступает момент t_1 , конденсатор $C1$ снова начинает заряжаться через резисторы $R2$, $R4$, $R5$ вплоть до напряжения открытия транзистора $VT1$ и далее алгоритм работы схемы повторяется.

Отмечается, что элементная база из резисторов $R1$, $R2$ выбирается таким образом, чтобы протекающий ток в прямом направлении был всегда меньше величины тока удержания, в связи с индивидуальной особенностью тиристорных. Как правило, для достижения необходимых технических параметров, например, конкретного значения токового импульса управления тиристором в схеме сейсмоисточника, используют ряд схемотехнических

решений, одно из которых заключается в применении импульсных трансформаторов со специальной площадью сечения магнитопровода, позволяющее оперировать как длительностью формируемого токового импульса, так и его амплитудой.

Таким образом, в данном разделе были приведены различные схемотехнические решения по реализации схемы формирователя тока возбуждения в обмотке подвижной катушки LSM.

3 Система питания обмотки якоря

Задачей системы питания является формирование в обмотке возбуждения электромагнита импульсов тока в заданной кодовой последовательности, при которых возникает электромагнитная сила, воздействующая на грунт посредством излучательной плиты.

Анализ предложенных схмотехнических решений в разделе 2 показал, что в силу конструктивных особенностей сейсмоисточника на LSM, а также использования совершенно другого силового привода со своей спецификой работы, перечисленные ранее решения не являются подходящими для разработки системы питания.

«Именно особенности конструкции LSM и накладывают особенности на систему питания кодоимпульсного сейсмоисточника.

Поскольку токи фаз разные (2), фактически необходимо три независимых генератора тока, которые из одного задающего сигнала силы выдадут в конечном итоге три независимых тока, которыми будут коммутированы фазы обмоток LSM. Для решения этой задачи предлагается структура системы питания, представленная на рисунке 12.» [13]

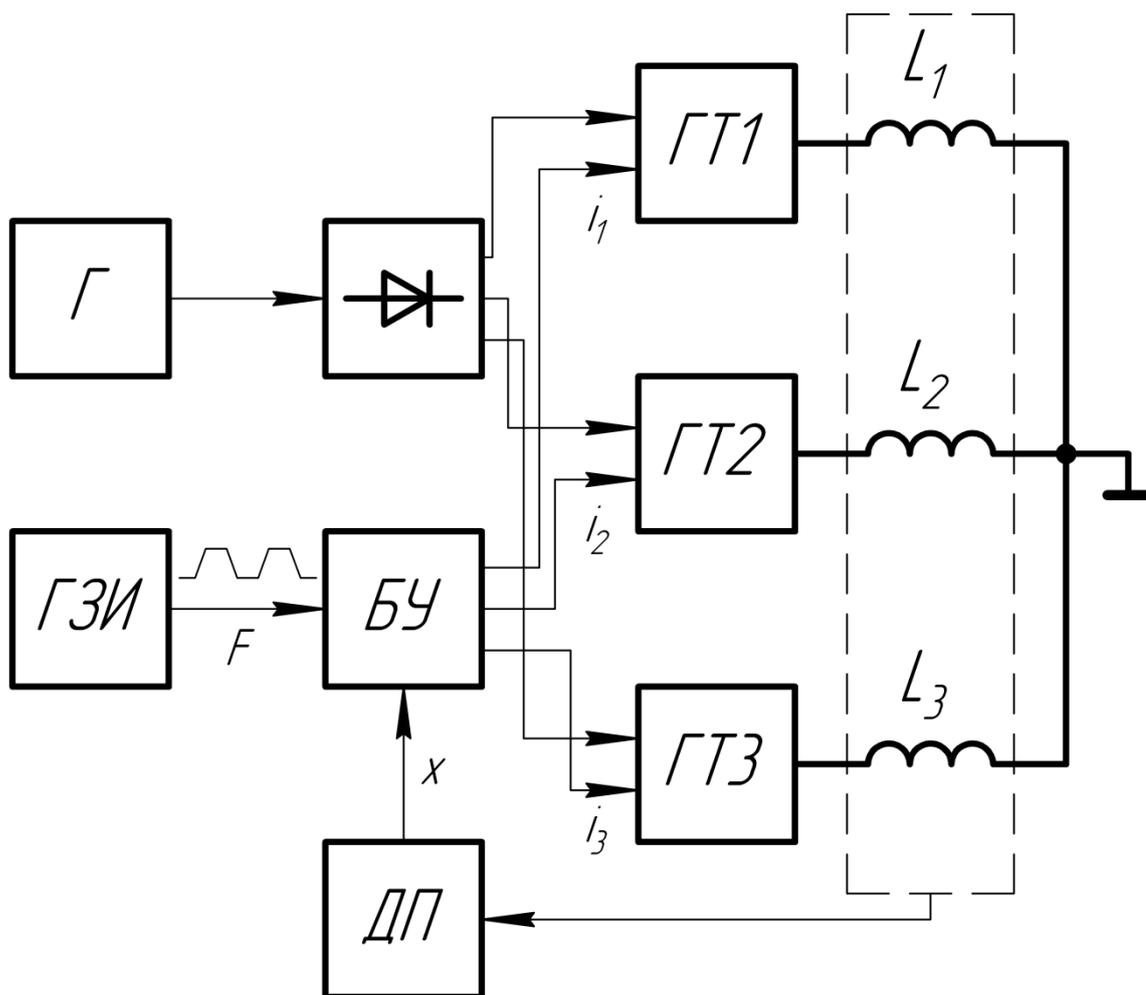


Рисунок 12 – Структурная схема системы питания кодоимпульсного сейсмоисточника на LSM

«На структурной схеме изображены 3 генератора тока (ГТ), к которым подключены фазы обмоток L_1 , L_2 , L_3 LSM.

Сигналы, пропорционально которым должны быть сгенерированы токи в обмотках, исходят из блока управления (БУ), который по сигналу силы и положению системы генерирует три тока заданной формы.

Поскольку токи будут иметь разнополярные значения, генераторы должны быть разнополярных токов. В связи с этим предлагается следующее схемотехническое решение. С помощью ШИМ-управления транзисторными ключами будет формироваться кривая тока по необходимому закону.

Высокочастотные гармоники сглаживаются фильтром верхних частот как в усилителях класса D (рисунок 13).

Питание необходимо двухполярное, поэтому предлагается использовать трехфазный генератор напряжения (Г) на основе трехфазного выпрямителя со средней точкой.

Генератор зарядных импульсов – сейсмостанция, которая управляет сейсморазведочным процессом, отправляет информацию по радиоканалу в блок управления о форме, длительности, амплитуде сигнала.

Датчик положения (ДП) – элемент, который фиксирует координату x с помощью сигнала, пропорционального или равного координате обмотки подвижной системы и далее отправляет полученный сигнал в блок управления для формирования импульса тока в обмотку» [13].

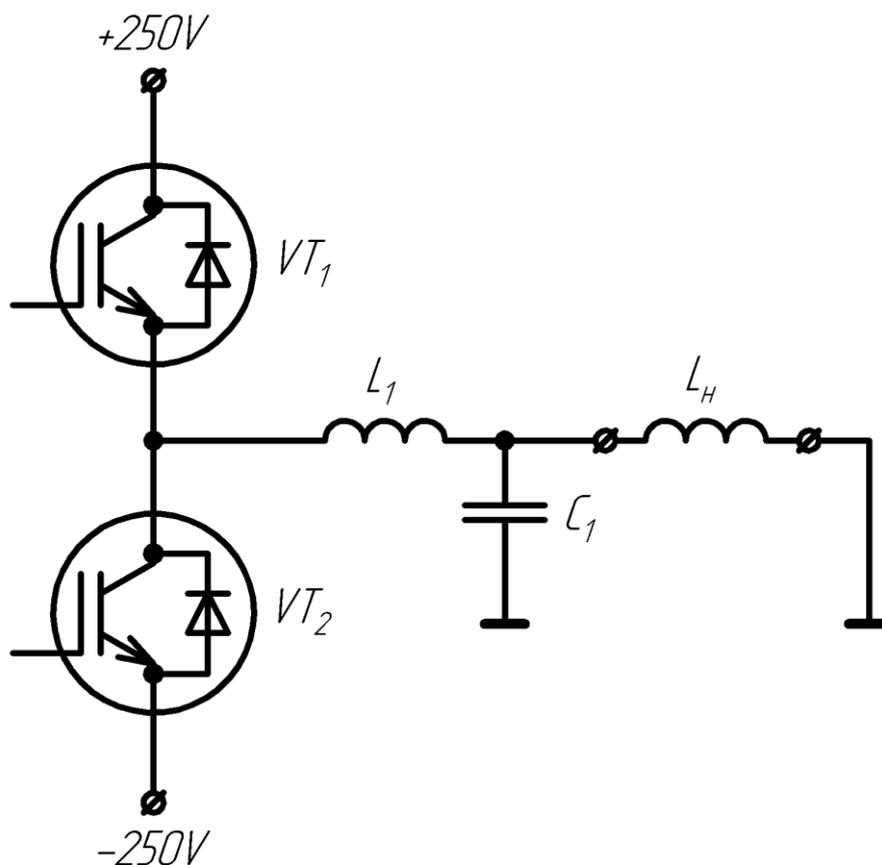


Рисунок 13 – Предлагаемое схемотехническое решение

3.1 Генератор тока для питания подвижной катушки

3.1.1 Требования, предъявляемые к генератору тока

Требования, предъявляемые к разработке генератора тока для питания подвижной катушки линейного синхронного двигателя, сводятся к тому, чтобы возбудить разнополярный периодический ток регулируемой амплитуды в активно-индуктивной нагрузке. Частота этого тока лежит в пределах 0-100 Гц, а амплитуда тока – в диапазоне 0-100 А. Стоит отметить, что указанные электрические параметры задаются логическим однополярным сигналом, поступающим с блока управления.

3.1.2 Подбор электронной компонентной базы

Следует выделить, что главной задачей для оптимальной работы ЭМП является управление тремя каналами генератора тока в зависимости от положения катушек во всей магнитной системе. Для данной задачи было принято использовать датчик положения подвижной катушки на основе ультразвукового датчика, как возможное техническое решение.

Принцип работы ультразвукового датчика заключается в исследовании окружающего пространства с помощью звуковых волн, частотой, находящейся за пределами слышимости человеческим ухом – ультразвуком. При обнаружении изменения частоты отраженного сигнала, вследствие движения объектов, датчик запускает заложенную в нее функцию [22].

Внутри ультразвукового датчика движения расположен генератор звуковых волн (в зависимости от производителя и модели обычно генерируется частота звуковой волны 20-60 кГц), которые излучаются в зоне действия датчика и, отражаясь от окружающих объектов, поступают обратно в приемник [22].

Когда в зоне обнаружения ультразвукового датчика появляется движущийся объект, частота отраженной от объекта волны изменяется

(эффект Доплера), что регистрируется приемником датчика и от него поступает сигнал на выполнение заложенной в ультразвуковой датчик функции, это может быть включение освещения или резкое появление импульса в движении [22].

Ультразвуковой датчик выбран неспроста, у него есть некоторые преимущества в отслеживании движения объекта:

- Может определять движение объекта вне зависимости от его характеристики материала;
- Имеет крайне малую зависимость от влияния температуры окружающей среды;
- Имеет высокую работоспособность даже при условиях высокой влажности или запыленности.

В качестве опытного образца ультразвукового датчика была выбрана модель MA400A1, представленная на рисунке 14.

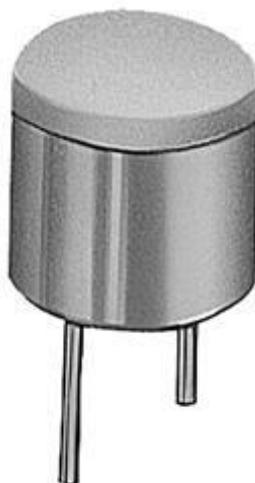


Рисунок 14 – Ультразвуковой датчик MA400A1

Датчик имеет алюминиевый корпус, а акустический слой выполнен из пластика. Выбранный прототип является высокочастотным, принципиально изготовленным под определение расстояния. Датчик работает в аналоговом режиме.

Технические характеристики МА400А1 приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Технические характеристики МА400А1

Наименование	МА400А1
Функция	Приемопередатчик
Диаметр	11 мм
Чувствительность	-74 дБ
Уровень звукового давления	-
Угол рассеяния	7°
Разрешение	1 мм
Детектируемое расстояние	0,06...0,3 м

Важно отметить, что данный ультразвуковой датчик имеет малое значение такого свойства тела, как инерция. При движении якоря в магнитной системе возможны резкие смещения подвижной части относительно неподвижной в момент создания и окончания импульса тока в обмотке, из-за чего датчики, имеющие высокий инерционный фактор, могут как бы «съесть» некоторую часть сформированной кривой тока в активно-индуктивной нагрузке и тем самым препятствовать динамическому воздействию ЭМП на грунт.

Для расшифровки законов ускорений, записанных при помощи датчиков и измерительной аппаратуры, датчики должны быть протарированы, а измерительная аппаратура прокалибрована [3].

Тарировка – это компенсация большей части систематической погрешности всей измерительной системы от входа измеряемой физической величины до выхода измеренного значения этой величины. Тарировка делается путем подачи на датчик эталонной величины физического воздействия [21].

Тарировка ультразвукового датчика будет заключаться в том, чтобы установить соответствие между линейным перемещением и значением сигнала с выхода этого самого датчика для перераспределения фактической координаты x подвижной системы LSM в результирующую амплитуду тока.

Без тарировки ультразвукового датчика необходимо было бы взять

некий задающий сигнал тока i , который фактически определяет амплитуду механической силы. Этот импульс тока подается на вход блока управления вместе с сигналом, который пропорционален координате обмотки LSM x в подвижной системе. Затем блок управления из полученных сигналов должен сгенерировать три выходных сигнала, вычисленные по формуле 2. После этого сигналы принимают генераторы тока, которые впоследствии и формируют сильноточные сигналы в фазы обмоток LSM.

В разрабатываемом генераторе тока низковольтный сигнал с блока управления должен предварительно усиливаться как по току, так и по напряжению.

В качестве элементов усиления по напряжению используются две аналоговые интегральные микросхемы: NE5532 и LM311P, описание которых представлено ниже.

Графическая иллюстрация электронных компонентов NE5532 и LM311P представлена на рисунках 15 и 16.

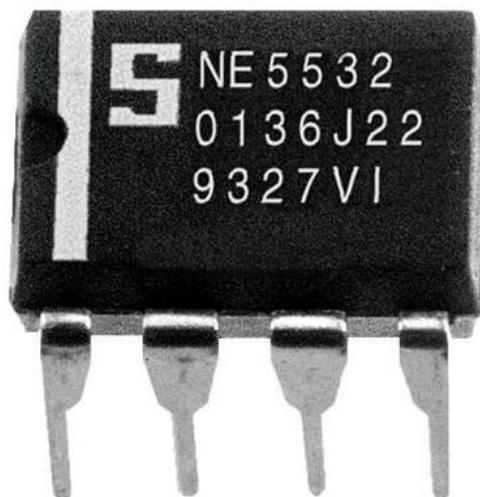


Рисунок 15 – Модель NE5532



Рисунок 16 – Модель LM311P

Некоторые технические характеристики NE5532 и LM311 представлены в таблицах 2 и 3.

Таблица 2 – Технические характеристики NE5532

Параметр	Значение
Максимальное напряжение питания, В	± 22
Максимальный входной ток, мА	± 10
Максимальный выходной ток кор. зам., мА	60
Коэффициент усиления, дБ	100
Диапазон рабочих температур, °С	0...70

Таблица 3 – Технические характеристики LM311P

Параметр	Значение
Максимальное напряжение питания, В	± 36
Максимальный входной ток, мА	7,5
Максимальный выходной ток, мА	50
Коэффициент усиления, дБ	100
Диапазон рабочих температур, °С	0...70

Для электропитания вышеупомянутых микросхем предусмотрен блок питания (БП) MC5BB с выходным напряжением ± 12 В, представленный на рисунке 17.



Рисунок 17 – Блок питания MC5BB

В качестве элементов усиления по току используется сильноточная пара биполярных транзисторов с изолированным затвором (IGBT): MSG75T120FQW, описание которых представлено ниже [11, 12].

Графическая иллюстрация транзисторов показана на рисунке 18.



Рисунок 18 – Модель MSG75T120FQW

Некоторые технические характеристики MSG75T120FQW представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Технические характеристики MSG75T120FQW

Параметр	Значение
Максимальное напряжение коллектор-эмиттер, В	1200
Максимальный ток коллектор-эмиттер, А	115
Импульсный ток коллектора, А	230
Максимальная рассеиваемая мощность при 25°C, Вт	882
Время задержки включения при 25°C, нс	205
Время задержки выключения при 25°C, нс	130
Рабочий диапазон температур, °C	-55...+150

Для управления силовыми транзисторами используется полумостовой драйвер IR21844, представленный на рисунке 19.

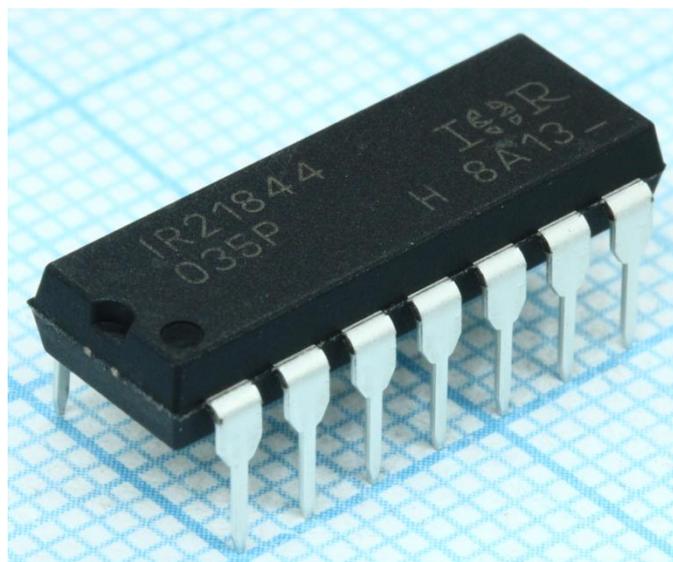


Рисунок 19 – Полумостовой драйвер IR21844

Некоторые технические характеристики IR21844 представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Технические характеристики IR21844

Параметр	Значение
Максимальное напряжение питания, В	20
Пиковый выходной ток нарастания, А	1,9
Пиковый выходной ток затухания, А	2,3
Номинальное время нарастания сигнала, нс	40
Номинальное время затухания сигнала, нс	20
Максимальное напряжение смещения, В	600
Рабочий диапазон температур, °С	-40...+150

Для электропитания микросхемы IR21844 предусмотрен блок питания MC5C с выходным напряжением +15 В. Визуально он выглядит идентично блоку питания MC5BB (рисунок 17).

В схеме генератора тока имеется также датчик тока LA 55-P, он питается от блока питания MC5BB. Графически датчик тока представлен на рисунке 20.

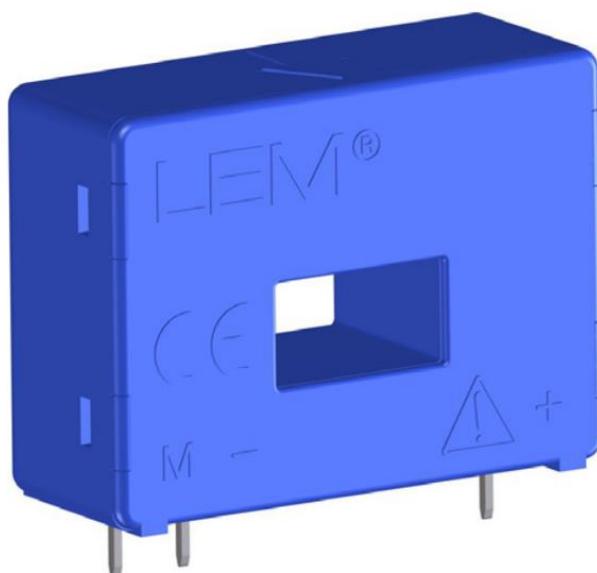


Рисунок 20 – Датчик тока LA 55-P

Для защиты слаботочной части от сильноточной в схеме генератора тока предусмотрена гальваническая развязка оптоэлектронной организации на микросхеме PC817. Графически микросхема представлена на рисунке 21. Некоторые технические характеристики PC817 представлены в таблице 6.

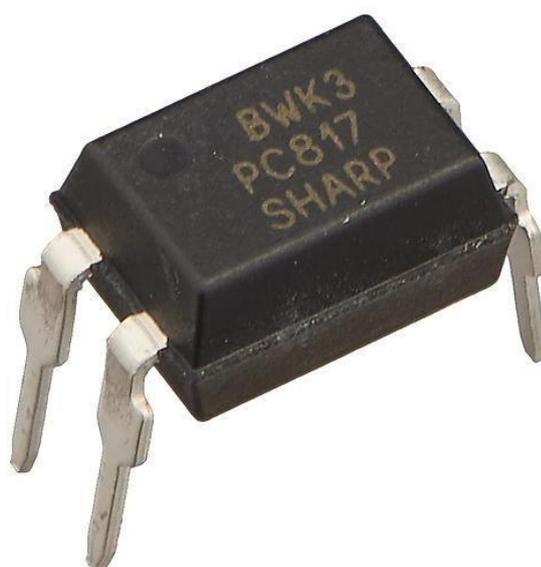


Рисунок 21 – Оптопара транзисторная PC817

Таблица 6 – Технические характеристики РС817

Параметр	Значение
Напряжение изоляции, В	5000
Максимальный ток коллектора, мА	50
Максимальный коэффициент передачи по току, %	400
Тип входа	DC
Тип выхода	Транзистор
Напряжение выхода, В	80
Рабочий диапазон температур, °С	-30...+100

3.1.3 Расчет катушки

В предложенном схмотехническом решении (рисунок 13) находится последовательный колебательный контур в виде -цепи. В схеме генератора такая ветвь исполняет роль не только фильтра верхних частот, но и одновременно задает задержку в обратную связь по переключению транзисторов, которые управляются ШИМ-сигналом. Она задает частоту переключения, а также скорость нарастания тока в обмотке катушки.

В связи с требуемыми индивидуальными техническими параметрами катушки индуктивности было принято решение изготовить ее самостоятельно.

Сердечник катушки имеет форму чашки, а материал – феррит, в связи с высокой частотой периодического разнополярного тока.

«Катушкой индуктивности будет называть элемент, в котором ток i и потокосцепление ψ связаны некоторой алгебраической зависимостью» [6]

$$\psi = L * i ,$$

где ψ – потокосцепление (полный магнитный поток),

i – проходящий через катушку электрический ток,

L – индуктивность.

Габаритные размеры чашечного сердечника представлены на рисунке 22.

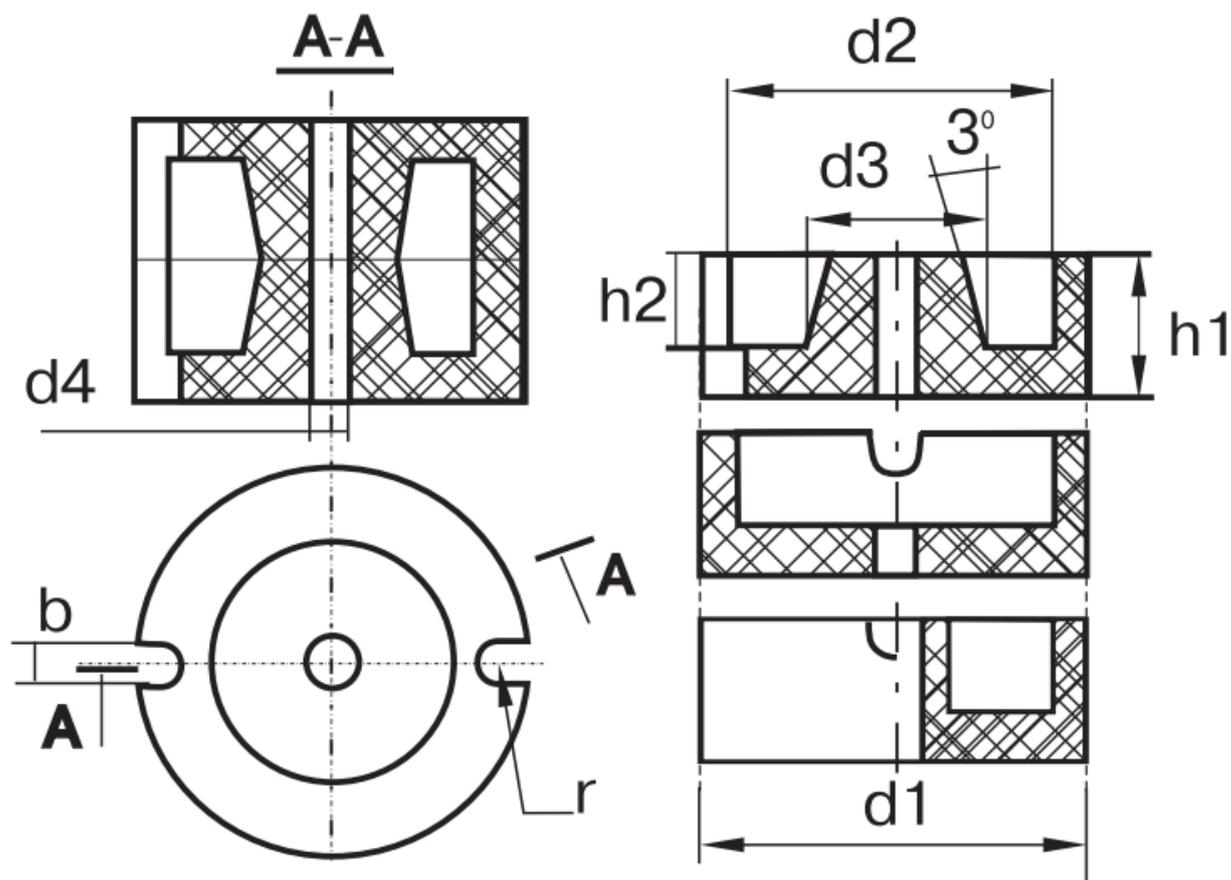


Рисунок 22 – Габаритные размеры чашечного сердечника

На рисунке 23 изображена катушка индуктивности с разомкнутым по обе стороны вертикальной оси магнитопроводом. Известно, что при протекании тока i по катушке создается магнитный поток. Часть потока $\Phi_{ВН}$, называемая потоком рассеяния, замыкается около обмотки и не проходит по зазору магнитной системы, через который замыкается основной поток $\Phi_{ВШ}$. Сойдемся на том, что скорости изменения магнитных потоков в участках магнитной цепи с сопротивлением $R_{ВН}$ и $R_{ВШ}$ соответственно создаются одной и той же магнитодвижущей силой F_M . Магнитная цепь катушки изображена на рисунке 24 [27].

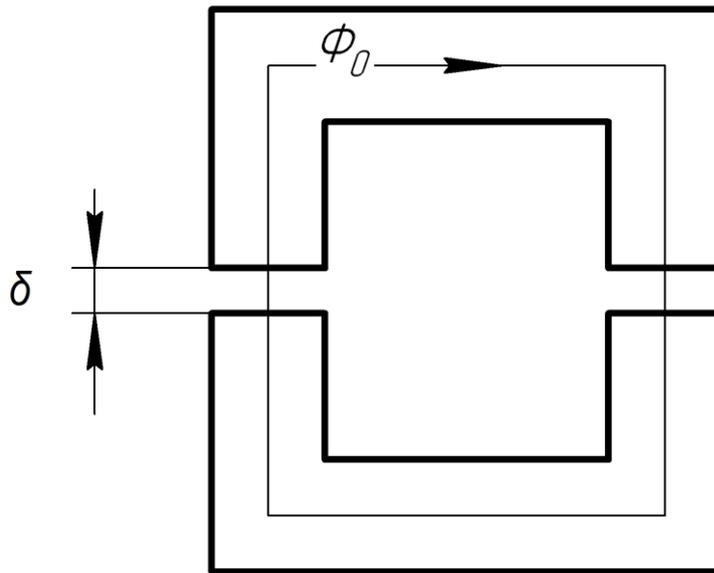


Рисунок 23 – Структура катушки индуктивности на разомкнутом магнитопроводе

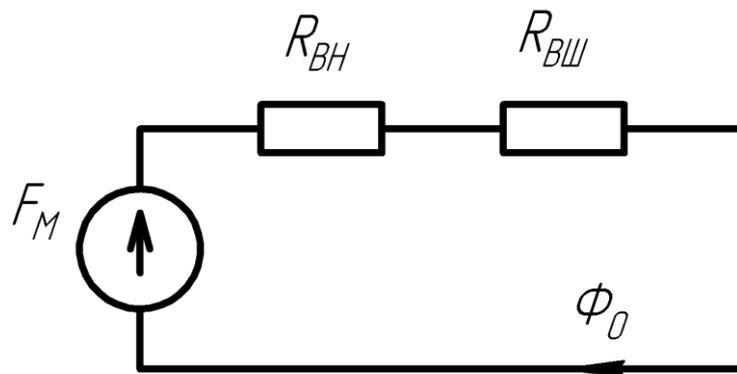


Рисунок 24 – Схема магнитной цепи катушки

Задача состоит в том, чтобы при токе 100 А индукция магнитного поля в катушке была не больше 0,5 Тл в силу недопущения насыщения магнитопровода.

Для получения точного математического результата использовался программный пакет Mathcad, в котором приведен расчет катушки на чашечном магнитопроводе. Результат расчета отображен на рисунке 25.

$$\begin{aligned}
d1 &:= 48.7 \cdot 10^{-3} & Im &:= 100 \\
d2 &:= 39.5 \cdot 10^{-3} \\
d3 &:= 20.4 \cdot 10^{-3} \\
d4 &:= 7.3 \cdot 10^{-3} \\
\mu0 &:= 4\pi \cdot 10^{-7} \\
Sin &:= \frac{\pi}{4}(d3^2 - d4^2) & Sin &= 2.85 \times 10^{-4} \\
Sout &:= \frac{\pi}{4}(d1^2 - d2^2) & Sout &= 6.373 \times 10^{-4} \\
\\
w &:= 20 \\
\delta &:= 3.5 \cdot 10^{-3} \\
Rin &:= \frac{\delta}{\mu0 \cdot Sin} & Rout &:= \frac{\delta}{\mu0 \cdot Sout} \\
L &:= \frac{w^2 \cdot \mu0}{\delta \left(\frac{1}{Sin} + \frac{1}{Sout} \right)} & L &= 2.828 \times 10^{-5} \\
B &:= \frac{Im \cdot w}{(Rin + Rout) \cdot Sin} & B &= 0.496 \\
\\
h2 &:= 10.3 \cdot 10^{-3} \\
Sok &:= 2h2 \cdot (d2 - d3) & Sok &= 3.935 \times 10^{-4} \\
\frac{Sok}{w} &= 1.967 \times 10^{-5} \\
Dpr &:= 1 \cdot 10^{-3} & N &:= 5 \\
Spr &:= \frac{\pi \cdot Dpr^2 \cdot N}{4} \\
kz &:= \frac{w \cdot Spr}{Sok} & kz &= 0.2
\end{aligned}$$

Рисунок 25 – Результат расчета в пакете Mathcad

По итогам расчета следует, что в катушке должно находиться 5 медных проводов сечением 1 мм^2 , расположенных параллельно в 20 витков. Провода укладываются в две чашки магнитопровода, зазор между которыми составляет 3,5 мм, что является довольно большим. С такими условиями индуктивность получается равной 28 мкГн и индукцией 0,5 Тл в максимуме тока.

3.1.4 Схема источника питания ГТ

В качестве схемы источника питания генератора тока было принято использовать синхронный трехфазный генератор напряжения со средней точкой. После генерации напряжение выпрямляется, поступая на трехфазный выпрямитель (схема Ларионова), а затем полученное постоянное напряжение в районе 500 В поступает на генератор тока [18, 19, 20]. Стоит добавить, что блоки питания МС5ВВ и МС5С также заведены на одну из фаз трехфазного генератора для дальнейшего преобразования напряжения и работы низковольтных устройств и элементов. Схема источника питания генератора тока представлена на рисунке 26.

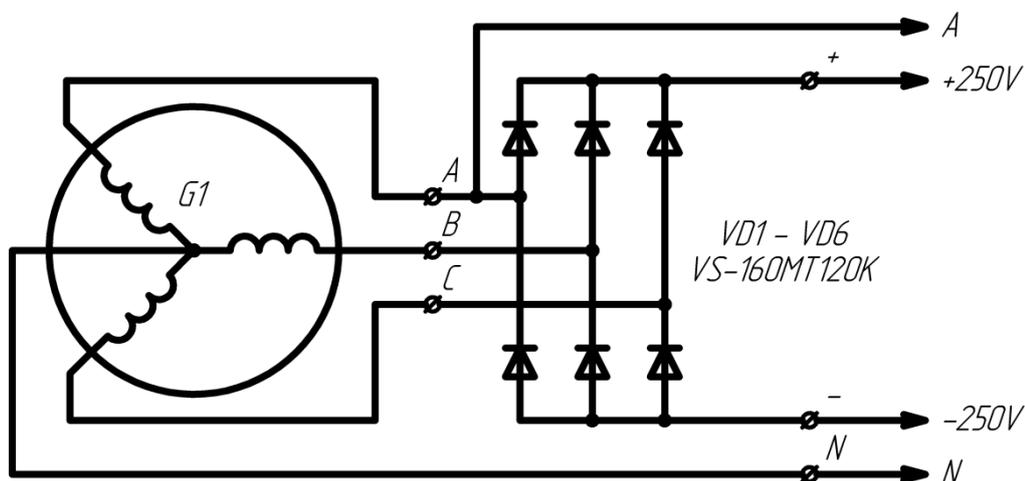


Рисунок 26 – Схема источника питания генератора тока кодоимпульсного сейсмоисточника на LSM

3.1.5 Схема питания подвижной катушки LSM на основе ГТ

Схема питания формирователя тока подвижной катушки LSM на основе генератора тока представлена на рисунке 27. Она состоит из двух каскадов: предварительного и окончного.

Принцип действия данной схемы основывается на формировании фронта импульса тока при помощи силовой пары IGBT-транзисторов в

полумостовом включении. Силовые полупроводниковые приборы работают в ключевом режиме. В зависимости от того, где находится подвижная катушка LSM, ультразвуковой датчик, расположенный на якорной обмотке силового привода, считывает расстояние подвижной части в текущий момент времени и отправляет сигнал в блок управления. После этого блок управления принимает сигнал с датчика положения и с помощью определенного метода математической обработки генерирует импульс на вход генератора тока. Далее сигнал усиливается с помощью входного усилителя напряжения и поступает на один из входов компаратора. Затем компаратор посредством оптоэлектронного прибора отправляет сигнал на вход полумостового драйвера, а тот, в свою очередь, на тот или иной транзистор. Фактически схема работает в ключевом режиме, что и соответствует в некоторой степени названию «кодоимпульсный метод».

Очень важно отметить, что системой питания является не один, а именно три генератора тока с другими элементами, приведенными в структурной схеме системы питания, которые и управляют тремя группами LSM кодоимпульсного сейсмоисточника.

Также можно добавить, что сейсмоисточник с такой электрической схемой способен работать не только в кодоимпульсном режиме, но еще и в режиме вибратора.

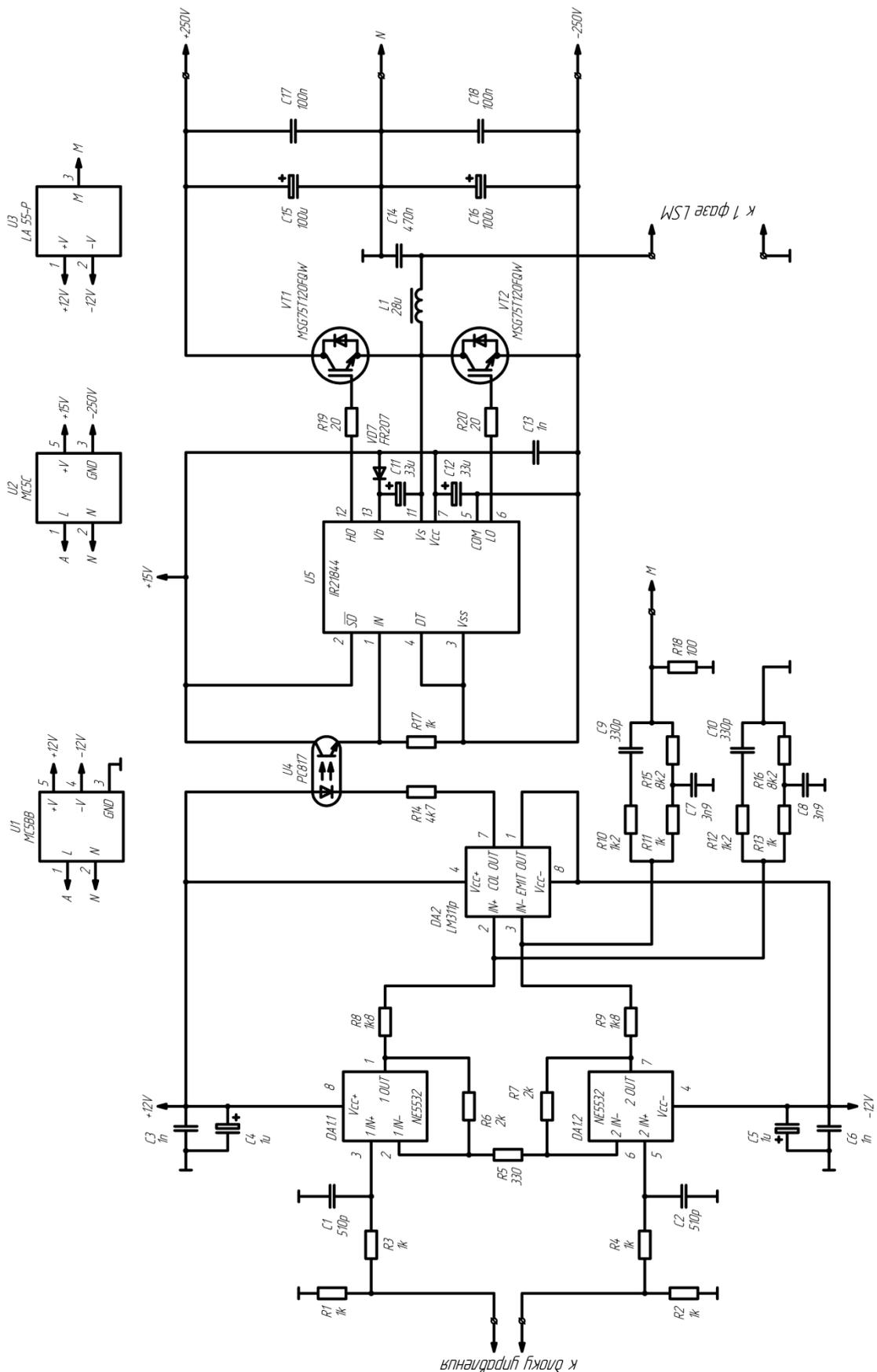


Рисунок 27 – Схема электрическая принципиальная генератора тока кодоимпульсного сейсмоисточника на LSM

На сдвоенном операционном усилителе NE5532 собран так называемый «балансный усилитель». Под словом «балансный» подразумевается, что эталонный сигнал на входе раздваивается, и затем один из них инвертируется. В обоих сигналах, как ни странно, помехи накапливаются одинаково. Затем в приемном устройстве один из двух сигналов снова инвертируется, и после этой операции они складываются в один. Результирующий сигнал в конечном итоге складывается из двух инвертированных, а их собранные помехи взаимовычитаются. Главное достоинство подобного метода передачи сигнала заключается в том, что при таких операциях можно использовать длинный кабель, тем самым даже при достаточно низком уровне сигнала заметных помех не наблюдается.

Коэффициент усиления по напряжению балансного усилителя составляет примерно 16 дБ и задается соотношением значений сопротивлений резисторов $R5, R6, R7$. Амплитудно-частотная характеристика задается элементами двух входных ветвей, а именно: $R1, R3, C1$ и $R2, R4, C2$. Идентичные сигналы с выходов сдвоенного операционного усилителя поступают в компаратор вместе с сигналами, сформированными цепью обратной связи (ОС) по напряжению, которая уменьшает нелинейные искажения. Компаратор, обрабатывая сигналы с усилителя и цепи ОС, создает цифровой сигнал на полумостовой драйвер с помощью организованной оптотранзисторной гальванической развязки, которая фактически является многофункциональной защитой низковольтной части от высоковольтной. Номинал резистора выбран таким образом, чтобы при открытии транзистора через эмиттерный переход протекал ток 15 мА. Для формирования импульса тока в транзистор полумостовой драйвер имеет лишь один вход для формирования двух выходных противофазных сигнала, что является его достоинством, т.к. степень интеграции схемы генератора тока становится ниже. Также IR21844 имеет такую микросхемотехнику, что сквозной ток со стороны сильноточной части исключается внутри микросхемы специальными аппаратными средствами задержки. Как было

описано в разделе 3.1.3, в схеме генератора тока находится последовательный колебательный контур в виде -цепи, исполняющая роль в основном роль фильтра и задающего звена в управлении транзисторным полумостом. Между реактивными элементами $L1$ и $C14$ расположен датчик тока, который формирует сигнал обратной связи пропорционально току в обмотке $L1$ и затем сравнивается с входным сигналом компаратора. Стоит отметить, что датчик расположен именно между реактивными элементами, а не после конденсатора $C14$ в связи с тем, что некоторые высокочастотные составляющие тока будут зашунтированы этим конденсатором и не попадут в датчик тока, таким образом, это нарушит четкость срабатываний компаратора. Для более четкого срабатывания он расположен между реактивными элементами, чтобы все гармоники тока завелись на него и затем на обратную связь. Конденсаторы $C15, C16$, а также $C17, C18$ используются в качестве фильтров низкочастотных и высокочастотных пульсаций токов. Через $C15, C16$ хорошо проходят высокие частоты: конденсаторы имеют маленькие тангенс угла диэлектрических потерь и паразитную индуктивность. Через $C17, C18$, соответственно, хорошо проходят низкие частоты токов.

На основе схемы генератора тока (рисунок 27) разработан конструктив устройства: печатная плата и ее сборочный чертеж. Разводка печатной платы осуществлялось в комплексной системе САПР Altium Designer. Печатная плата имеет прямоугольную форму размером 200x70 мм. Результат трассировки печатной платы на стеклотекстолите фольгированном двустороннем представлен на рисунках 28 и 29, а эскиз сборочного чертежа – на рисунке 30.

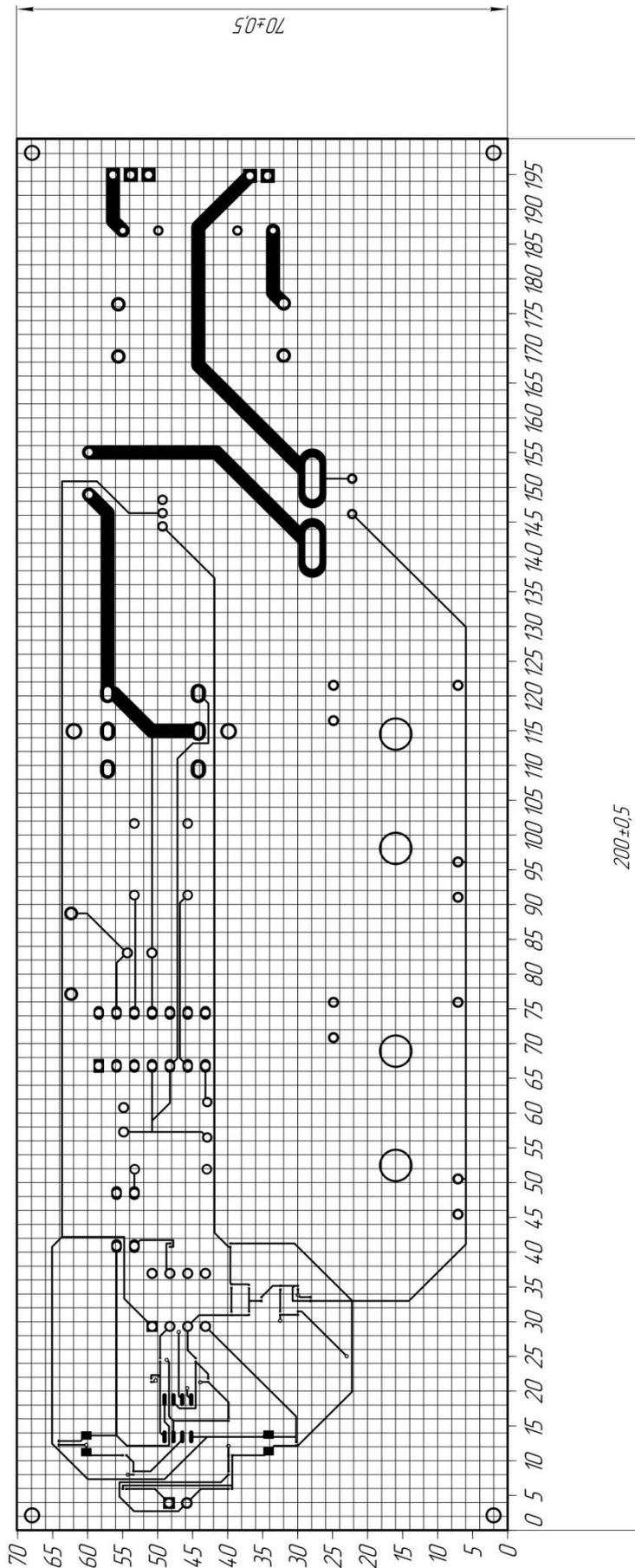


Рисунок 28 – Вид печатной платы сверху

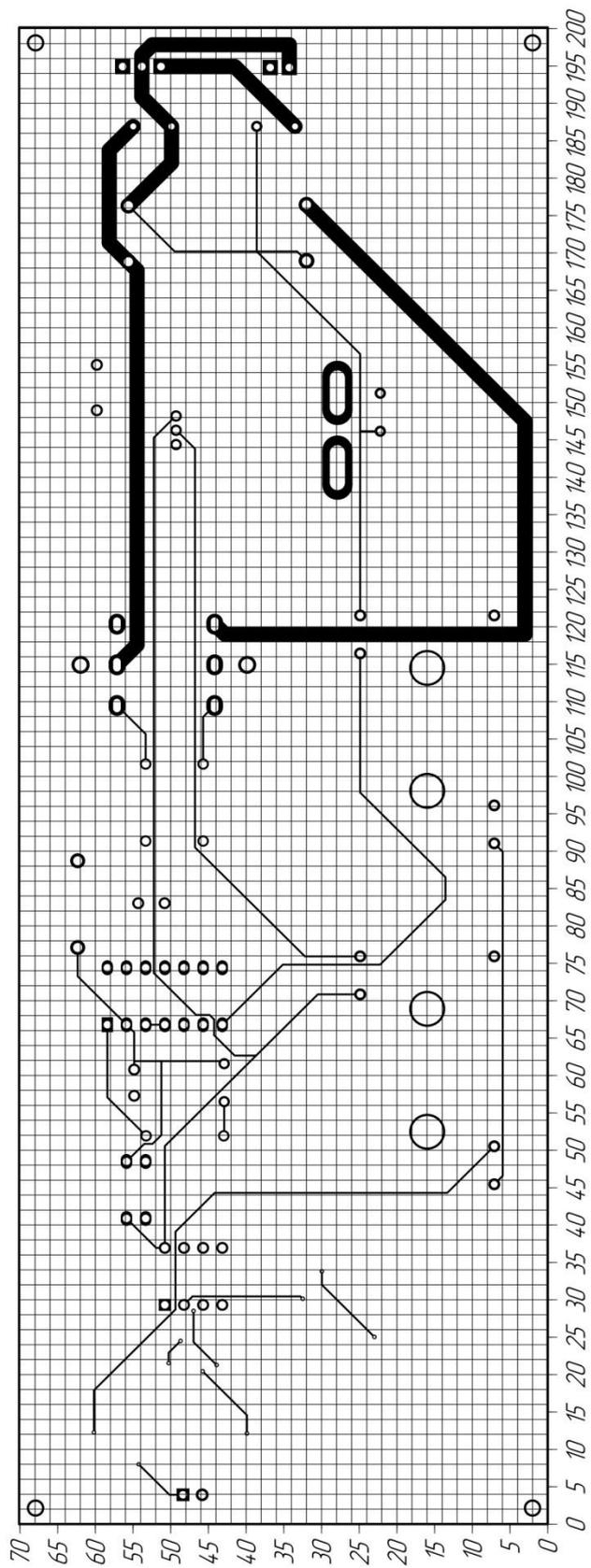


Рисунок 29 – Вид печатной платы снизу

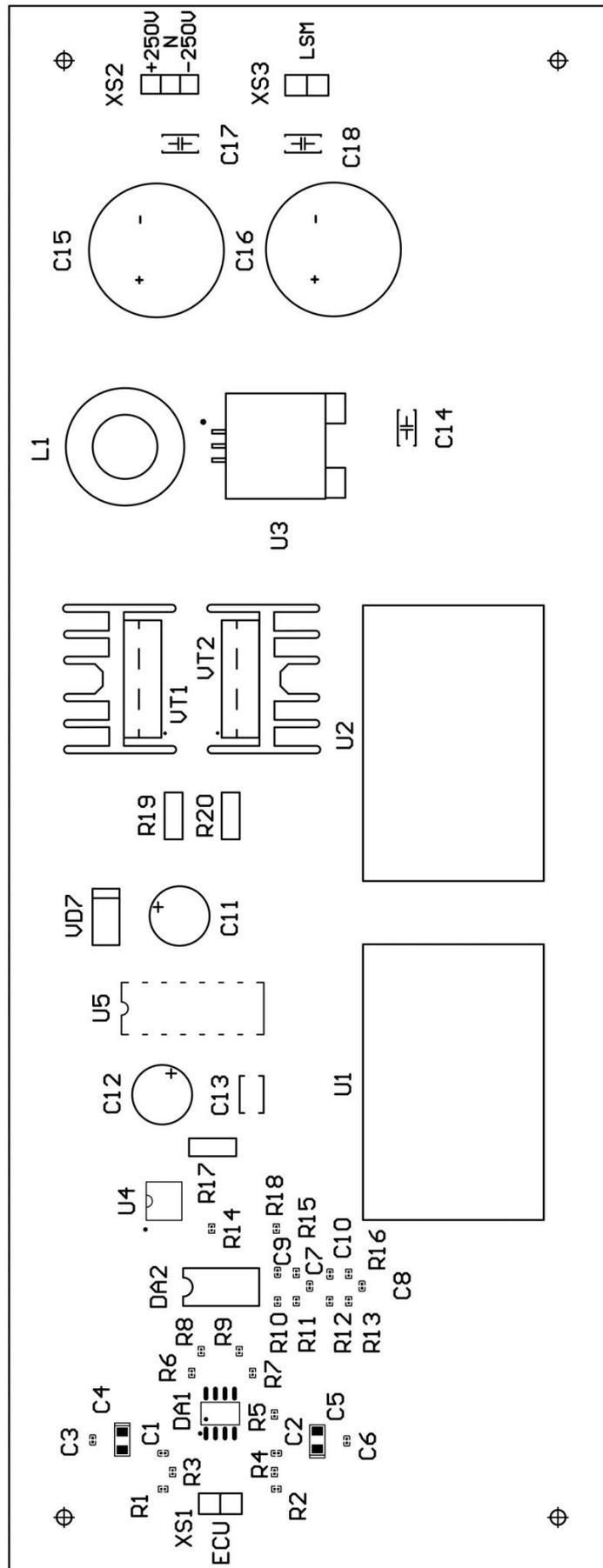


Рисунок 30 – Эскиз сборочного чертежа

Также возможностями печатной платы предусмотрено экранирование микросхем низковольтной части схемы генератора тока с помощью земляных полигонов и переходных отверстий вокруг них.

3.2 Математическое моделирование схемы ГТ

Разработка математической модели схемы генератора тока осуществлялась в программной среде Scilab. Модель симулирует работу генератора тока, формирующего разрядные импульсы тока разнополярной величины (рисунок 31). В качестве блока управления представлен генератор трапецеидальных импульсов, формирующий эталонный сигнал. Математическая модель включает в себя все те элементы, технические характеристики которых приближены к выбранным компонентам [5]. Временные диаграммы, иллюстрирующие работу генератора тока, представлены на рисунках 32 и 33.

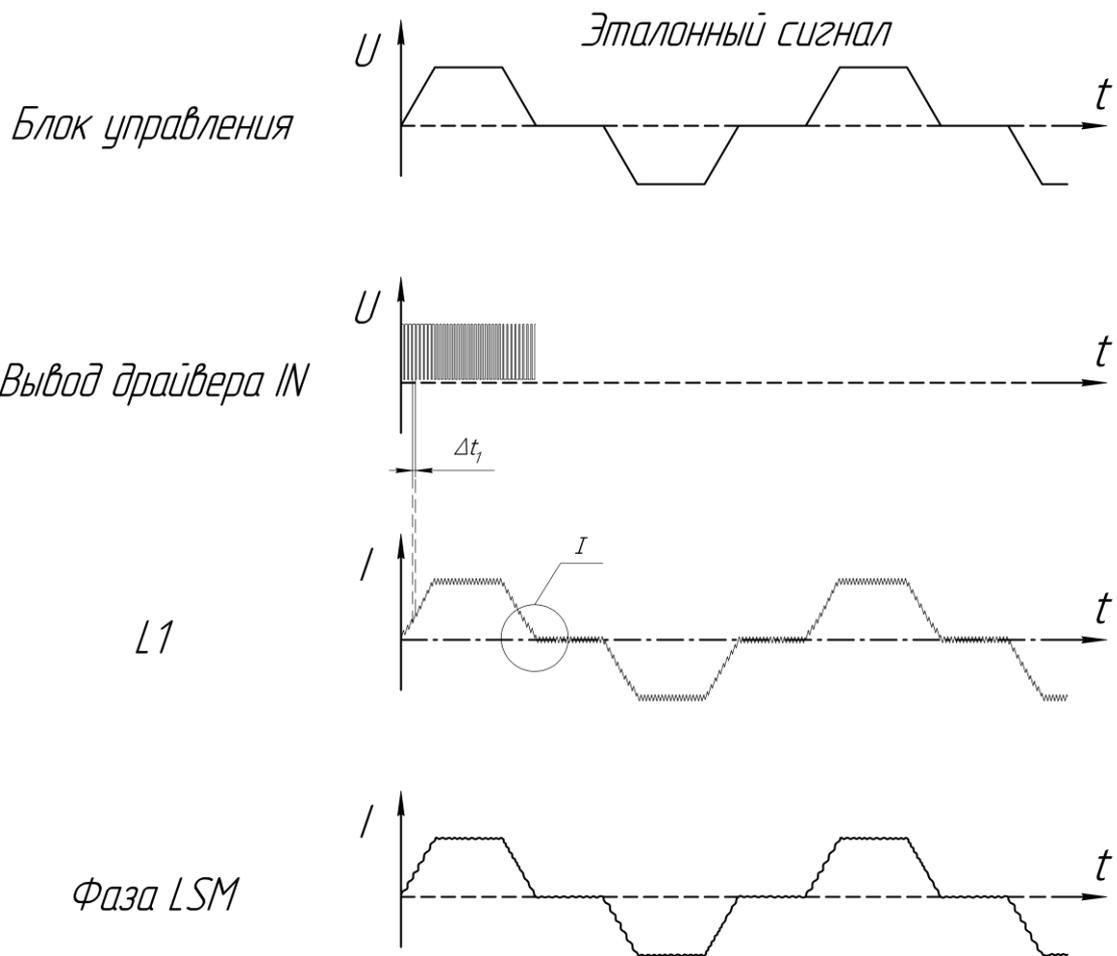


Рисунок 32 – Алгоритм работы генератора тока

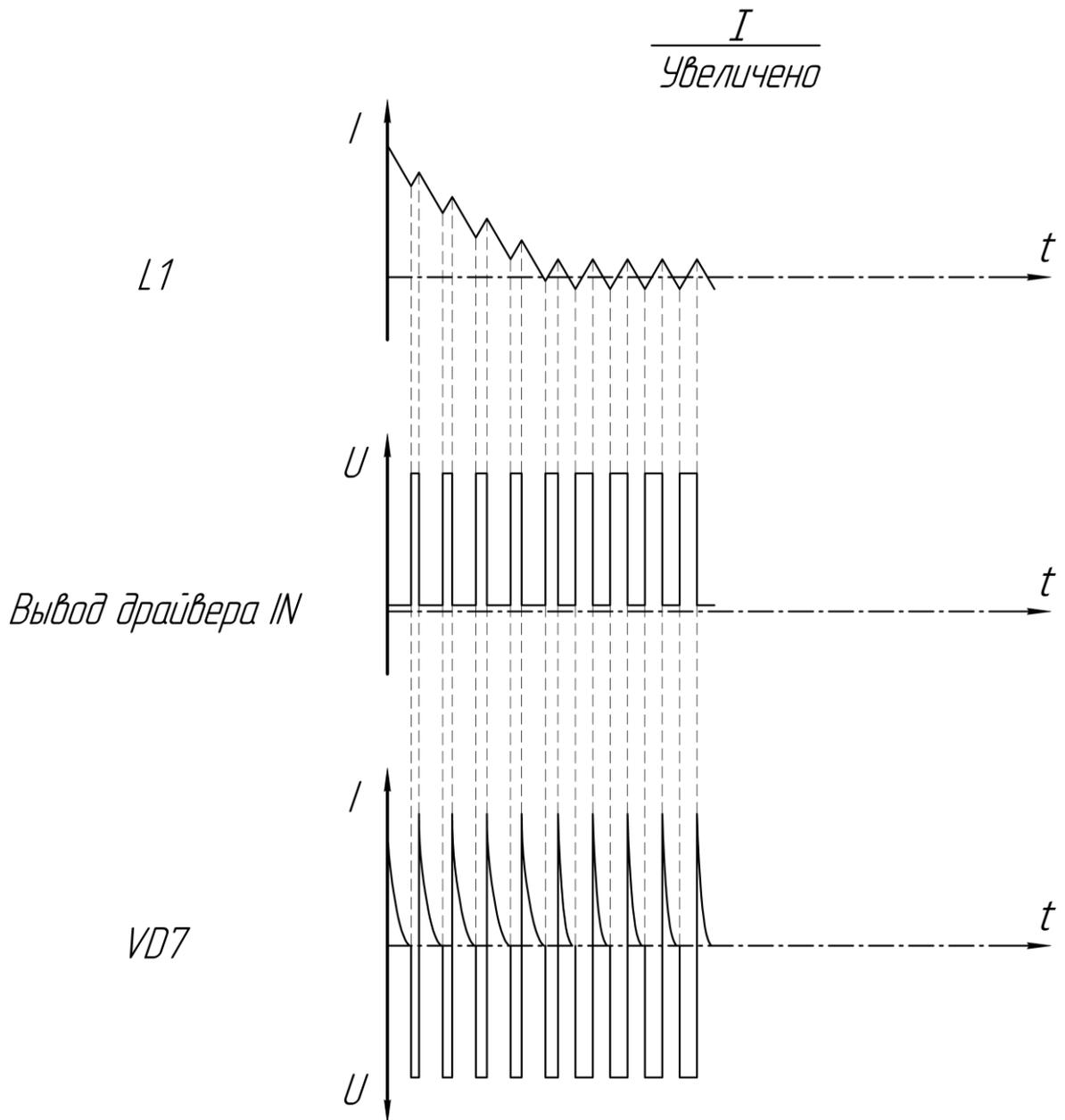


Рисунок 33 – Алгоритм работы генератора тока

Последовательность кодовых импульсов управления транзисторами формируется блоком управления, который реализует алгоритм работы генератора тока. Последовательность настраивается в соответствии с параметрами подвижной обмотки LSM. Частота подвижной обмотки LSM задается эталонным сигналом, поступающим от генератора зарядных импульсов (сейсмостанции). Исходя из параметров эталонного сигнала, блок

управления обеспечивает изменение частоты следования импульсов управления транзисторов ГТ. Формирование последовательности импульсов прекращается вместе с прекращением эталонного сигнала или если эталонным сигналом будет задана частота тока подвижной обмотки, являющаяся опасной для ГТ или LSM.

Алгоритм управления генератором тока является релейным. При повышении некоторого порогового значения транзисторы переключаются при достижении определенной величины.

Скорость нарастания сигнала определяется напряжением положительной полярности, а скорость спада – отрицательной полярности. Угол нарастания и спада является примерно одинаковым в силу равенства абсолютных значений напряжений. Амплитуда отклонения уровня срабатывания транзисторов напрямую зависит от цепи задержки в виде пассивного фильтра второго порядка из -цепи. При индуктивности 28 мкГн скорость нарастания (или спада) равняется около 8 А/мкс без учета временных задержек других электронных звеньев.

Поскольку частота переключения транзисторов является крайне высокой, временные характеристики некоторых элементов схемы генератора тока представлены на рисунке 34. Например, сигнал на диоде находится в одной фазе с сигналом IN полумостового драйвера. Когда на выводе IN положительный сигнал, диод $VD7$ находится в открытом состоянии, а значит, потенциал на эмиттере верхнего плеча полумоста является высоким, и к диоду $VD7$ через конденсатор $C11$ прикладывается напряжение обратной полярности. Когда на входе IN отрицательный сигнал, открывается нижний транзистор и напряжение на диоде близко к нулю. В момент полной разрядки появляется кратковременный ток $VD7$, который приводит к некоторой подзарядке конденсатора $C11$. После этого диод закрывается обратным напряжением, а в момент отпирания снова открывается, и далее ситуация повторяется.

Таким образом, в данном разделе был проведен подбор элементной базы для схемы генератора тока, осуществлен математический расчет катушки, разработана схема источника питания ГТ и непосредственно ГТ, а также конструктив устройства.

4 Обеспечение электромагнитной совместимости

Под электромагнитной совместимостью (ЭМС) любой электронной системы подразумевается способность системы нормально функционировать в заданной электромагнитной обстановке, не создавая при этом недопустимых помех другим средствам [23].

Надежная работа электронной аппаратуры является актуальной частью проблемы обеспечения электромагнитной совместимости электрооборудования.

Электромагнитная совместимость характеризуется не только взаимодействием устройств автоматики с окружающей средой, но и взаимодействием элементов этих устройств между собой.

Таким образом, электромагнитную совместимость можно определить как способность электрической установки или ее элементов функционировать в заданной электромагнитной обстановке так, чтобы не вызывать недопустимого электромагнитного воздействия на окружающую среду.

Электромагнитная помеха – случайное электромагнитное воздействие сторонней системы на рассматриваемую систему через паразитные или функциональные связи. В зависимости от того, находятся ли источник помех и испытываемая его воздействие система в едином пространстве, или они разделены, подразделяют помехи на внутренние и внешние по отношению к системе.

Цель работ по электромагнитной совместимости при проектировании, изготовлении и эксплуатации средств автоматизации состоит в устранении возможных недостатков, обусловленных электромагнитной несовместимостью. Эти задачи решаются путем организованного применения технически реальных мер при оправданных затратах [23].

Принципиальные мероприятия по повышению электромагнитной совместимости:

1. Подавление возникновения помех путем воздействия на источник

помех.

2. Подавление или ослабление помех в тракте распространения.

3. Повышение помехозащищенности и устойчивости слабого звена путем осуществления мероприятий, влияющих на условие проникновения помехи и интенсивность воздействия проникающей помехи.

4. Разделение во времени режимов появления помехи и функционирования чувствительного элемента [23].

4.1 Источники электромагнитных помех

Все помехи делятся на две группы:

- естественные источники;
- искусственные источники.

Естественные источники: разряды атмосферного электричества, заряды статического электричества между телами, получившими заряды разной полярности. Все другие естественные источники для системы автоматики не существенны.

Искусственные источники: все процессы при нормальных рабочих и аварийных режимах работы приборов, машин, электроэнергетических установок, устройств информационной техники, находящихся вблизи средств автоматизации.

Внутри прибора указанные помехи попадают совместно с полезными сигналами или с напряжением питания по проводам через параметры U и I , либо через поле. В дополнение к этим помехам, вызванным внешними источниками, могут возникнуть и внутренние помехи, распространяющиеся по проводам или в виде поля внутри системы.

Внутренние источники помех в системе:

- напряжение питания с частотой 50 Гц;
- высокочастотные и низкочастотные тактовые сигналы;
- коммутационные процессы;
- магнитные поля ходовых механизмов;

– изменения потенциала питания устройств электроники и др.

Каждое место спайки, скрутки или резьбового соединения двух различных материалов представляет собой термоэлемент, термонапряжение которого изменяется в пределах 40 мкВ при изменении температуры на 1 °С [23].

4.2 Устройства и мероприятия по обеспечению электромагнитной совместимости

Как правило, уже на ранних этапах создания электронных приборов и устройств учитываются необходимые требования и правила для обеспечения электромагнитной совместимости. При должном отношении к этому вопросу производителем гарантируется долгосрочная эксплуатация разрабатываемой продукции, минимальные дефекты и ограничения непосредственно в работе

Это обеспечивается:

– использованием промышленных элементов, показатели которых (помехоустойчивость, эмиссия помех) соответствует ожидаемым параметрам окружающей среды. А для промышленных устройств большой мощности – требуемым уровням совместимости в точке присоединения к сети;

– целесообразным выбором и размещением измерительных, управляющих и регулирующих приборов, соединений между ними и коммуникационных элементов с учетом имеющихся в устройстве электроэнергетических элементов (коммутационных, трансформаторных, электротехнологических, подъемных механизмов, лифтов и т.д.);

– проектированием здания (его конструкции, расположения помещений, экранирования помещений и здания, кабельных трасс);

– реализацией ряда дополнительных технических и организационных мероприятий. [23]

4.2.1 Пассивные помехоподавляющие и защитные компоненты

При обеспечении электромагнитной совместимости во многих случаях необходимо ослабить эмиссию помех, обусловленную гальваническими связями с источниками, или проникновение таких помех через чувствительный элемент, предотвратить возникновение перенапряжений в потенциальных источниках помех и ограничить опасные для изоляции перенапряжения или для функционирования напряжения помех, а также ослабить излучаемые источником электромагнитные поля и предотвратить проникновение этих полей через чувствительные элементы. Для этого используются пассивные помехоподавляющие устройства в виде фильтров, ограничителей напряжения и экранов [14]. В зависимости от задачи они могут быть установлены непосредственно у чувствительного элемента (рисунок 34,б) или у источника помех (рисунок 34,в). Эффективность таких компонентов обычно измеряется соотношением Z/Z_r .

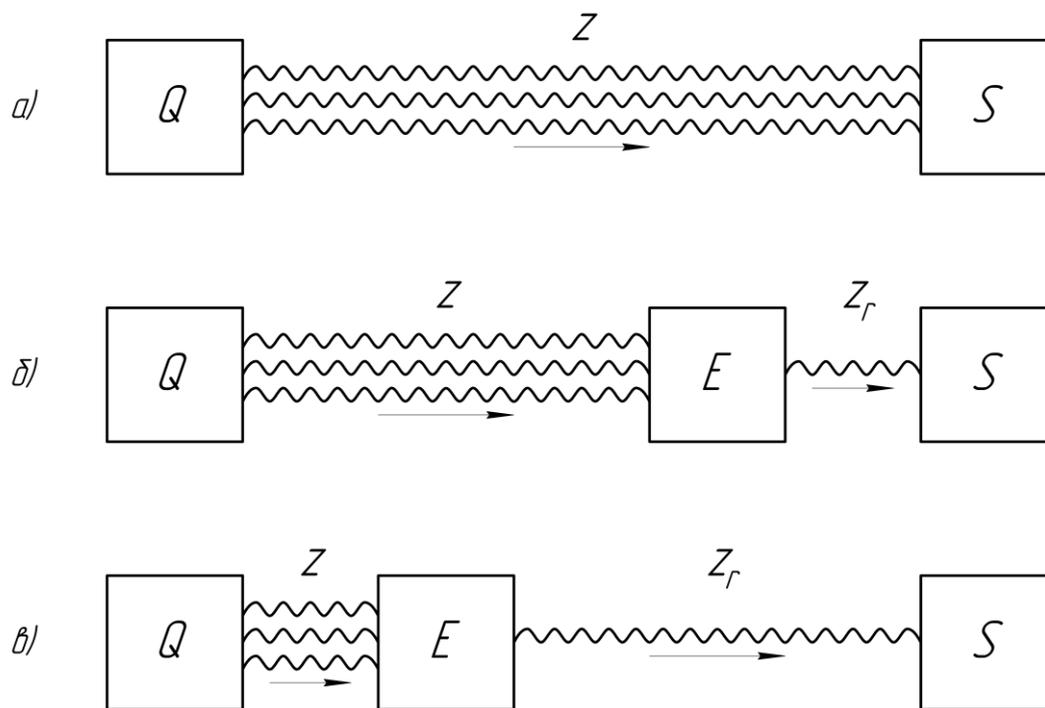


Рисунок 34 – Графическое отображение взаимного расположения источника помех Q, приемника S и защитного компонента (экрана) E: а) защита отсутствует; б) защита приемника; в) защита источника

4.2.2 Экранирование

Экран служит для ослабления электрических, магнитных и электромагнитных полей. Чтобы исключить их проникновение в электронные элементы, кабели и здания, и наоборот, чтобы подавить исходящие из промышленных средств и устройств помехи, обусловленные полями [23].

Эффективность экранирования зависит от частоты поля, электропроводности и магнитной проницаемости материала экрана, конфигурации и размера экрана [23].

Как правило, специальный защитный элемент в виде экранирующего покрытия обычно располагается между источником и приемником помех. Функция защитного экрана заключается в том, чтобы ослаблять в той или иной мере уровень воздействия электромагнитного поля (или его частных случаев). Пример экранирования токовых контуров представлен на рисунке 35.

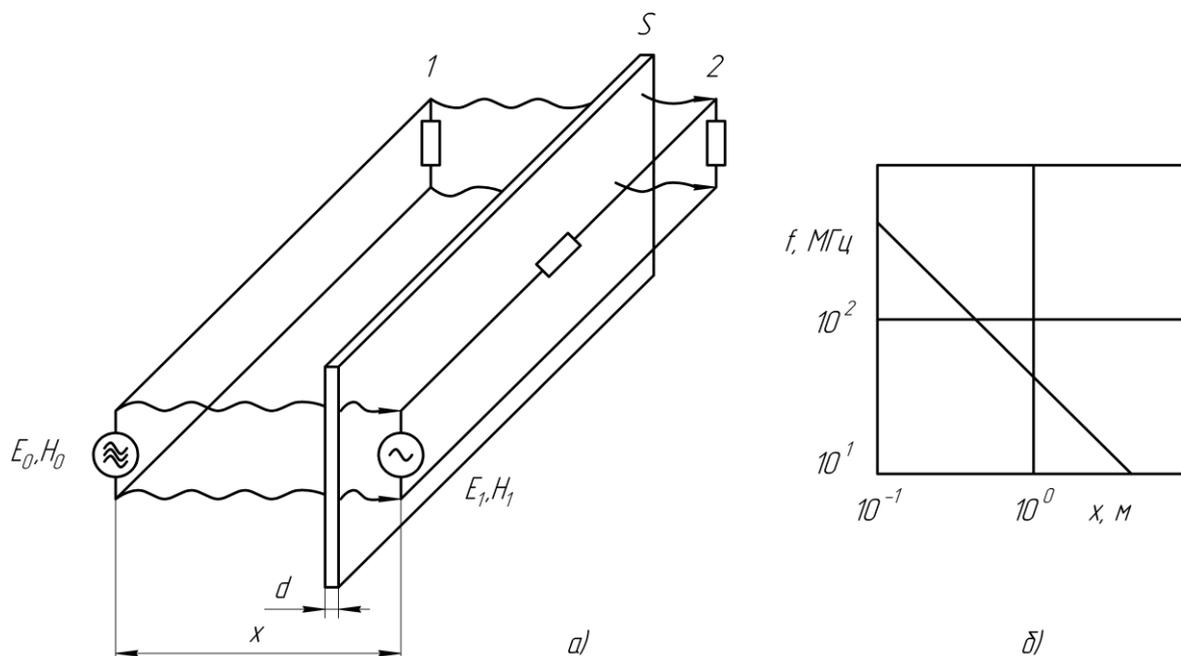


Рисунок 35 – Графическое отображение экранирования токовых контуров от внешних электрических и магнитных полей: а) принципиальное расположение контуров 1, 2 и защитного компонента (экрана) S; б) граница между условиями ближнего (нижняя левая часть) и дальнего (верхняя правая часть) полей

4.2.3 Применение защитной конструкции

Основная цель проведения мероприятий по созданию защитной конструкции заключается в следующем:

- обеспечить устройству собственную устойчивость к помехам;
- совместно с другими техническими мероприятиями обеспечить защиту от электромагнитных полей и статического электричества;
- снизить излучение устройства, вызванное, например, тактовыми сигналами или коммутационными элементами, в окружающую среду или уменьшить его до приемлемого уровня.

В большинстве случаев сформированные мероприятия по применению защитных конструкций включают в свой состав некий блок из защитного материала с индивидуальной внутренней и внешней конфигурацией.

Как правило, корпус устройства может разделяться на некоторое количество зонных составляющих, представленных на рисунке 36. Где А – самая оборудованная зона, В – средняя зона, которая также может иметь название «полупустая зона», а С – так называемая «пустая зона», которая, по большей части, ничем не оборудована.

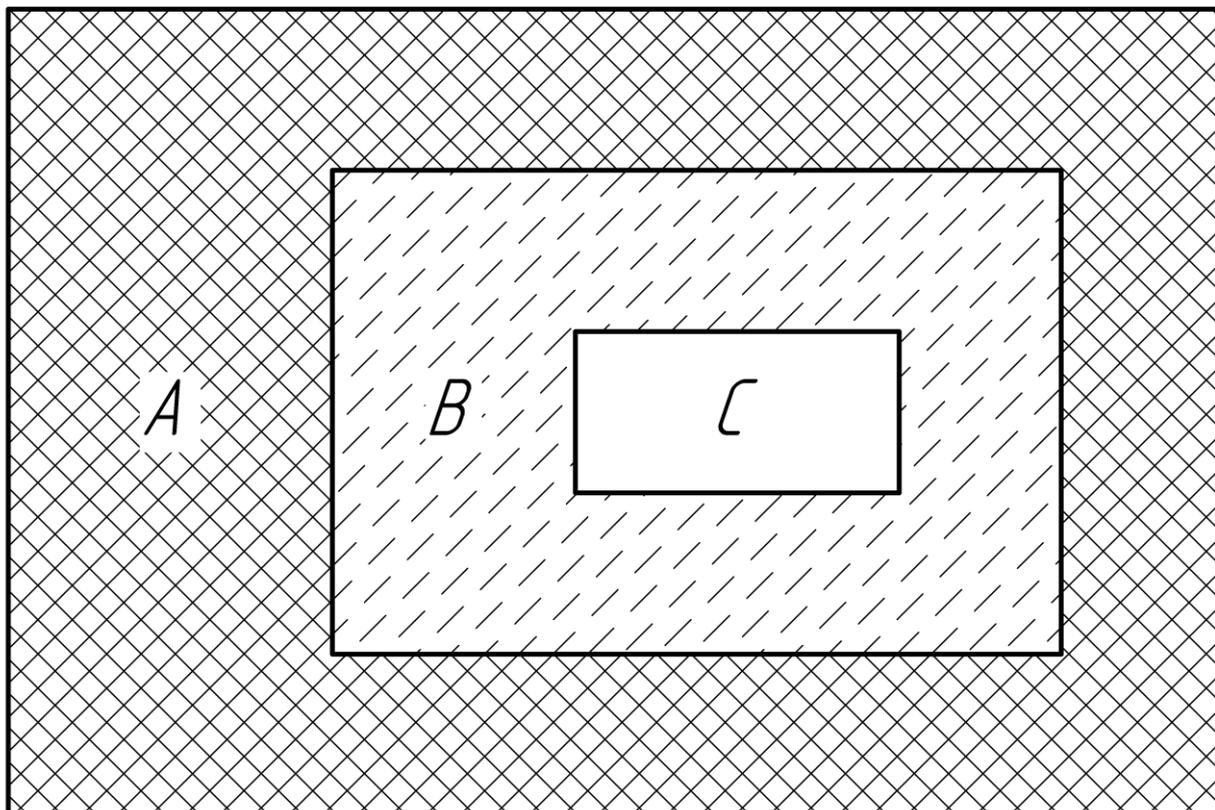


Рисунок 36 – Пример деления корпуса устройства по зонам электромагнитной обстановки: А – зона внешнего пространства; В – зона компоновки силовой части устройства; С – пустая зона

Чаще всего пустая зона С не имеет или почти не имеет никаких сигнальных проводов, которые могут быть связаны с оборудованием зоны А. Связь между ними обеспечивается так называемыми «световодами», т.е. оптоволоконной связью.

Подобной организацией по защитным конструкциям различного типа широко обладают датчики в силу имеющихся индивидуальных особенностей и имеющихся технических тенденций.

Таким образом, в данном разделе были предложены различные меры по обеспечению электромагнитной совместимости электронных устройств с целью обеспечения их согласованной работы.

Заключение

В результате выполнения выпускной квалификационной работы была разработана система питания для кодоимпульсного сейсмоисточника с электромагнитным приводом на линейном синхронном двигателе.

На основе обзорного анализа возможных схмотехнических решений и особенностей электромеханического преобразователя на LSM разработана структурная схема системы питания, которая включает в себя необходимые элементы для эффективной и исправной работы сейсмоисточника.

Разработана электрическая принципиальная генератора тока в соответствии со структурной схемой, составлен перечень элементов. Приведено описание процесса выбора электронной компонентной базы.

На базе электрической схемы разработана и разведена печатная плата, составлена спецификация.

Проработаны вопросы о возможной электромагнитной обстановке. Предложены различные меры по обеспечению электромагнитной совместимости электронных устройств.

Результаты работы опубликованы на конференции «Студенческие Дни науки в ТГУ» : научно-практическая конференция (Тольятти, 1-30 апреля 2024 года) [13].

Список используемой литературы и используемых источников

1. А. с. 1508784, СССР, МПК G01V 1/143. Источник сейсмических волн / В.В. Ивашин, Н.А. Иванников, С.А. Симкин и А.К. Кудинов (СССР); Тольятт. политехн. ин-т; № 4352256/31-25; заявл. 30.12.87; д. с. п.
2. А. с. 1746342, СССР, МПК G01V 1/053. Источник сейсмических сигналов. / С.А. Симкин и А.К. Кудинов (СССР); Тольятт. политехн. ин-т; № 4841467/25; заявл. 22.06.90; опубл.: 07.07.92, Бюл. № 25
3. Г. С. Батуев, Ю. В. Голубков, А. К. Ефремов, А. А. Федосов, Инженерные методы исследования ударных процессов / Москва : Изд-во Машиностроение, 1969.
4. Гликман О. Г. Сейсморазведка (физические основы) [Электронный ресурс] // НТФ "ГЕОФИЗПРОГНОЗ" 20 августа 2012, Санкт-Петербург. URL: <https://newgeophys.spb.ru/ru/article/seysmorazvedka/> (дата обращения: 17.06.2021)
5. Использование метода переменных состояния для технических расчетов динамических процессов. А.А. Подоров, А.В. Прядилов, С.А. Угаров // Всероссийская студенческая научно-практическая междисциплинарная конференция «Молодежь. Наука. Общество»: Тольятти, ТГУ 2023. (18.12.2023)
6. Кудинов А.К., Методы анализа и расчет электронных схем на ЭВМ : учеб. пособие / А.К. Кудинов. – Тольятти : ТГУ, 2007. – 174 с.
7. Кудинов, А.К. Мощный транзисторный преобразователь для заряда емкостного накопителя энергии / А.К. Кудинов, А.В. Прядилов, К.Х. Узбеков // Наука – производству. - 2004. - №4(72). - С.54-56.
8. Линейный синхронный двигатель [Электронный ресурс] URL: <https://www.servotechnica.ru/catalog/type/brand/index.pl?id=91#:~:text=Линейны й%20синхронный%20двигатель%20-%20это,пластину%20редкоземельных%20магнитов%20чередующейся%20полярности> (дата обращения: 03.03.2024)
9. Линейный двигатель [Электронный ресурс] URL:

https://translated.turbopages.org/proxy_u/en-ru.ru.eec94e33-666179d4-96b3389e-74722d776562/https/en.wikipedia.org/wiki/Linear_motor (дата обращения: 04.03.2024)

10. Методические рекомендации к технической инструкции по наземной сейсморазведке при проведении работ на нефть и газ. [Электронный ресурс] // Министерство природных ресурсов России. 2002. URL: <https://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-metodicheskie-rekomendacii-po-nazemnoj-sejsmorazvedke-pri-provedenii-rabot-.pdf> (дата обращения: 17.06.2021)

11. Мощные полупроводниковые приборы: Диоды: Справочник / Б.А. Бородин, Б.В. Кондратьев, В.М. Ломакин и др.; Под ред. Голомедова. – М.: Радио и связь, 1985. – 400 с.

12. Мощные полупроводниковые приборы. Транзисторы: Справочник Б.А. Бородин, В.М. Ломакин, В.В. Мокряков и др.; Под ред. А.В. Голомедова.-М.: Радио и связь, 1985.-.560с., ил

13. Особенности системы питания кодоимпульсного сейсмоисточника на LSM. А.А. Подоров, А.К. Кудинов // «Студенческие Дни науки в ТГУ» : научно-практическая конференция (Тольятти, 1-30 апреля 2024 года) : Сборник студенческих работ / Тольятти : Изд-во ТГУ, 2024. – 1 оптический диск.

14. Пассивные помехоподавляющие и защитные компоненты [Электронный ресурс] URL: <https://studfile.net/preview/4241819/page:29/> (дата обращения: 24.03.2024)

15. Пат. 2028646, Российская Федерация, МПК6 G01V 1/02. Источник сейсмических волн / Ивашин В.В.; Симкин С.А.; Кудинов А.К.; Тольятт. политехн. ин-т. - № 4939488/25; заявл. 29.05.91; опубл. 09.05.95, Бюл. № 4.

16. Пат. 2457509 РФ, МКИ 7G 01 V 1/02. Кодоимпульсный сейсмоисточник / Ивашин В.В., Кудинов А.К., Иванников Н.А.; опубл.

27.07.12, Бюл. № 12

17. Проектирование мощных короткоходовых импульсных электромагнитных двигателей [Текст] : монография / В. П. Певчев, В. В. Ивашин ; М-во образования и науки Российской Федерации, Тольяттинский гос. ун-т, Ин-т энергетики и электротехники, Каф. "Пром. электроника". - Тольятти : Изд-во ТГУ, 2012. - 141 с. : ил., табл.; 21 см.; ISBN 978-5-8259-0636-2

18. Силовая электроника / Ф. Чайл, И. Герман и др. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 384 с.

19. Силовые полупроводниковые приборы. Пер. с англ. Под ред. В.В. Токарева. Первое издание. – Воронеж: «Элист», 1995 г. – 664 с.

20. Семёнов Б.Ю. Силовая электроника: от простого к сложному. – 2 изд., испр - М.: СОЛОН-Пресс, 2015. – 416с.: ил

21. Тарировка, калибровка, градуировка [Электронный ресурс] URL: https://www.lcard.ru/lexicon/calibration_gauging (дата обращения: 15.02.2024)

22. Типы датчиков движения [Электронный ресурс] URL: <https://spectrmsk.ru/news/types-of-motion-sensors/> (дата обращения: 11.12.2023)

23. Электромагнитная совместимость: учебное пособие / сост.: Д.М. Валиуллина, В.К. Козлов. – 2-е изд., доп. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2018. – 95 с

24. Electrical resistance and conductance [Электронный ресурс] URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Electrical_resistance_and_conductance (дата обращения: 17.05.2024)

25. Harris C. M., Crede C. E., Shock and Vibration Handbook, Vol. 2, McGraw-Hill Book Co, 1961, p. 25.24-25.30

26. Junkichi Inone, Yoshiaki Araki, Yukimasa Okada. On the Selsynchronization of Mechanical Vibrators (part 4, A Number of Unbalanced Rotors Arranged in Space). Transact of the Japan Society of Mechanical Engrs.,

1975, 41, No. 350.

27. Linear Motor. Core Type Linear Motor. Coreless Type Linear Motor / 2021. 01 LS ELECTRIC Co.,Ltd. All rights reserved. / (01) 2021. 01 Human Power [Электронный ресурс] URL: <https://www.servotechnica.ru/files/doc/documents/file-2263.pdf> (дата обращения: 07.04.2024)

28. Rik Noorlandt , Guy Drijkoningen , Johan Dams , and Rob Jenneskens. A seismic vertical vibrator driven by linear synchronous motors / GEOPHYSICS, VOL. 80, NO. 2 (MARCH-APRIL 2015); P. EN57–EN67, 17 FIGS., 1 TABLE. 10.1190/GEO2014-0295.1

29. V.P. Nerubatskyi, O.A. Plakhtii, D.A. Hordiienko and H.A. Khoruzhevskyi. Study of the energy parameters of the system solar panels – solar inverter – electric network / ICSF 2023 IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 1254 (2023) 012092 IOP Publishing doi:10.1088/1755-1315/1254/1/012092

Приложение А

Перечень элементов к схеме электрической принципиальной генератора
тока

		Поз. обозначение	Наименование	Кол.	Примечание		
Перв. примен.		<i>Конденсаторы</i>					
		C1, C2	СС0603JRNPO9BN511 - 510 пФ	2			
		C3, C6	C3225B102K202NT2 - 1 нФ	2			
		C4, C5	VGA-50V010MD60-R - 1 мкФ	2			
		C7, C8	MA0805XR392K251PR - 3,9 нФ	2			
		C9, C10	СС0805JRNPO9BN331 - 330 пФ	2			
		C11, C12	K50-35 - 33 мкФ	2			
		C13	СС-102/500 - 1 нФ	1			
		C14	ЕCQE4474JF - 470 нФ	1			
		C15, C16	LGX2H101MELZ40 - 100 мкФ	2			
C17, C18	S104Z93Z5VL83LOR - 100 нФ	2					
Справ. №		<i>Микросхемы</i>					
		DA1	NE5532	1			
		DA2	LM311P	1			
		<i>Катушки индуктивности</i>					
		L1	Изготавливается самостоятельно: 28 мкГн, 100 А	1			
		<i>Резисторы</i>					
		R1-R4, R11, R13	RC0402FR-071KL - 1 кОм	6			
		R5	RC0603FR-07330RL - 330 Ом	1			
		R6, R7	RC1206JR-072KL - 2 кОм	2			
		R8, R9	RC0402FR-071K8L - 1,8 кОм	2			
R10, R12	1206S4F1201T5E - 1,2 кОм	2					
R14	R10402L4701FT - 4,7 кОм	1					
R15, R16	RC0805FR-078K2L - 8,2 кОм	2					
Подп. и дата	24-110304.38/09.013.07 ПЭЗ						
	Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		
Инв. № подл.	Разраб.	Подаров					
	Проб.	Прядилов					
	Н.контр.						
	Утв.						
		Генератор тока			Лит.	Лист	Листов
		Перечень элементов				1	2
					ТГУ, гр. ЭЛБ-2002а		

