

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«Тольяттинский государственный университет»

Институт энергетики и электротехники

Кафедра «Промышленная электроника»

11.04.04 – Электроника и микроэлектроника

(код и наименование направления подготовки, специальности)

Электронные приборы и устройства

(направленность (профиль))

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

на тему «Источник питания для кодоимпульсного сейсмоисточника»

Студент

Качалов С.Е.

(И.О. Фамилия)

_____ (личная подпись)

Руководитель

Певчев В.П.

(И.О. Фамилия)

_____ (личная подпись)

Руководитель программы д.т.н., профессор В.В. Ивашин

(ученая степень, звание, И.О.Ф.)

_____ (личная подпись)

Допустить к защите

Заведующий кафедрой

«Промышленная электроника» к.т.н, доцент А.А. Шевцов

(ученая степень, звание, И.О.Ф.)

_____ (личная подпись)

« _____ » _____ 2018 г.

Тольятти 2018

Содержание

Введение.....	4
1. Обоснование актуальности исследования	8
2. Обзор возможных схем зарядного устройства	17
2.1 НЕУПРАВЛЯЕМОЕ ЗАРЯДНОЕ УСТРОЙСТВО С ДРОССЕЛЕМ	18
2.2 НЕУПРАВЛЯЕМЫЙ УДВОИТЕЛЬ ФАЗНОГО НАПРЯЖЕНИЯ	18
2.3 УПРАВЛЯЕМЫЙ ДВУХФАЗНЫЙ УДВОИТЕЛЬ ЛИНЕЙНОГО НАПРЯЖЕНИЯ	19
2.4 ТРЁХФАЗНЫЙ УПРАВЛЯЕМЫЙ УДВОИТЕЛЬ ЛИНЕЙНОГО НАПРЯЖЕНИЯ	20
2.5 ОДНОФАЗНЫЕ УДВОИТЕЛИ НАПРЯЖЕНИЯ	21
3. Коммутирующие схемы системы возбуждения электромагнитного двигателя сейсмоисточника	24
3.1 СИЛОВАЯ СХЕМА НА БАЗЕ ТИРИСТОРА И КОНДЕНСАТОРА	24
3.2 СХЕМА С ЗАШУНТИРОВАННОЙ ОБМОТКОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТА	26
3.4 МОСТОВОЙ ВАРИАНТ СХЕМЫ С РАЗДЕЛЁННОЙ ОБМОТКОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТА. 31	
3.5 МОСТОВОЙ ВАРИАНТ СХЕМЫ С ЕДИНОЙ ОБМОТКОЙ	32
4. Схема зарядного устройства накопителя энергии и его система управления	34
4.1 РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕМЕНТОВ СХЕМЫ ЗАРЯДНОГО УСТРОЙСТВА	36
4.2 РАЗРАБОТКА СХЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЗАРЯДНЫМ УСТРОЙСТВОМ	36
5 Моделирование работы схемы источника питания	43
6 Обеспечение электромагнитной совместимости.....	54
6.1 ИСТОЧНИКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОМЕХ.....	57
6.2 ПРИЧИНА ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОМЕХ	58
6.3 УСТРОЙСТВА И МЕРОПРИЯТИЯ ПО ДОСТИЖЕНИЮ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ	60
6.3.1 Пассивные помехоподавляющие и защитные компоненты	60
6.3.2 Экранирование	61
6.3.3 Применение защитной конструкции.....	64
6.4 ПУТИ УСТРАНЕНИЯ ВЛИЯНИЯ СТАТИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАЗРЯДОВ.....	66
6.5 ЗАЩИТА ОТ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТОВ.....	68

7	Проектная реализация разработки источника питания	70
	Заключение	78
	Список используемой литературы	80

Введение

Область топливной и энергетической промышленности, базирующаяся на активном использовании природных ресурсов, является для Российской Федерации, пожалуй, самой основополагающей частью в сфере экономики. В то время как в мероприятиях по поиску нефтяных и газовых месторождений наиболее важным геофизическим методом является метод использования сейсморазведочных работ (сокращенно сейсмораздка), а в свою очередь главным же ее звеном является источник сейсмических колебаний сокращенно сейсмоисточник, то, следовательно, поиски путей улучшения его эффективности с точки зрения экономики и геофизики имеют повышенную практическую значимость.

Анализ технических источников информации дает информацию о том, что во многих известных конструктивных моделях сейсмоисточников мало внимания уделяется выбору, созданию и проработке схем источников питания для сейсмоисточников. Источник питания является очень важной составляющей частью всей сейсмической установки и во многом определяет характер и качество ее работы, вследствие этого данному вопросу следует уделять особое внимание.

Цель работы состоит в разработке принципиальной схемы источника питания (зарядного устройства) для кодоимпульсного сейсмоисточника.

Актуальность цели подкрепляется малым количеством научных публикаций на данную тематику во публичных изданиях и сборниках, как в Российской Федерации, так и за ее пределами. Также следует отдельно выделить, что повышенное внимание уделяется перспективному методу проведения сейсморазведки на данный момент – методу кодоимпульсной сейсморазведки.

Основными задачами диссертационной работы являются:

1) Определение основных требований к кодоимпульсному сейсмоисточнику, которые обеспечивают эффективное использование механической энергии для возбуждения сейсмических колебаний.

2) Проработка структурной схемы возбуждения электромагнита сейсмоисточника и методика выбора параметров элементов ее структуры: зарядного устройства, коммутирующей цепи, а также управляющего устройства.

3) Разработка модели зарядного устройства, получение рабочих характеристик исследуемого зарядного устройства.

4) Исследование электромагнитной совместимости составных элементов зарядного устройства.

5) Исследование разработки источника питания с точки зрения проекта

Для достижения цели проведены следующие работы:

1. Построение компьютерной модели схемы источника питания, которая с достаточной точностью имитирует его функционирование. Проработка режима работы источника питания и его алгоритма управления.

2. Исследование влияния параметров элементов схемы источника питания на скорость осуществления заряда конденсаторного накопителя энергии.

В данной работе активно применялся метод компьютерного моделирования с использованием мощностей современных средств вычислительной техники.

Научная новизна.

1. Разработанная компьютерная модель зарядного устройства конденсаторного накопителя энергии, которая сочетает в себе положительные свойства двух классических схем импульсных преобразователей постоянного напряжения.

Практическая ценность

1. Разработанное устройство способно применяться на реальных силовых сейсморазведочных установках и поддерживать качество проведения сейсморазведочных работ на должном уровне.

2. Алгоритм построения коммутации силовых ключей источника питания даёт значительное улучшение качества заряда накопителя энергии, что немало важно при использовании установки в полевых условиях.

Структура диссертации

Диссертация состоит из пяти глав, посвящённых отдельным вопросам при разработке источника питания. В каждой из глав формируется и исследуется определенная задача, которая производится путем определенного вида исследования, проведения анализа и затрагивает области знаний, которые позволяют найти необходимые решения для поставленных задач.

В первой главе приводится структурная схема возбуждения электромагнита кодоимпульсного сейсмоисточника, производится анализ его структурных звеньев, сравнение имеющихся на современный день технических решений для построения электрической принципиальной схемы источника питания.

Во второй главе диссертационной работы приводится обзор имеющихся на данный момент технических решений зарядного устройства.

В третьей главе диссертационной работы происходит обзор коммутирующих схем системы возбуждения электромагнита сейсмоисточника.

В четвертой главе диссертационной работы производится описание работы выбранной схемы устройства для заряда конденсаторного накопителя энергии, разработка принципиальной схемы источника питания для кодоимпульсного сейсмоисточника, расчет параметров и выбор элементов схемы заряда, а также разработка системы управления схемой заряда.

В пятой главе диссертационной работы производится моделирование работы зарядного устройства, а также получение рабочих характеристик зарядного устройства.

В шестой главе диссертационной работы производится анализ имеющихся решений по достижению электромагнитной совместимости разрабатываемого устройства.

В завершающей седьмой главе диссертационной работы производится исследование реализации разработки источника питания для кодоимпульсного сейсмоисточника с точки зрения проекта.

1. Обоснование актуальности исследования

Сейсморазведочные работы являются одной из самых важных задач при добыче нефти и газа, и недр земли. На рисунке 1 приводится типовая схема проведения геофизических работ по разведке грунта. Для целей инициализации сейсмических волн в сейсморазведке на грунте применяются установки обеспечивающие силовые воздействия на поверхность грунта именуемые сейсмоисточниками. Процесс фиксирования отражённых волн чувствительной аппаратурой сеймостанции (приёмники сейсмических волн осуществляют регистрацию вертикальной или горизонтальной составляющих скорости смещения грунта земли) и дальнейший процесс их обработки способствуют получению детальной информации о структуре земных пластов и осознанно готовиться к процессу бурения скважин.

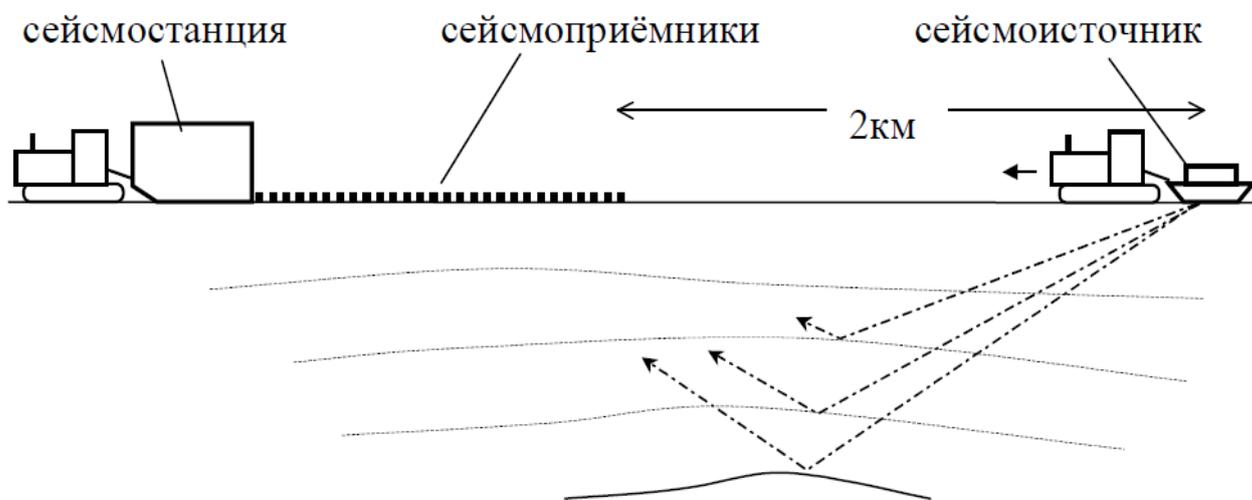


Рисунок 1 – Схема процесса проведения геофизических работ по разведке грунта

Современные методы проведения сейсморазведочных работ на грунте имеют несколько основных направлений: импульсная, вибрационная, а также усредненная между ними кодоимпульсная. Вибрационный метод проведения сейсморазведочных работ базируется на генерировании силовой аппаратурой гармонических воздействий на грунт. В основе метода импульсной

сейсморазведки лежат силовые воздействия малой временной длительности, которые достигаются посредством детонации зарядов в земных скважинах. Конструкция сейсмоисточников с применением импульсного метода сейсморазведки является более простой нежели конструкция вибрационных сейсмических установок, что служит однозначным плюсом по отношению к экономической части вопроса. К примеру, выполняемые импульсным сейсмоисточником "Енисей–СЭМ–100" задачи являются аналогичными тем, которые способен решать вибрационный сейсмоисточник "СВ 120/250", тем не менее стоимость и мощность импульсного гораздо ниже, чем у вибрационного.

Основными показателями сейсмоисточников, которые воздействуют на грунт в ортогональном направлении являются:

- осуществляемое силовое воздействие (10-90 т);
- временная продолжительность силового воздействия (мс).

Достигнуть вышеприведенных показателей возможно с применением различных конструктивных схем сейсмических установок и разных типов двигателей в таких установках. В настоящее время существуют модели сейсмоисточников, в основе функционирования, которых лежит удар по поверхности грунта падающей массой, ускорение которой происходит под действием поля силы тяжести или же специализированной установкой – приводом.

Также существуют и источники сейсмических воздействий с применением некоторых вариантов исполнения газодинамических и электромеханических двигателей-приводов (см рисунок 2), функционирование которых осуществляется в режиме давления. Такие типы двигателей в свою конструкцию включают: твердый груз 2 большой массы, который при работе сейсмоисточника отпрыгивает от твердого основания сейсмоизлучателя 1 под действием силового воздействия, развиваемого двигателем 3.

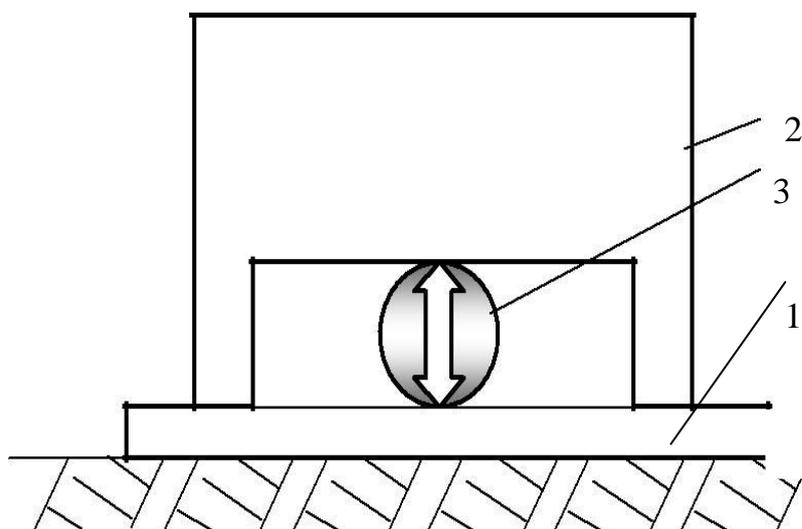


Рисунок 2 – Структура сейсмоисточника с электромеханическим приводом

Процесс усовершенствования и изменения уже имеющихся и новых конструктивных исполнений сейсмоисточников не останавливается и в настоящее время. Разнообразие конструкций сейсмоисточников может быть объяснено следующими факторами:

- техническими инновациями в процессе проектирования сейсмических установок при внедрении которых используются различные пути технической реализации задач проектирования;
- отличиями требований по эксплуатации и технических требований к конструктивному исполнению сейсмических установок;
- отсутствием информации касательно механизмов взаимодействий излучателя сейсмических волн с поверхностью различных типов грунта, что является основанием для неопределенности расчетов прикладываемых силовых воздействий на грунт, скоростных характеристик сейсмических ударов и длительностей типовых силовых воздействий.

В связи с собой важностью периодичности процесса заряда конденсаторного накопителя электроэнергии для функционирования сейсмоисточника наиболее значимой частью всего устройства можно считать источник питания кодоимпульсного сейсмоисточника. В связи с этим целью

настоящей диссертационной работы является разработка принципиальной схемы зарядного устройства для кодоимпульсного сейсмоисточника.

Перспективным методом сейсморазведочных работ с целью поиска месторождений углеводородного сырья следует признать кодоимпульсный [1]. По сравнению с широко применяющимися вибрационным, импульсным и использующим взрывы [2] он имеет несколько преимуществ. Как и при импульсной сейсморазведке, источники сигналов в этом методе применяются значительно менее мощные, чем при вибрационном. Кроме того, при их производстве допускается более низкий уровень технологии машиностроения, что значительно снижает себестоимость сейсмоисточников. В сумме этих двух факторов кодоимпульсные сейсмоисточники имеют во много раз меньшую стоимость, чем вибрационные.

За последние 30 — 50 лет были опробованы различные технические решения импульсных сейсмоисточников: механические, газодинамические, различные варианты электромеханических. Однако в настоящее время используются в основном при работах на суше электромагнитные импульсные источники [3], а на воде - пневматические [4]. Кодоимпульсные не вышли за рамки экспериментальных изделий, и в них использовались те же электромеханические приводы, что и в импульсных источниках. Вибрационные сейсмоисточники по конструктивному решению являются потомками гидравлического вибратора второй половины прошлого века [5].

По производительности сейсморазведочных работ импульсный, кодоимпульсный и вибрационный методы приблизительно одинаковы и имеют преимущество по сравнению с использующим взрывы. Сложность обработки результатов сейсморазведочных работ в настоящее время из-за значительного повышения возможностей вычислительной техники при всех методах возбуждения сейсмических сигналов сопоставима [1].

Если провести сравнение кодоимпульсного сейсмоисточника с импульсным, то импульсный обычно развивает силу 100 тонн и более, а

кодоимпульсному достаточно 10 — 20 тонн. Частота следования воздействий у импульсного 1 раз в 6 секунд, а у кодоимпульсного при ЛИП или ЛИЧ-развёртке [1] (линейно- изменяющийся период или частота) максимальная частота достигает 50 Гц. Соответственно, кодоимпульсный сейсмоисточник потребляет значительно большую, чем импульсный мощность, приблизительно 10 кВт, но весьма меньшую, чем вибрационный, у которых она превышает 300 кВт.

Таким образом, своя "ниша" у кодоимпульсных сейсмоисточников есть, но по сравнению с импульсными они более сложные, а составить реальную конкуренцию вибрационным сейсмоисточникам, имеющим полувековую историю производства в нескольких странах, экспериментальная разработка не может. Доступными в настоящее время являются моделирование, постепенное накопление информации по улучшению конструктивных решений отдельных их элементов и, на основе этого, совершенствование конструкции.

Одним из весьма интересных направлений совершенствования силового привода кодоимпульсного сейсмоисточника является конструктивное решение так называемой "плавающей массы" [6], при реализации которого инерционная опора двигателя сейсмоисточника - пригруз выполняет свою функцию не только в исходном относительно излучателя положении, но и на некоторой высоте над ним. Это решение позволяет увеличить максимальную частоту воздействий и его мощность.

Наиболее сложным элементом кодоимпульсного сейсмоисточника является система его электропитания. Её разработка является одной из проблем при его проектировании. Кодоимпульсный сейсмоисточник должен формировать механические воздействия на грунт со строго заданными параметрами импульса: моментом вступления, длительностью фронта и общей длительностью. Этими параметрами определяется частотный спектр излучаемого сигнала и обеспечивается синхронизация сейсмоисточников с сейсмостанцией и друг с другом при работе в группе. Поэтому основой

системы электропитания импульсного и кодоимпульсного электромеханических сейсмоисточников является колебательный контур, содержащий обмотку его двигателя и накопительную батарею электрических конденсаторов [6].

В связи со значительным за последние годы шагом в развитии электронных компонентов: электрических конденсаторов большой ёмкости, управляемых полупроводниковых силовых ключей и слаботочной электроники, появилась возможность совершенствования системы формирования импульсов тока в обмотках электромеханического двигателя возвратно- поступательного движения, являющегося основой кодоимпульсного сейсмоисточника.

Изучение технических источников наглядно иллюстрирует недостаточную изученность вопроса создания и проработке схем источников питания для сейсмоисточников. Проанализируем характерные черты процесса возбуждения электромагнита сейсмоисточника. В частности, для сейсмоисточников импульсного типа действия типичной особенностью является существенное превышение амплитудного значения развиваемой мощности над средним значением мощности, которая потребляется от источника напряжения. В качестве примера, у некоторых сейсмоисточников значения мощностей равняются $5 \cdot 10^6$ Вт и $2 \cdot 10^3$ Вт. В полевых условиях на реальных сейсмических установках реализовать такие значительные значения импульсной мощности труднодостижимо, но применение конденсаторного накопителя электрической энергии, который необходимо заряжать с некой периодичностью решает данную проблему.

В общем виде структурная схема системы возбуждения, в которой используется накопитель энергии на основе конденсаторной батареи выглядит так, как иллюстрируется на рисунке 3.

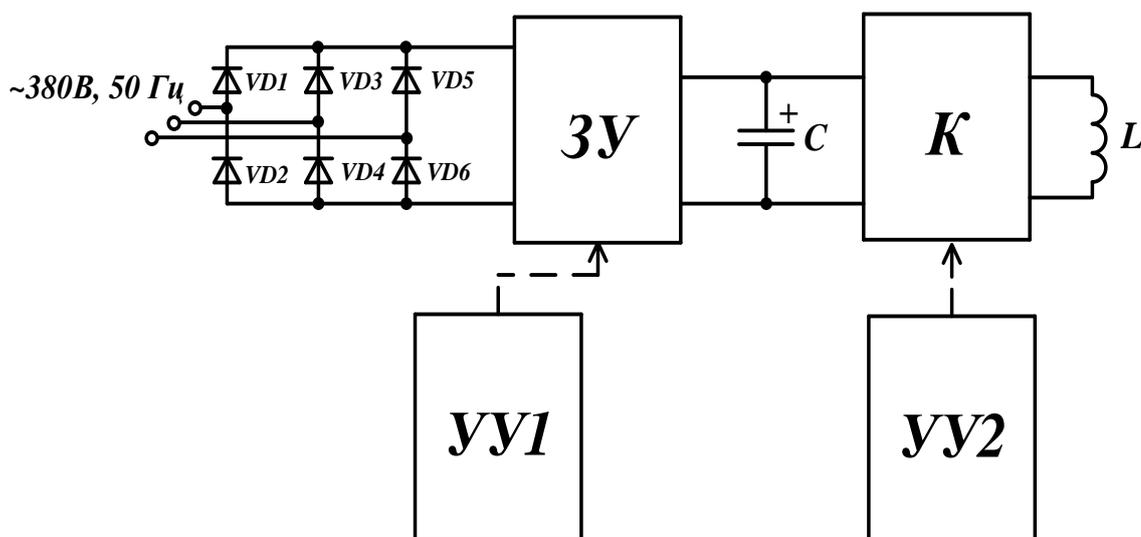


Рисунок 3 – Структурная схема возбуждения электромагнита сейсмоисточника

где ЗУ – устройство заряда накопителя (источник питания),
 С – накопитель энергии (конденсаторная батарея),
 L – обмотка электромагнитного двигателя сейсмоисточника,
 К – коммутирующая цепь тока возбуждения электромагнита,
 УУ1 – устройство управления вентилями зарядного устройства,
 УУ2 – устройство управления вентилями коммутирующей цепи.

В качестве первичного источника энергии служит трехфазная сеть напряжения 380В, 50 Гц, которое выпрямляется и увеличивается на выходе мостовой трехфазной схемы Ларионова.

Накопитель энергии импульсного сейсмоисточника – конденсаторная батарея С, работает по следующему циклу: медленный процесс зарядки накопителя (примерно 2-4 мс), пауза, форсированный разряд накопителя токами большой амплитуды, для обеспечения необходимой энергии возбуждения электромагнита $W_{\text{имп}} \sim 200 \text{ Дж}$. Следует также отметить, что накопитель имеет способность выдерживать много циклов заряд-разряд в неблагоприятной обстановке с постоянной вибрацией и при значительных

пониженных температурах окружающей среды. Рабочим напряжением на конденсаторном накопителе обычно является напряжение в 850—950 В (при этом на максимум используется полный диапазон напряжений класса электробезопасности установок до 1 кВ).

Ключевыми элементами «ключами» в коммутирующих схемах **К** в сейсмоисточниках с электромагнитами часто служат однооперационные тиристоры. Тем не менее только на тиристорах реализовать заданные функции в коммутирующих схемах порой бывает невозможно и вследствие этого в качестве ключей также можно использовать биполярные, полевые и IGBT–транзисторы, а также и двухоперационные выключаемые тиристоры.

Предпочтительным вариантом реализации структурной схемы на рис.3 системы электропитания [7] является решение, приведенное на рис. 4. Схема содержит обмотку *Y* двигателя возвратно- поступательного движения, накопительную батарею электрических конденсаторов *C_H*, коммутатор тока обмотки на полупроводниковых ключах *VS₁ — VS₄* и зарядное устройство, содержащее выпрямитель и импульсный преобразователь постоянного напряжения (ИППН) на основе быстродействующих ключей IGBT структуры. Ёмкость накопителя составляет несколько миллифард, напряжение на нём порядка 1000 В.

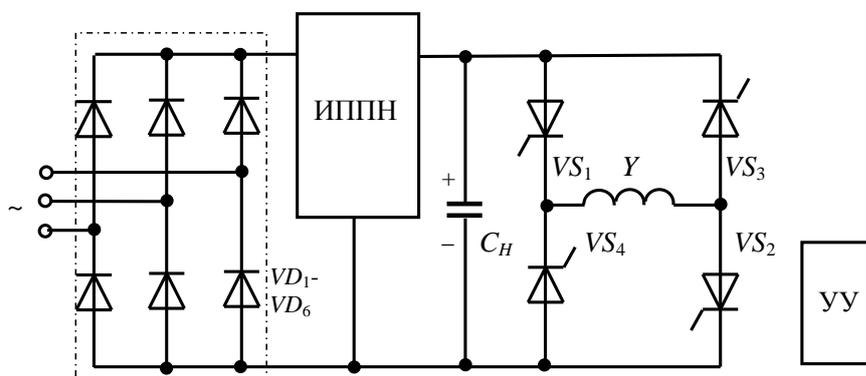


Рисунок 4 – Предлагаемая схема системы электропитания кодоимпульсного сейсмоисточника

Изображённая на рис.4 схема предоставляет несколько вариантов режима работы с формированием импульсов тока различной формы [8]. Ключами VS_1 — VS_4 в ней могут быть тиристоры либо IGBT - транзисторы. Транзисторы предоставляют полный спектр возможностей по управлению схемой, однако однооперационные тиристоры позволяют коммутировать значительно большие токи, чем транзисторы.

Рассмотрим тиристорный вариант схемы. В процессе нарастания токового импульса в витках электромагнита Y , который начался с момента синхронного включения тиристоров VS_1 , VS_2 схемой управления (УУ) амплитуда напряжения на накопителе C_n падает, но одновременно ток в обмотке Y нарастет. В момент, когда накопитель перезарядится до такого напряжения, при котором произойдет следующая коммутация тиристора VS_1 схема управления переводит тиристор VS_3 в проводящее состояние. В момент открытия тиристора VS_3 ток в обмотке электромагнита начинает протекать по пути цепь VS_1 , обмотка Y , VS_3 . Одновременно с этим ток через тиристор VS_2 снижается до нуля и тиристор закрывается, результатом этого уровень напряжения на накопителе C_n все время остаётся неизменным. Когда в следующий такт работы коммутирующей схемы системой управления включается тиристор VS_4 , напряжение на тиристоре VS_1 меняет полярность т.к. к нему теперь приложено обратное напряжение на накопителе C_n . Результатом этого служит выключение тиристора VS_1 ведущее за собой замыкание тока нагрузки по цепи VS_4 , обмотка Y , VS_4 и как следствие этого заряд накопителя до изначальной полярности см. рис.4.

Этот вариант режима управления позволяет проявить основные достоинства мостовой схемы: возможность рекуперации оставшейся неиспользованной энергии магнитного поля двигателя сейсмоисточника в накопитель для использования при следующем импульсе, практически однополярный режим работы накопителя, обеспечивающий по сравнению с двуполярным значительное увеличение ресурса электрических конденсаторов, и возможность оперативного регулирования длительности

импульса тока, обеспечивающий более точную настройку работы сейсмоисточника на конкретную нагрузку. С применением дополнительных блоков искусственной коммутации тиристоров или транзисторов в качестве ключей возможна более тонкая настройка импульса тока: формирование импульсов треугольной и трапецеидальной формы, обеспечение частичного разряда накопителя и др.

2. Обзор возможных схем зарядного устройства

Учитывая тот факт, что в схеме электропитания сейсмоисточника используется накопитель энергии C необходимо также понимать, что без устройства для его заряда обойтись невозможно и следует задуматься о реализации схемотехники зарядного устройства (ЗУ на рисунке 3). К примеру, зарядить конденсаторный накопитель можно при использовании следующих решений:

- применение в качестве первичного источника на входе схемы источник постоянного напряжения и осуществление процесса заряда накопителя через резистор или индуктивность;
- заряд накопителя от источника переменного напряжения через известные схемы удвоителей (умножителей) напряжения;
- осуществление процесса заряда накопителя с использованием известных классических решений, таких как схемы импульсных преобразователей постоянного напряжения (схемы ИППН);

Далее рассмотрим подробно некоторые схемные варианты реализации зарядного устройства.

2.1 Неуправляемое зарядное устройство с дросселем

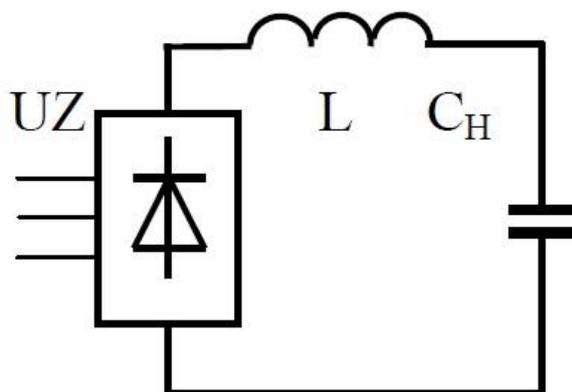


Рисунок 5 - Неуправляемое зарядное устройство с дросселем

В данной схеме осуществляется заряд накопителя энергии до уровня напряжения на выходе трёхфазного мостового выпрямителя, которое приблизительно равняется 540 В. При резонансном процессе заряда накопителя C_H через индуктивность (дроссель) L напряжение на накопителе способно возрасти до уровня в 1.6 раза, превышающего напряжение на выходе трехфазного моста, то есть до уровня 850 В, что можно считать удовлетворительным. Тем не менее данная схема имеет существенные недостатки, такие как: большая длительность времени заряда (~5 с), высокую стоимость изготовления и габариты индуктивности, которые при проектировании окажутся неоправданно завышенными. Также следует отметить и тот факт, что в случае короткого замыкания в нагрузке такого зарядного устройства, к примеру, в случае выхода из строя полупроводникового ключа в схеме формирователя тока возбуждения электромагнита, оно оказывает влияние и на электрогенератор, что может стать причиной его поломки и поэтому опасно.

2.2 Неуправляемый удвоитель фазного напряжения

Схема, приведенная на рисунке 6 имеет в своем составе неуправляемый удвоитель фазного напряжения (220 В), который имеет возможность заряда

конденсаторного накопителя лишь до уровня напряжения 630 В, что является недопустимым фактом и не позволяет полностью использовать диапазон напряжений в 1000 В. Неполное использование этого диапазона приводит при заданной величине энергии накопителя к увеличению ёмкости накопителя C_H и снижению числа витков обмотки возбуждения электромагнита. С целью повышения напряжения на накопителе в данной схеме применяется повышающий трансформатор напряжения, показанный на рисунке 4.2 пунктирными линиями.

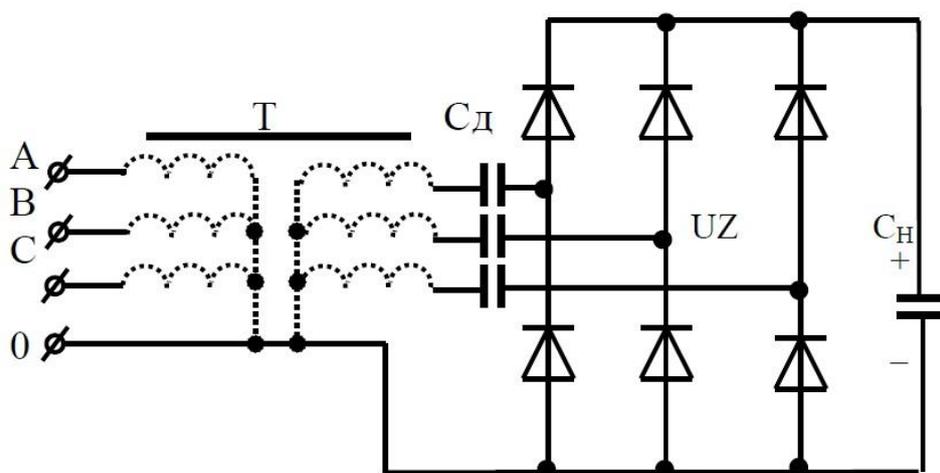


Рисунок 6 - Неуправляемый удвоитель фазного напряжения

2.3 Управляемый двухфазный удвоитель линейного напряжения

В настоящее время на некоторых моделях существующих сейсмоисточников используются в качестве зарядных устройств схемы удвоителей линейного напряжения. Максимальное значение напряжения заряда в таких схемах может немного превышать 1000 В, что является уже более высоким уровнем напряжения, чем предельно допустимый уровень для установок данного класса электробезопасности, в следствии этого для ограничения выходного напряжения в составе таких удвоителей встречаются управляемые полупроводниковые вентили, например, полупроводниковые тиристоры. Схема одного из таких удвоителей, а именно двухфазного удвоителя линейного напряжения приведена на рисунке 7.

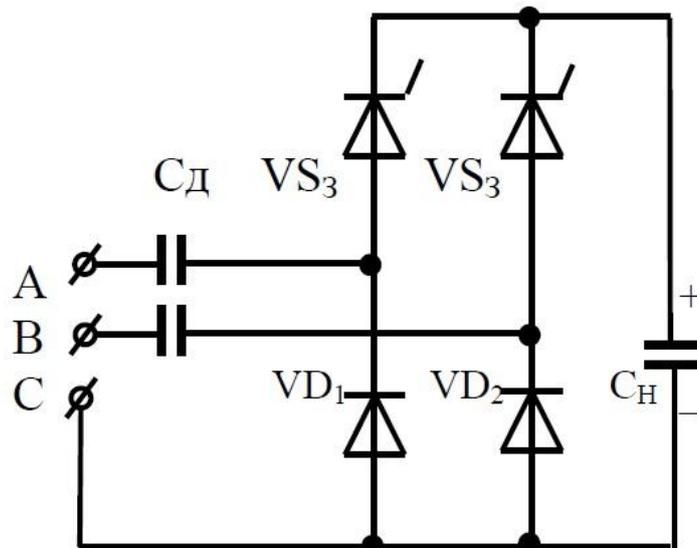


Рисунок 7 - Управляемый двухфазный удвоитель линейного напряжения

2.4 Трёхфазный управляемый удвоитель линейного напряжения

В случае потребности в ускорении процесса заряда накопителя и одновременного устранения неравномерность загрузки фаз трехфазного генератора отличным техническим решением может стать применение трёхфазная схемы удвоителя линейного напряжения, например, такая, как приведенная на рисунке 8.

Чтобы регулировать напряжение на накопителе в такой схеме в диапазоне напряжений от 600 до 1000 В в роли коммутатора зарядного тока допустимо применение тиристора VS_3 , так как зарядный ток накопителя C_H при уровне напряжения на нём свыше 600 В становится прерывистым. В процессе токовых пауз тиристор самостоятельно выключается. В случае необходимости продолжения процесса заряда накопителя на управляющий переход полупроводникового тиристора должен подаваться запускающий сигнал.

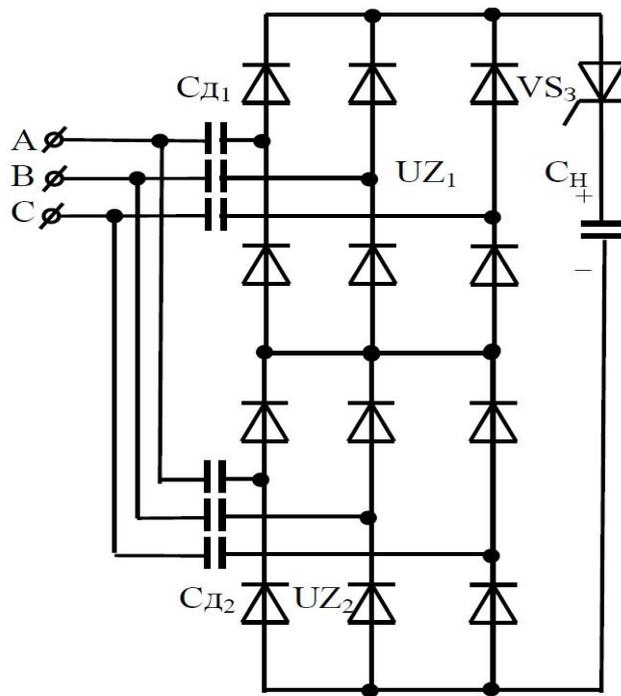


Рисунок 8 - Трёхфазный управляемый удвоитель линейного напряжения

2.5 Однофазные удвоители напряжения

Однофазная схема умножителя напряжения – схема удвоения приведенная на рисунке 9 может быть построена по двухполупериодной схеме (рисунок 9а), при использовании трансформатора напряжения или по однополупериодной схеме (рисунок 9б), в варианте такой схемы без применения трансформатора напряжения процесс заряда накопителя в схеме происходит только лишь при одной полярности напряжения на входе схемы, в тоже время в двухполупериодной схеме процесс осуществления заряда накопителя осуществляется при любой полярности напряжения на входе схемы).

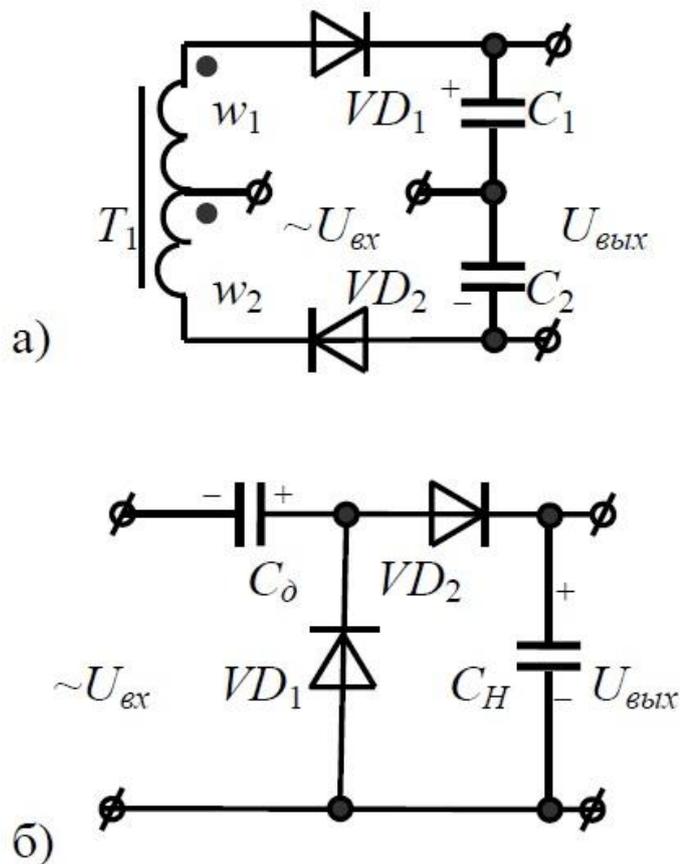


Рисунок 9 – Однофазные удвоители напряжения:
 а – двухполупериодный; б – однополупериодный

В схеме, приведенной на рисунке 9а при одной полярности входного напряжения $U_{вх}$ по пути обмотка w_1 , диод VD_1 заряжается конденсатор C_1 , а при противоположной полярности заряжается конденсатор C_2 по пути обмотка w_2 , диод VD_2 . Напряжения на конденсаторах складываются, и вместе они представляют собой единый накопитель C_n .

На рисунке 10а, схеме Вилларда, при одной полярности напряжения на входе схемы $U_{вх}$ через полупроводниковый диод VD_1 заряжается конденсатор $C_{д1}$, а при обратной полярности под воздействием суммарного напряжения на конденсаторе $C_{д1}$ и $U_{вх}$, через диод VD_2 заряжается конденсатор C_n - накопитель энергии. Цепи полупроводниковых диодов и конденсаторов могут соединяться каскадами. При помощи такого каскадного соединения диодов и конденсаторов могут быть построены схемы утроения, и т. д. напряжения. Схема каскада, построенная показанная на рисунке 4.6а,

носит название умножителя Шенкеля–Вилларда, а схема, указанная на рисунке 10б, носит название умножителя Латура–Делонга–Гренашера.

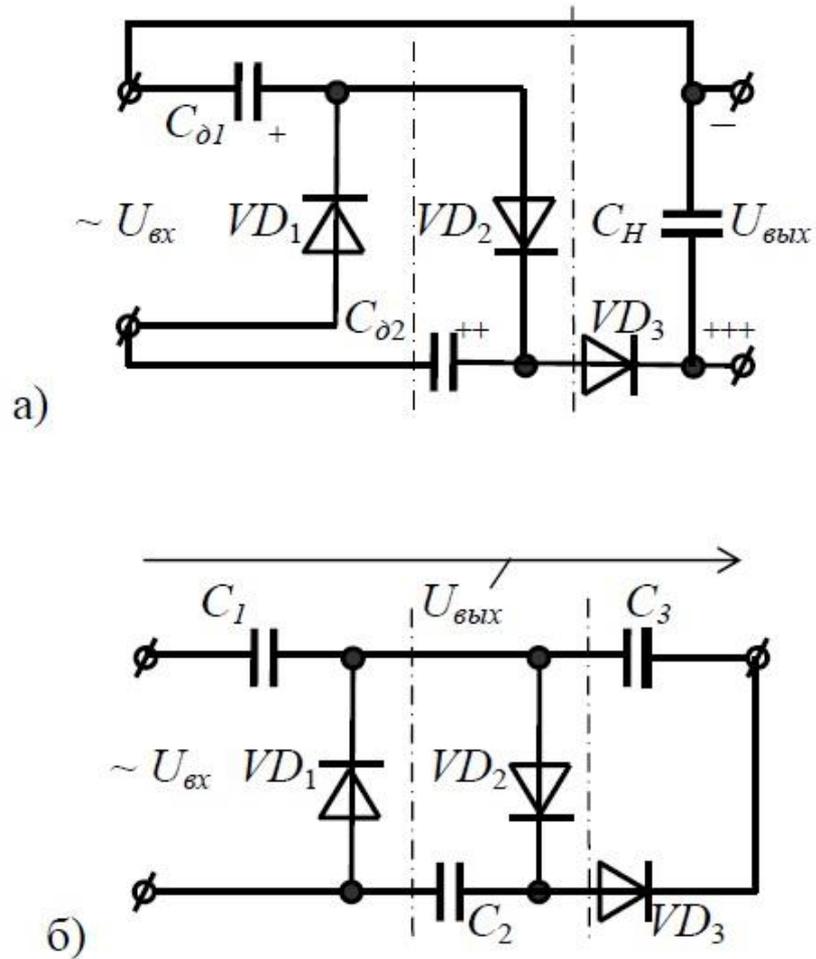


Рисунок 10 – Однофазные утроители напряжения: а – умножитель Шенкеля – Вилларда; б – умножитель Латура–Делонга–Гренашера

Уникальностью указанных выше схем умножителей напряжения, см. рисунок 10б и 10а, является возможность использования конденсатора большой емкости, который устанавливается в конце каскада цепочек VD_i-C_i , его емкость значительно больше, чем в предыдущих цепочках. Процесс заряда такого конденсатора осуществляется в отличие от предыдущих конденсаторов в схеме, приведённых на рисунках 10а и 10б, за большое число периодов изменения входного напряжения. Этот конденсатор в данной схеме выполняет функцию накопителя энергии, а остальные – функцию дозирующих элементов, которые рассчитывают величину энергии,

которая заряжает основной конденсаторный накопитель за один цикл заряда (в течение 1-го периода входного напряжения).

3. Коммутирующие схемы системы возбуждения электромагнитного двигателя сейсмоисточника

Обычно для того, чтобы получить предельно возможную механическую силу, которая развивается приводом электромагнитного двигателя и необходима для дальнейшего исследования структуры грунта продолжительность рабочего такта схемы возбуждения электромагнита Y (рисунок 4) выбирается такой, чтобы снабдить потоки порций энергии в магнитное поле за отрезок времени равный 1,5-2 мс, а далее, спустя еще 3-4 мс вся система возбуждения обязана гарантировать режим работы максимально приближенный к "неизменному потокосцеплению" (так называемое время "замыкания"). Сохранившаяся после определения функционального зазора энергия, запасенная магнитным полем способна рассеиваться на активной составляющей сопротивления обмотки электромагнита, так как последнее является вполне допустимым для импульсного режима функционирования схемы, но в тоже время имеет способность к рекуперации некоторые реактивные компоненты в силовой схеме зарядного устройства или схеме коммутации (если таковые имеются в общей структуре возбуждения) либо же непосредственно напрямую в накопитель энергии.

3.1 Силовая схема на базе тиристора и конденсатора

Самой элементарной схемой формирования тока в электромагните является схема на основе полупроводникового тиристора и конденсатора (накопителя) см. рис. 11, элементы C_n , K , Y [1].

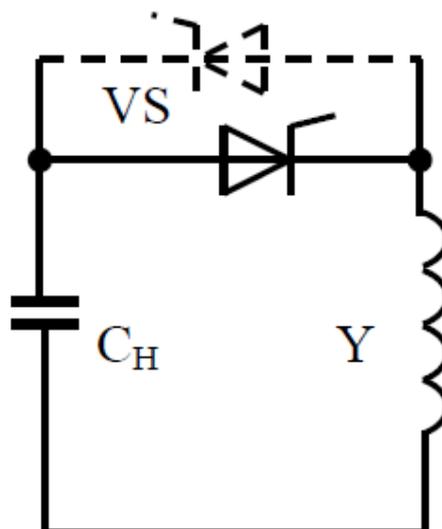


Рисунок 11 – Простая силовая схема на базе тиристора и конденсатора

Очевидным преимуществом данной схемы считается тот факт, что энергия, запасенная в схеме способна автоматически рекуперироваться непосредственно в накопитель энергии C_n . Тем не менее эта схема не лишена и некоторых недостатков, таких как:

- отсутствие технических возможностей незамедлительного контроля за продолжительностью токового импульса;
- накопитель энергии C_n функционирует в режиме со сменой полярности, что существенно сокращает срок его службы;
- в начале работы схемы накопитель энергии C_n находится под воздействием напряжения обратной полярности относительно начального, данный факт делает принципиальную схему зарядного устройства более сложной.

Минус схемы, связанный с обратной полярностью напряжения на накопителе является несущественным для технических установок, которые не должны иметь обязательной одинаковости параметров последующих срабатываний сейсмической установки. На практике существуют установки, разработанные в советском союзе, которые служат для целей изготовления

бетонного состава. В таких принципиальных схемах применялись технические решения с вспомогательными тиристорами, см. рис. 11 указан пунктиром, которые подключались параллельно навстречу главному полупроводниковому тиристоры VS и работающему в очереди с основным. Таким образом начальный импульс, создаваемый коммутирующей схемой при открытии главного тиристора, значительно более мощный, вследствие того, что первый импульс в процессе заряда накопителя не участвует.

Так как для сейсмоисточника необходима потребность в тождественности силовых воздействий для полноты картины исследования описанная выше схема не является оптимальным техническим решением для построения источника питания сейсмоустановки и как следствие требуется поиск иных решений для решения поставленных задач возбуждения электромагнита [2], [3].

3.2 Схема с зашунтированной обмоткой электромагнита

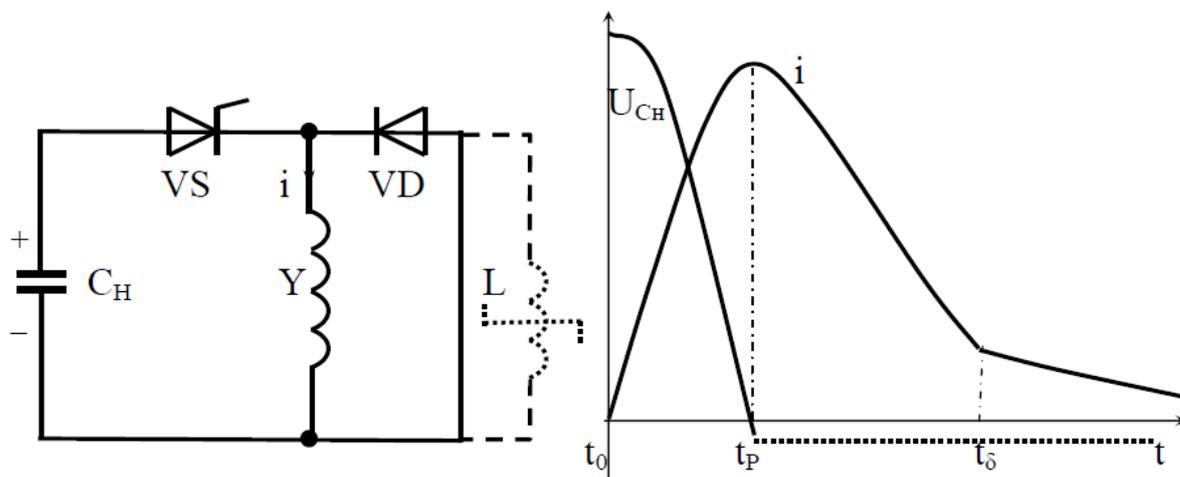


Рисунок 12 – Схема с зашунтированной обмоткой электромагнита и диаграммы ее работы

Изначально накопитель энергии C_H в схеме заряжен до полярности, указанной на рис.12. Как только схемой управления будет открыт полупроводниковый тиристор (момент времени t_0 на диаграмме) VS ток

обмотки электромагнита Y возрастает. Далее, в момент времени t_p накопитель энергии C_H завершит процесс разряда этим током и начинает процесс перезаряда, затем полупроводниковый диод VD открывается, а тиристор VS запирается. Ток диода начинает постепенно спадать благодаря воздействию ЭДС движения. В следующий момент времени t_δ зазор в электромагните выбирается целиком, и ток после этого снижается уже гораздо с меньшей скоростью, благодаря потерям.

Отличием данной схемы от предыдущей является отсутствие возможности процесса рекуперации энергии, запасенной в магнитном поле оставшейся после полного выбора зазора в электромагните, эта энергия рассеивается внутри обмотки этого электромагнита. Также следует отметить тот факт, что в случае, когда ток тиристора меньше тока которым заряжается накопитель будут необходимы корректирующие действия по переключению тиристора. В противном случае через тиристор VS начнет протекать обратный ток и процесс заряда накопителя прекратится, что ни в коем случае не допустимо. Корректирующим действием в данной ситуации является приостановка работы схемы зарядного устройства на промежуток времени, необходимый для полного такта работы схемы формирования тока в обмотке электромагнита, или как альтернативный вариант переключение тиристора во включенное состояние искусственно.

Последний вариант устранения несоответствия токов уже находил свое применение в некоторых версиях сейсмоисточников в советском союзе. В нем процесс коммутирования полупроводникового тиристора осуществлялся в процессе перезарядки накопителя энергии благодаря диоду, который подключался последовательно электромагниту (см. рис. 5 отмечено пунктирной линией). В случае такого технического решения эффективно решалась проблема отделения работы схемы заряды и коммутации тока возбуждения электромагнита сейсмоустановки. Однако на самом деле ток в электромагните все же протекал еще примерно 0,4 с. Тем не менее в последующих модификациях сейсмоисточников полюса электромагнита

были уже значительно большими, что послужило полному выбору зазора δ в электромагните ко времени t_k , и как результат этого тока в обмотке становится достаточно даже при меньших его значениях.

В наши дни на реальных сейсмических установках, в частности в моделях сейсмоисточников "Енисей" находят применение схемы формирователей тока возбуждения электромагнита с характерной особенностью параллельного процесса коммутации полупроводникового тиристора VS , схожие со схемой см. рис. 13 [4].

3.3 Схема с шунтированием обмотки электромагнита и принудительной коммутацией тиристора

В начальный момент времени конденсаторы C_H и C_K см. рис. 13 уже полностью заряжены схемой зарядного устройства, причем напряжение на этих конденсаторах идентичное. Пока время не достигло момента t_p данная схема функционирует абсолютно также, как и схема на рисунке 12. Однако с момента времени t_p начинаются различия, в частности происходит закоротка обмотки электромагнита посредством полупроводниковых диода VD_{III} и тиристора VS , ток i в обмотке электромагнита протекает именно через них. С целью предотвращения разряда конденсатора C_K минуя при этом конденсатор накопитель C_H , применяется техническое решение введения в схему дополнительного сопротивления R_3 , также есть и вариант другого технического решения которое заключается подключением диода VD_3 параллельно силовому тиристор. В последующий временной промежуток t_k (чаще всего время $t_k > t_\delta$) схемой системы управления силовыми полупроводниковыми вентилями отпирается тиристор VS_K . Емкость C_K (за определенный промежуток времени, который обычно не может быть меньшим, чем время восстановления свойств тиристора VS) полностью разряжается через обмотку электромагнита, и, как следствие генерируя в обмотке показанный на диаграмме рисунка 13 токовый импульс i .

Напряжение конденсатора C_K в процессе его разряда является для тиристора VS обратным, в результате чего закрывается. Необходимо также отметить, что в схеме присутствует возможность запираания тиристора в абсолютно любой момент времени, когда $t_K > t_0$, и одновременно до наступления момента времени t_p .

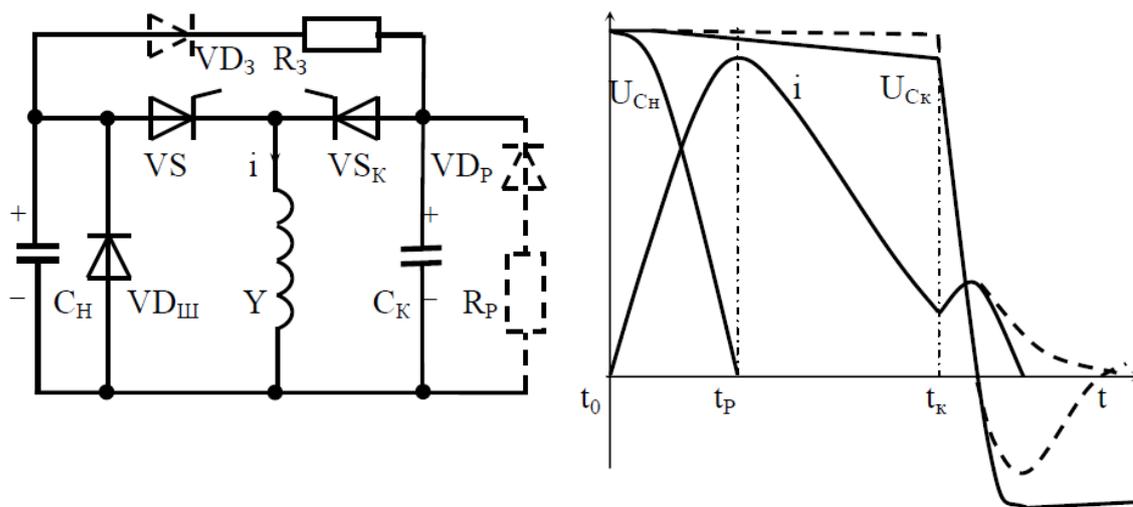


Рисунок 13 – Схема, иллюстрирующая процесс шунтирования обмотки электромагнита с принудительным процессом коммутации силового тиристора и диаграммы работы схемы

Энергия, которая осталась в магнитном поле ко времени t_K способствует осуществлению перезаряда конденсатора C_K до напряжения, которое будет пропорционально этому запасу. Особенностью схемы на рис. 13 следует также считать и тот факт, что ввиду различия емкости конденсаторов C_K и C_H ($C_K \ll C_H$) напряжение обратной полярности на C_K способно быть несколько более большим по величине. Чтобы снизить обратное напряжение на этом конденсаторе действенным способом является использование технического решения из цепи сопротивления R_P и полупроводникового диода VD_P , на рис. 13 изображены пунктиром. В данном случае это приводит к тому, что продолжительность процесса

протекания тока в обмотке электромагнита становится более продолжительной, но при этом как раз достигается необходимое снижение напряжения на конденсаторе C_K .

Описанная выше схема, теоритически способна применяться для целей процесса регулирования продолжительности силового воздействия на грунт путём временного сдвига коммутации силового вентиля $t_K < t_\delta$. Тем не менее, применяемый в данной схеме путь реализации рекуперации энергии магнитного поля в конденсатор C_K в случае высоких значений объемов рекуперированной энергии затребует от разработчика интегрирования в схему мощного сопротивления R_P , что является нежелательным ввиду большого нагрева этого компонента, а также экономического удорожания схемы.

Резюмируя вышеописанное следует выделить следующие недостатки использования данной схемы: техническое отсутствие возможности последующего использования рекуперированной энергии, ввиду перезаряда конденсатора C_K до обратной полярности дальнейший процесс его перезаряда возможен только при использовании сопротивлений R_P и R_3 .

Наиболее выгодные функции имеют схемы, в которых процесс рекуперации энергии магнитного поля в конденсатор C_n происходит при изначальной его полярности, т.е. не происходит ее перемены. К настоящему времени являются наиболее известными являются мостовые схемы [5] с возможностью рекуперации энергии в накопитель энергии, которые следует делить на две подгруппы:

- схемы, в которых обмотка электромагнита технически разделена на части (встречаются также и схемы с разделением накопителя энергии, однако схемотехника таких схем весьма сложна и не имеет явных достоинств);

- схемы, в которых обмотка электромагнита и накопитель энергии не подлежат разделению.

3.4 Мостовой вариант схемы с разделённой обмоткой электромагнита

На рисунке 14 приведена схема с разделением обмотки электромагнита на две части. Предложенную схему рационально применять на высоких частотах следования импульсов, осуществляющих разряд накопителя энергии [6].

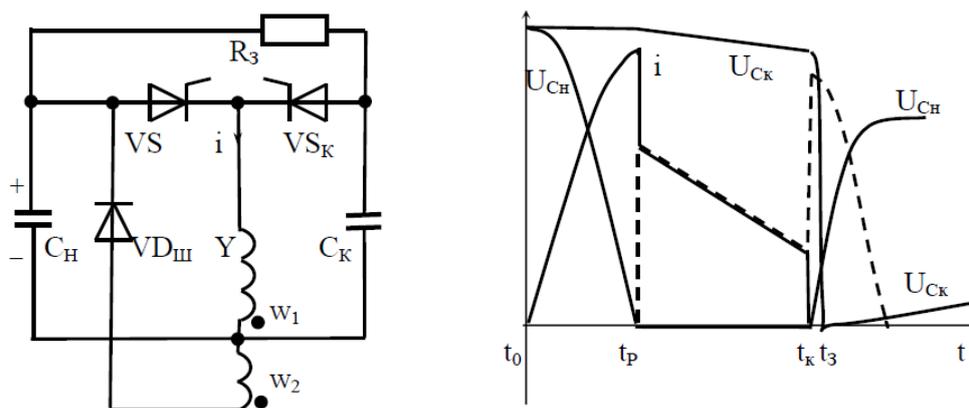


Рисунок 14 – Мостовой вариант схема с разделённой обмоткой и диаграммы ее работы относительно конденсаторов

Процесс формирования тока в обмотке электромагнита в данной схеме начинается с момента времени, когда схема управления вентилями коммутирующей схемы откроет силовой полупроводниковый тиристор VS (на диаграмме момент времени t_0). Начиная с этого момента уровень напряжения на накопителе C_H начинает снижаться и одновременно с этим ток обмотки $Y(w_1)$ возрастает. Далее, когда завершиться процесс перезаряда накопителя до напряжения, необходимого для отпирания диода VD (на диаграмме время t_p) ток в схеме скачкообразно снижается и начинает протекать через полупроводниковые приборы по пути VS, VD минуя при этом полностью всю обмотку электромагнита Y (на диаграмме ток части обмотки w_1 иллюстрируется сплошной линией, а части обмотки w_2 – показан пунктирной линией), напряжение на накопителе энергии C_H вплоть до времени t_k не меняется. В момент времени t_k , схема управления включает тиристор VS_K и к силовому тиристор VS прикладывается запирающее его

напряжение на конденсаторе C_K который в свою очередь зарядился через сопротивление R_3 . Затем конденсатор C_K начинает разряжаться, в это время силовой тиристор VS запирается, одновременно с этим ток i обмотки $Y(w_2)$ начинает протекать через полупроводниковый диод VD , тем самым осуществляя заряд накопитель энергии C_H до изначальной полярности. Сопротивление R_3 в схеме служит для подзарядки конденсатора C_K во временной паузе между срабатываниями сейсмической установки.

3.5 Мостовой вариант схемы с единой обмоткой

Мостовая схема (рисунок 15) является наиболее подходящей в качестве коммутатора тока, т.к. способствует осуществлению процесса регулирования длительности протекания тока в обмотке электромагнита. Число полупроводниковых вентилях в ней больше, но тем не менее применение единой обмотки экономически более оправдано чем с разделенной. Также важно отметить, что потери, связанные с нагревом такой обмотки существенно меньше чем с разделённой, и как следствие при меньшем числе витков обмотки электромагнита в сравнении со схемой с разделенной обмоткой в моменты переключения тиристоров амплитуда тока в обмотке не может превысить амплитудное значение, а момент времени t_p .

Схема коммутирующей схемы, которая формирует ток в обмотке электромагнита с неразделёнными накопителем и обмоткой [5] показана на рис. 15, схемотехнически она также, как и предыдущая, имеет структуру моста из полупроводниковых вентилях.

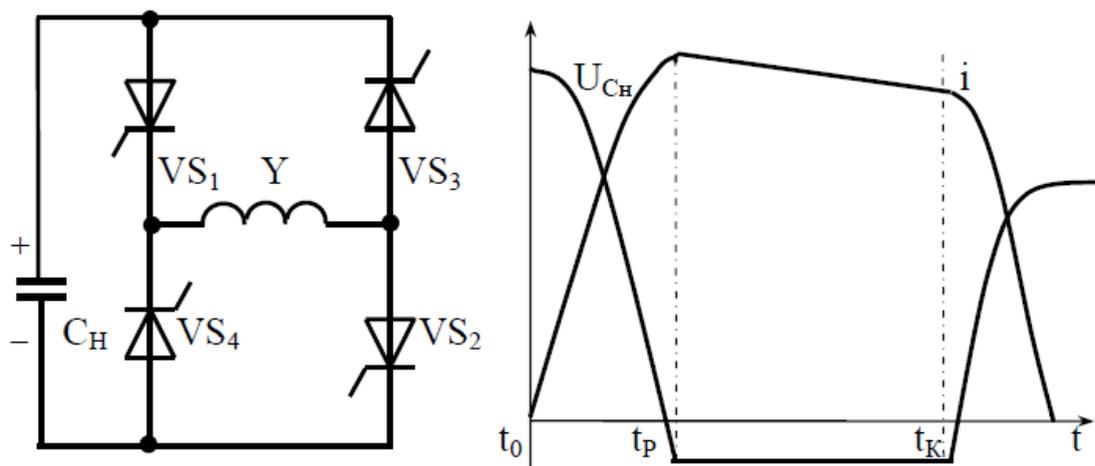


Рисунок 15 – Мостовой вариант схемы формирователя тока в обмотке электромагнита с единой обмоткой и диаграммы ее работы

В одной диагонали данной схемы подключается накопитель энергии C_H , предварительно заряжаемый от схемы зарядного устройства, а в другую включена обмотка электромагнита Y . Процесс формирования тока i в обмотке инициализируется в момент t_0 одновременным включением схемой управления вентилями коммутирующей схемы силовых полупроводниковых тиристоров VS_1, VS_2 . После этого уровень напряжения на накопителе C_H постепенно снижается, а ток обмотки Y соответственно растет. В момент, когда накопитель перезарядится до определенного напряжения, которое является необходимым для следующей пары тиристоров, в момент времени t_p силовой тиристор VS_3 открывается схемой управления. После того, как он откроется, в этот же момент времени посредством воздействия напряжения обратной полярности на накопителе C_H отпирается силовой тиристор VS_2 , результатом этого служит протекание тока нагрузки i по короткозамкнутому пути: VS_1 , обмотка Y , VS_3 , а уровень напряжения на накопителе C_H не изменяется. В момент времени t_k открывается силовой тиристор VS_4 , и к тиристорам VS_1 прикладывается обратное напряжение на накопителе C_H , в результате этого тиристор VS_1 закрывается и ток нагрузки начинает

протекать уже по пути тиристор VS_3 , обмотка Y , тиристор VS_4 , тем самым осуществляя заряд накопителя до изначальной полярности.

Описанная выше схема наиболее подходит для применения в кодоимпульсных сейсмоисточниках, так как сочетает в себе отдельные достоинства предыдущих схем и более универсальна [7], [8].

Недостатком же схемы является лишь принципиальная сложность системы управления, из-за применения большого числа полупроводниковых вентиляей.

4. Схема зарядного устройства накопителя энергии и его система управления

Проведя анализ предложенных схем в гл.2 следует сделать вывод о том, что ни одна из них должным образом не является подходящим решением для построения зарядного устройства. Выходом же из сложившейся ситуации служит схема на основе комбинации импульсных преобразователей напряжения см. рис. 16 [25]. Следует отметить, что комбинация двух схем импульсных преобразователей, а именно понижающего и повышающего выбрана не случайно, а ввиду того что схема понижающего преобразователя не способна зарядить накопитель до требуемого напряжения в 950В и тем самым неэффективно использует накопитель, а схема повышающего не работает при низком напряжении на накопителе. Тем самым решением данной проблемы является комбинация схем преобразователей, которая помогает устранить их недостатки и собрать схему, удовлетворяющую условию заряда накопителя до требуемого напряжения в 950В.

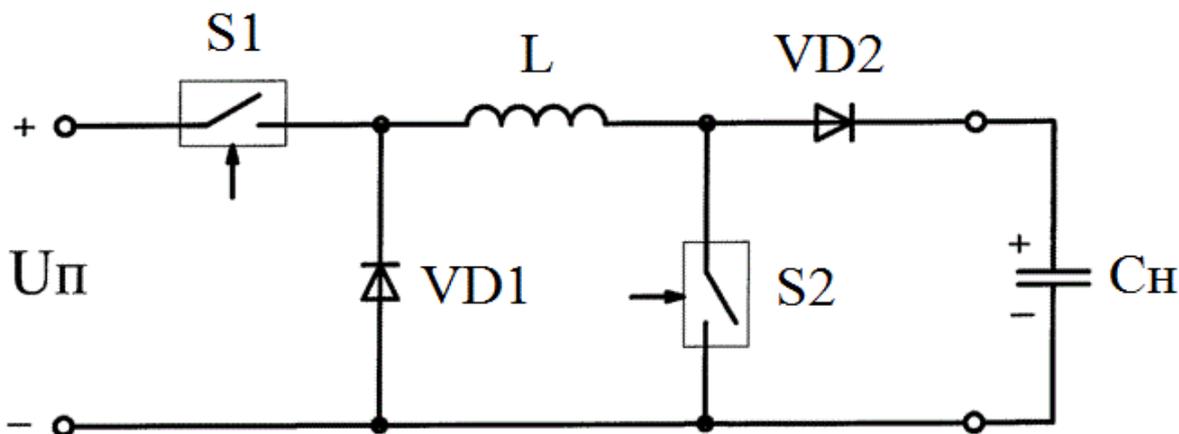


Рисунок 16 – Схема зарядного устройства на схемах ИППН

В процессе заряда накопителя от нулевого напряжения до напряжения входного источника управляющие импульсы поступают на силовой ключ S1, ключ S2 при этом закрыт. Ток дросселя L нарастает согласно выражению 1.

$$\frac{dI}{dt} = \frac{U_n - U_H}{L}, \quad (1)$$

где U_n - напряжение питания;

U_H - напряжение на конденсаторном накопителе энергии;

L – индуктивность дросселя.

Когда ключ 1 закрыт ток через дроссель уменьшается согласно выражению 2:

$$\frac{dI}{dt} = -\frac{U_H}{L}, \quad (2)$$

Т. к. частота коммутаций ключа S1 высока, пульсации тока дросселя малы, то можно считать, что заряд накопителя осуществляется постоянным током [3]. В момент времени, когда напряжение на накопителе достигает величины напряжения входного источника, ключ S1 включают постоянно, а на ключ S2 подают импульсы управления. Когда ключ S2 открыт, ток дросселя нарастает согласно выражению 3:

$$\frac{dI}{dt} = \frac{U_n}{L}, \quad (3)$$

а во время закрытого состояния ключа S2 уменьшается согласно выражению 4:

$$\frac{dI}{dt} = \frac{U_n - U_H}{L}, \text{ при } (U_n < U_H) \quad (4)$$

Когда напряжение на накопителе достигает требуемой величины, ключи S1 и S2 выключают.

4.1 Расчет параметров элементов схемы зарядного устройства

Для того чтобы оценить ток, протекающий в цепи зарядного устройства во время зарядки накопителя энергии воспользуемся формулой для вычисления мощности.

$$P = U \cdot I \quad (5)$$

где I – ток дросселя, U – напряжение на выходе выпрямителя $U \sim 530\text{В}$ Дж С другой стороны, мощность зарядного устройства можно вычислить как:

$$P = W_{\text{имп}} \cdot f_{\text{имп}} = 500 \text{ Дж} \cdot 50 \text{ Гц} = 25000 \text{ Вт} \quad (6)$$

где $W_{\text{имп}}$ - энергия разрядного импульса $W_{\text{имп}} = 500 \text{ Дж}$,
 $f_{\text{имп}}$ – частота следования разрядных импульсов $f_{\text{имп}} = 50 \text{ Гц}$.

Совмещая формулы 6 в 5 можно найти искомое значение тока:

$$I = \frac{W_{\text{имп}} \cdot f_{\text{имп}}}{U} = \frac{25000 \text{ Вт}}{530 \text{ В}} = 47,16 \text{ А} \quad (7)$$

Зная значение тока дросселя, исходя из запасаемой в индуктивности энергии в процессе заряда накопителя, можно определить значение индуктивности дросселя:

$$L = \frac{2W_{\text{зар.имп}}}{I^2} = \frac{2 \cdot 2,5 \text{ Дж}}{2500 \text{ А}^2} = 0,002 \text{ Гн} = 2 \text{ мГн} \quad (8)$$

4.2 Разработка схемы управления зарядным устройством

Исходя из алгоритма работы схемы рис.16 разрабатываемая схема управления зарядным устройством должна отслеживать ток в цепи

(необходимо для ограничения нарастания тока силовых ключей), а также иметь обратные связи по напряжению (обратные связи по напряжению в схеме управления необходимы для осуществления процесса заряда накопителя в две стадии посредством определения моментов переключения схем импульсных преобразователей напряжения).

Одним из вариантов осуществления схемы управления зарядным устройством является схема, приведенная на рис.17.

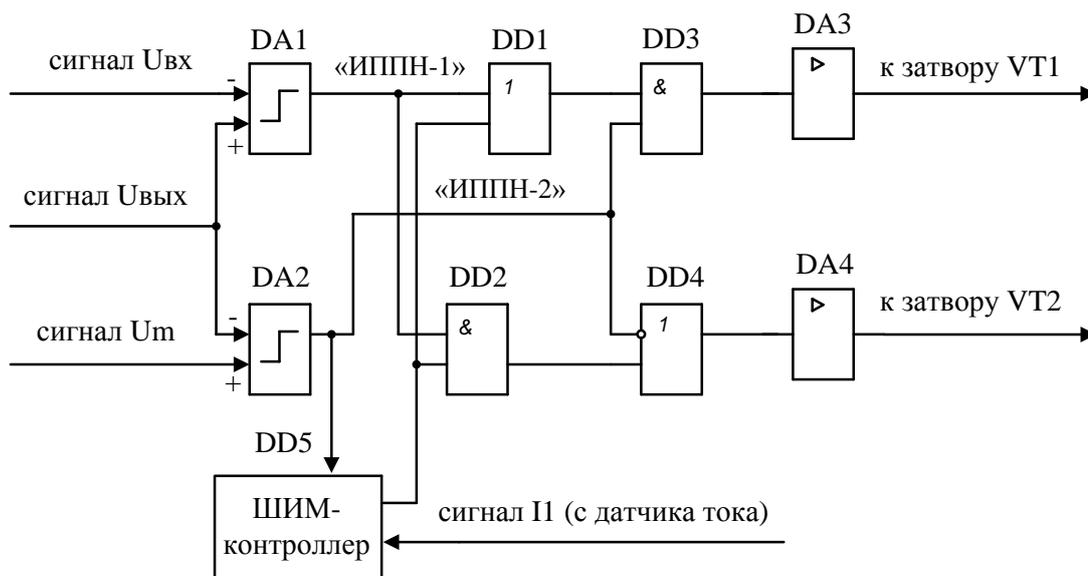


Рисунок 17 – Схема управления зарядным устройством

Схема управления предлагаемым устройством содержит интегральные компараторы DA1 и DA2, логические элементы DD1 – DD4, драйверы DA3, DA4 для IGBT-транзисторов VT1 и VT2, а также ШИМ - контроллер DA5.

Функционирует данная схема следующим образом. Изначально, пока напряжение на накопителе C_n меньше некоторой величины (1000 В), определяемой напряжением U_m на входе DA2, этот компаратор задаёт лог.1 на прямом входе элемента DD3, на инверсном входе DD4 и входе запуска ШИМ- контроллера DA5 (сигнал «ИППН-2»). Если напряжение $U_{вых}$ на накопителе C_n не достигло величины напряжения $U_{вх}$, выдаваемого выпрямителем VD1 – VD6, этот компаратор задаёт лог.0 на входах элементов DD1, DD2 (сигнал «ИППН-1»), а если достигло, то лог.1. Если сигнал

"ИППН-1" равен лог.0 элемент DD2 блокирует прохождение лог.1 с выхода DA5 через DD4 на вход драйвера DA4, и транзистор VT2 постоянно выключен. [11]

Если ток в катушке индуктивности L меньше заданного в ШИМ-контроллере верхнего предела или равен нулю, то DA5 формирует сигнал лог.1, который поступает на входы DD1, DD2 вместе с сигналом «ИППН-1». Через DD1 и DD3 на вход драйвера DA3 поступает лог.1. Транзистор VT1 включен, и по цепи: выпрямитель, VT1, L, VD8, Cн, протекает постоянно увеличивающийся ток. По достижении током в катушке заданного в ШИМ-контроллере верхнего предела формируется сигнал лог.0 на выходе DA5, поступающий через DD1, DD3 на вход драйвера DA3, и транзистор VT1 выключается. Запасённая в катушке L энергия сбрасывается в накопитель Cн через VD7, VD8, при этом ток в катушке уменьшается. Когда он уменьшится до заданного в ШИМ- контроллере нижнего предела, DA5 опять сформирует на выходе лог.1, и цикл повторится. Как при включенном, так и при выключенном транзисторе VT1 ток катушки L протекает через накопитель Cн, заряжая его. [14]

Когда в процессе заряда накопителя Cн сигнал «ИППН-1» станет равен лог.1, он пройдёт через DD1 и DD3 на DA3. Транзистор VT1 станет постоянно включенным. При этом элемент DD2 разблокирует прохождение лог.1 с выхода DA5 через DD4 на вход драйвера DA4. Сигнал ШИМ-контроллера при этом будет управлять транзистором VT2. При включенном VT2 протекает возрастающий по величине ток по цепи: выпрямитель, VT1, L, VT2. А при выключенном VT2 ток протекает по цепи: VD7, L, VD8, Cн, запасённая в катушке L энергия сбрасывается в накопитель Cн, при этом ток в катушке уменьшается, а накопитель заряжается. Цикл повторяется до достижения напряжением на накопителе Cн заданной величины, после чего сигналом лог.0 с выхода DA2 заблокируется ШИМ- контроллер DA5. Транзисторы VT1 и VT2 выключатся, а само устройство ожидает разряда накопителя.

Итоговая же схема разрабатываемого устройства показана на рисунке

18.

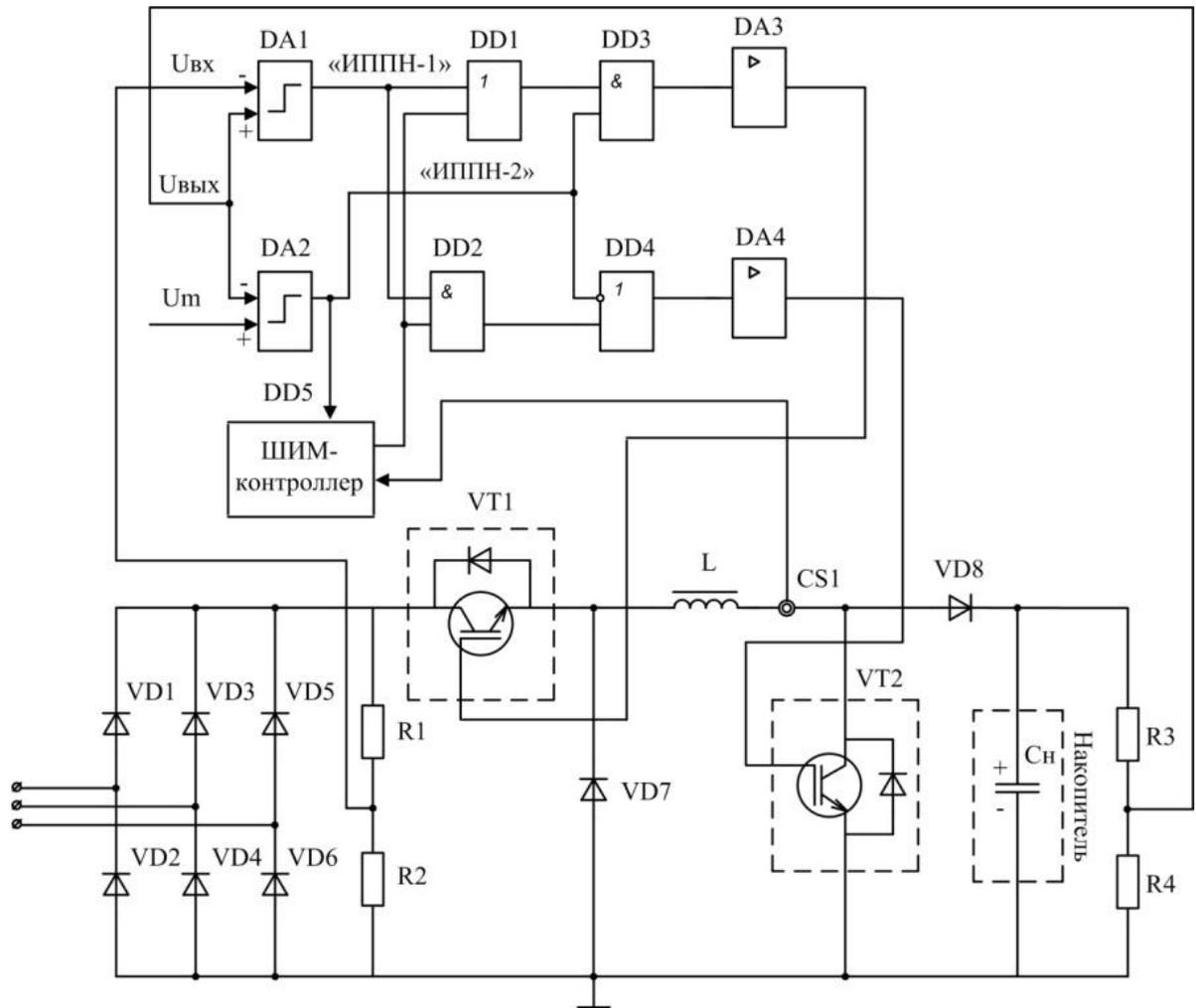


Рисунок 18 – Схема зарядного устройства с системой управления

На основе схемы на рис.16 была спроектирована система управления рис.17, после чего с учетом подобранной элементной базы в системе автоматизированного проектирования Altium Designer был спроектирован макет печатной платы системы управления зарядным устройством см. рис. 19.

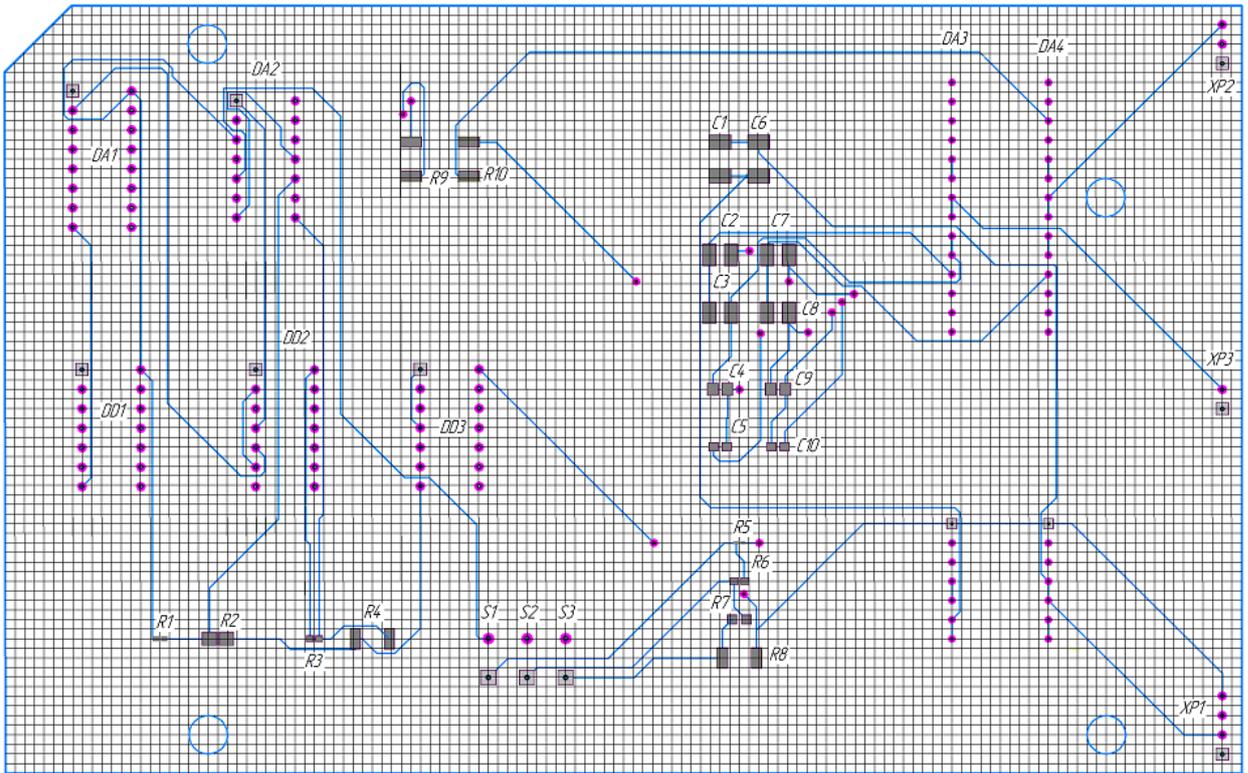


Рисунок 19 – Макет печатной платы системы управления зарядным устройством

4.3 Выбор элементов схемы

Исходя из рассчитанного в п.3 значения тока, были подобраны IGBT-модули (чопперы) M111-100-12 и M110-100-12 см. рис.20 со следующими параметрами см. табл.1.



Рисунок 20 – IGBT-модуль M110-100-12

Таблица 1 – Параметры IGBT-модуля M110-100-12

Максимально допустимое напряжение коллектор-эмиттер, В	1200
Напряжение насыщения коллектор-эмиттер, В	1,8
Номинальное значение тока транзистора, А	100
Структура модуля	транзистор с диодом
Предельная частота модуляции, кГц	20
Ёмкость затвора, нФ	35
Мощность привода, кВт	-
Компоновка драйвера управления	внешний
Токовая защита	нет
Защита от КЗ	нет
Защита от перегрева	нет
Предельный ток эмиттера, А	200
Предельное напряжение затвор-эмиттер, В	6
Предельно допустимое напряжение для изоляции корпуса, В	2500
Рабочий диапазон температур окружающего воздуха, С	-40...150
Производитель	АО Электрум

Для определения тока в цепи зарядного устройства необходим датчик тока, в качестве которого выбран бесконтактный датчик тока CSNF161 см. рисунок 21, его основные параметры приведены в табл.2.



Рисунок 21 – Бесконтактный датчик тока CSNF161

Таблица 2 – Параметры датчика тока CSNF161

Тип датчика	Бесконтактный
Тип выхода	Ток
Диапазон напряжения питания	DC \pm 5В
Выход датчика	Замкнутый контур
Время реакции	0.5мкс
Диапазон замера переменного тока	-150А до 150А
Диапазон постоянного тока	0 до 150А
Потребление тока	14 мА
Максимальная частота	150 кГц

В качестве элементной базы для системы управления зарядным устройством был подобран следующий набор микросхем см. табл.3. При подборе микросхем был учтен ряд требований, таких как наличие логических выходов у компараторов и ШИМ-контроллера, наличие у ШИМ-контроллера токового и запускающего входа, а также наличие логического входа у драйвера управления IGBT транзистором.

Таблица 3 – Элементная база для схемы системы управления зарядным устройством

Элемент	Модель	Корпус	Напряжение питания DC
RS-триггер	K561TP2A	DIP-16	+5 В
Драйвер IGBT	VLA500-01R	SOIC-15	+15 В
Аналоговые компараторы	LM139J	DIP-14	+5 В
Логический элемент НЕ	KM155ЛН1	DIP-14	+5 В
Логический элемент 2ИЛИ	KM155ЛЛ1	DIP-14	+5 В
Логический элемент 2И	KM155ЛИ1	DIP-14	+5 В

5 Моделирование работы схемы источника питания

Следующим же шагом в ходе выполнения научно-исследовательской работы является симуляция работы всего устройства рис.22, для этой цели выбрана программная среда Simulink математического пакета MATLAB. Данная схема получена комбинированием схем понижающего и повышающего импульсного преобразователя постоянного напряжения. Схема осуществляет процесс заряда накопителя энергии Сн до высокого напряжения, которое позволяет создать достаточный импульса тока для обмотки электромагнита сейсмоисточника. Комбинация двух схем импульсных преобразователей позволяет заряжать емкостной накопитель от нулевого напряжения до напряжения большего, чем напряжение входного источника, а также повысить значение коэффициента стабилизации выходного напряжения.

Одним из проблемных шагов при проектировании кодоимпульсного сейсмоисточника является разработка системы его электропитания.

Кодоимпульсный сейсмоисточник, как и импульсный, должен формировать импульсы воздействия на поверхность грунта со строго заданными параметрами момента вступления, фронта импульса и длительностью. Именно поэтому одной из главных задач при проектировании кодоимпульсного сейсмоисточника помимо разработки электрической схемы источника питания и схемы управления зарядным устройством. Является также моделирование ее работы с целью ее дальнейшей отладки.

Для реализации данного алгоритма в программная среде Simulink была составлена имитационная модель см. рис.5. в нее добавлен LC-фильтр на выходе выпрямителя с целью сглаживания входного напряжения. [15]

Данная модель состоит из непосредственно силовой схемы: трехфазного источника на входе схемы (блоки AC Voltage Source,1,2), трехфазного выпрямителя по схеме моста Ларионова (блок Universal Bridge), LC-фильтра (элементы L1, C1), дросселя (элемент L), диода (элемент VD1), непосредственно накопителя энергии (элемент C), IGBT-транзисторов (элементы VT1, VT2), а также для осуществления имитации разделения силовой схемы и схемы системы управления делителей напряжения на резисторах (элементы R1-R4). Схема системы управления построена на блоках компараторов (компаратор $U_{вх}$, компаратор $U_{вых}$), отслеживающий соответственно входное и выходное напряжение, блоков компаратор 1, компаратор 2, пороговых элементов, отслеживающих пересечение ток дросселя заданных значений (пределов – блоки констант нижний предел тока, верхний предел тока, задаваемых вручную), а также соответствующих логических операторов (блоки Logical Operator, 1-6), RS-триггера, которых способствует должным образом осуществить алгоритм работы системы управления. Дополнительно в схеме установлены блоки измерителей напряжений и тока ($U_{ос}$, $U_{вх}$, U_c , $U_{вых}$, ток диода), а также блок осциллограф, который выводит результаты моделирования на график.

Параметры модели выбраны следующие:

Напряжение питания на входе $\sim 220\text{В}$ трехфазное, $C1=100\text{ мкФ}$, $L1=20\text{ мкГн}$, $R1=99,5\text{ кОм}$, $R2=500\text{ Ом}$, $R3=995\text{ кОм}$, $R4=5\text{ кОм}$, $L=2\text{ мГн}$, $C=1\text{ мФ}$, нижний предел тока 90А , верхний предел тока 100А , $U_{c_{\text{макс}}}=1000\text{В}$.

Результат моделирования работы схемы приведен на рис. 23.

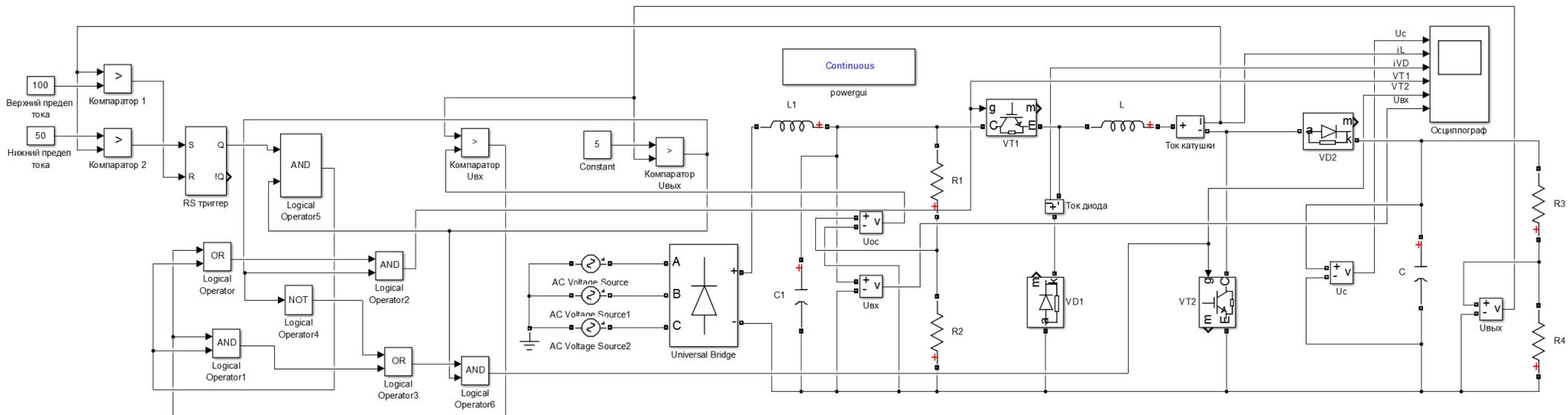


Рисунок 22 - Имитационная модель источника питания в программной среде Simulink

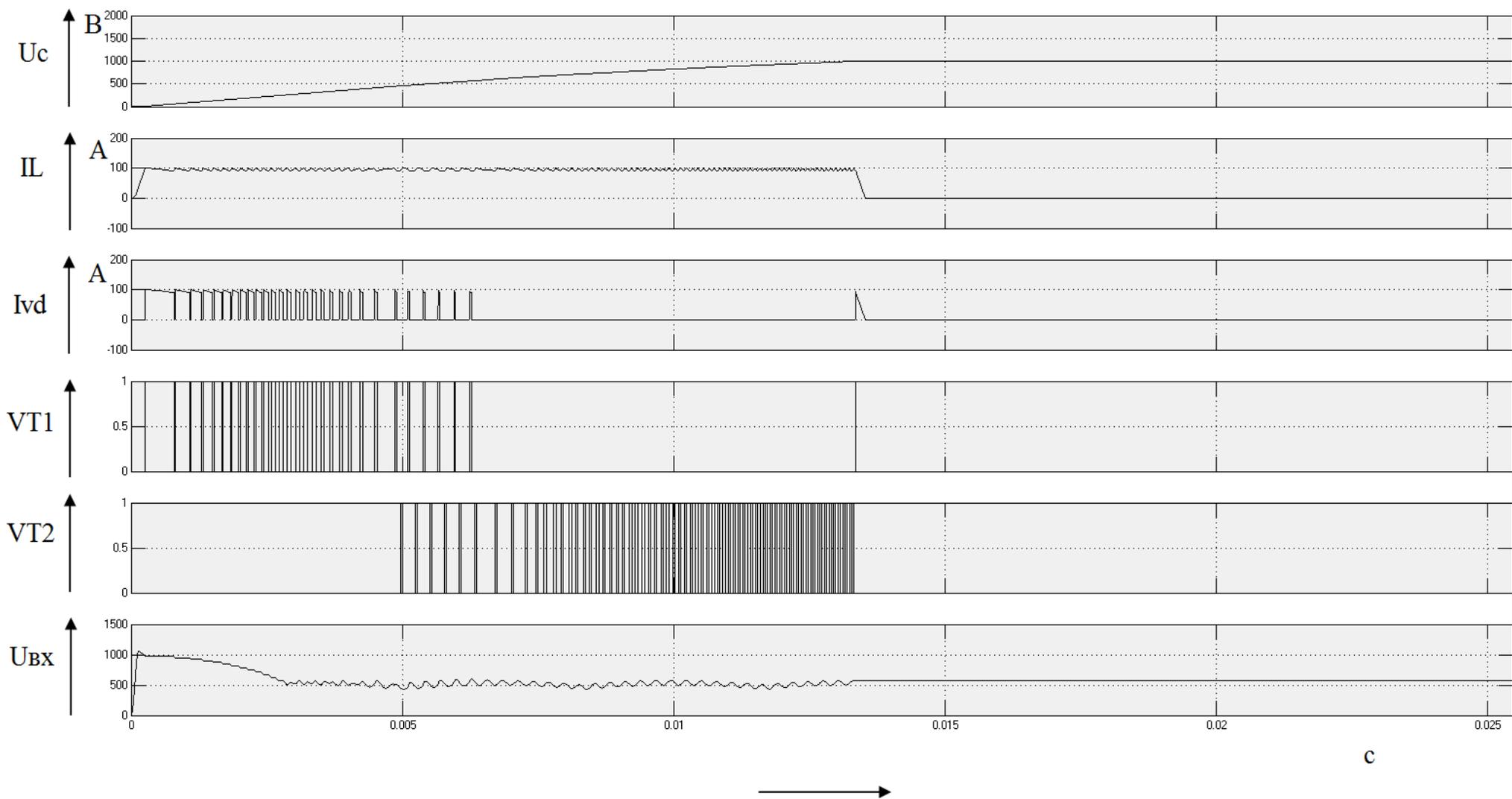


Рисунок 23 – Результаты моделирования работы схемы
источника питания

Как можно видеть из результатов работы схемы см. рис.6 конденсатор С при данных параметрах схемы заряжается до необходимого напряжения 1000В за время 13,5 мс (график 1), на графике 2 показано изменение тока дросселя во время заряда конденсатора, на графике 3 показан ток через диод VD1, на графиках 4,5 показаны управляющие импульсы на затворы транзисторов VT1 и VT2 причем как можно заметить транзистор VT2 начинает свою работу при достижении напряжением на конденсаторе С значения входного напряжения, на графике 6 показано изменение входного напряжения во время процесса заряда.[16]

После проведения моделирования работы были построены следующие зависимости $t_{зар.}=f(L)$, $t_{зар.}=f(I_{Lверх.})$, $t_{зар.}=f(I_{Lниж.})$, $t_{зар.}=f(C)$, $t_{зар.}=f(U_{вх})$ см. рис. 24-28.

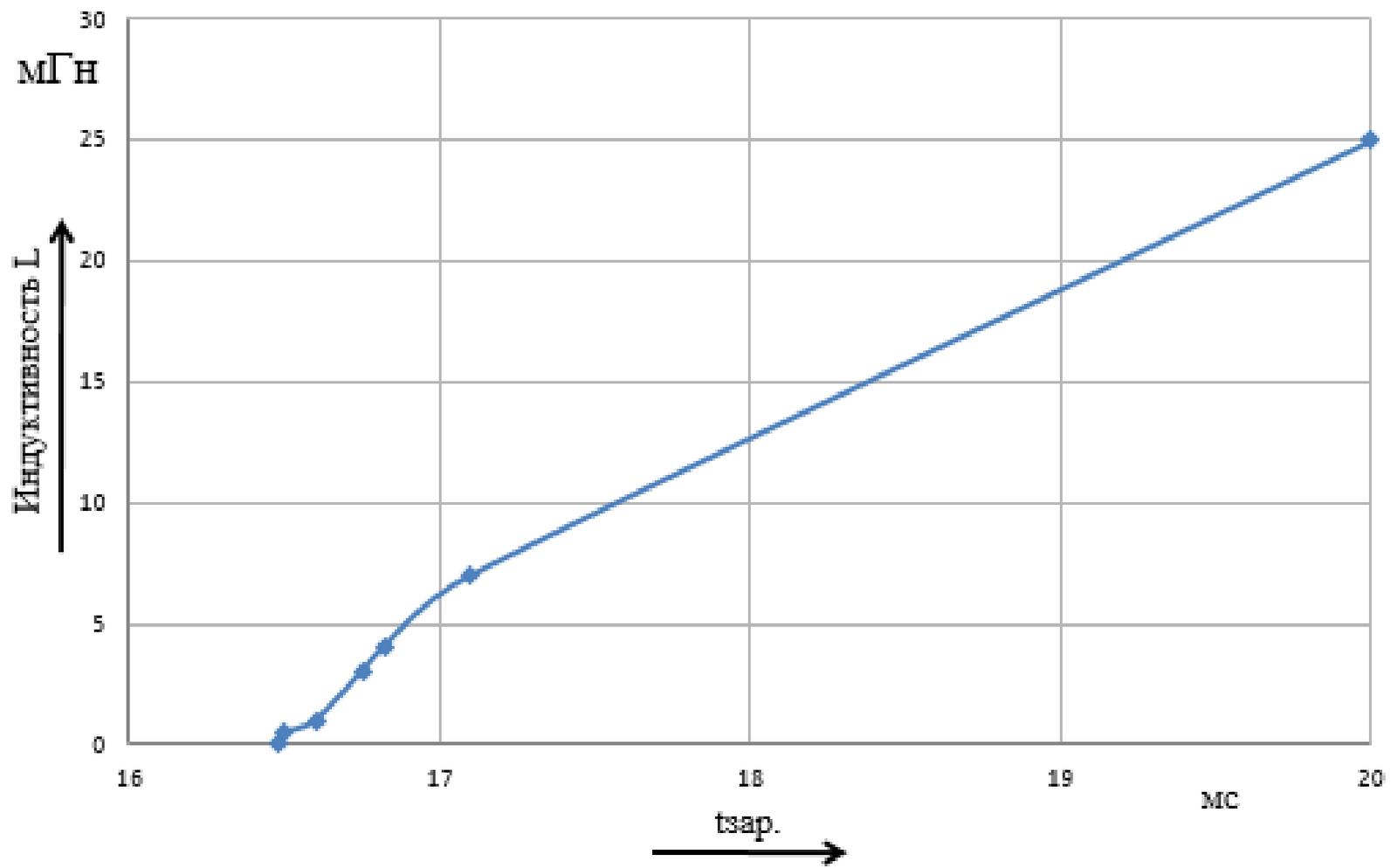


Рисунок 24 – График зависимости $tsap.=f(L)$

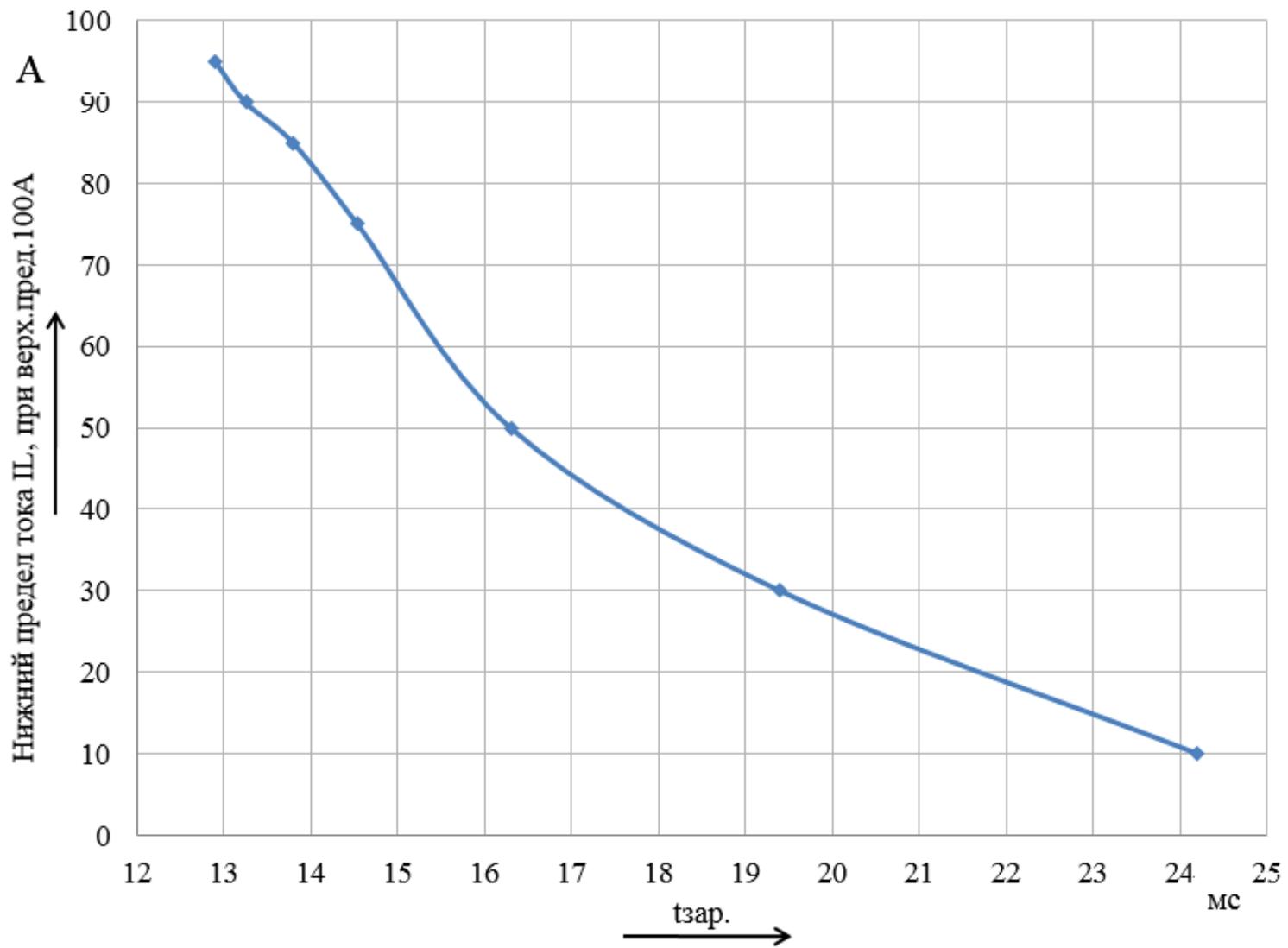


Рисунок 25 – График зависимости $t_{зар.} = f(I_{L\text{верх.}})$

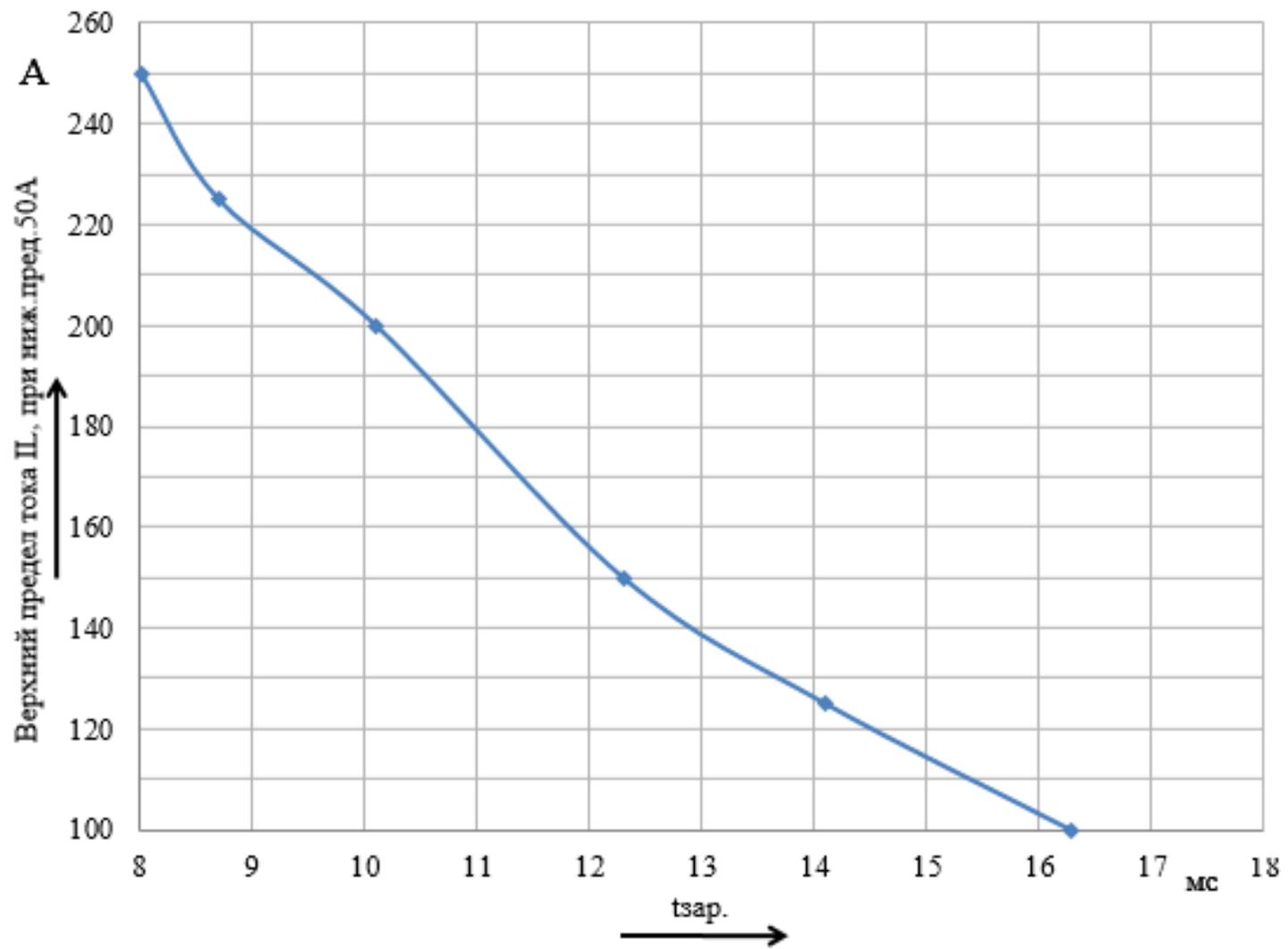


Рисунок 26 – График зависимости $t_{\text{зар.}}=f(I_{\text{нижн.}})$

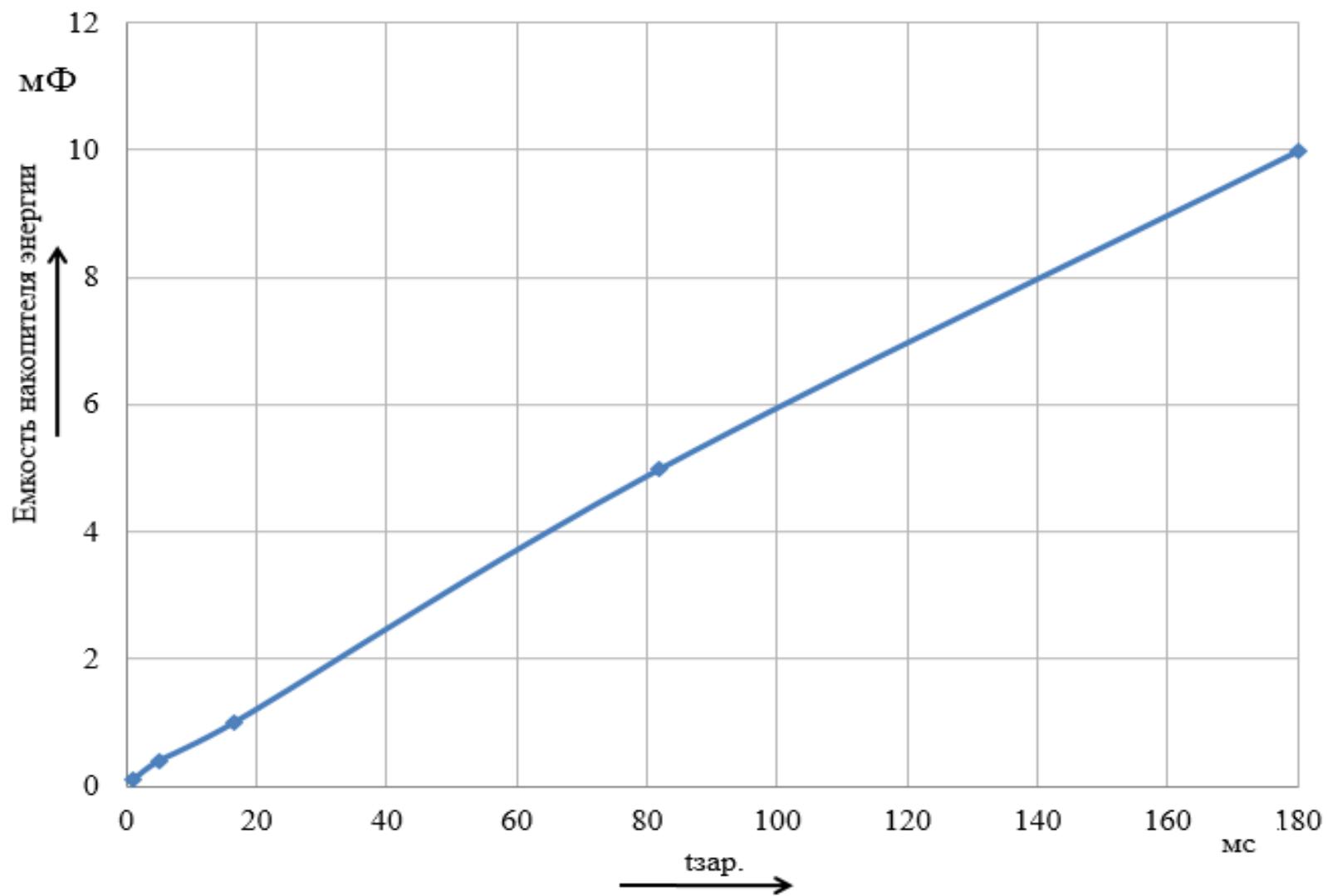


Рисунок 27 – График зависимости $t_{зар.}=f(C)$

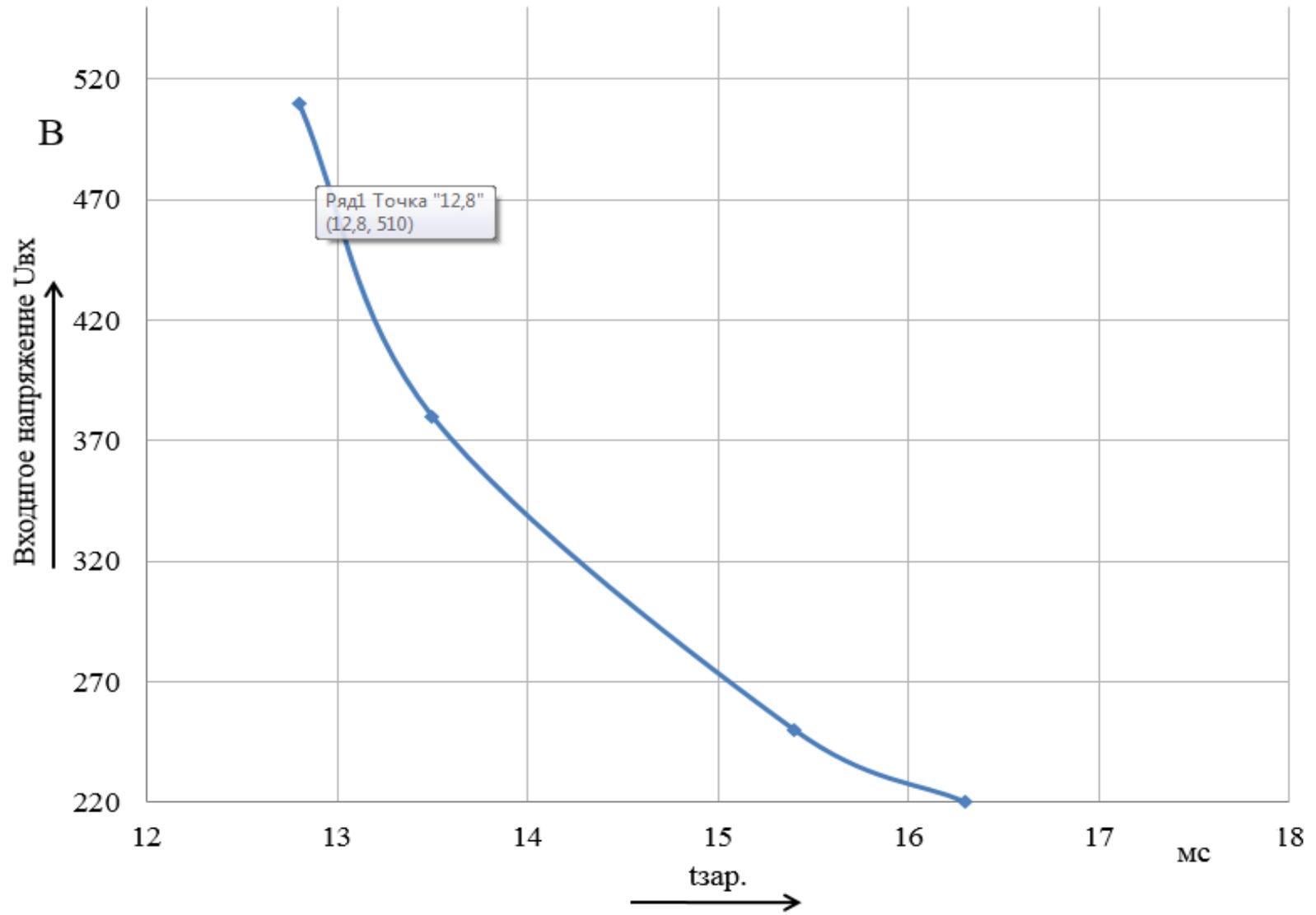


Рисунок 28 – График зависимости $t_{зар.}=f(U_{вх})$

6 Обеспечение электромагнитной совместимости

Электромагнитной совместимостью устройств электроники именуют возможность синхронной работы электронных компонентов, агрегатов и устройств в полевых условиях эксплуатации. Работа всех устройств и компонентов электронной системы требуется с определенным качеством при воздействии случайных электромагнитных помех. Помимо этого, также следует исключить влияние непозволительных электромагнитных помех и остальных техническим устройствам в составе единой установки или агрегата. [16]

На сегодняшний день время в сфере терминологии электромагнитной совместимости главным государственным стандартом считается ГОСТ Р 50397-2011. В этом государственным стандарте отображается полное определение терминов в сфере электромагнитной совместимости. Под электромагнитной обстановкой же подразумевают совокупность реальных электромагнитных явлений, которые присутствуют в данном месте в разных диапазонах частот и времени.

Электромагнитные помехи способны проявлять влияние на функциональную работоспособность технических электронных устройств. Для предоставления функциональной безопасности функционирования электронных устройств при воздействии электромагнитных помех следует выполнить оценку вероятного влияния электромагнитных помех на общий риск и провести конструирование (проектные работы), производство, установку и монтаж электронных устройств так, чтобы риски, связанные с вероятностным воздействием электромагнитных помех, был понижен до приемлемых значений.

При компоновке электронного оборудования в реальных установке действует большое количество излучений различного типа. Следовательно, целью электромагнитной совместимости как проблемы научного характера

считается предоставление работы совместно работающих технических средств.

Объектом исследования электромагнитной совместимости как проблемы научного характера является поиск закономерностей препятствующего взаимодействия электронной аппаратуры, работающей вместе, на базе которых создаются рекомендации по достижению совместимости электронных устройств.

Следует отметить, что электронное устройство (агрегат, система, установка) кроме составных элементов, которые необходимы для осуществления заданных функций, способно дополнительно содержать уникальные элементы, системы или подсистемы, связанные с обеспечением безопасности. Вследствие этого многофункциональной безопасности таких элементов устройства следует уделить должное внимание.

Правильное и безопасное функционирование электронного устройства находится в зависимости от нескольких факторов:

- электромагнитной обстановки и уровней электромагнитной эмиссии от всевозможных источников помех;
- устойчивости к помехам устройств, которые находятся в зоне действия особо сильных электромагнитных полей и электромагнитных помех.

Разрешенные уровни эмиссии помех от электронных устройств регламентируются соответствующими техническими комитетами по стандартизации. Электромагнитной помехой именуют паразитное физическое явление или воздействие полей различной природы, например, таких магнитное, электрическое либо электромагнитное, а также помимо них токов и напряжений внешнего или внутреннего источника энергии, нарушающих оптимальную работу электронных устройств. Также вероятна и деградация технических характеристик и параметров данных электронных устройств. Превышение уровней помехоэмиссии в нормальных условиях эксплуатации является недопустимым. Тем не менее в условиях аварийной

работы электронных устройств или неисправности, либо заводского брака такое превышение способно возникать и требует немедленного устранения.

При рассмотрении устойчивости к электромагнитным помехам, следует также учитывать возможные изменения в качестве функционирования электронного устройства, имеющие статистический характер и вызванные условиями производства данного устройства, а также вероятными последствиями старения оборудования.

С целью обеспечения функциональной безопасности электронного устройства необходимо произвести следующие мероприятия в отношении воздействия электромагнитных помех:

1. Выделить окончательную структуру, конструкцию и производимые функции конструируемого (проектируемого) или уже имеющегося электронного устройства;

2. Оценить электромагнитную обстановку вокруг защищаемого устройства;

3. Определить требования к функциональной безопасности устройства;

4. Выполнить анализ надежности с целью выявления опасностей (касательно различных электромагнитных явлений и относящихся к элементам электронного устройства), которые способны вызвать повышение уровня риска понижения безопасности вследствие воздействия на устройство электромагнитных помех;

5. Осуществить испытания в области электромагнитной совместимости принимая во внимание требования в отношении функциональной безопасности устройства;

6. Внести изменение в конструкцию, правила установки и монтажа электронного устройства с целью понижения возможности рисков до удовлетворительных значений (имеет место в случае возникновения необходимости);

7. Выполнить процесс валидации с целью демонстрации того, что электронное устройство осуществляет свои функции в соответствии с

принятыми требованиями по функциональной безопасности электронных устройств;

8. Составить указания по эксплуатации и проведению сервисного обслуживания разработанного устройства с целью обеспечения необходимой функциональной безопасности на протяжении всего срока эксплуатации электронного устройства. [18]

6.1 Источники электромагнитных помех

Процесс анализирования факторов надежности в отношении электромагнитной совместимости разработанного источника питания на начальном этапе предполагает выявление источников электромагнитных помех.

Источник питания кодоимпульсного сейсмоисточника располагается в непосредственной близости к выходу всей электроустановки сейсмоисточника, обеспечивая процесс преобразования входного напряжения и обеспечение требуемого напряжения для заряда емкостного накопителя энергии, следовательно, необходимо уделить должное внимание всем сигналам как непосредственно в схеме источника, так и сигналам с плат управления. [20]

На рассматриваемый источник питания могут воздействовать следующие источники электромагнитных помех:

1. Высокочастотные поля микрополосковых линий передачи блоков сейсмоприемника, располагающихся вблизи блока питания;
2. Синхронные и асинхронные типы сигналов, поступающие со стороны излучателей;
3. Кондуктивные электромагнитные помехи низких частот со стороны плат управления;
4. Электромагнитные поля сторонней электронной аппаратуры вблизи дислокации сейсмоисточника;

Электромагнитные поля линий электропередач;

Разработанный блок питания также способен стать источником электромагнитных помех также и в других устройствах в случаях:

1. Процессы излучения электромагнитных полей высоких частот и их воздействия на платы управления;
2. Проникновения высокочастотной части сигнала в силовые схемы питания и платы управления соседних электронных устройств;

6.2 Причина воздействия электромагнитных помех

Самой очевидной и распространенной причиной влияния электромагнитного излучения на электронные устройства являются электромагнитные волны, которые излучаются токовым контуром и распространяющиеся в окружающем пространстве со скоростью света $c = 300000 \text{ км/с}$ (см. рис. 29, а).

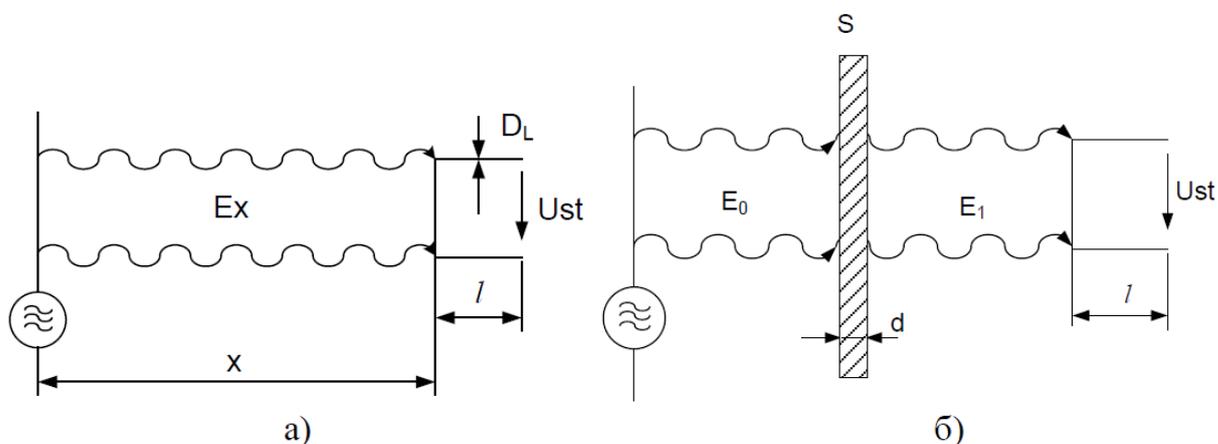


Рисунок 29 – Влияние электромагнитных волн на электрический контур длиной l без экрана (а) и с экраном S толщиной d (б).

Длина волны λ и частота f связаны выражением:

$$\lambda = c / f \quad (1)$$

Напряженность электрического поля на расстоянии x от источника

мощностью P определяется из соотношения:

$$E_x = 0,3 \sqrt{P} / x \quad (2)$$

E_x выражена в В/м, P – выражена в кВт, x - в км.

В процессе воздействия электромагнитной волны на электропроводящие объекты из-за антенного эффекта часто возникают высокочастотные напряжения, которые зачастую являются помехами в сигнальных контурах.

В первом приближении ЭДС в антенне находится как:

$$U_{st} = E l_{x\text{ eff}} \quad (3)$$

где l_{eff} - эффективная длина антенны.

Длина l_{eff} находится в зависимости от габаритов устройства, которое проявляет антенные свойства (D_l и l на рис. 1, а) и длины волны. Например, на частоте $f=300$ МГц, $E_x=10$ В/см, $l= 0,1$ м, $l_{\text{eff}} = 0,2$ м, напряжение $U_{st} = 2$ В. [23]

Защитить устройство, в данном случае источник питания или же ослабить действие электромагнитного поля, как с целью нивелирования излучения, так и для понижения уровня проникновения, помогают экранирующие стенки, которые устанавливаются между источником и приемником электроэнергии (рис. 1, б). При применении такой стенки напряженность воздействующего поля уменьшается от значения $E0$ до значения $E1$. Этот процесс обуславливается, как поглощением энергии поля в структуре материала экрана, так и с другой – процессом отражения электромагнитной волны. Процесс затухания волны зависит от толщины экранирующего покрытия, его способности проводить электрический ток, магнитной проницаемости данного материала из которого оно изготовлено, а также и от частоты электромагнитного излучения.

6.3 Устройства и мероприятия по достижению электромагнитной совместимости

6.3.1 Пассивные помехоподавляющие и защитные компоненты

В процессе обеспечения электромагнитной совместимости очень часто и немало важно снизить эмиссию помех, которая обуславливается гальваническими связями с источниками электроэнергии, или проникновением таких помех сквозь чувствительный элемент электронного устройства, исключить процесс возникновения перенапряжений в потенциальных источниках электромагнитных помех и нивелировать вероятность возникновения высоких напряжений, представляющих угрозу пробоя изоляции проводной продукции, а также снизить уровень излучаемых источником электромагнитных полей и избежать попадание этих полей через те же чувствительные элементы. Для этих целей применяются пассивные устройства помехоподавления в форме фильтров, ограничителей перенапряжения и экранирующих покрытий. При решении задач по электромагнитной совместимости все вышеперечисленные устройства могут быть замонтированы непосредственно у чувствительного элемента электрической схемы (рис. 30, б) либо же у источника (рис. 30, в). Аналитически такое защитное действие данных электронных компонентов представляется в виде соотношения z/z_r .

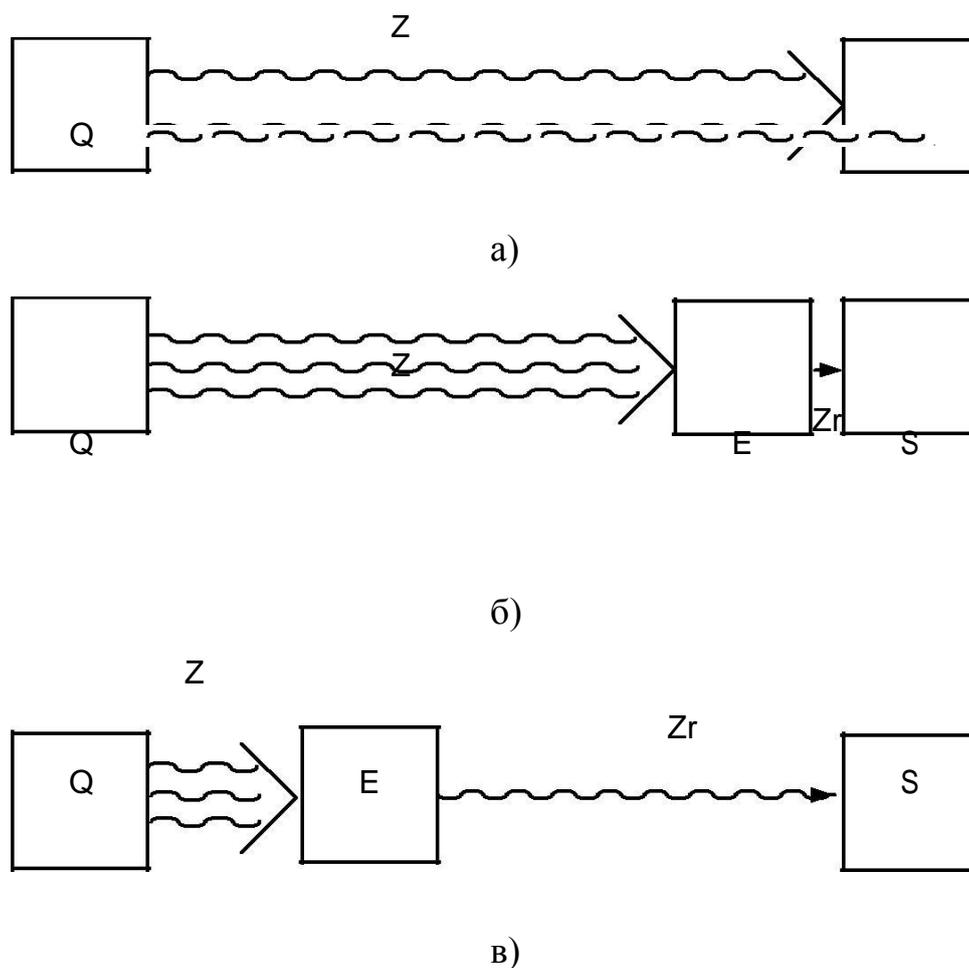


Рисунок 30 – Иллюстрация взаимного положения источника помех Q, приемника помех S и защитного элемента (экрана) E: а) – отсутствие защиты; б) – присутствует только защита электроприемника; в) – подавление помехи х у источника помех.

6.3.2 Экранирование

Процесс экранирования необходим для целей снижения негативного воздействия электрических, магнитных и электромагнитных полей, устранения попадания и негативного действия этих полей на элементы электронных схем, блоков, приборов, кабельной продукции, помещений и зданий, и наконец чтобы устранить помехоэмиссию следующую из

электрических и электронных средств промышленности, которая обуславливается этими полями.

Экранирующее покрытие монтируется между источником энергии и непосредственно приемником помех и уменьшает напряженности E_0, H_0 воздействующих полей до уровня E_1, H_1 за экранирующим покрытием (рис. 31). Физическим способом процесс экранирования может быть объяснен процессом наводки на поверхности экранирующих покрытий заряда или процессом возникновения в нем тока, поле которых суммарно налагается на воздействующее, тем самым как результат ослабляя его. Такие образом в результате как бы получается чувствительный приемник помехи от источника сигнала.

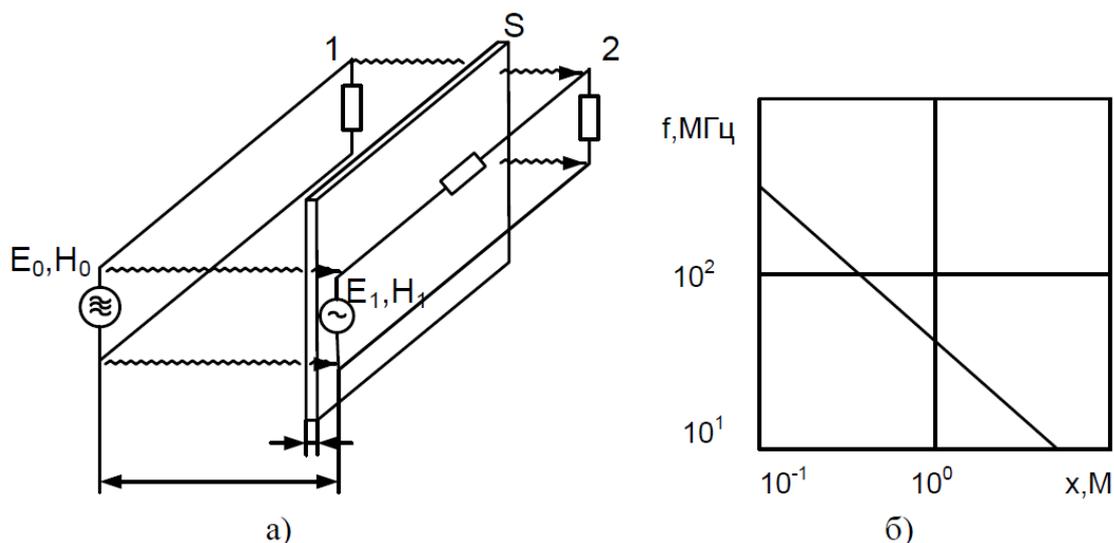


Рисунок 31 – Иллюстрация процесса экранирования токовых контуров от внешних электрических и магнитных полей: а — расположение токовых контуров 1, 2 и экранирующего покрытия S; б - граница между условиями ближнего (нижняя левая часть) и дальнего (верхняя правая часть) электромагнитных полей.

Эффективность процесса экранирования сильно зависит от частоты поля, электропроводности и магнитной проницаемости материала экранирующего покрытия, а также в немного меньшей степени от конфигурации и размеров самого экрана.

При конструировании экрана присутствует необходимость учитывать

тот фактор, что эффективность экранирующего покрытия также зависит и от присутствия дефектов и различных проемов в стенке экранирующей плоскости (к примеру от отверстий под вентиляцию, кабельных вводов и служебных отверстий для различных предусмотренных вспомогательных функций), а также тот факт, что в самих экранах могут возникать эффекты резонанса, так как корпус электрического прибора в котором присутствуют проводящие стенки можно рассматривать и в качестве объемного резонатора.

В экранах непосредственно применяются как немагнитные металлы, такие, например, как медь, так и ферромагнетики. Экранирующее воздействие популярных немагнитных материалов ($\mu_r = 1$, $\sigma_r = 0,6-1$) является следствием магнитных полей, создаваемых вихревыми токами. Постоянное магнитное поле в результате этого почти не поддается экранированию, а переменное поле низких частот ослабевает в незначительной мере. В то же время электрические поля подобными экранами поддаются демпфированию хорошо. [21]

Электронные устройства с металлическими корпусами также способствуют защите от проникающего воздействия электромагнитных помех из внешней среды. Тем не менее присутствующие разрезы, сварные швы, кабельные вводы и вентиляционные отверстия существенно снижают их экранирующее воздействие. В корпусах устройств, которые удовлетворяют требованиям электромагнитной совместимости государственных стандартов, такой недостаток всегда подлежит устранению. Надлежащие конструкционные решения способствуют сплошному электрическому соединению всех стенок поверхности корпуса электронного устройства, с применением некоторых уплотнений, таких, например, как проволочные плетенные прокладки. При этом также не мало важное и эффективное экранирование электронных устройств с пластиковыми корпусами (цифровые или логические управляющие платы для вентиляционных преобразователей) достигается путем применения так называемых металлических нитей в связующем материале или металлической обработкой

поверхностей корпусов этих устройств. [4]

6.3.3 Применение защитной конструкции

Основная цель мероприятий по созданию защитной конструкции заключается в том, чтобы:

- обеспечить собственную помехоустойчивость прибора;
- в комбинации с другими техническими мероприятиями способствовать защите от электромагнитных полей и от разрядов статического электричества;
- снизить процесс излучения прибором, к примеру, под влиянием тактовых сигналов или коммутационных сетевых элементов электромагнитных полей помех, в окружающую среду или уменьшить его до приемлемого уровня.

Основными мероприятиями, которые подразумевают выполнение корпуса, его стенок и различных отверстий в нем, используемых материалов, внутренней компоновки устройств и плат управления, т. е. расположения в пространстве отдельных блоков (входных и выходных цепей, устройств обработки сигнала и запоминания), проводных соединений определенных блоков, а также линий входных и выходных сигналов, а также силовых линий электропитания. В частности, рекомендуется следовать следующим указаниям:

- корпус устройства должен быть принципиально разделен на несколько специальных зон [6] (рис. 33): одну пустую зону с чистым пространством **С**, экранированную зону с поглощающим колебания высоких частот металлическим экранирующим покрытием, в которой располагается быстродействующая логика, и другие особенно чувствительные к помехам блоки, и следующую полуспокойную зону **В** которая предназначена для компоновки коммутационных или силовых устройств (вентильных преобразователей). В зоне с невозмущенным пространством по возможности

должны быть исключены сигнальные провода и провода управления, связанные с оборудованием зоны А. Необходимые же связи в таком корпусе должны обеспечиваться с помощью световодов.

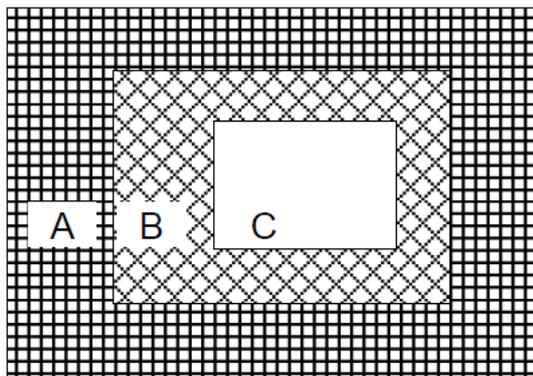


Рисунок 32 – Типичное разделение корпуса устройства по зонам электромагнитной обстановки: *A* — зона внешнего пространства; *B* - полуспокойная зона (зона компоновки силовой части устройства); *C* — спокойная зона (пустая)

- конструкция устройства должна быть спроектирована с учетом минимизации объема сигналов между блоками;
- при компоновке устройства должно быть произведено структурное разделение информационной и силовой частей, и одновременно с этим разделение элементов конструкции по группам (секции, шкафы, стойки которые отделяются друг от друга специальными экранирующими стенками);
- слаботочная и силовая линии кабельной продукции должны быть разнесены в пространстве, а в случае невозможности такого разнесения провода следует прокладывать в трубах или кабельных каналах, которые обеспечивают должный уровень электромагнитной защищенности прокладываемой кабельной линии;
- избегать параллельного размещения в пространстве входных и выходных проводов сетевых блоков и фильтров; [22]

Касательно компоновки печатных плат рекомендуется:

- отдельно размещать элементы и прокладывать соединительные провода, предназначенные для аналоговых, дискретных, низкочастотных и высокочастотных режимов;

- размещать как можно ближе к разъему высокочастотные и быстродействующие логические коммутирующие элементы, фильтры, разделительные устройства;

- тактовые и сигнальные контуры выполнять предельно малыми, чтобы слабо проявлялись их антенные свойства по приему и излучению помех высоких частот, предусматривать широкие расположенные рядом друг с другом дорожки для питания электронных устройств. В многослойных платах подвод питания и систему опорного потенциала следует осуществлять в виде широких пластин на двух близко расположенных друг от друга проводящих поверхностях;

- для предотвращения влияния отражений следует стремиться к тому, чтобы длина проводящей дорожки не превышала значения $l_{gr} \approx 2 T_r$ (здесь l_{gr} выражена в см, а время нарастания импульса T_r - в нс). Обычно $l_{gr} = 10 - 20$ см, $T_r = 5 - 10$ нс.

6.4 Пути устранения влияния статических электрических разрядов

Как известно статическое электричество зачастую способно возникать в результате трения нескольких поверхностей друг о друга, чаще всего носителем такого разряда является находящийся в движении объект, к примеру тело человека или корпус какого-либо устройства при перемещении в пространстве относительно других статических объектов. Результатом последних действий при трении является накопление на поверхности избыточного электрического заряда напряжением несколько кВ, чего вполне достаточно для пробоя многих электронных структур и как следствие этого критические повреждения или полная утрата работоспособности

электронных устройств, плат управления, радиокомпонентов силовых электронных устройств с вентильными преобразователями. В некоторых промышленных помещениях с синтетическими покрытиями полов, которые не проводят электричество и покрытых пластиковыми предметами угроза накопления заряда статического электричества наиболее велика. Основными рекомендациями в таких случаях служат: первое – применение специализированных стандартизированных мер по нивелированию процесса образования новых зарядов статического электричества, а также нейтрализация уже имеющихся зарядов в случае, если за препятствовать их образованию все же не удалось. Так, например, эффективным средством для борьбы с зарядами статического электричества служат приборы, которые являются стойкими к высоким импульсным напряжениям, которые испытаны по специальным методологиям к воздействию разрядов статического электричества. [5]

В процессе работы с электронными компонентами и платами, к примеру, в процессе осуществления сервисного обслуживания электронных устройств, очень важно выполнять разработанные нормы в сфере защиты от воздействия разрядов статического электричества. Самыми главными из которых принято считать:

- транспортирование и перевоз электронных схем и плат управления в закороченном состоянии при последующем их использовании способно вызывать спонтанные помехи по силовой линии сети питания в форме напряжения помех с высокой du/dt , а также сетевых токов, которые содержат в своем составе некоторые составляющие с большими производными di/dt . Так, например, схемы выпрямителей совместно со схемами управления, необходимыми для управления силовыми ключами способны генерировать помехи высокой частоты вплоть до одного мегагерца. Поэтому информационные линии необходимо располагать дальше от проводов питания, которые идут к выпрямительному устройству. Устранить влияние

выпрямительных устройств и их систем управления на сеть можно, реализуя следующие мероприятия:

- использование схем выпрямления, которые оказывают низкое влияние на внешнюю сеть электропитания;
- целесообразный выбор места, в котором выпрямитель должен присоединяться к внешней сети;
- оптимальный выбор параметров сглаживающих реакторов;
- осуществление алгоритмов управления выпрямительными устройствами, в которых негативное влияние на сеть оказывается самым низким и выгодным;
- правильный выбор, компоновка и расчет параметров компенсации реактивной составляющей полной мощности (применение схем с шунтирующими контурами, применение конденсаторных установок, осуществляющих процесс компенсации реактивной составляющей, а также использование схемотехнических решений на базе выпрямителей и т. д.).

6.5 Защита от влияния электромагнитов

Электронные устройства и схемы, которые содержат в своем составе электромагниты и прочие элементы их содержащие способны в процессе своего функционирования и особенно во время выключения создавать высокие индуктивные перенапряжения. Такие перенапряжения связаны с высокоскоростным процессом роста напряжения ($\Delta u/\Delta t = 0,1 - 20 \text{ В/нс}$) и способны в несколько раз или даже порядков превышать рабочее напряжение устройства ($u_{\max} = 100 - 2000 \text{ В}$).

В случае, когда такое устройство или схема осуществляет свои функции совместно с компонентом, содержащим электромагнит или же самим электромагнитом, то прогнозируемый уровень перенапряжения при обесточивании электромагнита подлежит ограничению с применением

специальных предохраняющих схем или отдельных электронных компонентов, таких, например, как варисторы. Располагать такие схемы и компоненты следует обязательно на участке схемы, где предполагается появление перенапряжений. На рис.33 показаны наиболее употребляемые помехозащитные цепи. Они выпускаются в виде модулей и по возможности их необходимо монтировать непосредственно на обмотке электромагнита, чтобы сохранять малыми собственную индуктивность и антенное влияние соединительных проводов.

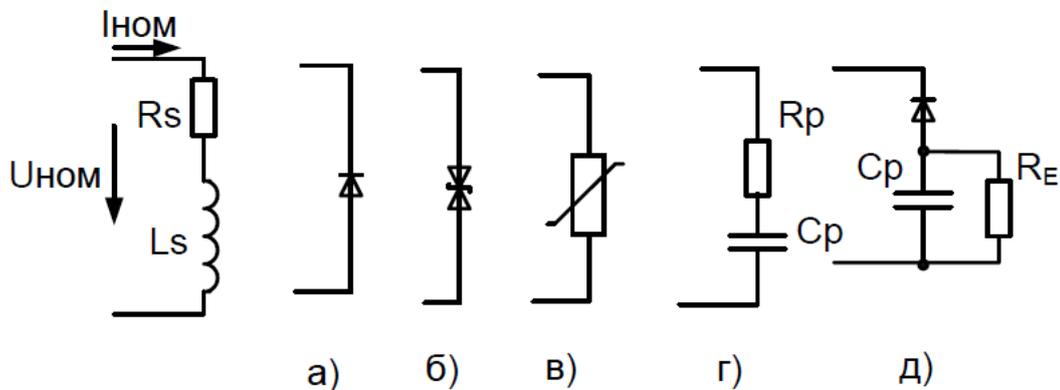


Рисунок 33 - Цепи для снижения индуктивных перенапряжений

Функционально эти модули должны работать лишь при напряжении, превышающем номинальное напряжение обмотки. При отключении они должны рассеивать энергию, остающуюся в обмотке ($L_s I_{ном}^2 / 2$), и пропускать номинальный ток $I_{ном}$. Исходя из вышесказанного следует выразить некоторые указания по использованию устройств для защиты от помех вызванными электромагнитами – в устройствах с применением электромагнитов, работающих на переменном токе применение RC-цепей (рис. 5, г) является наиболее перспективным. Так, например, себестоимость изготовления таких цепей довольно низка, такие цепи не занимают много места при компоновке, а также еще одним их плюсом является компенсация реактивной составляющей мощности, что в свою очередь очень важно если коммутация в схеме устройства произошла в неподходящий момент времени.

7 Проектная реализация разработки источника питания

Цель проекта - разработка источника питания для кодоимпульсного сейсмоисточника.

Задачи проекта.

1 Разработка принципиальной схемы источника питания для кодоимпульсного сейсмоисточника.

2 Разработка системы управления вентилями источника питания.

3 Моделирование работы схемы источника питания и системы управления.

4 Проектирование печатной платы ИП и СУ.

5 Конструирование источника питания для кодоимпульсного сейсмоисточника.

6 Отладка спроектированного устройства.

Основные данные проекта

Дата начала проекта - 26.10.17

Дата окончания проекта - 15.12.17

Общая длительность проекта / (рабочих дней) - 51 день / (37 день)

Бюджет проекта - 300000 руб.

Описание задач и необходимых ресурсов для их выполнения

Перед началом проекта следует этап подготовки, который включает в себя получение технического задания (ТЗ) и согласования ТЗ с заказчиком, которые выполняются непосредственно руководителем проекта.

1 Для проектирования источника питания для кодоимпульсного сейсмоисточника (задачи 2.1-2.4) необходимы следующие ресурсы (в скобках указан тип ресурса):

- Инженер-проектировщик 1-го разряда (трудовой)
- Инженер-проектировщик 2-го разряда (трудовой)
- Инженер-проектировщик 3-го разряда (трудовой)

- Инженер-электронщик 2-го разряда (трудовой)
- Инженер-электронщик 3-го разряда (трудовой)
- Инженер-технолог (трудовой)
- Покупка компьютеров и принтеров (затраты)
- Покупка лицензионного программного обеспечения - ПО (затраты)
- Покупка расходных материалов (затраты)
- Аренда помещения (затраты)

Данная задача, в свою очередь делится на следующие подзадачи -

- Разработка структурной схемы источника питания (ИП) для кодоимпульсного сейсмоисточника
- Разработка принципиальной схемы источника питания для кодоимпульсного сейсмоисточника
- Разработка системы управления (СУ) вентилями источника питания
- Расчет параметров элементов схемы ИП
- Подбор элементной базы разрабатываемого устройства
- Проектирование печатной платы ИП и СУ
- Моделирование работы СУ источника питания
- Моделирование работы схемы источника питания

Данные подзадачи могут выполняться в последовательном порядке, т. е. начало последующей подзадачи начинается с завершением предыдущей [1]. Но подзадачи разработки системы управления (СУ) вентилями источника питания и расчета параметров элементов схемы ИП, а также подзадачи моделирования работы схемы ИП и СУ можно выполнять параллельно, т. к. они независимы друг от друга.

Общая длительность выполнения задачи – 19 дней.

2 Для выполнения задачи конструирования источника питания для кодоимпульсного сейсмоисточника (задача 2.5) необходимы следующие ресурсы (в скобках указан тип ресурса):

- Инженер-электронщик 2-го разряда (трудовой)
- Инженер-технолог (трудовой)

- Старший инженер-конструктор (трудовой)
- Инженер-конструктор (трудовой)
- Покупка лицензионного программного обеспечения - ПО (затраты)
- Текстолит, радиоэлементы, паяльная станция (материальные ресурсы)
- Аренда помещения (затраты)

Задача конструирования источника питания для кодоимпульсного сейсмоисточника (задача 2.5) разбивается на следующие подзадачи:

- Конструирование печатной платы СУ, которая в свою очередь состоит из подзадачи трассировки печатной платы СУ и подготовки макета
- Конструирование печатной платы ИП которая в свою очередь состоит из трассировки печатной платы ИП и подготовки макета

Подзадачи трассировки печатных плат будут параллельно выполняться инженером электронщиком 2-го разряда, а также инженером технологом. Подзадачи подготовки макетов печатных плат в свою очередь включают в себя нанесение рисунка на текстолит, травления, лужение, установку радиоэлементов и их пайки на печатную плату. Для выполнения подзадач подготовки макетов потребуются более опытный старший инженер конструктор, который будет конструировать плату СУ (как более сложную задачу), а также инженер конструктор, который будет конструировать печатную плату ИП, данные подзадачи также будут распараллелены между инженерами-конструкторами.

Задача конструирования в результате распараллеливания подзадач выполняется в течение 8 рабочих дней. [27]

3 Задача по отладке источника питания для кодоимпульсного сейсмоисточника (задача 2) выполняется совместно инженером-наладчиком и старшим инженером-конструктором под непосредственным надзором руководителя проекта. Дополнительно к вышеописанным трудовым ресурсам в данной задаче применяется материальный ресурс в виде осциллографа, а также учитываются затраты на аренду помещения.

Данная задача на подзадачи уже не делится, т. к. на данном этапе жизненного цикла отлаживается уже работа всего устройства в целом, а не составных его частей.

Задача отладки выполняется в течение 2 рабочих дней.

Завершается же проект внутренней проверкой, нормоконтролем, осуществляемым инженером-технологом, а также утверждением проекта самим руководителем проекта.

Результаты проектирования

Выполнение проекта производилось в программной среде Microsoft Project. В данной программе реализуется создание проекта от момента получения задания до окончательного выполнения проекта. Microsoft Project удобен тем, что он позволяет контролировать как денежные, трудовые, так и временные ресурсы. Еще удобным качеством данной программы является возможность безболезненного переноса дат выполнения задач с сохранением связей между ними [3].

На первом этапе работы задаются задачи проекта, также эти задачи можно разделять на подзадачи. Скриншот отображения задач приведен на рисунке 34.

Режим задачи	Название задачи	Длительно	Начало	Окончание	Предшественни	Названия ресурсов
	Проект	37 дней	Чт 26.10.17	Пт 15.12.17		
	Начало проекта	0 дней	Чт 26.10.17	Чт 26.10.17		
	Подготовка	3 дней	Чт 26.10.17	Пн 30.10.17	2	Аренда помещения[3]
	Получение технического задания	1 день	Чт 26.10.17	Чт 26.10.17	2	Руководитель проекта
	Согласование ТЗ с заказчиком	2 дней	Пт 27.10.17	Пн 30.10.17	4	Руководитель проекта
	Проектирование	19 дней	Вт 31.10.17	Пт 24.11.17	3	Компьютер[4];Принтер[2];Лицензионное ПО[3 000,
	Конструирование	8 дней	Вт 28.11.17	Чт 07.12.17	15	Аренда помещения[8]
	Конструирование печатной платы СУ	8 дней	Вт 28.11.17	Чт 07.12.17	15	Лицензионное ПО[1 000,00р.]
	Трассировка печатной платы СУ	1 день	Вт 28.11.17	Вт 28.11.17	15	Инженер-электронщик 2-го разряда
	Подготовка макета	7 дней	Ср 29.11.17	Чт 07.12.17	18	Текстолит[1];Радиоэлементы[1];Паяльная станция[
	Нанесение рисунка на текстолит	1 день	Ср 29.11.17	Ср 29.11.17	18	Старший инженер-конструктор
	Травление	1 день	Чт 30.11.17	Чт 30.11.17	20	Старший инженер-конструктор
	Лужение	1 день	Пт 01.12.17	Пт 01.12.17	21	Старший инженер-конструктор
	Установка радиоэлементов	1 день	Пн 04.12.17	Пн 04.12.17	22	Старший инженер-конструктор
	Пайка радиоэлементов	3 дней	Вт 05.12.17	Чт 07.12.17	23	Старший инженер-конструктор
	Конструирование печатной платы ИП	8 дней	Вт 28.11.17	Чт 07.12.17	17НН	
	Трассировка печатной платы ИП	1 день	Вт 28.11.17	Вт 28.11.17	15	Инженер-технолог

Рисунок 34 - Отображение задач в Microsoft Project

Очень удобным свойством данной программной среды является автоматический режим расчета длительности, как задач проекта, так и его выполнения в целом.

В качестве отсчетной точки является задача «начало проекта» (рис. 34). Это так называемая веха.

Для каждой задачи можно назначить какой-либо ресурс, будь то трудовой, затратный или материальный. В качестве ресурсов для «проектирования» являлись затраты на покупку принтера, компьютера и лицензионного ПО см. рис. 34 [29].

В данном окне программы на рис. 1 можно вывести информацию о названии ресурсов, необходимых для выполнения задачи.

Колонки «начало» и «окончание» привязаны к календарю, и показывают конкретные даты длительности задач (проекта). Благодаря привязке проекта к календарю, можно отслеживать и выполнение задач в процентном соотношении на любом этапе жизни проекта.

Колонка предшественники показывает, сколько предыдущих задач, подзадач или процент выполнения какой-либо задачи необходим для начала выполнения задачи.

На рисунке 35 представлен скриншот листа ресурсов выполняемого проекта.

Руководитель проекта	Трудовой		Р	100%	220,00р./ч	0,00р./ч	0,00р.	Пропорциональное	Стандартный
Инженер-проектировщик 1-го разряда	Трудовой		И	100%	160,00р./ч	0,00р./ч	0,00р.	Пропорциональное	Стандартный
Инженер-проектировщик 2-го разряда	Трудовой		И	100%	195,00р./ч	0,00р./ч	0,00р.	Пропорциональное	Стандартный
Инженер-проектировщик 3-го разряда	Трудовой		И	100%	210,00р./ч	0,00р./ч	0,00р.	Пропорциональное	Стандартный
Инженер-электронщик 2-го разряда	Трудовой		И	100%	220,00р./ч	0,00р./ч	0,00р.	Пропорциональное	Стандартный
Инженер-электронщик 3-го разряда	Трудовой		И	100%	270,00р./ч	0,00р./ч	0,00р.	Пропорциональное	Стандартный
Инженер-программист	Трудовой		И	100%	250,00р./ч	0,00р./ч	0,00р.	Пропорциональное	Стандартный
Инженер-конструктор	Трудовой		И	100%	180,00р./ч	0,00р./ч	0,00р.	Пропорциональное	Стандартный
Старший инженер-конструктор	Трудовой		С	100%	240,00р./ч	0,00р./ч	0,00р.	Пропорциональное	Стандартный
Инженер-наладчик	Трудовой		И	100%	150,00р./ч	0,00р./ч	0,00р.	Пропорциональное	Стандартный
Инженер-технолог	Трудовой		И	100%	170,00р./ч	0,00р./ч	0,00р.	Пропорциональное	Стандартный
Лицензионное ПО	Затраты		Л					Пропорциональное	
Компьютер	Материальный		К		20 000,00р.		0,00р.	Пропорциональное	
Принтер	Материальный		П		8 000,00р.		0,00р.	Пропорциональное	
Паяльная станция	Материальный		П		24 000,00р.		0,00р.	Пропорциональное	
Текстолит	Материальный		Т		2 000,00р.		0,00р.	Пропорциональное	
Радиоэлементы	Материальный		Р		3 500,00р.		0,00р.	Пропорциональное	
Аренда помещения	Материальный		А		400,00р.		0,00р.	Пропорциональное	
Осциллограф	Материальный		О		10 000,00р.		0,00р.	Пропорциональное	
Расходные материалы	Затраты		Р					Пропорциональное	

Рисунок 35 - Лист ресурсов проекта

В данном окне можно задать тип ресурсов (трудовой, затраты, материалы), в колонках «стандартная и сверхурочная» задается ставка, почасовая или дневная, для трудовых ресурсов. В итоге получаем список всех используемых в проекте ресурсов, которые затем используются для выполнения задач, представленных на рисунке 1.

На рисунке 36 представлена диаграмма Ганта из программы Microsoft Project.

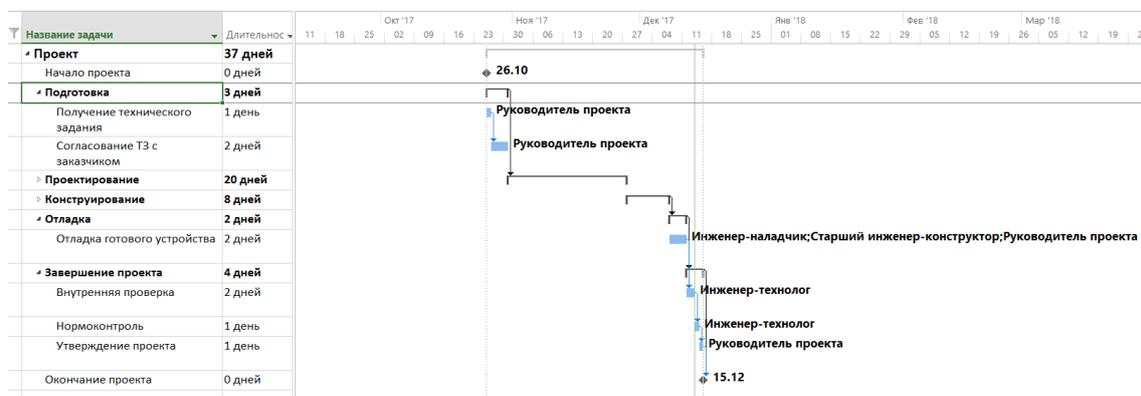


Рисунок 36 – Диаграмма Ганта

Диаграмма Ганта представляет собой последовательную структуру, на которой можно отследить последовательность выполнения задач и их взаимосвязи друг с другом. Также на нем можно поставить взаимосвязи между задачами и подзадачами, которые показывают после какого этапа предшествующей задачи может начаться следующая. Например, в данной выполняемой работе задачи по получению ТЗ и согласованию ТЗ с заказчиком выполняются строго последовательно, так как каждая последующая задача не может начаться, пока не завершится предыдущая.

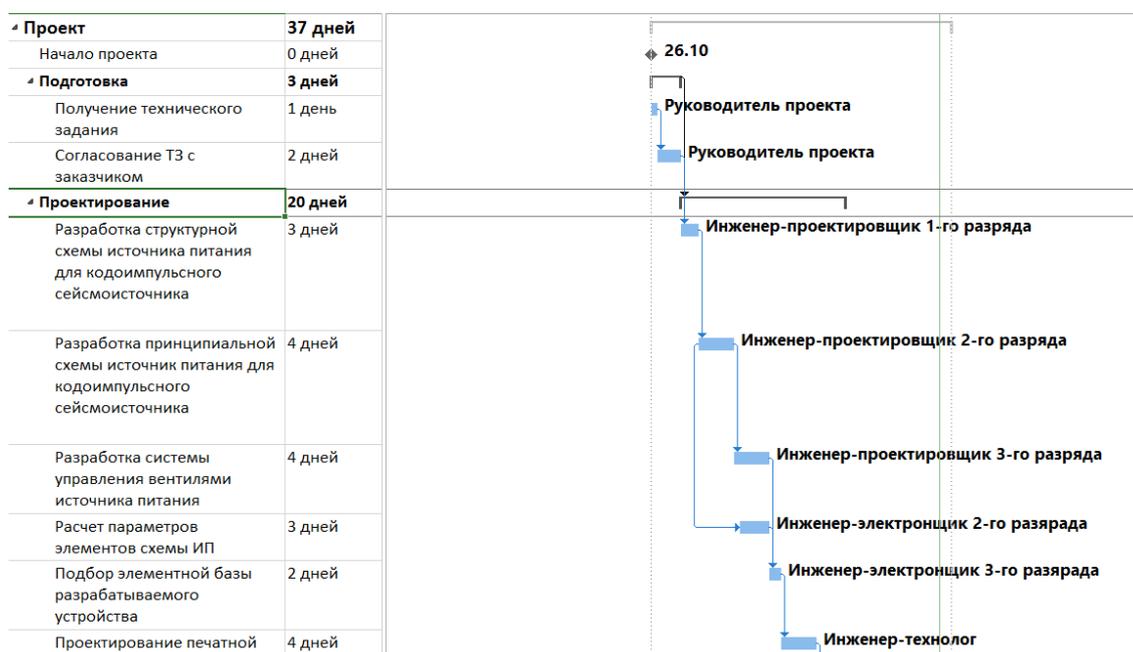


Рисунок 37 – Диаграмма Ганта

В свою очередь, подзадача по разработке системы управления вентилями источника питания и расчет параметров элементов схемы ИП могут выполняться одновременно и потому на диаграмме Ганта (рис. 36) они параллельны [30].

Как можно видеть из диаграммы Ганта (рис. 37) завершение проекта наступает 15.12, что означает выполнение работы в установленные сроки.

Важным условием выполнения любого проекта является не выход из бюджетных планов. На рисунке 38 представлена таблица с расчетами затрат на проект.

БЮДЖЕТ НА ПРОЕКТ 300000									
Трудовой ресурс	ставка руб. ч	время работы, ч	з/п без вычета	НДФЛ	ФСС	ПФР	ФФОМС	Зарплата за вычетом НДФЛ	общие затраты на сотрудника
Руководитель проекта	220	48	10560	1372,8	306,24	2323,2	538,56	9187,2	13728
Инженер-проектировщик 1-го разряда	160	24	3840	499,2	111,36	844,8	195,84	3340,8	4992
Инженер-проектировщик 2-го разряда	195	32	6240	811,2	180,96	1372,8	318,24	5428,8	8112
Инженер-проектировщик 3-го разряда	210	32	6720	873,6	194,88	1478,4	342,72	5846,4	8736
Инженер-электронщик 2-го разряда	220	32	7040	915,2	204,16	1548,8	359,04	6124,8	9152
Инженер-электронщик 3-го разряда	270	40	10800	1404	313,2	2376	550,8	9396	14040
Инженер-программист	250	16	4000	520	116	880	204	3480	5200
Инженер-конструктор	180	56	10080	1310,4	292,32	2217,6	514,08	8769,6	13104
Старший инженер-конструктор	240	72	17280	2246,4	501,12	3801,6	881,28	15033,6	22464
Инженер-наладчик	150	16	2400	312	69,6	528	122,4	2088	3120
Инженер-технолог	170	24	4080	530,4	118,32	897,6	208,08	3549,6	5304
Материальный ресурс	Стоимость	Затраты	Стоимость						107952
Персональные компьютеры x4	80000	Расходные материалы	1500						
Лицензии на ПО	6000	Аренда помещения	14800						
Принтеры	16000								
Текстолит	4000								
Радиоэлементы	7000								
Осциллограф	10000								
Паяльная станция	48000								
Общие затраты	295252								

Рисунок 38 - Таблица с расчетами затрат на проект

Как можно увидеть из рисунка 5 затраты на проект включают себя затраты на з/п сотрудников, фиксированные отчисления в следующие фонды и на материальные ресурсы:

-отчисления в ФСС (фонды социального страхования), составляют 2,9% от заработной платы сотрудника без вычета НДФЛ - основного вида прямых налогов на прибыль физических лиц.

-отчисления в ПФР (пенсионный фонд России), составляют 22% от заработной платы сотрудников.

-отчисления в ФФОМС (фонд обязательного медицинского страхования), составляет 5,1% от заработной платы сотрудников.

- покупка компьютеров и принтеров
- покупка текстолита, радиоэлементов
- покупка паяльной станции
- покупка лицензионного ПО

Как можно увидеть из рисунка 5 затраты на проект не превышают заложенного бюджета.

Итоги

Проект закончен 15.12, что соответствует назначенным срокам.

Затраты на проект составили 295252 рубля, что меньше заложенных средств в размере 300 тыс. руб., выделенных на проект.

Заключение

В результате проведенных в диссертационной работе исследований по разработке схемы источника питания для кодоимпульсного сейсмоисточника получены следующие основные результаты:

Определено, что наиболее оптимальным вариантом исполнения сейсоисточника является кодоимпульсный, так как он имеет наиболее оптимальные с точки зрения экономики, а также характеристик производительности. Для повышения эффективности кодоимпульсного сейсмоисточника потребуется обеспечить:

- период зарядного импульса конденсаторного накопителя энергии равный 50 Гц;
- энергия, которую несет в себе зарядный импульс конденсаторного накопителя энергии $W_{имп} = 200 \text{ Дж}$;
- рабочее напряжение на конденсаторном накопителе, равное максимально возможному из условия заданного класса электробезопасности работ (установки напряжением до 1000 В) и составляющее $U_c = 950 \text{ В}$;

По результатам исследования схем заряда конденсаторного накопителя удалось выяснить, что схемы удвоителей напряжения (одно- и трёхфазные) удовлетворяют условиям применения в качестве зарядных устройств электрических конденсаторов и их применение в мощных электроприводах сейсмоисточников, при тяжёлых условиях эксплуатации и значительных импульсных изменениях напряжения на входе и переменчивости условий окружающей температуры воздуха, а также при вибрационных воздействиях может обеспечить существенно более высокую надёжность работы электропривода по сравнению с функционально более сложными схемами.

Была разработана и исследована компьютерная модель зарядного устройства, а также получены результаты ее работы в виде функциональных зависимостей времени заряда накопителя энергии от различных параметров схемы источника питания, из анализа которых следует отметить, что наиболее резко на время заряда влияют пульсации тока дросселя (уставки

его предельных значений, которые в схеме задаются пороговыми элементами - компараторами).

Была разработана принципиальная схема зарядного устройства, а также ее схема системы управления.

После проведенных расчетов параметров элементов схемы зарядного устройства подобраны IGBT-модули силовых ключей, а также определена индуктивность необходимого дросселя. В ходе поисков подобрана элементная база для схемы системы управления зарядным устройством, которая позволяет осуществить требуемый алгоритм работы всей схемы заряда емкостного накопителя энергии.

В системе автоматизированного проектирования Altium Designer был создан макет печатной платы системы управления зарядным устройством, который позволил судить о размерах будущей платы.

Был проведен анализ разработки источника питания с точки зрения проекта, в результате которых удалось выяснить сроки реализации проекта и его стоимость.

Список используемой литературы

1. 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.
2. Чичинин, И. С. Вибрационное излучение сейсмических волн / И.С. Чичинин.– М.: Наука, 1984.– 223с.
3. Шнеерсон, М. Б. Установки для возбуждения упругих колебаний в наземной невзрывной сейсморазведке / М.Б. Шнеерсон, В.А. Гродзенский и др. // Разведочная геофизика.– М.: 1985.– 157с.
4. Булатов, О. Г. Полупроводниковые зарядные устройства емкостных накопителей энергии / О.Г. Булатов.– М.: Радиосвязь, 1986.– с.159.
5. Ваншельбойм, В. Г. Геологическая и технико–экономическая эффективность наземных невзрывных источников сейсмических колебаний / В.Г. Ваншельбойм, В.В. Майоров, М.В. Шнеерсон // Исследование и разработка наземных невзрывных источников сейсмических колебаний.– М.: 1988 – с.118.
6. Нейман, Л. Р. Теоретические основы электротехники / Л.Р. Нейман, К.С. Демирчян.– Том 1.– Л.: Энергия, 1981.– 305с.
7. Пентегов, И. В. Основы теории зарядных цепей емкостных накопителей энергии / И.В. Пентегов.– Киев: Наукова думка, 1982.–419с.
8. Бондаренко В.М., Демура Г.В., Савенко Е.И. Общий курс разведочной геофизики – М.:Норма, 1998 – с.312–383.
9. Шевченко А.А. Скважинная сейсморазведка М: РГУ нефти и газа, 2002. — 129 с.
10. Кострыгин Ю. П. Сейсморазведка на сложных сигналах.– Тверь: Издательство ГЕРЕС, 2002.– 416 с.
11. Шнеерсон М. Б. Теория и практика наземной сейсморазведки.– М. : ОАО "Издательство Недр", 1998.– 527 с.

12. Ивашин В. В., Певчев В. П. К вопросу развития импульсных наземных сейсмоисточников для сейсморазведки / Научное обозрение. 2012.– № 2.– С.313-321.
13. Бадиков, Н. В., Москаленко Ю. А., Захаров Н. В., Шумский Б. В. Пневматические источники сейсмического волнового поля "Пульс" / Приборы и системы разведочной геофизики: Саратов, 2003.– № 1.– С.30-32.
14. Патент № 4632215 США, кл. G 01 V 1/047, G 01 V 1/133. Двухмодульный гидравлический вибратор / Farris Richard C.; заявл. 20.04.84; опубл. 30.12.86
15. Чуркин И. М. Кодоимпульсный сейсмоисточник с повышенной частотой возбуждения сейсмических волн / Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2009.– № 3.– С. 28-35.
16. Певчев В. П. Особенности системы импульсного питания электромагнитного двигателя источника сейсмических волн / Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н.Туполева, 2009.– № 3.– С.47-50.
17. Ивашин В. В., Сипайлов Г. А. Генератор однополярных импульсных токов треугольной и трапецеидальной формы / Приборы и техника эксперимента, 1966.– № 5.– С.151-155.
18. Кудинов А. К., Узбеков К. Х. Применение принципов дуальности в силовой электронике / Актуальные проблемы электронного приборостроения: материалы Международной научно-технической конференции.- Саратов: СГТУ, 2006.– С. 349-354.
19. Абрамов В. М. Электронные элементы устройств автоматического управления: схемы, расчет, справочные данные. - М.: Академкнига, 2006. – С.134-162.
20. NCP1207-D Datasheet: [Электронный ресурс]. URL: <http://www.datasheet-pdf.com/mobile/473288/NCP1207-D.html> (дата обращения: 9.10.2017).

21. CSNE381 Closed loop current sensor, measures ac, dc or impulse current: [Электронный ресурс]. URL: <https://sensing.honeywell.com/CSNE381-closed-loop-current-sensors> (дата обращения: 11.10.2017).
22. А. К. Кудинов, В.П. Певчев О выборе коэффициента преобразования кодоимпульсного сейсмоисточника / Известия ВУЗов. Электромеханика, 2011.– № 2.– С.34-38.
23. Б. Ю. Семенов. Силовая электроника для любителей и профессионалов. - М: Солон-Р, 2001 г., С.127-140.
24. Г. А. Белов. Динамика импульсных преобразователей. - Изд-во Чуваш. ун-та Год: 2001 — с. 74.
25. Пат. 2254662 РФ, МКИ H02M3/22, H02J7/10. Преобразователь постоянного напряжения / Кудинов А.К.; опубл. 20.06.15, Бюл. № 15.
26. Управление проектами: от планирования до оценки эффективности: практиче-ское пособие/ под ред. Ю.Н. Лапыгина.-Москва: Издательство «Омега-Л», 2007. – 251с.: ил.
27. Charger for NiMH batteries based on buck DC/DC converter 2014, V. Stanko, K. Laptelic, A. Voltec: [Электронный ресурс]. URL: <http://www.doiserbia.nb.rs/img/doi/1451-4869/2014/1451-48691403477L.pdf> (дата обращения: 8.04.2017).
28. Estimating the limit possibilities of the step charging system for capacitive energy, 2013, Y. Kadasr, D. Piros: [Электронный ресурс]. URL: <http://advances.utc.hun/index.php/ADCW/article/view/53> (дата обращения: 3.04.2017).
29. High voltage coil current sensor for DC-DC converters employing DDCC, 2014, T. Lender, A. Kirinovich http://www.radioeng.cz/fulltexts/2014/14_04_0783_0992.pdf (дата обращения: 27.03.2017).
30. A New Multilevel Inverter Structure For High-Power Applications using Multi-carrier PWM Switching Strategy, 2015, R. Alisher, S. Hossei

<http://www.iotpe.com/ИТПЕ/ИТПЕ-2015/ИТПЕ-Issue22-M5/8-ИТПЕ-Issue22-Vol7-pp46-51.pdf> (дата обращения: 29.03.2017).

31. A study of optimization thermal management of IGBT transistors, 2015, T. Flemming, A. Komre <https://www.researchgate.net/publication/33627456> (дата обращения: 2.04.2017).