

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

Институт машиностроения  
(наименования института полностью)

Кафедра «Промышленная электроника»  
(наименование)

11.04.04 «Электроника и наноэлектроника»  
(код и наименование направления подготовки)

Электронные приборы и устройства  
(направленность (профиль))

## **ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)**

на тему: **МАЛОГАБАРИТНЫЙ ИМПУЛЬСНЫЙ СЕЙСМОИСТОЧНИК  
С УПРУГО-УДАРНЫМ РЕЖИМОМ РАБОТЫ**

Студент

С.З.Давлатов

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Научный

руководитель

к.т.н., доцент, А.В. Прядилов

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

Тольятти 2021

# Содержание

Введение.....	3
1. Формулировка актуальности, цели и задач проекта .....	4
1.1. Актуальность проекта.....	4
1.2. Цели и задачи проекта .....	4
2. Разработка системы питания.....	6
2.1. Назначение зарядного устройства.....	8
2.2. Обзор вариантов подходящих зарядных устройств. ....	9
2.3. Обзор схемотехнических решений схем заряда .....	13
2.4. Описание зарядного устройства .....	21
2.4.1 Входные цепи схемы заряда .....	22
2.4.2 Трансформатор TV1 .....	26
2.4.3. Умножитель напряжения .....	27
2.5. Обзор схемотехнических решений формирователя разрядных импульсов.....	30
2.6. Разработка и расчет формирователя разрядных импульсов.....	35
2.6.1 Разработка силовой схемы формирователя .....	35
2.6.2 Схема управления формирователем разрядных импульсов ...	39
2.7. Блок питания.....	40
3. Математическое моделирование .....	43
3.1. Разработка математической модели .....	43
3.2 Реализация математической модели.....	55
Заключение .....	62
Список используемой литературы .....	64
Приложение А Перечень элементов .....	69

## Введение

В настоящее время разработка сейсмоисточников для разведки полезных ископаемых и инженерная геофизика является актуальной задачей. Существуют сейсмоисточники различных типов (взрывные, дебалансные, гидравлические, индукционно-динамические, электромагнитные и т.д.), каждый из которых обладает своими достоинствами и недостатками. При анализе потребностей рынка и выпускаемой номенклатуры сейсмоисточников была выявлена потребность в создании малогабаритного сейсмоисточника, предназначенного для работы в зоне малых скоростей (на малые глубины) и при этом безопасного для применения в городской черте. Такие сейсмоисточники предназначены для поиска полезных ископаемых на малых глубинах и инженерной геофизики (изучения строения верхних слоев земной поверхности перед проведением строительных работ). В лаборатории «Виброимпульсная электромагнитная техника» (ВИЭМТЕХ) Тольяттинского государственного университета проводились работы по разработке такого малогабаритного сейсмоисточника электромагнитного типа. Сейсмоисточник работает следующим образом: от переносного источника питания (аккумуляторных батарей) заряжаются энергоемкие конденсаторы. Далее энергия из конденсаторов используется для формирования в силовом электромагните магнитного поля в результате чего якорь и индуктор электромагнита начинают притягиваться друг к другу и это силовое воздействие через опоры передается на грунт, вызывая появление в нем сейсмической волны.

Таким образом, одной из неотъемлемых частей сейсмоисточника будет являться система питания, которая предназначена для формирования в обмотке электромагнита импульсов тока, вызывающих появление электромагнитной силы, воздействующей на грунт.

# **1. Формулировка актуальности, цели и задач проекта**

## **1.1. Актуальность проекта**

В настоящее время разработка малогабаритного импульсного сейсмоисточника электромагнитного типа является актуальной задачей в силу ряда причин.

Во первых существует реальная необходимость в таком малогабаритном сейсмоисточнике, который был бы пригоден для исследования зоны малых скоростей в непроходимых для больших вибраторов и сейсмоисточников местах.

Во вторых существует необходимость в источнике сейсмических волн, предназначенном для инженерной геофизике (при разработке проектов строения многоэтажных зданий). Т.е. источник должен быть пригоден для использования в городской черте, для чего не подходят многие существующие сейсмоисточники (взрывного, газодинамического типов, а так же мощных электромагнитные и гидравлические).

Повысить эффективность работы сейсмоисточника можно улучшением его согласования с нагрузкой (грунтом). Одним из способов повышения эффективности предположительно может являться обеспечение упруго-ударного режима работы сейсмоисточника, при котором якорь сначала разгоняется, а затем бьет по излучающей плите в режиме доавливания.

## **1.2. Цели и задачи проекта**

Таким образом, целью данной работы является: разработка конструктивной схемы и системы питания импульсного малогабаритного сейсмоисточника электромагнитного типа с упруго-ударным режимом работы.

Для достижения этой цели необходимо решение следующих задач:

1. Разработка структурной схемы системы питания.

2. Обзор существующих систем питания или их блоков, пригодных для разрабатываемого сейсмоисточника.
3. Обзор существующих схемотехнических решений и выбор наиболее подходящих вариантов
4. Разработка каждого из блоков системы питания и синтез общей схемы.
5. Расчет электрической схемы системы питания.
6. Разработка математической модели упруго-ударного режима работы сейсмоисточника
7. Проведение математического моделирования, выбор оптимальных режимов работы
8. Написание публикации

### **Выводы по первому разделу**

В первом разделе были сформулированы актуальность, цели и задачи проекта.

## 2. Разработка системы питания

Задачей системы питания (СП) является формирование в обмотке электромагнита импульсов тока, вызывающих появление электромагнитной силы, воздействующей на грунт. Опираясь на опыт проектирования подобных устройств, имеющийся в лаборатории НИЛ-6 ТГУ, была разработана упрощенная структурная схема СП (рис. 2.1.)

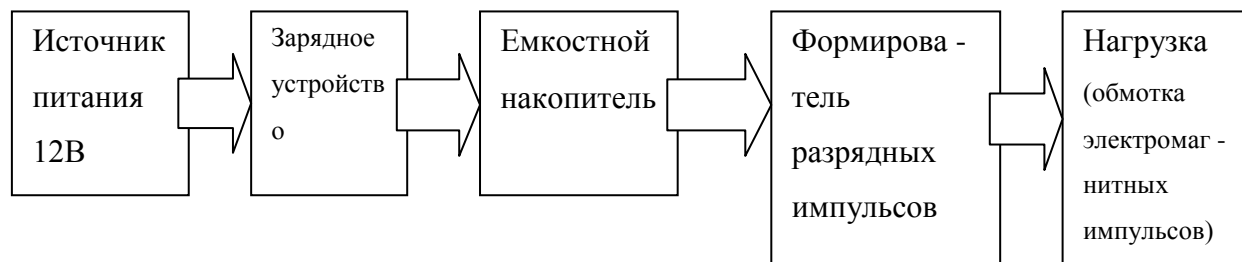


Рис. 2.1 – Упрощенная структурная схема СП

Источником питания для СП является аккумуляторная батарея (12 В постоянного напряжения). Энергией из этой батареи заряжается емкостной накопитель и далее накопленная в нем энергия используется для формирования в активно-индуктивной нагрузке (обмотке электромагнитного привода) импульса тока, который вызовет появление электромагнитной силы.

На основе упрощенной структурной схемы разработали структурную схему (рис. 2.2.)

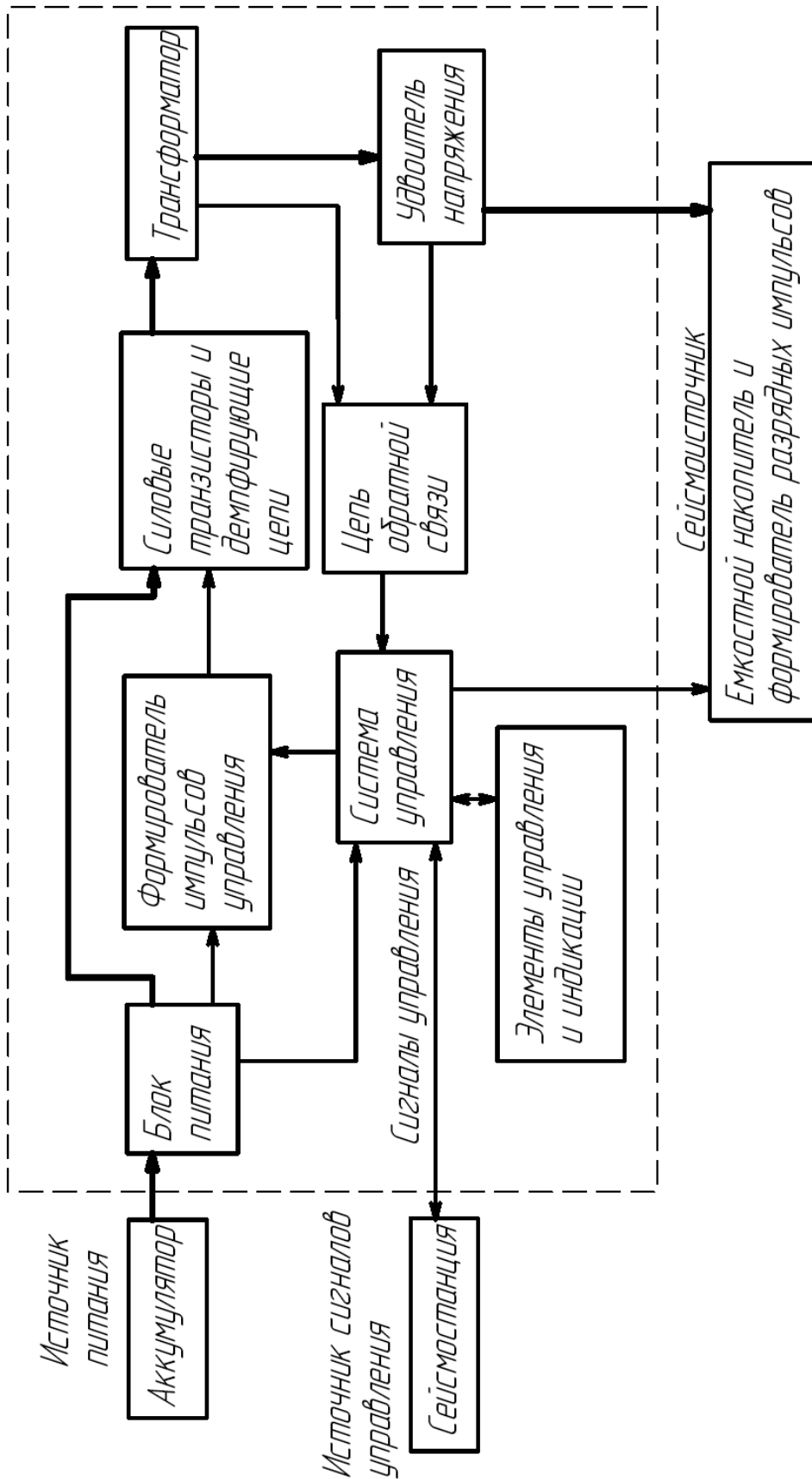


Рисунок 2.2. – Структурная схема системы питания сейсмоисточника.

## 2.1. Назначение зарядного устройства

Зарядное устройство емкостного накопителя энергии (ЗУ), предназначено для работы в составе автономной системы питания малогабаритного импульсного сейсмоисточника.

Зарядное устройство должно осуществлять заряд емкостного накопителя энергии автономной системы питания малогабаритного сейсмоисточника в диапазоне напряжений от 650 В до 950 В от аккумулятора / батареи аккумуляторов с напряжением 12 В  $^{+17}_{-15}$  % при следующих обеспечиваемых функциях и значениях параметров:

емкость конденсаторной батареи (емкостного накопителя энергии): 800 мкФ/1200 мкФ;

обеспечение ЗУ гальванической развязки аккумулятора от емкостного накопителя;

защита от неправильного подключения (переполюсовки) аккумулятора;  
сопряжение с внешним устройством запуска (системой синхронизации и возбуждения импульсного сейсмоисточника);

возможность работы ЗУ в ручном и автоматическом режимах;

длительность заряда емкостного накопителя: 2,0 – 2,5 секунды, не более 3 секунд;

режим работы:

циклический: 10 - 20 циклов заряд/разряд емкостного накопителя, пауза 5-6 секунд;

температура эксплуатации: от минус 40°C до +60°C \*,

Для разрабатываемых образцов ЗУ рабочий диапазон температур может составлять от минус 20°C до +60°C, т.е. разрешается использование материалов и комплектующих имеющих данный рабочий диапазон. При этом обязательным является использование материалов и комплектующих имеющих климатическое исполнение в указанном выше диапазоне



температуры от минус 40°C до +60°C. Использование материалов и комплектующих не имеющих климатического исполнения указанного диапазона запрещено. Например, использование микросхем выпускаемых с климатическим исполнением от минус 20°C до +60°C, и не имеющих исполнения от минус 40°C до +60°C запрещается.

## 2.2. Обзор вариантов подходящих зарядных устройств.

Исходя из требований, предъявляемых к работе зарядного устройства, можно выделить следующие особенности его работы:

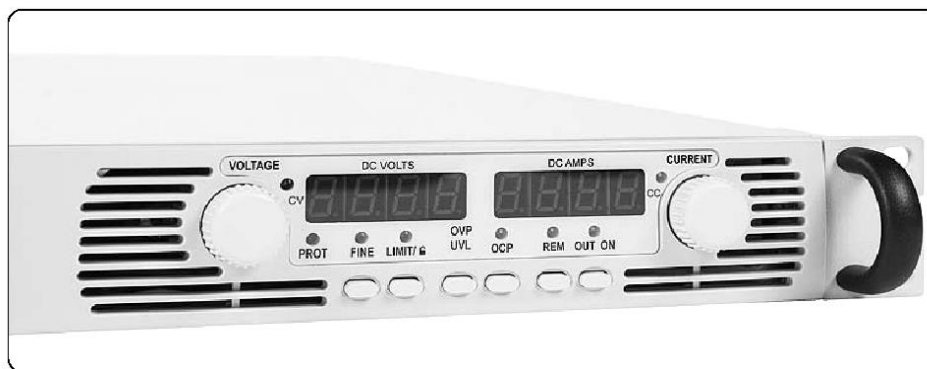
- ЗУ работает с коэффициентом повышения напряжения в  $950/12 \approx 80$  раз. а с учетом падения напряжения на кабелях и уменьшением напряжения на аккумуляторе – примерно в 100 раз.

- ЗУ работает на емкостную нагрузку с плавным повышением выходного напряжения от нуля до номинального. То есть в начале заряда работа осуществляется фактически в режиме короткого замыкания по выходу.

Рассмотрим возможные решения, удовлетворяющие данным требованиям.

Одной из возможностей является использование стандартных источников питания, способных работать на емкостную нагрузку.

Существуют готовые блоки питания (например, Agilent Technologies (США)), способные заряжать емкостной накопитель (рис. 2.3) [48].



а) вид спереди



б) вид сзади

Рис. 1.1. – Источник питания типа N5752A  
производства Agilent Technologies

Их недостатком является цена и необходимость 220 В входного напряжения

Для подключения к аккумуляторной батарее можно воспользоваться стандартным инвертором напряжения 12V-220V, например автомобильный инвертор SureSins-300 производства Morningstar corporation.

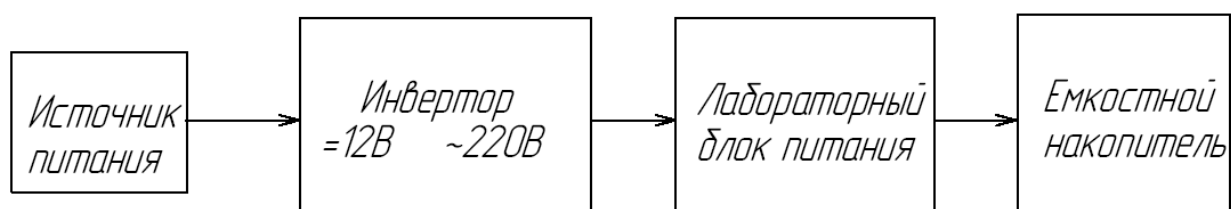


Рис.2.4 - Возможность использования существующего лабораторного блока питания и автомобильного инвертора напряжения.

Недостатком такого способа является большая стоимость лабораторного блока питания, без которого можно обойтись использованием трансформатора либо умножителя напряжения (рис.2.5,6)

Для стабилизации напряжения необходимо предусмотреть цепи обратных связей, блокирующих работу инвертора при достижении напряжением на накопителе заданного уровня.

К недостаткам такого решения можно отнести использования автомобильного инвертора, имеющего на такие мощности большие массу и габариты, а так же необходимость сопряжения его с дополнительной схемой, что создаст трудности в упаковке их в единый корпус.

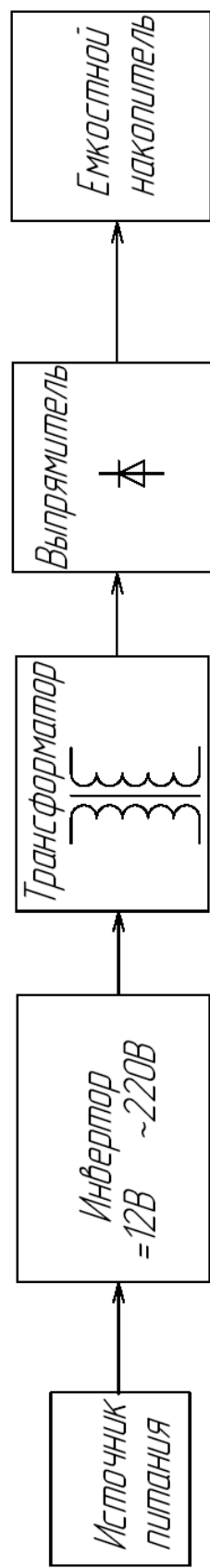


Рис.2.5 - Возможность использования существующего автомобильного инвертора напряжения и трансформатора с выпрямителем.

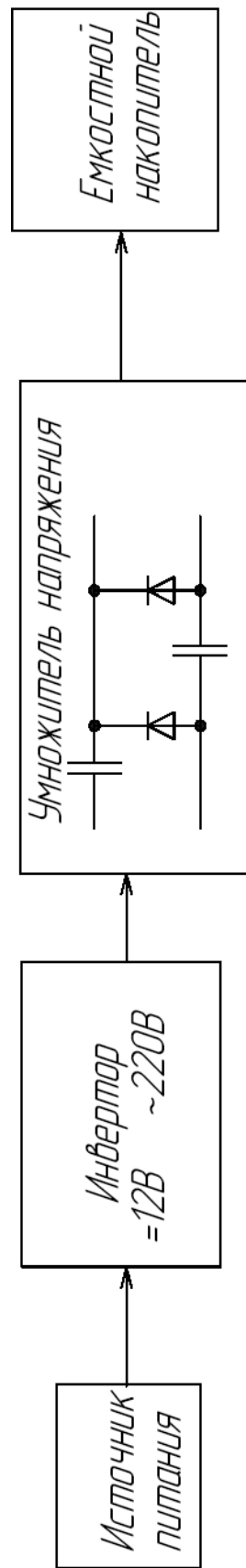


Рис.2.6 - Возможность использования существующего автомобильного инвертора напряжения и лестничного умножителя напряжения.

### **2.3. Обзор схемотехнических решений схем заряда**

Заряжать емкостной накопитель можно с помощью повышающего преобразователя (рис. 2.7). Однако данная схема имеет два недостатка:

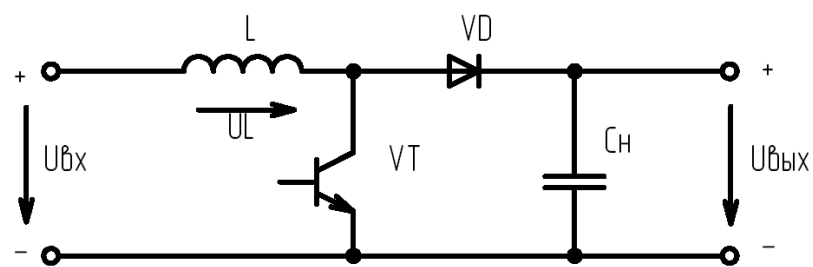
1. для его работы необходимо предварительно заряжать накопительный конденсатор до уровня входного напряжения.
2. В процессе разряда емкостного накопителя необходимо отключать его от входного напряжения для предотвращения протекания больших токов.
3. Схема эффективно работает только при повышении напряжения в небольшой (не более 5-10) число раз.

Существует универсальный ППН, запатентованного в НИЛ-6 ТГУ [2, 25], который может лишен 1го и 2го недостатков стандартного повышающего ППН (рис. 2.4) [18,25].

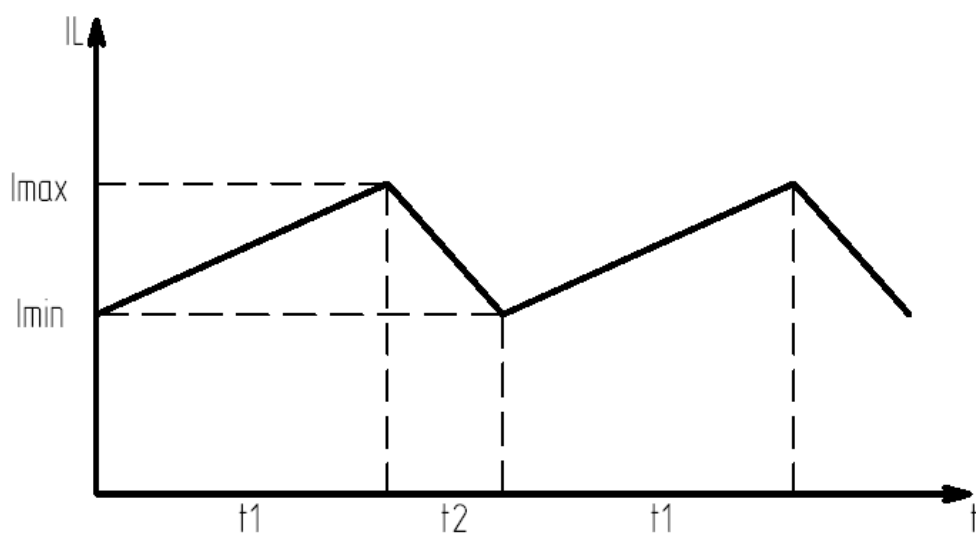
Однако и он не эффективен при повышении напряжения в большое число раз.

Существует обратно-ходовой (fly-back) преобразователь (рис. 2.5) [30].

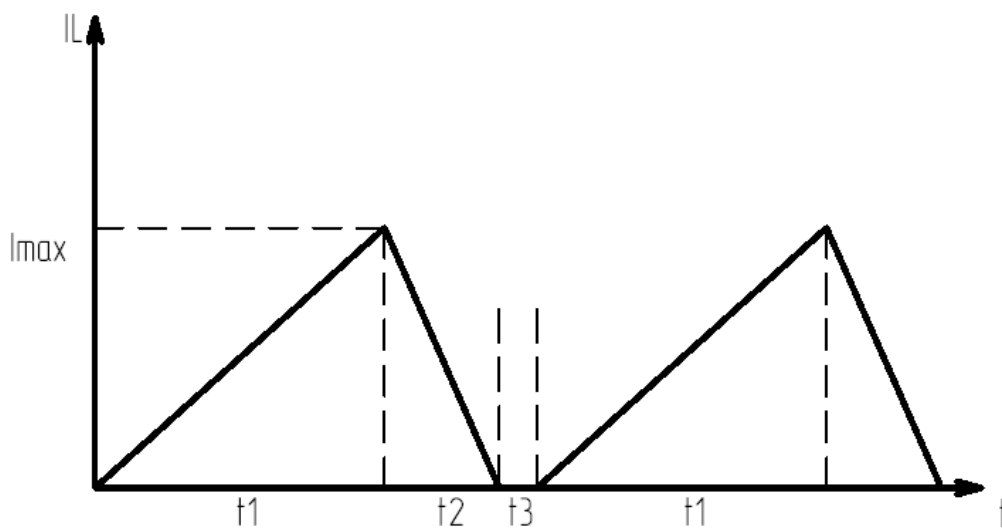
В этом преобразователе центральным элементом является дроссель – трансформатор  $T_r$ , накапливающий энергию в одном промежутке времени и отдающий ее в другом. Такие схемы применяются в основном в маломощных задачах



а) Силовая схема



б) Временные диаграммы для случая непрерывных токов.



в) Временные диаграммы для случая прерывистых токов.

Рис. 2.3 - Повышающий ППН.

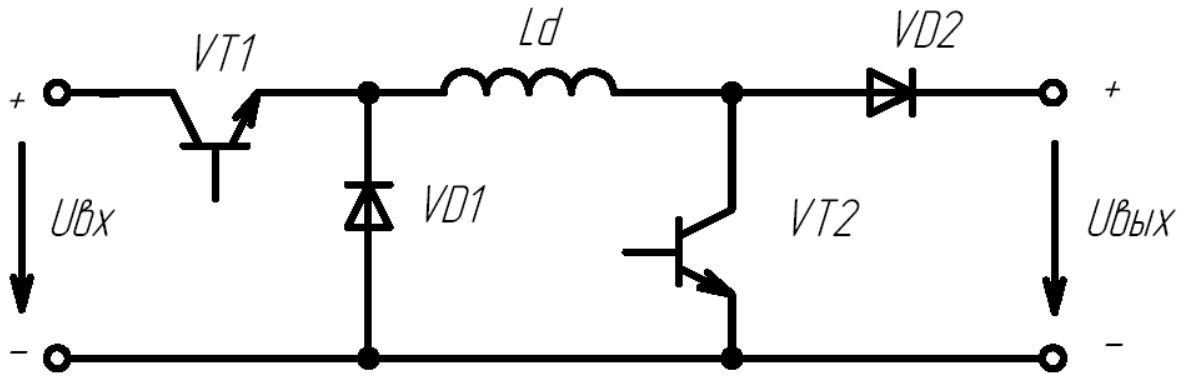
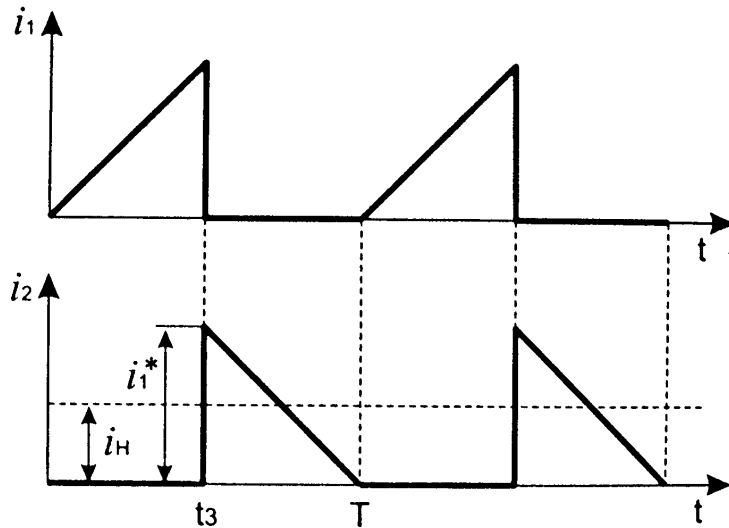
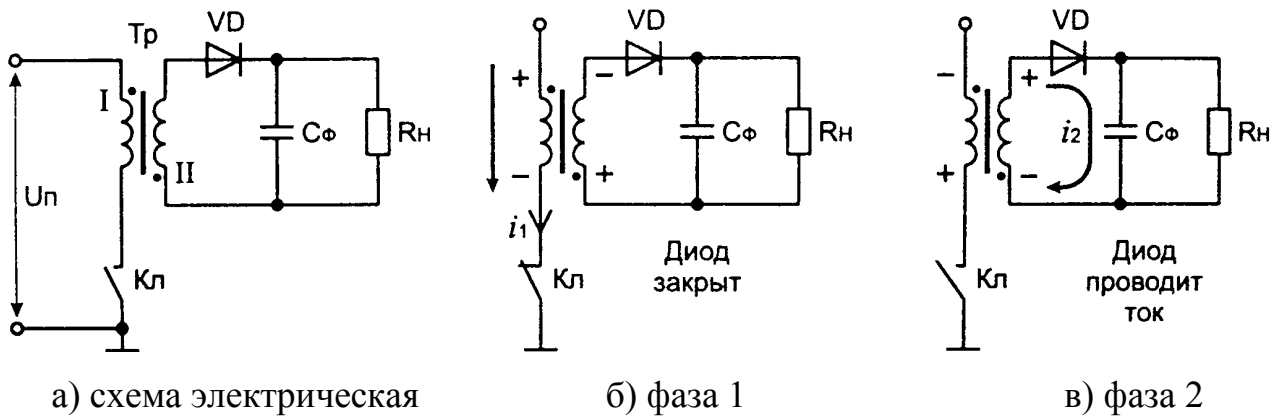


Рис. 2.4 - Универсальный (понижающе-повышающий) ППН.



г) графики формы тока в первичной  $i_1$  и вторичной  $i_2$  обмотках

Рис. 2.5 - Обратногодовая (fly-back) схема преобразователя.

Наиболее подходящей для задач данной ВКР является схема согласно рис. 2.6. В этой схеме транзисторы открываются поочередно и на вторичной стороне трансформатора формируется знакопеременное напряжение. Далее это напряжение выпрямляется выпрямительным мостом. [30]

К недостаткам схемы можно отнести большие токи в момент переключения транзисторов. Для устранения этого недостатка совместим схему выпрямителя с так называемым «лестничным удвоителем напряжения», конденсаторы которого будут выполнять токоограничительную функцию.

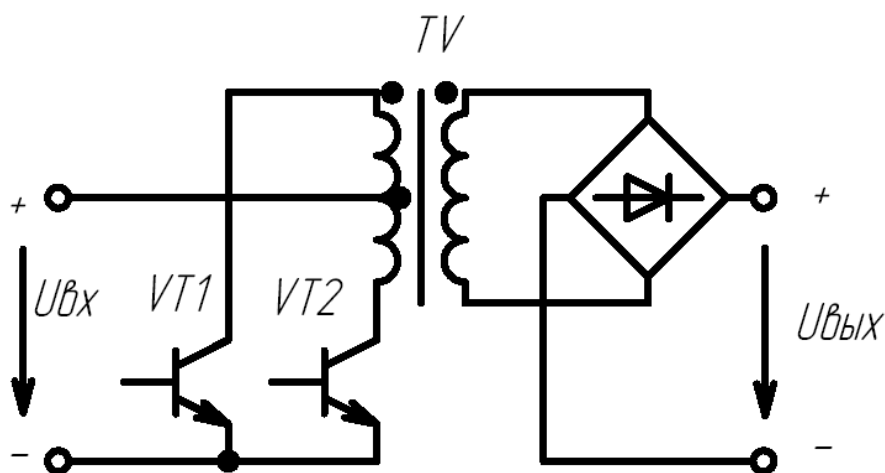


Рис. 2.6– ППН с гальваноразвязкой

«Отдельно необходимо рассмотреть вопрос защиты транзисторов от перенапряжения, появляющихся при их коммутации в результате наличия паразитных индуктивностей.»[30]

«Обладая определенными достоинствами, полевые и IGBT-транзисторы имеют существенный недостаток - они очень чувствительны к перенапряжениям, даже очень коротким. Мощные транзисторы способны прерывать большие токи за малое время, что вызывает появление перенапряжений на паразитных индуктивностях монтажа или индуктивности



рассеяния трансформатора и может привести к выходу из строя приборов. Поэтому необходимо применять определенные меры защиты транзисторов»[30].

Принцип действия системы заряда может быть проиллюстрирован рис.2.7.

«На силовые транзисторы VT1 и VT2 поочередно подаются импульсы управления (с паузой между импульсами), в результате чего, на первичные полуобмотки I и II трансформатора TV1 поочередно подаётся напряжение аккумулятора, которое трансформируется на вторичную обмотку IV. Демпфирующая цепь (на рисунке не показаны) для уменьшения перенапряжений, вызванных наличием паразитных индуктивностей монтажа и трансформатора.»[30].

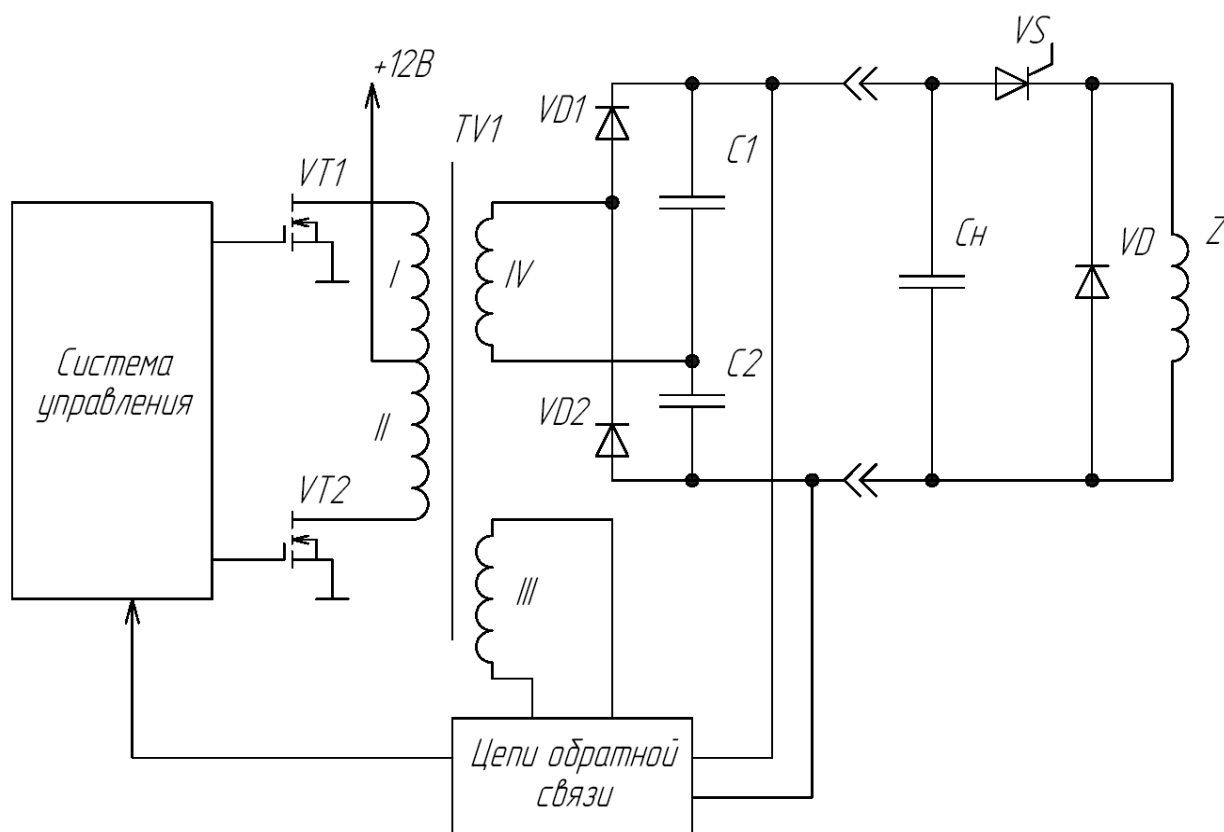


Рис. 2.7 - Упрощенная схема системы заряда

«На элементах VD1,2, C1,2 построен удвоитель напряжения, причём диоды VD1,2 высокочастотные. Удвоитель работает следующим образом. Допустим, на полуобмотке IV трансформатора TV1 положительная полуволна (сверху «+», снизу «-»), поэтому ток будет протекать по цепи: полуобмотка IV – VD1 – C1 – полуобмотка IV, а конденсатор C1 будет заряжаться полярностью без скобок (сверху «+», снизу «-»). Одновременно с этим, через заряженный в другом полупериоде конденсатор C2 будет протекать ток по цепи: полуобмотка IV – VD1 – Cн – C2 – полуобмотка IV. Таким образом, на нагрузке будет получаться напряжение, складывающееся из напряжения на полуобмотке трансформатора TV1 и напряжения на конденсаторе. На отрицательной полуволне конденсатор C2 заряжается, а конденсатор C1 разряжается на нагрузку. Заряд ёмкостного накопителя Cн происходит по экспоненциальной зависимости, стремящейся к напряжению 1200 В. Балластные ёмкости C1 и C2 определяют скорость заряда ёмкостного накопителя Cн.»[30]

Цепь обратной связи предназначена для прекращения процесса заряда конденсатора Cн, когда напряжение на нём достигнет заданного значения. Полуобмотка III трансформатора VT1 питает цепи обратной связи.

Формирователь разрядных импульсов обеспечивает в обмотке возбуждения источника ток необходимой величины и длительности. Формирователь работает так. При открывании силового тиристора VS, предварительно заряженный конденсатор Cн разряжается на обмотку возбуждения источника по цепи Cн-VS – Z – Cн. С момента времени, когда конденсатор Cн разрядится до нуля, ток перехватится в цепь Z - VD. По истечении некоторого времени, которое, в основном, определяется постоянной времени обмотки, ток в ней затухает до нуля.

«Отдельно необходимо рассмотреть вопрос защиты транзисторов от перенапряжения, появляющихся при их коммутации в результате наличия паразитных индуктивностей.

Обладая определенными достоинствами, полевые и IGBT-транзисторы имеют существенный недостаток - они очень чувствительны к перенапряжениям, даже очень коротким. Мощные транзисторы способны прерывать большие токи за малое время, что вызывает появление перенапряжений на паразитных индуктивностях монтажа или индуктивности рассеяния трансформатора и может привести к выходу из строя приборов. Поэтому необходимо применять определенные меры защиты транзисторов» [1,2, 30].

«Методы борьбы с коммутационными перенапряжениями можно разделить на две категории: конструктивные методы и схемотехнические. К конструктивным методам относится минимизация паразитных индуктивностей за счет выбора оптимального расположения токоподводящих элементов конструкции. Среди обязательных мер при проектировании преобразователей являются:

1. применение плоских шин в качестве токоподводящих элементов;
2. минимизация длин контуров цепей;
3. минимизация расстояний между элементами.

Однако выполнение конструкторских требований является необходимым, но не достаточным условием защиты приборов: как бы мы не старались, геометрические размеры не могут быть равны нулю. Следовательно, необходимо применять дополнительные меры.»[30]

«В качестве схемотехнических мер защиты транзисторов в преобразовательных схемах предлагаются следующие:

1. Установка параллельно с транзистором ограничителя напряжения. В качестве ограничителей возможно использование варисторов или диодов NRANSIL (высоковольтных быстродействующих стабилитронов)

(рис. 2.7а, б) Достоинство: можно выбирать транзисторы с небольшим запасом по напряжению относительно защитного ограничителя, независимо от режимов работы. Недостатком является особенность, связанная с выходом из строя ограничителя - короткое замыкание на месте вышедшего из строя ограничителя.

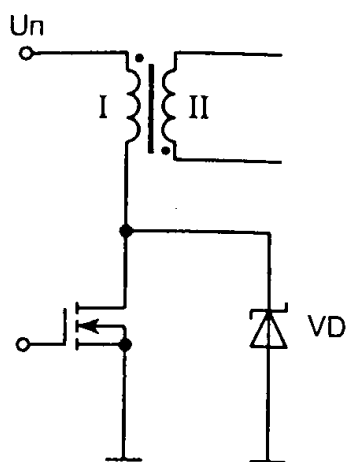
2. Установка параллельно транзистору снабберной RC-цепочки (под параллельностью имеется ввиду параллельность на схеме замещения по переменному току) (рис. 2.7в).

3. Установка параллельно с транзистором демпфирующей RCD-цепочки (цепочки, состоящей из резистора, диода и конденсатора) (рис. 2.7г). Такие цепочки иногда называют «фиксирующими» Эта цепочка должна удовлетворять требованиям:

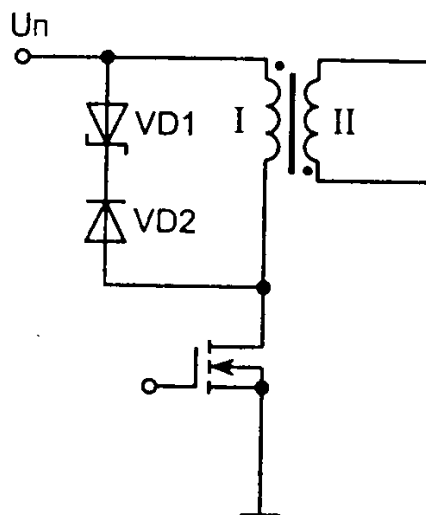
а) RCD-цепочка должна располагаться в непосредственной близости от защищаемого прибора, чтобы обеспечить минимальную индуктивность в цепи заряда емкости С;

б) диод D должен обладать высоким быстродействием и желательно мягкой характеристикой включения;

в) емкость С должна обладать низкой индуктивностью и малым тангенсом потерь.»[30]

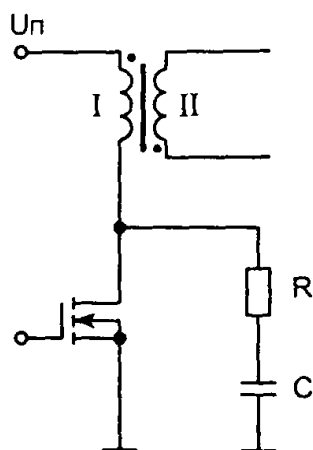


а) Использование защитного



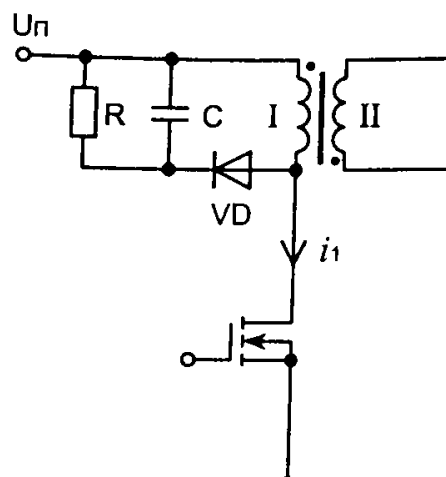
б) Использование TRANSIL для

## TRANSIL



в) Снаббер

## ограничения индуктивных выбросов



г) демпфирующая (фиксирующая)  
цепочка

Рис.2.7 - Способы защиты транзистора от коммутационных перенапряжений.

В этой ВКР принимаем решение использовать схему, разработанную на основе схемы по рис. 2.7.

### 2.4. Разработка и расчет схемы заряда

Полная схема питания, разработанная в данном дипломе, изображена на рис.2.5, а ее перечень элементов – в приложении.

### 2.4. Описание зарядного устройства

Зарядное устройство (рис.2.2) состоит из блока питания, формирователя импульсов управления, силовых транзисторов VT1,2 и их демпфирующих цепей, трансформатора TV1, умножителя напряжения и цепи обратной связи.

«Зарядное устройство работает следующим образом. На транзисторы VT1 и VT2 поочередно подаются импульсы управления (с паузой между импульсами), в результате чего на первичные полу обмотки трансформатора TV1 I и II (через токоограничительные резисторы R10-R12) поочередно

подается напряжение +12В, которое трансформируется на вторичную обмотку IV. Это двуполярное напряжение прямоугольной формы поступает на выпрямительный умножитель напряжения, построенный на элементах VD8,9; L1,2; C9,10. Выпрямленное и умноженное на 2 напряжение через токоограничительный резистор R15 заряжает емкостной накопитель Cн.»[30]

Когда напряжение на конденсаторе достигает заданного значения по цепи обратной связи через гальвано развязывающую оптопару V1 подается сигнал, блокирующий подачу управляющих импульсов на транзисторы VT1,2. Блок питания +12В необходим для питания микросхем DA2,3, осуществляющих формирование управляющих импульсов на транзисторы.

Так как форма напряжения на первичной, а следовательно, и на вторичной обмотках трансформатора – прямоугольная, то на конденсаторы умножителя напряжения подаются так же прямоугольные импульсы. Это приводит к появлению больших импульсных зарядных токов в первичной и вторичной обмотках трансформатора в моменты подачи управляющих импульсов на транзисторы. Для ограничения амплитуды импульсных токов использованы элементы: R10-R12, R14, L1 и L2.

#### **2.4.1 Входные цепи схемы заряда**

Необходимо заряжать емкость Cн 200мкФ от нуля до напряжения 900В (W=81 Дж) за время tзар=1 с. Потребляемая от источника мощность

$$P_{зар} = W / t_{зар} = 81 / 1 = 81 \text{ Вт.} \quad (2.1)$$

Среднее значение тока

$$I_{зар.ср} = P_{зар} / U_{п} = 81/12= 6.75 \text{ А,} \quad (2.2)$$

где Uп=12 В – входное напряжение;

Входной ток имеет импульсную форму. Поэтому его действующее значение будет примерно в 2 раза больше среднего

$$I_{\text{зр.д}} = 2 \cdot I_{\text{зр.ср}} = 2 \cdot 6.75 = 13.5 \text{ А.} \quad (2.3)$$

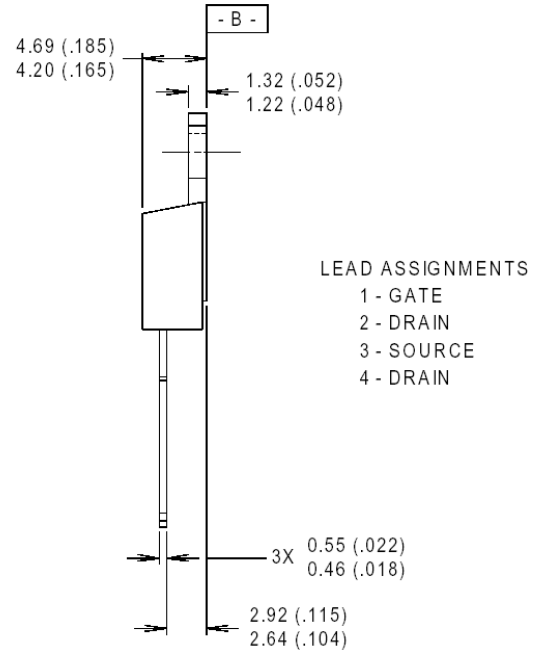
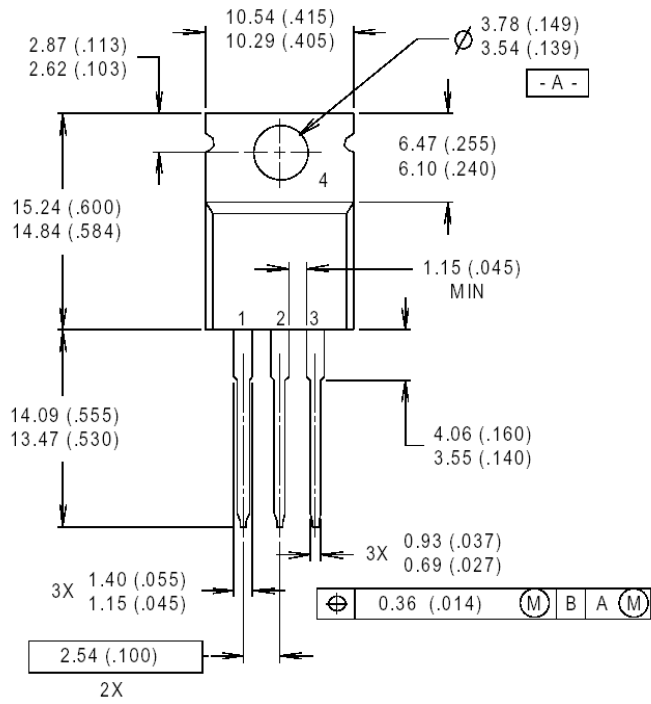
Ток поочередно протекает через транзисторы VT1,2. Пересчитаем ток каждого из них.

$$I_{\text{вт.д}} = I_{\text{зр.д}} / \sqrt{2} = 13.5 / 1.41 = 9.57 \text{ А} \quad (2.4)$$

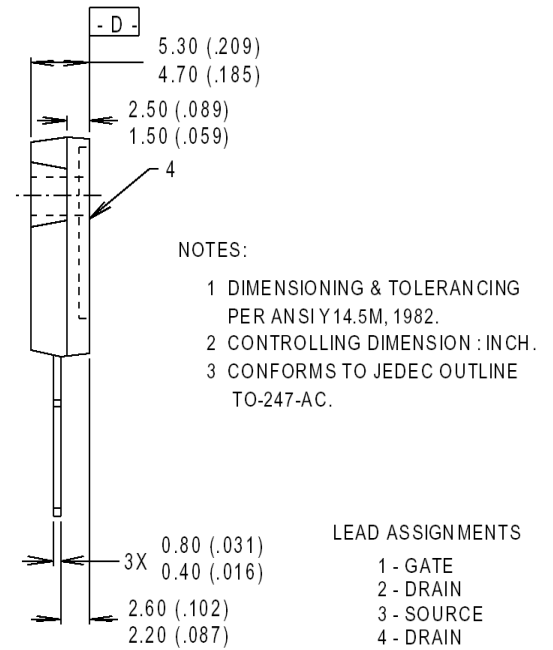
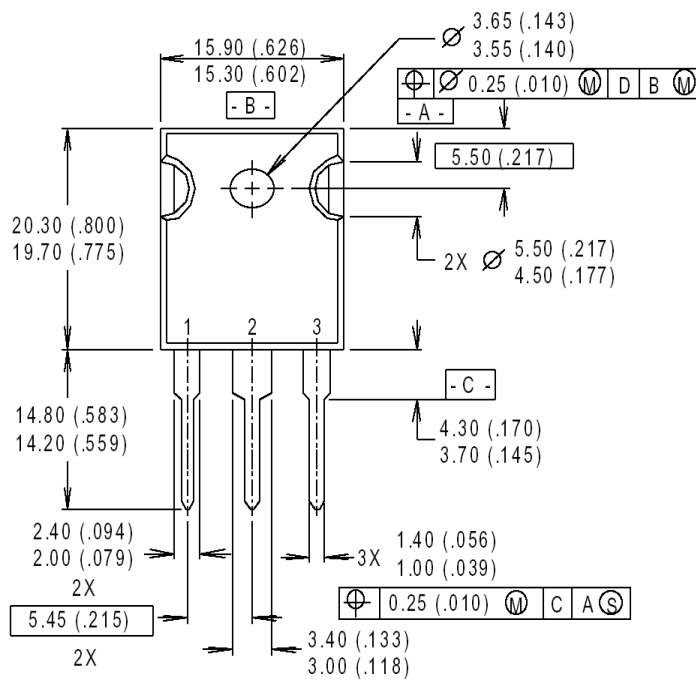
Исходя из этого тока, в качестве силовых транзисторов VT1, 2 выбрали полевые транзисторы типа IRF3205 [49] с параметрами:

Корпус	ТО-220 (рис. 2.8а)
Напряжение пробоя сток-исток	55 В
Сопrotивление сток-исток открытого транзистора	8 мОм.
Предельный ток при 25 С	110 А
Предельный ток при 100 С	80 А
Максимальная отводимая мощность	200 Вт
Напряжение управления затвор-сток	5-20 В

При необходимости вместо вышевыбранных транзисторов можно взять транзисторы типа IRFP064N, обладающие теми же самыми параметрами и отличающиеся только более мощным корпусом ТО-247 (рис. 2.8б).



а) корпус TO-220



NOTES:

- 1 DIMENSIONING & TOLERANCING PER ANSI Y14.5M, 1982.
- 2 CONTROLLING DIMENSION : INCH.
- 3 CONFORMS TO JEDEC OUTLINE TO-247-AC.

LEAD ASSIGNMENTS

- 1 - GATE
- 2 - DRAIN
- 3 - SOURCE
- 4 - DRAIN

б) корпус TO-247

Рис. 2.8 – Чертежи корпусов.



Резисторы R10..R12, предназначенные для сглаживания импульсов тока, соединенные параллельно дают суммарное сопротивление 0.033 Ом. Мощность, выделяющаяся на них составит

$$P = I_{\text{зар.д}}^2 \cdot R = 13.5^2 \cdot 0.0033 = 6 \text{ Вт.} \quad (2.5)$$

Следовательно, суммарная мощность этих резисторов должна составить 6 Вт. Выбрали резисторы [28

R10..R12: SQP-2Вт-0.1 Ом.

Микросхема DA2 типа KP1211EY1 – это специализированная микросхема, применяемая в электронных балластах газоразрядных ламп. При заземленных входах FC и In на выходах Out1 и Ou2 поочередно формируются прямоугольные с паузой между ними. Их период определяется постоянной времени  $\tau$  внутреннего генератора микросхемы, которая задается элементами R4 и C3 и может быть примерно найдено по формуле

$$\tau = R \cdot C \quad (2.6)$$

$$\tau = 1 / (f \cdot 14) = 1 / (100 \cdot 10^3 \cdot 14) = 0.714 \text{ мкс.} \quad (2.7)$$

$$R4 = 0.714 \cdot 10^{-6} / 560 \cdot 10^{-12} = 1275 \text{ Ом} \approx 1.2 \text{ кОм} \quad (2.8)$$

в действительности время  $\tau$  зависит (хоть и не сильно) от напряжения питания микросхемы DA2 и при необходимости его можно будет подкорректировать изменением номиналов R4 или C3.

Микросхема DA3 типа IR4427 является двухканальным драйвером, предназначенным для управления полевыми транзисторами. Для предотвращения защелкивания выходных каскадов драйвера используются

резисторы R7, R8 с номиналом 18 Ом, выбранным согласно рекомендациям по применению этого драйвера.

Конденсаторы C5 и C6 осуществляют фильтрацию напряжения питания. Выбрали их типы [15,16,17]

C5: К 50-35 2200 мкФ х 35 В

C6: К 10-17Б 1.5 мк Y5V

#### **2.4.2 Трансформатор TV1**

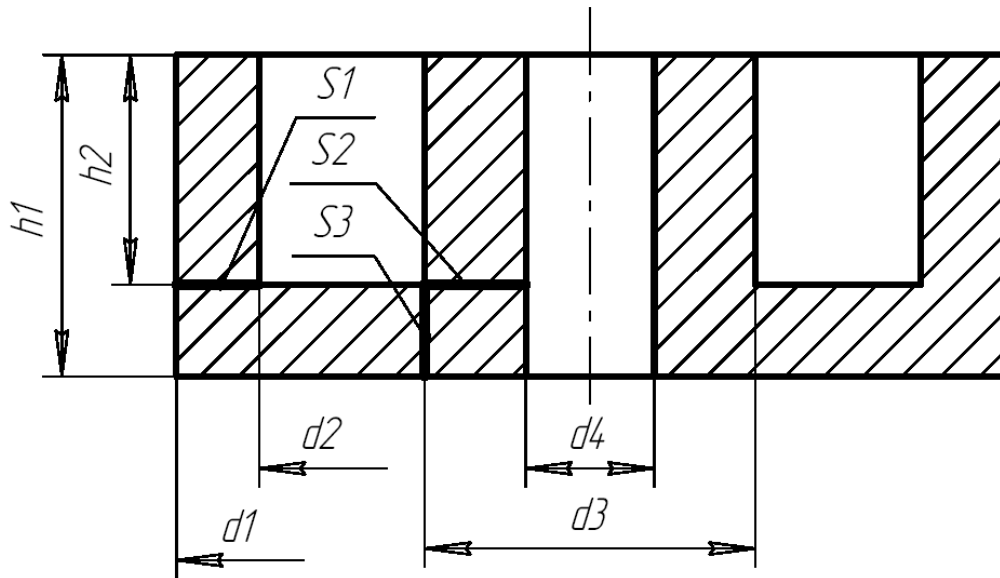
Трансформатор TV1 сконструируем на ферритовых броневых сердечниках (рис.2.9а).

Выберем максимальное напряжение  $U_{\max}=1000$  В. Это напряжение меньше напряжений, на которые рассчитана конденсаторная батарея и силовые приборы.

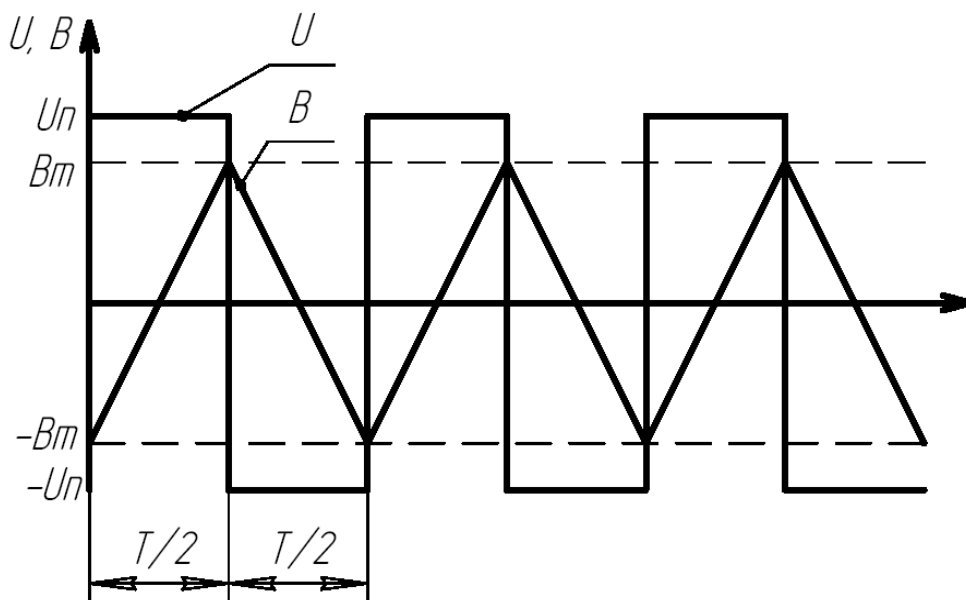
Коэффициент трансформации

$$K_T = U_{\max} / (U_{\text{п}} \cdot 2) = 1000 / (12 \cdot 2) = 41,7. \quad (2.9)$$

Трансформатор необходимо изготавливать исходя из действующих значений токов, рассчитанных выше. Наилучшим решением будет использование броневое магнитопровода (рис. 2.9а).



а) геометрические размеры броневое сердечника



б) Временные диаграммы входного напряжения  $U$  и индукции в сердечнике

В.

Рис.2.9 – Трансформатор TV1.

### 2.4.3. Умножитель напряжения

На элементах VD8,9; L1,2; C9,10 построен умножитель напряжения, подключенный к обмотке IV трансформатора TV1. Скорость заряда будет

определяться балластными емкостями C9 и C10, равные Cб, а так же паразитной индуктивностью трансформатора (практически не поддающейся предварительному расчету). Поэтому величины C9 и C10 необходимо подбирать экспериментально, после физического изготовления трансформатора и остальной схемы.

Выберем резистор R15, так же ограничивающий амплитуды токов. Зададимся мощностью этого резистора 6 Вт. Ток, протекающий через этот резистор будет в 2 раза меньше тока, протекающего через резистор R14, поэтому его сопротивление можно взять в 2 раза большим. R15: R14: SQP 3.9 к Ом 10Вт [4]

Рассчитаем дроссели L1 и L2. Найдем величину их индуктивности Lб.

Для этого найдем суммарное активное сопротивление

$$R_a = R_{1T} \cdot K_T^2 + R_{2T},$$

где R1T – суммарное сопротивление на первичной стороне трансформатора, примем  $R_{1T} = R_{10}/3 = 0.033 \text{ Ом}$

R2T – суммарное сопротивление на вторичной стороне трансформатора, приняли  $R_{2T} = R_{14} = 47 \text{ Ом}$ .

Тогда

$$R_a = 0.033 \cdot 34.5^2 + 47 = 86.3 \text{ Ом} \quad (2.32)$$

Волновое сопротивление контура Lб – Cб в сумме с активным сопротивлением должно ограничивать амплитуду импульсного тока вторичной обмотки. Найдем сопротивление  $\rho = \sqrt{\frac{L_b}{C_b}}$ , исходя из условия

$$\rho = (U_p \cdot K_T / I_{2M}) - R_a = (12 \cdot 41.7 / 3.19) - 86.3 = 70.6 \text{ Ом}. \quad (2.33)$$

Выразим необходимую величину Lб

$$L_b = \rho^2 \cdot C_b = 70.6^2 \cdot 2.7 \cdot 10^{-9} = 0.1 \text{ мкГн}. \quad (2.34)$$

Ток насыщения должен быть не меньше амплитудного значения тока на вторичной стороне трансформатора  $I_{2M} = 0.3 \text{ А}$ .

Балластные дросселя L1 и L2 одинаковы. Каждый из них представляет собой кольцо, выполненное феррита с намотанными n витками изолированного провода.

Основываясь на формулах, приведенных в [39] методом последовательных итераций подобрали размера ферритового кольца и число витков, осуществляя расчеты по формулам (2.35-2.40). Выбранные параметры дросселя

Для магнитопровода используем кольцо K45x28x16 из феррита марки 1000НМ.

внешний диаметр– D=45 мм;

внутренний диаметр– d=28 мм;

высота– h=16 мм;

индукция насыщения–  $B_m=0,4$  Тл.

магнитная проводимость  $\mu=1000$

Число витков 8.

Находим площадь кольца:

$$S = \frac{D-d}{2} \cdot h = \frac{45-28}{2} \cdot 16 = 136 \text{ мм}^2 \quad (2.35)$$

Средняя длина пути прохождения магнитного потока:

$$l_{cp} = \pi \cdot \frac{D+d}{2} = 3,14 \cdot \frac{45+28}{2} = 115 \text{ мм} \quad (2.36)$$

Объем кольца:

$$V = S \cdot l_{cp} = 136 \cdot 10^{-6} \cdot 115 \cdot 10^{-3} = 15,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3 \quad (2.37)$$

Магнитная проводимость

$$G = \mu \cdot \mu_0 \frac{S}{l_{cp}} = 2 \cdot 1000 \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \frac{136 \cdot 10^{-6}}{0,115} = 1,49 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}$$

Индуктивность дросселя

$$L = w^2 \cdot G = 1,49 \cdot 10^{-6} \cdot 8^2 = 95 \text{ мкГн.}$$

Рассчитываем ток насыщения дросселя:

$$I_m = \frac{B_m \cdot l_{cp}}{\mu \cdot \mu_0 \cdot w} = \frac{0.4 \cdot 0,115}{1000 \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \cdot 8} = 4.56 \text{ А} \quad (2.38)$$

Максимальная запасаемая энергия в дросселе:

$$W_m = \frac{B_m^2 \cdot l_{cp} \cdot S}{2 \cdot \mu \cdot \mu_0} = \frac{0.4^2 \cdot 0,115 \cdot 136 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 1000 \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7}} = 0.99 \text{ мДж} \quad (2.39)$$

Полученные значения индуктивности и тока насыщения немного больше необходимых из соображений надежности.

Расчитаем собственную частоту колебаний контура Lб-Сб. Эта частота должна получиться больше рабочей частоты преобразователя  $f=100$  кГц, что бы емкости Сб успевали заряжаться за время одной полярности напряжения.

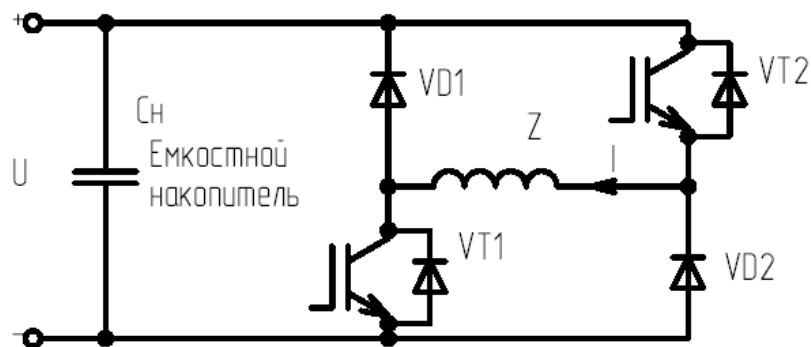
$$f_{LC} = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{1}{L_b \cdot C_b}} = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{1}{0.1 \cdot 10^{-6} \cdot 2.7 \cdot 10^{-9}}} = 159 \text{ кГц.} \quad (2.40)$$

Полученное значение нас устраивает. Оно означает, что к моменту закрытия транзисторов VT1,2 через них уже не будет протекать ток, что создаст благоприятные условия для их работы.

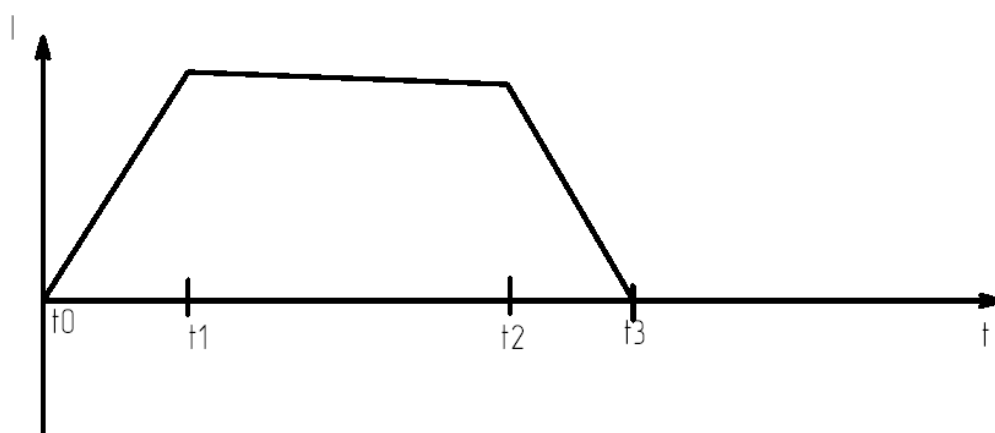
## **2.5. Обзор схемотехнических решений формирователя разрядных импульсов**

Задачей формирователя токов является обеспечение импульсного разряда емкостного накопителя на активно-индуктивную нагрузку (обмотку электромагнита) для формирования в ней импульса тока. Существуют различные схемотехнические решения, способные обеспечить необходимые условия работы.

Возможно формирование импульса тока схемой с использованием мощных IGBT транзисторов [18], изображенная на (рис. 2.2).



а) силовая схема



б) временные диаграммы

Рис. 2.2. – Формирователь разрядных импульсов на IGBT транзисторах.

Схема работает следующим образом.

В момент времени  $t_0$  транзисторы VT1 и VT2 – открываются. Временной интервал  $t_0-t_1$  называют фронтом импульса тока.

Когда ток достигает необходимого значения (момент времени  $t_1$ ) один из транзисторов (например VT1) закрывают, тогда ток  $I$  уменьшается. В течении времени  $t_1-t_2$  электромагнит создает значительную силу, а напряжение на нагрузке равно нулю, чем обеспечивается эффективный режим постоянства потокосцепления.

В заданный момент времени  $t_2$  второй транзистор так же закрывают. Этот промежуток времени принято называть спадом. К моменту  $t_3$  ток  $I$  спадает до нуля и формирование силы прекращается.

Далее система заряда дозарядит емкостной накопитель (скомпенсировав потери) и может быть сформирован следующий импульс силы.

Достоинством этой схемы является возможность регулирования как амплитуды усилия (перемещением момента  $t_1$  закрытия первого транзистора), так и времени импульса (перемещением момента  $t_2$  закрытия второго транзистора).

Недостатком схемы является дороговизна силовых транзисторов и необходимость применения специальных драйверов для управления ими.

Формирователь разрядных импульсов на тиристорах с возможностью рекуперации изображен на рис. 2.3.

«Рассмотрим работу этой схемы.

$t_0$ : подаём управляющие импульсы  $U_{упр}$  на тиристоры  $VS_1$  и  $VS_3$ .

$t_0-t_1$ : конденсатор начинает разряжаться по цепи  $C-VS_1-Z-VS_3-C$ . Ток  $I$  возрастает.

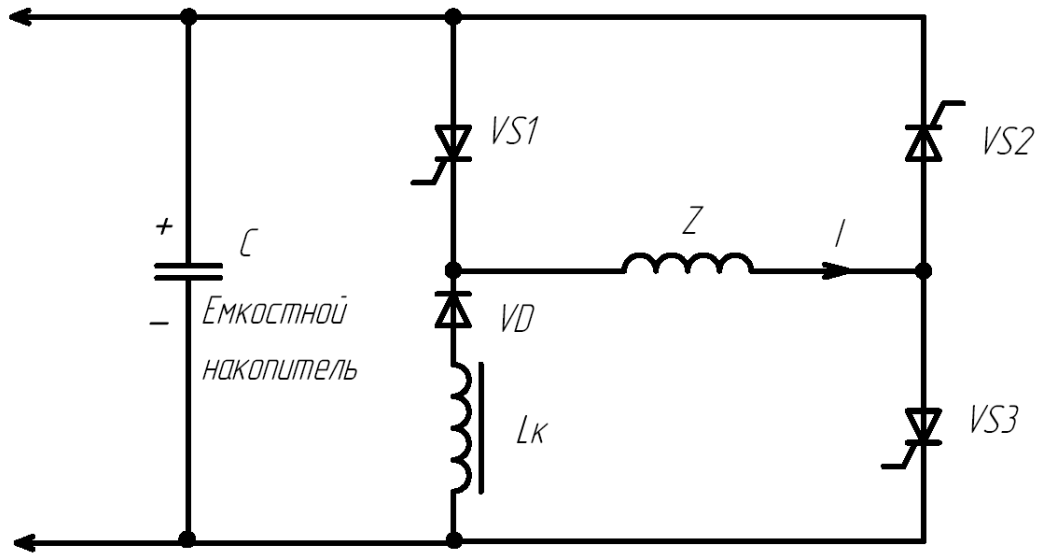
$t_1$ : когда напряжение на конденсаторе становится равным нулю ток через нагрузку близок к максимальному значению.

$t_1-t_2$ : конденсатор заряжается обратной полярностью, ток через нагрузку начинает уменьшаться. К дросселю насыщения  $L_k$  прикладывается напряжение.

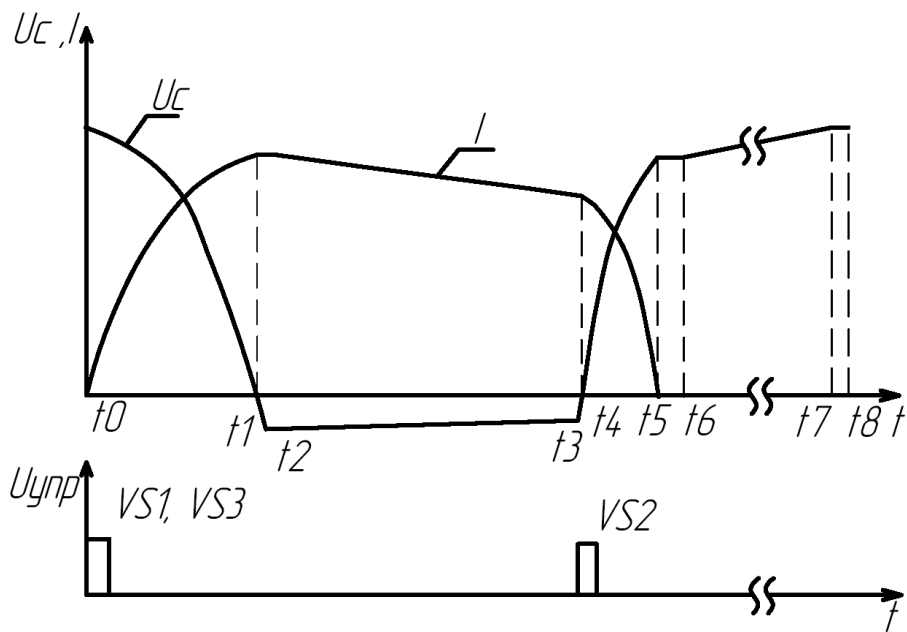
$t_2$ : дроссель  $L_k$  насыщается, диод  $VD$  открывается, к  $VS_1$  прикладывается обратное напряжение и он закрывается.

$t_2-t_3$ : ток замыкается в цепи  $L_k-VD-Z-VS_3-L_k$ . Ток постепенно уменьшается из-за активных потерь.»[1]





а) силовая схема



б) временные диаграммы

Рис. 2.3. – Формирователь разрядных импульсов с возможностью рекуперации на тиристорах.

« $t_3$ : открываем тиристор  $VS2$ . Ток начинает протекать по цепи  $Z1-VS2-C1-Lk-VD-Z$ . Обратное напряжение с конденсатора  $C$  прикладывается к  $VS3$  и он закрывается.

t3-t4: конденсатор разряжается до нуля, VS3 восстанавливает свои запирающие свойства.

t4-t5: конденсатор заряжается энергией, рекуперирующейся из нагрузки, ток уменьшается до нуля.

t5-t6: тиристор VS2 закрывается и восстанавливает свои запирающие свойства.

t6-t7: конденсатор C постепенно дозаряжается зарядным устройством до номинального напряжения.

t8: далее процессы повторяются.»[1]

«Данная схема позволяет регулировать амплитуду тока (заряжая конденсатор C до различных напряжений) и длительность создаваемого импульса тока, изменяя момент открытия тиристора.»[1]

Недостатком схемы является необходимость управлять несколькими тиристорами, а так же потери мощности, обусловленные протеканием тока через несколько силовых приборов последовательно.

Наиболее простым и подходящим для целей дипломного проекта является схемотехническое решение формирователя импульсов (рис. 2.4.), работа которого будет подробно рассмотрено в следующем пункте.

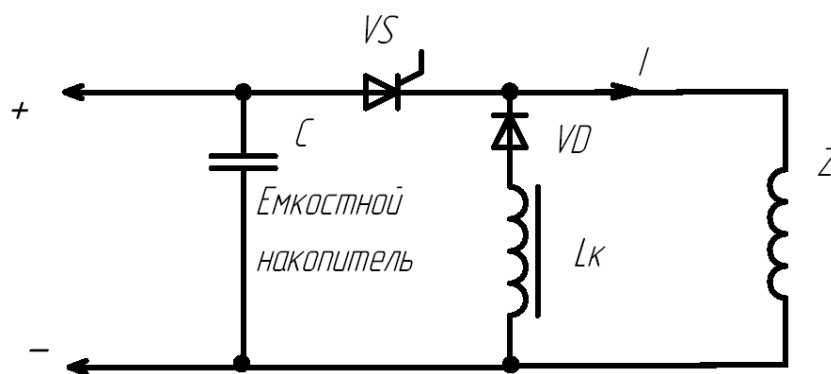


Рис. 2.4 – Формирователь разрядных импульсов на тиристоре.

## 2.6. Разработка и расчет формирователя разрядных импульсов

Полная схема питания, разработанная в данном дипломе, изображена на рис.2.5, а ее перечень элементов – в приложении.

### 2.6.1 Разработка силовой схемы формирователя

Известно, что требование создания максимальной силы наилучшим образом обеспечивается при режиме работы электромагнита, приближенном к режиму с постоянством потокосцепления, при котором магнитный поток, созданный обмоткой возбуждения, остается также постоянным и обеспечивает необходимое значение индукции магнитного поля в зазоре электромагнита.

Схема формирователя разрядных импульсов, обеспечивающая такой режим работы электромагнита (рис. 2.6) состоит из емкостного накопителя  $C_n$ , заряженного до регулируемого напряжения  $U_m \leq 1000$  В от зарядного устройства ЗУ, содержащего аккумулятор 12В и транзисторный преобразователь, и цепи формирования импульса тока  $i(t)$  в обмотке электромагнита, состоящей из тиристора VS и диода VD, шунтирующего обмотку возбуждения ОВ.

В момент времени  $t_0$  на тиристор VS подается управляющий импульс, тиристор открывается и емкость  $C_n$  разряжается на обмотку. В момент времени  $t_1$  емкость полностью разряжается и ток закорачивается через диод для «захвата» магнитного поля и обеспечения эффективного преобразования энергии магнитного поля в зазоре электромагнита в механическую при примерно постоянном значении потокосцепления, а значит, и создаваемого электромагнитного усилия  $P(t)$ . Дроссель насыщения L обеспечивает устойчивое запирающее действие тиристора при изменении напряжения на обмотке возбуждения.

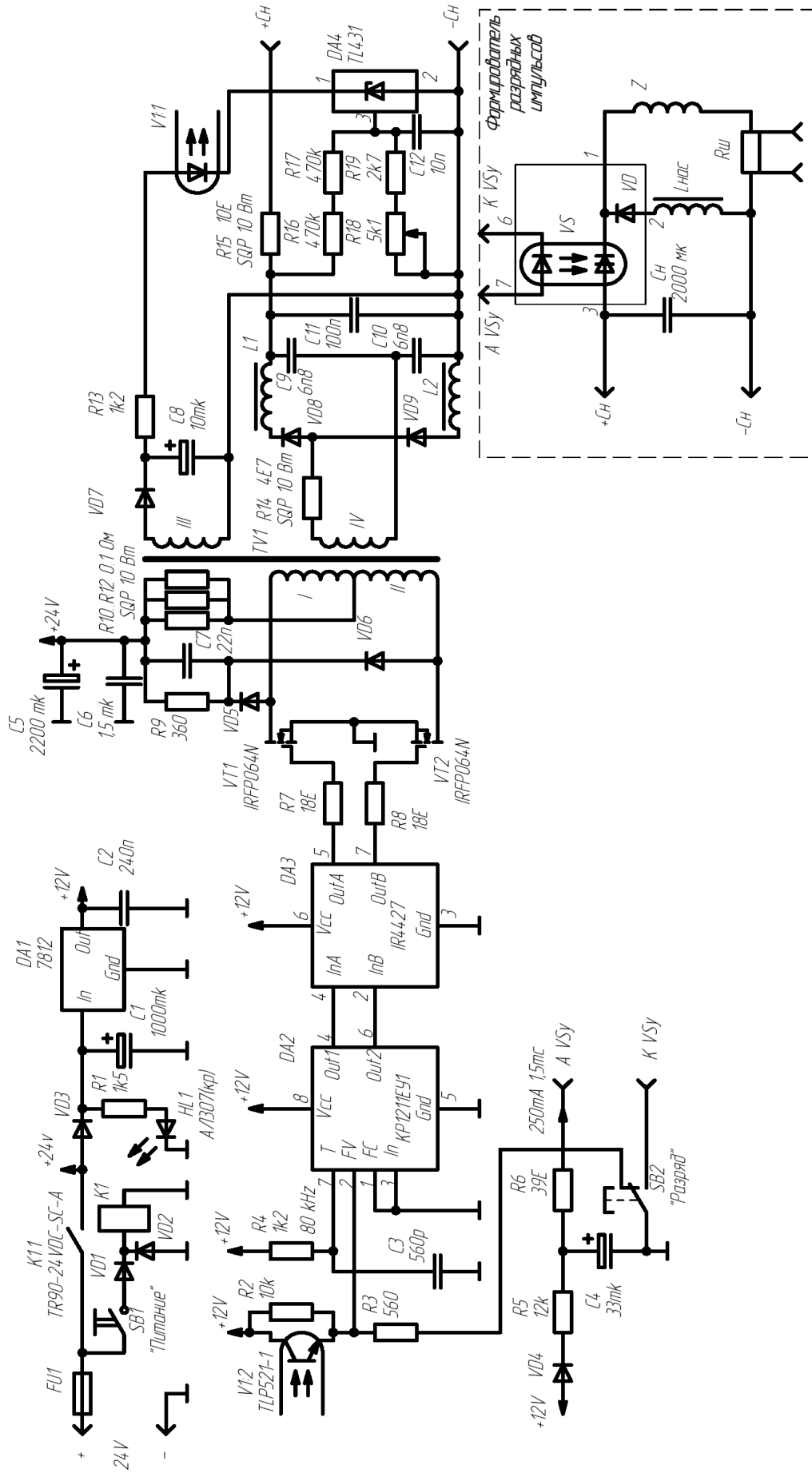
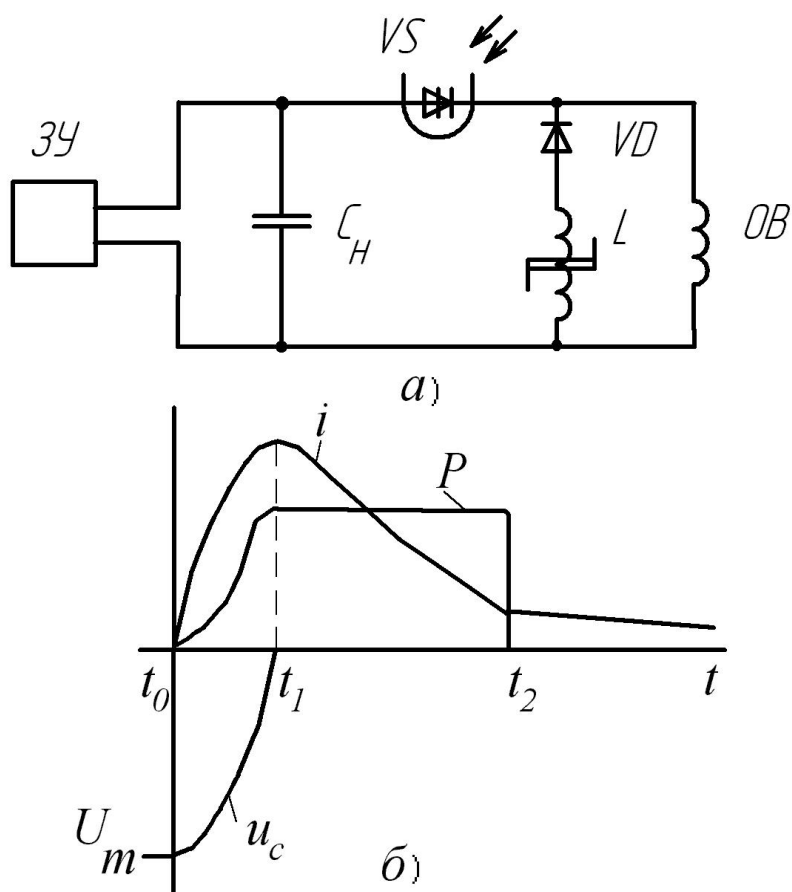


Рис.2.5 – Принципиальная электрическая схема системы питания сейсмоисточника.



а) схема питания; б) импульсы тока ( $i$ ), напряжения ( $U_c$ ) и силы ( $P$ )

Рис.2.6 - Силовая схема и временные диаграммы импульсного сейсмоисточника.

Согласно расчетам электромагнита в программном пакете ELCUT, при зазоре  $\delta=5$  мм, числе витков  $w=2$ , намагничивающей силе  $F=400$  А энергия в магнитном поле составляет  $W=90.2$  Дж и электромагнит развивает усилие  $P=104$  кН. Ориентируясь на вышеуказанное значение электромагнитной силы, равной заданной, примем этот режим за номинальный для работы.

Выберем емкостной накопитель  $C_n$  (рис.2.5). Из соображений техники безопасности, напряжение на нем не должно превышать 1000 В. Для обеспечения запаса номинальное напряжение накопителя  $U_n$  следует выбирать не превышающим 950 В. Из формулы выразим емкость, для этого необходимую.

$$W=C \cdot U^2/2, \quad (2.1)$$

где  $W$  – энергия в емкостном накопителе,

$C$  - емкость накопителя,

$U$  – напряжение на нем.

$$C=2 \cdot W/U^2=2 \cdot 90.2/950^2 = 200 \text{ мкФ} \quad (2.2)$$

Зададимся суммарной емкостью накопителя  $C_n=200\text{мкФ}$ . Тогда накопитель составим из двух конденсаторов с емкостью  $100\text{мкФ}$ , рассчитанных на рабочее напряжение  $1600 \text{ В}$  типа  $K75-80 \text{ } 100\text{мкФ} \text{ } 1600\text{В}$ .

Выбранную емкость  $200 \text{ мкФ}$  необходимо заряжать не до  $950$ , а до напряжения  $900\text{В}$ , при этом энергия составит  $81 \text{ Дж}$ . Таким образом, примем номинальное напряжение на батарее  $900 \text{ В}$ .

Из формулы

$$W=L \cdot I^2/2 \quad (2.3)$$

выразим эквивалентную индуктивность нагрузки  $Z$  (обмотки электромагнита)

$$L_e = 2 \cdot W/I^2 = 2 \cdot 81 / 200^2 = 4 \text{ мГн} \quad (2.4)$$

Тогда примерное время разряда накопителя на нагрузку составит четверть от резонансного периода колебаний контура  $C_n-Z$

$$T = \frac{1}{4} \cdot 2\pi \cdot \sqrt{L \cdot C} = \frac{1}{4} \cdot 2 \cdot 3.14 \cdot \sqrt{4 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 10^{-4}} = 5.4 \text{ мс} \quad (2.5)$$

Амплитуда разрядного тока составит

$$I_m = F/w = 400/2=200 \text{ А} \quad (2.6)$$

Согласно документации, диоды и тиристоры способны многократно выдерживать десятикратную перегрузку по току в течении  $10 \text{ мс}$ . Исходя из этого в качестве силовых диода и тиристора  $VD$  и  $VS$  выберем диодно-оптотиристорный модуль  $МДТО1-80-15-2\text{А}$ , рассчитанный на средний ток  $80 \text{ А}$  и напряжение  $1500\text{В}$ . Максимально допустимый постоянный ток

управления составляет  $I_{ГТМ} = 250$  мА (напряжение на управляющем светодиоде 2.5 В).

Дроссель насыщения  $L_{нас}$ , обеспечивающий надежное запираание тиристора получим пропуская силовой провод сквозь кольцевой сердечник К45х28х16, выполненный из феррита марки 1000НМ.

### 2.6.2 Схема управления формирователем разрядных импульсов

Формирование разрядного импульса происходит при нажатии на кнопку SB2 «Разряд» (см. рис.2.5). При этом конденсатор С4 через резистор R6 разряжается через разъем AVSy и К VSy на светодиод оптотиристора. Для надежного отпирания оптотиристора его ток должен составлять  $I_{ГТМ} = 250$  мА.

Рассчитаем величину резистора R6:

$$R6 = (12 - 2.5) / 0.25 = 38 \text{ Ом}, \quad (2.7)$$

где 12 В – напряжение питания системы управления (начальное напряжение на конденсаторе С4)

2.5 В – прямое падение напряжения на управляющем светодиоде.

0.25 А – ток управления

Приняли  $R6 = 39$  Ом.

Время разряда конденсаторной батареи Сн составляет примерно 5.5 мс.

Зададимся постоянной времени разряда конденсатора С4 в несколько раз меньшей этого времени  $\tau_{разр} = 1.5$  мс, что обеспечит с одной стороны надежное отпирание оптотиристора и позволит ему запереться после разряда конденсаторной батареи Сн с другой стороны.

$$C4 = \tau_{разр} / R5 = 0.0015 / 39 = 38 \text{ мкФ}. \quad (2.8)$$

Приняли С4: К 50-35 33 мкФ х 35 В.

Конденсатор С4 заряжается от напряжения 12 В через резистор R5 и диод VD4, обеспечивающий возможность однократной подачи управляющего

импульса даже после отключения всего напряжения питания (для разряда конденсаторной батареи).

Задались постоянной времени заряда конденсатора  $\tau_{зар}=0.5$  с, что обеспечит практически полный его заряд за 1 секунду. Тогда R5:

$$R5 = \tau_{зар} / C4 = 0.5 / 38 \cdot 10^{-6} = 13 \text{ кОм.} \quad (2.9)$$

Приняли  $R5=12$  кОм.

В этом случае ток управления при длительном нажатии на кнопку разряд составит

$$I_y = 12\text{В} / R5 = 12 / 12000 = 1\text{мА}, \quad (2.10)$$

что недостаточно для отпирания отпотиристора VS и позволит ему восстановить свои запирающие свойства даже при длительном нажатии на кнопку «Разряд».

Пока кнопка SB2 «Разряд» нажата, низ резистора R3 оказывается подвешенным в воздухе, в следствии чего на вход FV DA2 через резистор R2 10кОм оказывается поданным высокий потенциал и работа схемы заряда блокируется. Это сделано для блокировки работы зарядного устройства во время формирования разрядного импульса.

## 2.7. Блок питания

Входное питание будет подаваться на схему через реле K1 типа TR90-24VDC-SC-A, (реле 24В/30А, 240В). Его основные параметры сведены в таблицу 2.1.



Таблица 2.1. – Основные параметры реле TR90-24VDC-SC-A.

Параметр	Значение
Ток питания обмотки	постоянный
Количество обмоток	1
Ток срабатывания не более, мА	36
Сопротивление обмотки, Ом	660
Номинальное рабочее напряжение, В	24
Максимальное рабочее напряжение, В	28.8
Время срабатывания, мс	20
Время отпускания, мс	10
Сопротивление изоляции, МОм	10
Максимальное сопротивление электрических контактов, Ом	0.03
Материал контактов	AgSnIn
Наработка на отказ не менее, циклов	10000000
Рабочая температура, С	-55...85
Производитель	ТТІ

Конденсаторы С1 и С2 с емкостью 1000 мкФ и 240 нФ соответственно предназначены для фильтрации напряжения питания.

Выбранные типы конденсаторов:

С1: К 50-35 1000 мкФ х 35 В [43]

С2: К 10-17Б 240 нФ Y5V [43]

Благодаря диоду VD3 типа 1N4007 при отключении питания фильтрующие конденсаторы С5 и С6 разрядятся прежде, чем упадет уровень напряжения +12В, которое используется для формирования управляющих сигналов на транзисторы VT1 и VT2.

Временные диаграммы работы системы заряда изображены на рис. 2.7.

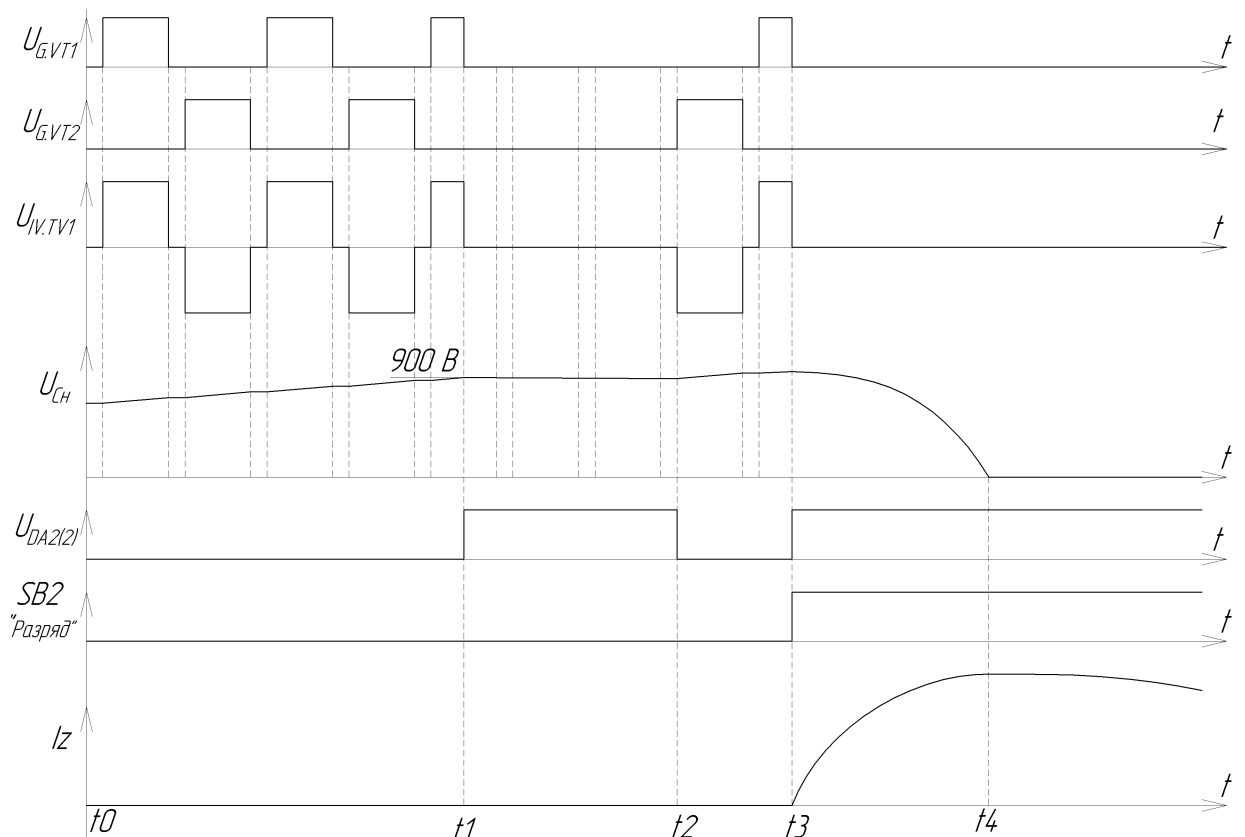


Рисунок 2.7 – Временные диаграммы работы системы заряда.

Транзистора VT1 и VT2 поочередно открываются, на вторичной стороне трансформатора формируется знакопеременное напряжение, которое выпрямляется удвоителем напряжения и заряжает конденсаторную батарею. При заряде до заданного значения оптрон обратной связи открывается, блокируя заряд. Если напряжение просядет из-за разрядных сопротивлений, то оптрон закроется и конденсатор дозарядится. При нажатии кнопки разряд открывается разрядный тиристор и конденсатор разряжается на нагрузку.

### Выводы по второму разделу

Во втором разделе была разработана система питания.

Основными элементами системы питания являются:

- а) зарядное устройство
- б) формирователь разрядных импульсов

Был проведен обзор их возможных схемотехнических решений и выбраны наилучшие.

### **3. Математическое моделирование**

#### **3.1. Разработка математической модели**

По теме диссертации была опубликована статья «Упруго – ударный режим работы импульсного сейсмоисточника» [40].

«В данном разделе анализируется режим работы электромагнитного сейсмоисточника со свободным разгоном якоря и частично–упругими элементами для передачи усилия в грунт. Рассматриваются условия согласования параметров электромагнитного двигателя с нагрузкой – грунтом.»[27]

Импульсные сейсмоисточники электромагнитного типа широко применяются в сейсморазведке, в связи с чем улучшение их характеристик является актуальной задачей. В данной работе будет рассмотрен вопрос согласования работы сейсмоисточника с нагрузкой посредством организации передачи импульса от якоря в грунт ударом через упругость. Определение эффективности проведем с помощью математического моделирования.

Электромеханические сейсмоисточники широко применяются при проведении сейсморазведочных работ в качестве генераторов мощных импульсных механических воздействий на грунт [36]. Однако, при проектировании сейсмоисточника под разные задачи сейсморазведки необходимо решать вопрос о выборе типа импульсного электромеханического привода и конструктивной схемы сейсмоисточника.

Электромагнитные двигатели имеют высокий КПД преобразования электрической энергии в механическую, но эффективно работают при сравнительно невысоких значениях удельной механической силы на единицу массы и обладают большим временем срабатывания. Электро– и

индукционно– динамические двигатели лишены этих недостатков, но обладают низким КПД.

Для лёгких переносных сейсмоисточников, используемых при исследованиях "зоны малых скоростей" и в инженерной сейсморазведке (это глубины до 100 м), весьма важным является достижение высоких удельных массогабаритных показателей. При этом приводы таких сейсмоисточников должны иметь высокий КПД, поскольку источником для них является аккумуляторная батарея большой ёмкости. Альтернативные источники энергии – электрогенераторы с двигателями внутреннего сгорания, создают сильные акустические помехи, поэтому при такой сейсморазведке не применяются.»[27]

«При применении в сейсмоисточнике электромагнитного двигателя существует возможность уменьшения длительности силы воздействия на грунт путём предварительного свободного хода (разгона) якоря с последующей передачей его кинетической энергии излучателю посредством согласующих упругих элементов. Для анализа данного режима и обоснования выбора параметров согласования сейсмоисточника с грунтом проведём его математическое моделирование.

Схема конструкции сейсмоисточника с согласующими упругими элементами, реализующая предварительный разгон якоря, приведена на рис. 3.1. Сейсмоисточник содержит электромагнитный двигатель, индуктор которого соединён с пригрузом;  $m_2$  – их суммарная масса. Над индуктором помещён якорь с зазором  $\delta_0$  между полюсами индуктора и магнитопроводом якоря;  $m_1$  – масса магнитопровода якоря со стальным сварным корпусом, снабжённым консолями. В исходном положении пригруз опирается на помещённый на грунт излучатель со стойками;  $m_3$  – суммарная масса излучателя со стойками;  $C_3$  – податливость грунта под излучателем. Сверху на стойках закреплены частично–упругие элементы 1, обладающие податливостью  $C_{13}$  и сопротивлением вязкого трения  $K_{tr}$  (на практике

предполагалось использование полиуретановых вкладышей). Между элементами 1 и консолями якоря в начальном положении установлен зазор  $\delta_{сх}$  (обеспечивающее его установку устройство на схеме не показано).»[27]

В сейсмоисточнике (рис. 3.1) после подачи тока в обмотку индуктора якорь  $m_1$  с силой  $P(t)$  притягивается к индуктору  $m_2$  и через стойки давит на излучающую плиту и грунт  $m_3$ . Для организации упруго-ударного режима якорь  $m_1$  сначала разгоняется вниз на свободном ходу  $\delta_{сх}$ , а затем бьет по излучающей плите  $m_3$  через упругость  $C_{13}$ .

«Так как масса  $m_1$  много меньше массы  $m_2$ , то на свободном ходе  $\delta_{сх}$  якоря относительно индуктора энергия магнитного поля двигателя преобразуется в основном в кинетическую энергию якоря. После выбора зазора  $\delta_{сх}$  при сжатии упругих элементов 1 кинетическая энергия якоря преобразуется в потенциальную энергию этих элементов. При этом до момента, когда упругие элементы разожмутся, на излучатель действует суммарная сила  $P$  двигателя и сжатых упругих элементов.

Переменными состояниями в мат. модели будут скорости « $V$ » и координаты « $x$ » с индексами 1,2,3 для якоря, индуктора и излучающей плиты соответственно.»[27]

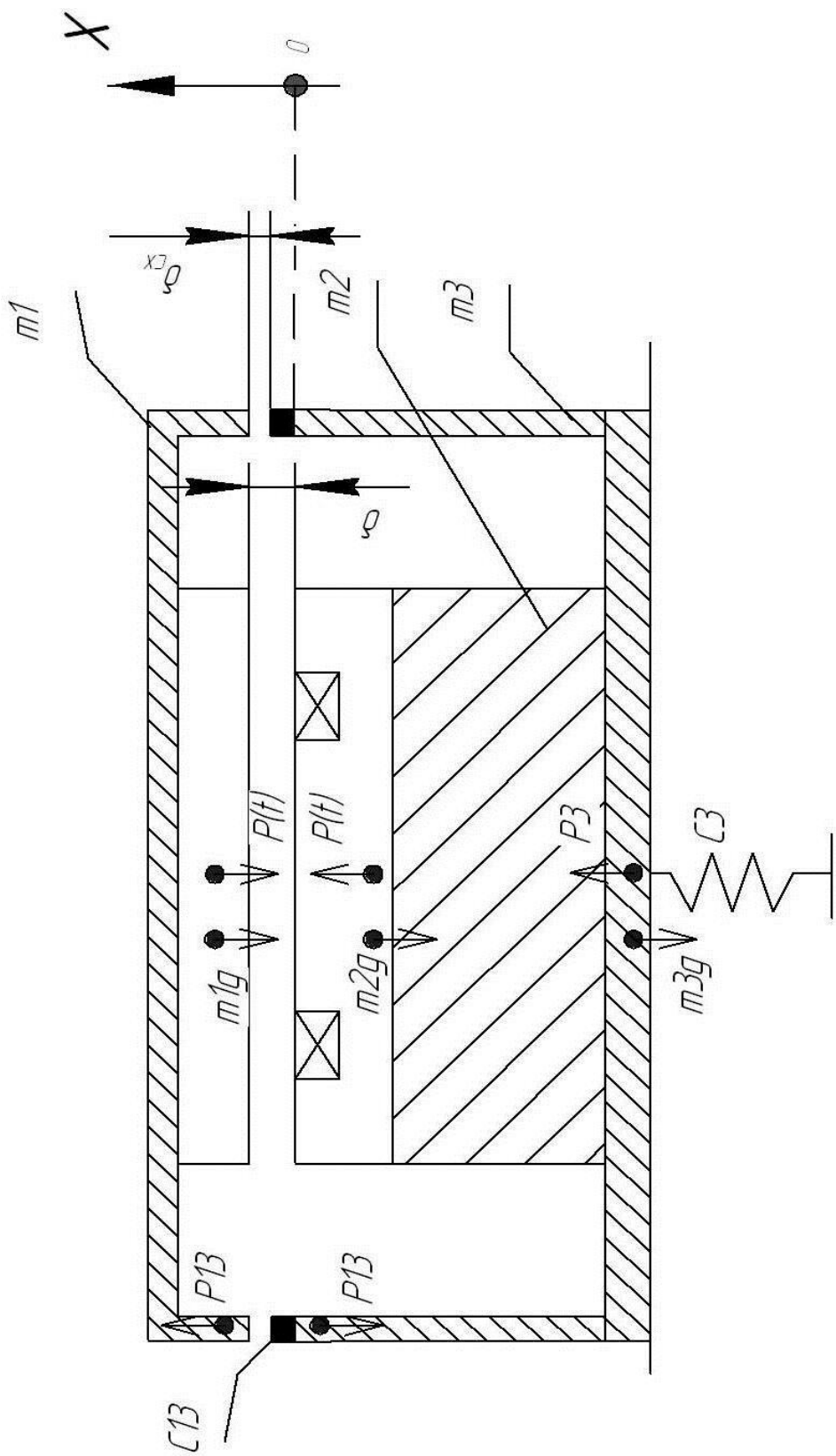


Рисунок 3.1 - Упрощенная конструктивная схема сейсмоисточника.

«Основным для представленной конструктивной схемы является режим удара через податливость ( $\delta_{сх}$  больше нуля,  $C_{13}$  больше нуля). Она также позволяет реализовать другие режимы работы сейсмоисточника, которые используем в качестве базы для сравнения:

1. Режим давления непосредственно на стойки ( $\delta_{сх}$  равен нулю,  $C_{13}$  соответствует податливости стоек и излучателя). Этот режим реализован в большинстве применяемых электромагнитных сейсмоисточников;

2. Режим давления через податливость ( $\delta_{сх}$  равен нулю,  $C_{13}$  больше податливости стоек и излучателя);

3. Режим жёсткого удара ( $\delta_{сх}$  больше нуля,  $C_{13}$  равна нулю), соответствует отсутствию упругой прокладки 1 и удару разогнанного до некоторой скорости якоря с консолью по стойкам. С практической точки зрения этот режим бесперспективен из-за быстрого разрушения соударяющихся элементов.»[27]

«Для моделирования зададим параметры, соответствующие реальному сейсмоисточнику для инженерной сейсморазведки:

$$m_1=5 \text{ кг}; m_2 = 20 \text{ кг}; m_3=8 \text{ кг}, C_3=2 \cdot 10^{-6} \text{ м/Н}, \delta_0=3.7 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Переменными состояниями в его математической модели являются:

-  $V_1, V_2, V_3$  – скорости якоря, индуктора и излучающей плиты соответственно, м/с.

-  $x_1, x_2, x_3$  – координаты этих элементов, мм.

Начальными условиями для расчёта по методу переменных состояний являются величины:

$$V_1 = V_2 = V_3 = 0, \quad x_1 = \delta_0 - x_0, \quad x_2 = x_3 = -x_0,$$

где координата  $x_0$ :

$$x_0 = (m_1 + m_2 + m_3)gC_3,$$

соответствует сжатию грунта весом сейсмоисточника;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.»[27]

В режиме удара через упругость можно выделить следующие интервалы (в зависимости от текущих значений зазоров):

- |                    |                          |                   |
|--------------------|--------------------------|-------------------|
| 1. Свободный ход,  | $\delta_{cx}(t) > 0,$    | $\delta(t) > 0 ;$ |
| 2. Додавливание,   | $\delta_{cx}(t) \leq 0,$ | $\delta(t) > 0 ;$ |
| 3. Послеударный 1, | $\delta_{cx}(t) \leq 0,$ | $\delta(t) = 0 ;$ |
| 4. Послеударный 2, | $\delta_{cx}(t) > 0,$    | $\delta(t) = 0.$  |

Режим давления через упругость может быть промоделирован как частный случай режима удара через упругость с нулевой начальной величиной свободного хода  $\delta_{cx}$ . Режим давления без упругости может быть получен из режима удара через упругость подстановкой очень малой величины податливости  $C13$ .

Нагрузка – грунт моделируется в данной схеме податливостью  $C3$  и массой, входящей в состав массы  $m3$ . Таким образом, величины масс составляют:  $m1=5$  кг;  $m2 = 20$  кг;  $m3=20$  кг.

«Переменными состояниями в математической модели являются:

$V1, V2, V3$  – скорости якоря, индуктора и излучающей плиты соответственно.

$x1, x2, x3$  – координаты якоря, индуктора и излучающей плиты соответственно.»[27]

Начальными условиями для расчета по методу переменных состояний являются величины:  $V1=V2=V3 = 0$ ;  $x1=\delta_0-x_0$ ;  $x2=x3=-x_0$ , где величина перемещения  $x_0=-(m2+m3) \cdot C3 \cdot g$  соответствует предварительному сжатию грунта под весом индуктора и излучающей плиты.

Системы уравнений для периодов работы – предударного и послеударного:

1. Предударный ( $x1 > x2$ )



$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dV1}{dt} = \frac{-m1 \cdot g - P(t) + P13(x1, x3)}{m1} \\ \frac{dV2}{dt} = \frac{-m2 \cdot g + P(t)}{m2} \\ \frac{dV3}{dt} = \frac{-m3 \cdot g + P3(x3) - P13(x1, x3)}{m3} \\ \frac{dx1}{dt} = V1 \\ \frac{dx2}{dt} = V2 \\ \frac{dx3}{dt} = V3 \end{array} \right. \quad (3.1)$$

2. Послеударный ( $x1=x2$ )

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dV1}{dt} = \frac{-m1 \cdot g - m2 \cdot g + P13(x1, x3)}{m1 + m2} \\ \frac{dV2}{dt} = \frac{-m1 \cdot g - m2 \cdot g + P13(x1, x3)}{m1 + m2} \\ \frac{dV3}{dt} = \frac{-m3 \cdot g + P3(x3) - P13(x1, x3)}{m3} \\ \frac{dx1}{dt} = V1 \\ \frac{dx2}{dt} = V2 \\ \frac{dx3}{dt} = V3 \end{array} \right. \quad (3.2)$$

Сила сжатия грунта:

$$P3(x3) = \begin{cases} -x3 \\ C3 \end{cases}, \text{ если } x3 < 0 \\ 0, \text{ если } x3 \geq 0 \end{cases} \quad (3.3)$$

Сила сжатия упругости:

$$P_{13}(x_1, x_3) = \begin{cases} \frac{(\delta o - \delta cx) - (x_1 - x_3)}{C_{13}}, & \text{если } (\delta o - \delta cx) - (x_1 - x_3) > 0 \\ 0, & \text{если } (\delta o - \delta cx) - (x_1 - x_3) \leq 0 \end{cases} \quad (3.4)$$

В момент удара скорости якоря и индуктора пересчитываются:

$$V_1 = V_2 = \frac{V_1 \cdot m_1 + V_2 \cdot m_2}{m_1 + m_2} \quad (3.5)$$

В реальном сейсмоисточнике (рис.3.2) имеется рычаг, в связи с чем необходимо пересчитывать силу давления на упругость  $C_{13}$ .

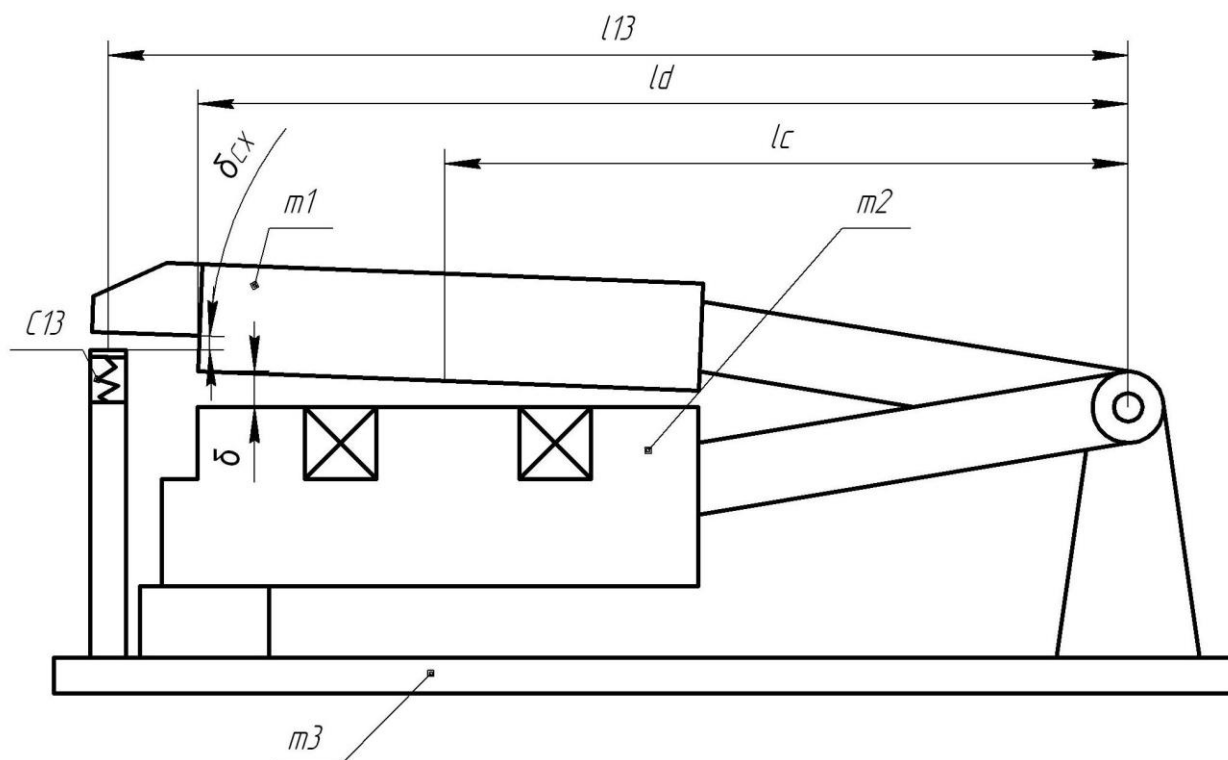


Рисунок 3.2. - Упрощенная конструктивная схема источника, вид сбоку.

Сила сжатия полиуретана C13:

$$P_{13}(x_1, x_3) = \begin{cases} K^2 \frac{(\delta_0 - \delta_{cx}) - (x_1 - x_3)}{C_{13}}, & \text{если } (\delta_0 - \delta_{cx}) - (x_1 - x_3) > 0 \\ 0, & \text{если } (\delta_0 - \delta_{cx}) - (x_1 - x_3) \leq 0 \end{cases}, \quad (3.6)$$

$K$  – коэффициент пересчета податливости  $C_{13}$ , учитывающий наличие рычага.

«При переходе из интервала 1 в интервал 2 новое значение скорости индуктора и якоря находится из закона сохранения импульса:»[27]

$$V_1 = V_2 = \frac{V_1 \cdot m_1 + V_2 \cdot m_2}{m_1 + m_2} \quad (3.7)$$

На рисунке конструкции вид сбоку (рис. 3.2) обозначены величины рычагов:

$l_{13} = 323$  мм – расстояние от оси вращения до опоры с прокладкой С13

$l_d = 300$  мм – расстояние до точки, расстояние между якорем и индуктором в которой принято за величину  $\delta$ . В этой же точке предполагается замерять зазор при проведении экспериментальных исследований.

$l_c = 222$  мм - расстояние до центра масс индуктора и якоря.

Согласно результатам экспериментальных исследований электромагнитов, подобных применяемому в данном сейсмоисточнике, форма электромагнитной силы  $P(t)$  близка к изображенной на рисунке 3.3.

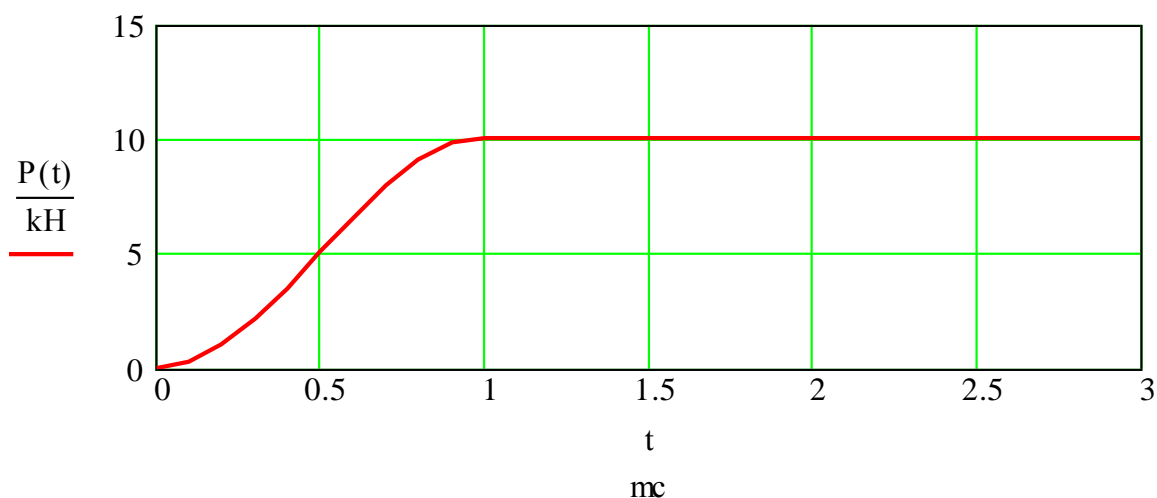


Рисунок 3.3 - форма электромагнитной силы  $P(t)$ .

В данной модели электромагнитная сила  $P(t)$  заменяется выражением:

$$P(t) = \begin{cases} \frac{P_m}{2} \left( 1 - \cos\left(\frac{\pi}{t_{Pm}} \cdot t\right) \right), & \text{если } t < t_{Pm} \\ P_m, & \text{если } t_{Pm} \geq 0 \end{cases}, \quad (3.8)$$

«где  $P_m=10$  кН – амплитудное значение силы;  
 $t_{P_m}=1$ мс – время нарастания силы от нуля до амплитудного значения.»[27]

Эквивалентная величина податливости грунта  $C_3=5 \cdot 10^{-7}$  м/Н – так же взята из предыдущих экспериментальных исследований.

Использованные в математической модели обозначения и величины параметров свели в таблицу 3.1.

Таблица.3.1 - Используемые в математической модели обозначения

Обозначение	Параметр	Значение параметра
m1	Масса якоря	5 кг
m2	Масса индуктора	20 кг
m3	Сумма масс излучающей плиты и эквивалентной массы грунта	20 кг
Pm	Амплитуда электромагнитной силы	10 кН
tPm	Время нарастания электромагнитной силы до амплитуды	1мс
$\delta_0'$	Величина зазора между якорем и индуктором	5 мм
$\delta_{сх}'$	Величина зазора свободного хода	2 мм при режиме удара через упругость; 0 при режимах давления
$\delta_0$	Величина зазора $\delta_0'$ , пересчитанная к расстоянию до центра масс якоря и индуктора	3.7 мм
$\delta_{сх}$	Величина зазора $\delta_{сх}'$ , пересчитанная к расстоянию до центра масс якоря и индуктора	1.48 мм
C13	Податливость полиуретана	$1.9 \cdot 10^{-7}$ м/Н при $\delta_{сх}'=0$ ; $0.6 \cdot 10^{-7}$ м/Н при $\delta_{сх}'=2$ мм
C3	Податливость грунта	$5 \cdot 10^{-7}$ м/Н
g	Ускорение свободного падения	$9.81 \text{ м/с}^2$
V1	Скорость якоря	Расчет
V2	Скорость индуктора	Расчет
V3	Скорость излучающей плиты	Расчет
x1	Координата якоря	Расчет
x2	Координата индуктора	Расчет
x3	Координата излучающей плиты	Расчет

### 3.2 Реализация математической модели

«Разработанная в данном разделе математическая модель импульсного электромагнитного сейсмоисточника была реализована в программном пакете Mathcad 2001. Она представляет собой численный расчет уравнений состояния (3.1, 3.2) с подстановкой в них величин сил (3.4, 3.5, 3.6) при помощи метода Рунге-Кутты четвертого порядка.

Рассчитанные для режимов давления якоря непосредственно на стойки и удара через податливость временные диаграммы представлены на рисунках 3.4 и 3.5.

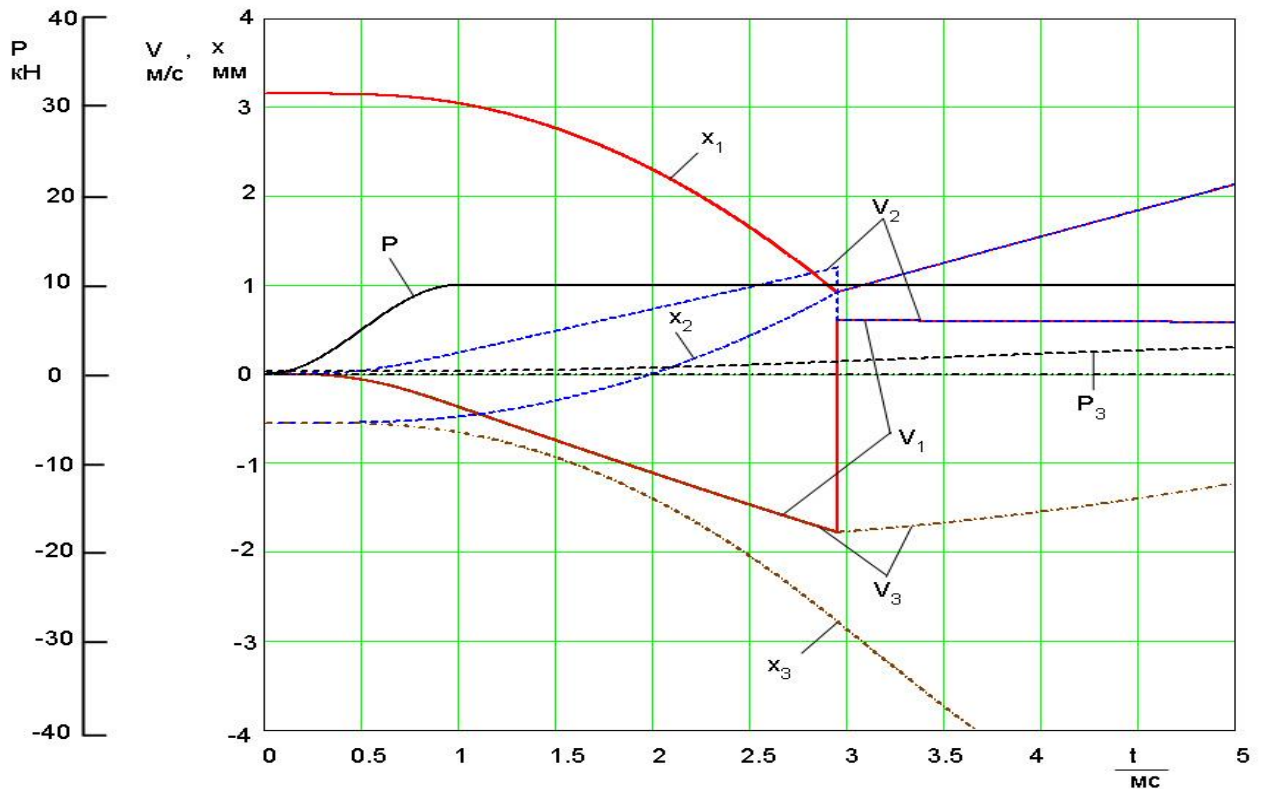


Рис. 3.4 Временные диаграммы, рассчитанные при  $\delta_{сх}=0$ ,  $C_{13}=0$ ,  $K_{tr}=0$  (стандартный режим работы сейсмосточника – давление через стойки)

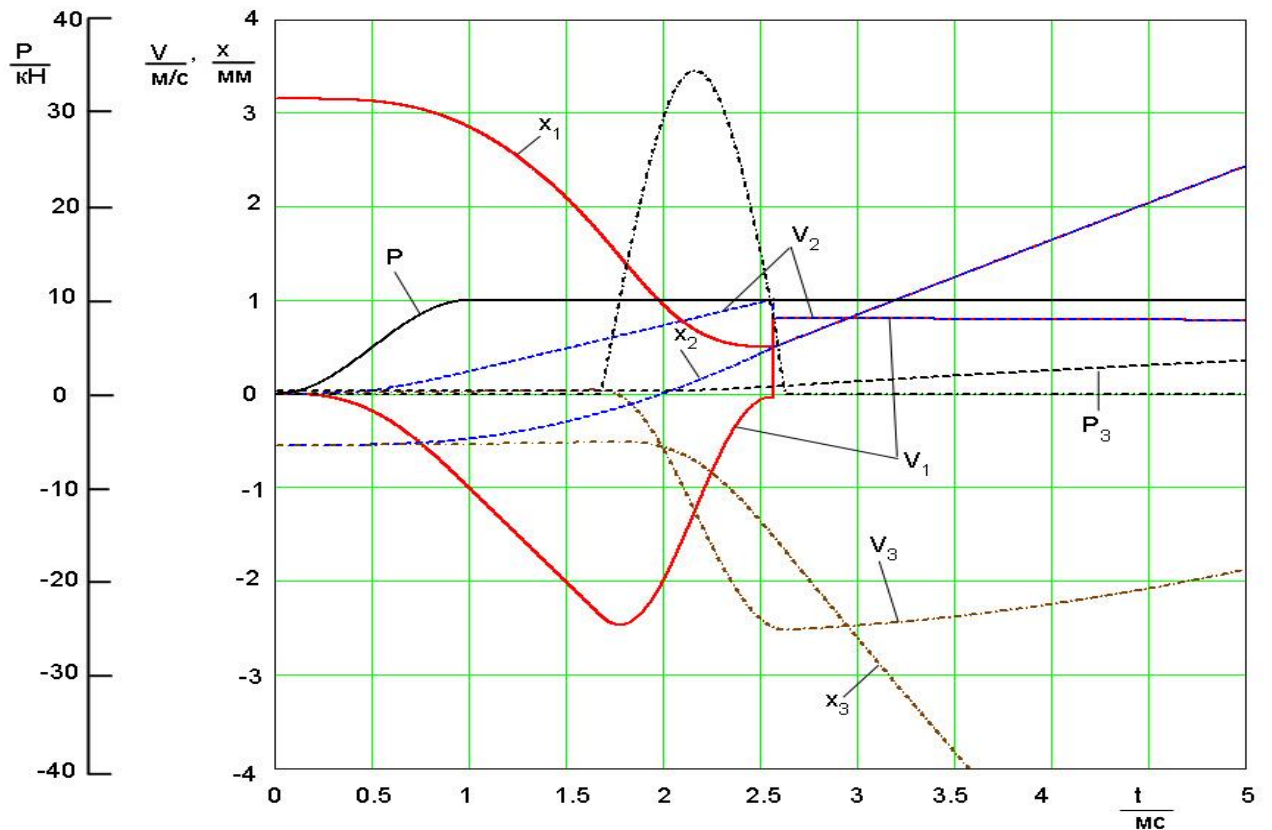


Рис. 3.5. - Результаты моделирования в режиме удара через упругость.

(Временные диаграммы, рассчитанные при  $\delta_{сх}=1.48 \cdot 10^{-3}$  м,

$C_{13}=24 \cdot 10^{-9}$  м/Н,  $K_{tr}=0$  Н·с/м)

Параметры формируемой в грунте сейсмической волны зависят для рассмотренной конструкции от податливости упругих. Результаты расчётов максимальных значений усилия  $P_{3max}$  сжатия грунта от их податливости приведены на рис. 3.6. Увеличение свободного разгона якоря практически до величины зазора между якорем и индуктором ( $\delta_{сх} \rightarrow \delta_0$ ) обеспечивает при уменьшении податливости  $C_{13}$  монотонное повышение максимальных значений усилия  $P_{3max}$  (верхняя пунктирная линия). При этом диапазон значений  $C_{13}$ , в котором обеспечивается повышение усилия  $P_{3max}$  по сравнению с режимом давления якоря на излучатель (при котором усилие  $P_{3max}$  равно 3.87 кН – график  $\delta_{сх}=0$ , точка  $C_{13}=0$ ) сужается.»[27]



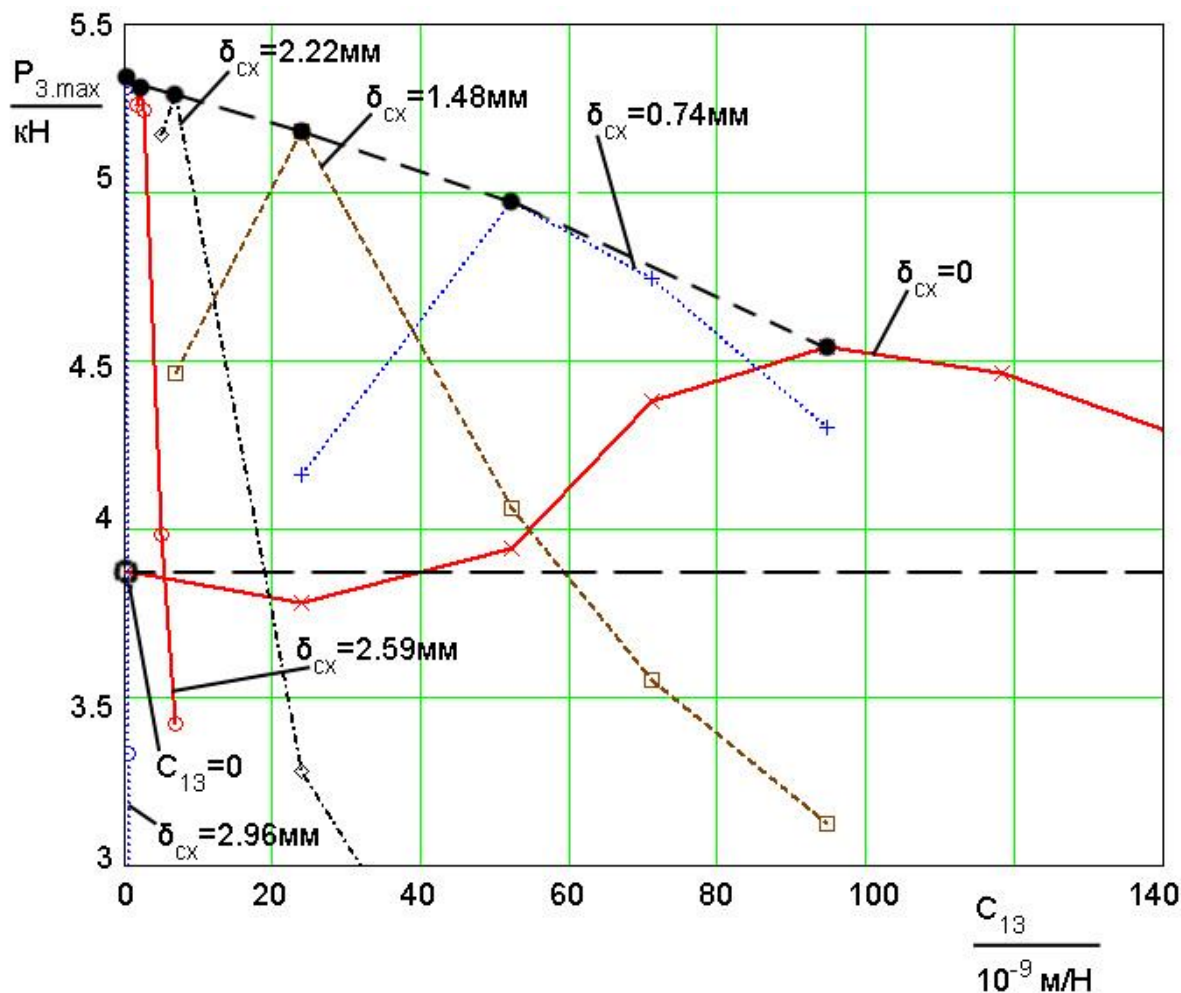


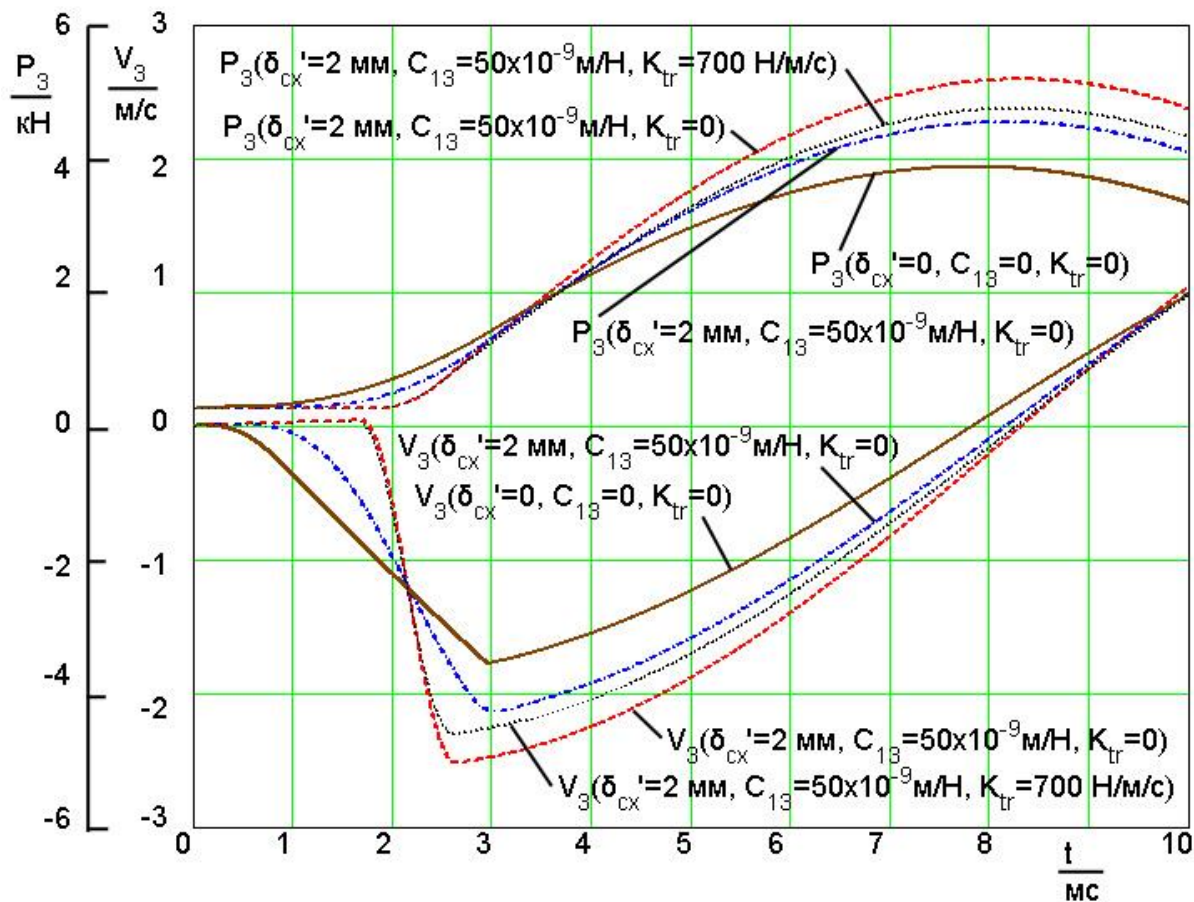
Рис. 3.6. Зависимости максимальных значений усилия  $P_3$  от податливости  $C_{13}$  для различных значений зазора  $\delta_{cx}$

«Для значений  $C_{13}=C_{13m}$ , при которых достигаются максимальные величины  $V_3$  и  $P_3$ , на рис. 5 представлены временные зависимости  $P_3(t)$  и  $V_3(t)$  для различных режимов работы сейсмоисточника:

- давление якоря непосредственно на стойки;
- давление через податливость;
- удар через податливость при  $\delta_{cx}=1.48$  мм.

На рис. 3.7 представлены также графики  $P_3(t)$  и  $V_3(t)$ , полученные при  $K_{tr}=5300$  Н·с/м в режиме удара через податливость. При указанном значении  $K_{tr}$  обеспечивается частично-упругий режим соударения якоря со стойками с быстро затухающими колебаниями (менее двух периодов), что в условиях

анализируемого сейсмоисточника (значения масс и податливостей) обеспечивает затухание колебаний, соответствующее упругим элементам из полиуретана»[27].



**Рис. 3.7** Сравнение временных зависимостей  $P_3(t)$  и  $V_3(t)$ .

«По графикам на рис 3.5-3.7 видно, что переход с режима давления на режим удара через податливость (или давления через податливость) позволяет увеличить максимальные значения скорости излучающей плиты  $V_3$  и силы воздействия на грунт  $P_3$ , а так же уменьшить длительности их фронтов. Однако свойства предложенных к использованию на практике упругих элементов из полиуретана далеки от абсолютно упругих, что, несомненно, уменьшает эффект от применения анализируемых режимов. Максимальные значения скорости и силы в режиме удара через полиуретановые вкладыши незначительно превышают значения, полученные

в режиме давления, что было подтверждено предварительными экспериментальными исследованиями. В настоящее время поиск позволяющих реализовать преимущества проанализированных режимов конструктивных решений упругих элементов (новые упругие материалы, короткоходовые пружины и т. д.) продолжается.

В таблице 1 приведены численные результаты, рассчитанные при использовании в описанной модели абсолютно упругих элементов.»[27]

Таблица 3.2 – Сравнение анализируемых режимов

Зазор $\delta_{сх}$ , мм	Податливость $C_{13 м}$ , $10^{-9}$ м/Н	Максимальное значение силы $P_3$ , кН	Максимальное значение скорости $V_3$ , м/с	Время фронта скорости и $V_3$ , мс	Амплитуда усилия сжатия упругих вставок, кН
0	0.0	3.87	1.78	1.96	6.7*
0	94	4.54	2.14	1.39	12
0.74	52	4.97	2.39	0.87	21
1.48	24	5.18	2.52	0.55	34
2.22	6.6	5.29	2.60	0.27	70
2.59	1.9	5.31	2.61	0.14	136
2.96	0.061	5.34	2.63	0.025	776

Из анализа проведенного моделирования можно сделать следующие выводы:

«1. Применение режимов со свободным разгоном якоря и последующим до момента выбора зазора между ним и индуктором упругим соударением с излучателем позволяет значительно уменьшить длительность фронта скорости движения излучателя и увеличить усилие деформации

грунта на 37% и скорость движения излучателя – на 46%. При этом существенно ослабляется влияние нагрузки – грунта на указанные показатели сейсмоисточника. Однако отсутствие необходимых упругих материалов не позволяет в полной мере реализовать эти преимущества. Из-за диссипации энергии в частично–упругом соударении якоря с излучателем усилие деформации грунта и скорость движения излучателя возрастают значительно меньше ожидаемого.

2. Увеличение свободного разгона якоря практически до величины зазора между якорем и индуктором обеспечивает монотонное повышение эффективности сейсмоисточника. Однако усилие сжатия упругих элементов следует ограничивать по критерию прочности и продолжительности безотказной работы конструкции сейсмоисточника.»[27]

В результатах моделирования были получены временные диаграммы (рис.3.4).

Для сравнительного анализа аналогично были промоделированы:

1. Режим удара через упругость,
2. Режим давления через упругость.
2. Режим давления без упругости

Результаты моделирования (графики зависимости сил от времени) изображены на рис. 3.5.

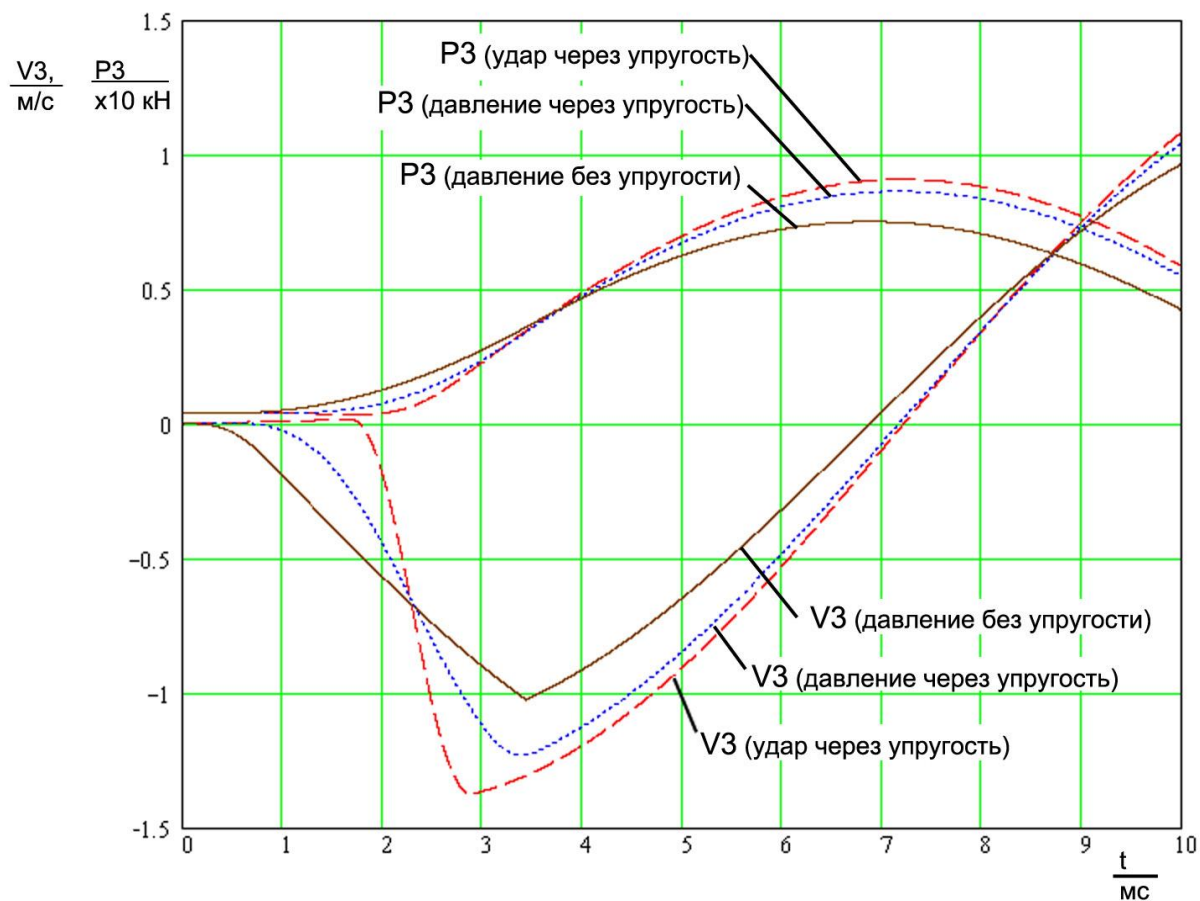


Рисунок 3.5 - Результаты моделирования (графики зависимости сил от времени)

### Выводы по математическому моделированию

1. Применение упругих режимов работы сейсмоисточника позволяет
  - а) увеличить силу на 15% в режиме давления через упругость и на 21% в режиме удара через упругость.
  - б) увеличить скорость излучающей плиты на 20% в режиме давления через упругость и на 34% в режиме удара через упругость.

## Заключение

В данной работе происходит разработка и математическое моделирование малогабаритного сейсмоисточника с ударно-упругим режимом работы.

В первом разделе рассмотрена актуальность, сформулированы цели и задачи работы.

Во втором разделе была разработана система питания.

Основными элементами системы питания являются:

- а) зарядное устройство
- б) формирователь разрядных импульсов

Был проведен обзор их возможных схемотехнических решений и выбраны наилучшие.

Предложенное схемотехническое решение умножителя напряжения с балластными конденсаторами позволит заряжать емкостной накопитель без больших импульсных токов в начале заряда, что обеспечит высокую надежность системы питания и низкий уровень электромагнитных помех, создаваемых зарядным устройством.

Использование высокочастотной схемы обеспечило малые габариты повышающего трансформатора. Обратная связь по напряжению позволила получить стабилизированное и регулируемое напряжение на емкостном накопителе, что обеспечит хорошую повторяемость импульсов тока в нагрузке и возможность изменения их амплитуды.

Силовой формирователь разрядных импульсов построен на схемотехническом решении, обладающем высокой надежностью и хорошо себя зарекомендовавшем для аналогичного использования.

Разработанная система питается от аккумуляторной батареи 12 В, способна заряжать емкостной накопитель до напряжения 950 В

В третьем разделе происходит разработка математической модели и математическое моделирование работы сейсмоисточника в различных режимах. Выявлено, что применение упругих режимов работы сейсмоисточника позволяет

а) увеличить силу на 15% в режиме давления через упругость и на 21% в режиме удара через упругость.

б) увеличить скорость излучающей плиты на 20% в режиме давления через упругость и на 34% в режиме удара через упругость.

Результаты работы опубликованы на конференциях Всероссийская студенческая научно-практическая междисциплинарная конференция «Молодежь. Наука. Общество»: Тольятти, ТГУ 2019 [40] и конференции «Студенческие Дни науки в ТГУ» : научно-практическая конференция (Тольятти, 5–30 апреля 2021 года) [14].

## Список используемой литературы

1. А.В. Прядилов, П.П. Барбаков, Д.М. Киряков. Система заряда емкостного накопителя, работающего в режиме с полным разрядом // Энергоэффективность и энергобезопасность производственных процессов. IV Всероссийская научно-техническая конференция студентов, магистрантов, аспирантов: сборник трудов. Ответственный за выпуск: В.В. Вахнина. 2016. С. 370-372.
2. А.В. Прядилов, П.П. Барбаков, Д.М. Киряков. Схемотехнические решения устройств заряда конденсаторов большой емкости // «Студенческие Дни науки в ТГУ» научно-практическая конференция (Тольятти, 1-25 апреля 2016 года) : сборник студенческих работ / отв. за вып. С.Х.Петерайтис. – Тольятти: Изд-во ТГУ, 2016. С.119-120
3. Аксенов А.И., Нефедов А.В. Отечественные полупроводниковые приборы. Справочное пособие., М.: СОЛОН., 1999 г.
4. Андреев Ю.Р., Антонян А.И., Иванов Д.М. и др. Резисторы: Справочник. - М.: Энергоиздат, 1981.
5. Болотовский Ю. И., Таназлы Г. И., Вашкевич Е. И., Никитин А.В. Разработка систем заряда емкостных накопителей энергии. Часть 1 // Силовая электроника. 2009. №2
6. В. В. Ивашин Электромеханические аналогии. Учебное пособие. – Куйбышев, КуАИ, 1983, 70 с.
7. В.В. Ивашин, М.В. Позднов. К вопросу об энергопреобразовании в электромагнитном вибраторе.// Прогрессивные техпроцессы в машиностроении: Труды всероссийской конф. с междунар. участием: Тольятти, ТГУ, 2002.-С.120-125.
8. Воронин, П.А. Силовые полупроводниковые ключи: семейства, характеристики, применение/ П.А. Воронин. - М.:Издательский дом “Додека-XXI”, 2001. – 384 с.



9. Дискретные приборы. Каталог. Саранск 2000. [Электронный ресурс]. URL: [www/rectifier.moris.ru](http://www.rectifier.moris.ru) (дата обращения: 01.05.2017).
10. Дьяконов В.С. Simulink 4. Специальный справочник. – СПб: Питер, 2002.-528с.
11. Забродин Ю.С. Промышленная электроника. – М.: Высш. Школа, 1982. 496 с.
12. Зиновьев, Г.С. Основы силовой электроники: учеб.пособ./ Зиновьев, Г.С. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. - 664с.
13. Изолированные датчики тока и напряжения фирмы LEM. характеристики, применение, расчеты. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.lem.com> (дата обращения: 01.05.2017).
14. Использование программы Elcut для расчета магнитных систем. А.В. Прядилов, В.В. Ивашин, М.Ю. Ербеков, С.З. Давлатов // «Студенческие Дни науки в ТГУ» : научно-практическая конференция (Тольятти, 5–30 апреля 2021 года) : Сборник студенческих работ / Тольятти : Изд-во ТГУ, 2021. – 1 оптический диск.
15. Каталог электронных компонентов Платан. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.platan.ru> (дата обращения: 01.05.2017)
16. Каталог электронных компонентов Чип и дип. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.chip-dip.ru> (дата обращения: 01.05.2017)
17. Кныш, В.А. Полупроводниковые преобразователи в системах заряда накопительных конденсаторов. – Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1981. – 160с., ил.
18. Кудинов, А.К. Мощный транзисторный преобразователь для заряда емкостного накопителя энергии / А.К. Кудинов, А.В. Прядилов, К.Х. Узбеков // Наука – производству. - 2004. - №4(72). - С.54-56.
19. Кузнечиков С.Ю. Магнитопроводы из композиционных магнитомягких порошковых материалов.// Электротехника 1994г. №8, С.54

20. Масленников М. Ю., Соболев Е. А., Соколов Г.В. Справочник разработчика и конструктора РЭА. Элементная база.
21. Миловзоров О. В. Электроника : учеб. для вузов / О. В. Миловзоров, И. Г. Панков. - Изд. 4-е, стер. ; Гриф МО. - М. :Высш. шк., 2008. - 288 с.
22. Мощные полупроводниковые приборы. Диоды: Под ред. Н.В. Ефимова, Т.В. Жукова.-М.; Энергоиздат, 1987.-562с.: ил.
23. Мощные полупроводниковые приборы. Транзисторы: Справочник Б.А. Бородин, В.М. Ломакин, В.В. Мокряков и др.; Под ред. А.В. Голомедова.-М.: Радио и связь, 1985.-.560с., ил.
24. Мощные полупроводниковые приборы: Диоды: Справочник / Б.А. Бородин, Б.В. Кондратьев, В.М. Ломакин и др.; Под ред. Голомедова. – М.: Радио и связь, 1985. – 400 с.
25. Пат. 2254662 Преобразователь постоянного напряжения / Кудинов А.К.; заявл.29.12.03, опубл. 20.06.05, Бюл №17.
26. Позднов М.В. “Магнитная пружина”- элемент перестраиваемых по частоте резонансных колебательных систем // Вестник молодых ученых: серия технические науки, №7 .-2000г., издательство СПбГТУ, С.38-45.
27. Прядилов А.В., Позднов М.В., Певчев В.П. Численное исследование математической модели электромагнитного сейсмоисточника со свободным разгоном якоря // Вектор науки Тольяттинского Государственного Университета №4 (18), 2011.-550 с.
28. Резисторы: (справочник)/ Ю.Н. Андреев, А.И. Антонян и др.; Под редакцией И.И. Четвертакова.-М.; Энергоиздат, 1981.-352с., ил.
29. Северенс, Р. Импульсные преобразователи постоянного напряжения для систем вторичного электропитания / Северенс Р., Блум Г. – М.: Энергоатомиздат, 1988. –294 с: ил.
30. Семёнов Б.Ю. Силовая электроника: от простого к сложному. – 2 изд., испр - М.: СОЛОН-Пресс, 2015. – 416с.: ил.

31. Силовые полупроводниковые приборы. Пер. с англ. Под ред. В.В. Токарева. Первое издание. – Воронеж: «Элист», 1995 г. – 664 с.
32. Смирнов .К.Н. Elcut. Справочник – СПб: Питер, 2003. 386с.
33. Смирнов В.П., ОАО «Енисейгеофизика», г. Минусинск. Электромагнитные источники сейсмических колебаний ряда «Енисей СЭИ, КЭМ» // ж. «Приборы и системы разведочной геофизики», №01(03), 2003г.
34. Справочник разработчика и конструктора РЭА. Элементная база/ Масленников М.Ю., Соболев Е.А., Соколов Г.В. и др.; Под ред. Масленникова М.Ю. М.: Радио и связь,1996.
35. Теория и практика вибросейсмического зондирования земной коры: сб. науч. Тр./АН СССР, сиб. отд-ние, ин-т геологии геофизики [Ред. кол.: И. С. Чичин, А. И. Бочанов и др.] – Новосибирск: ИГиГ 1988, 159с.
36. Теория и практика наземной сейсморазведки/ под ред. М.Б. Шнеерсона.- М.: ОАО “Издательство “Недра ”, 1998.-527с.
37. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника: Справочное руководство. Пер. с нем. – М.: Мир,1982. – 512 с.,ил.
38. Транзисторы малой мощности: Справочник/Под ред. А. В. Голомедова.- М.: Радио и связь,1989.
39. Трансформаторы и преобразователи «Электроагрегат». Каталог. – Санкт Петербург.: Электроагрегат, 2003 г. 38 с.
40. Упруго – ударный режим работы импульсного сейсмоисточника. А.В. Прядилов, С.З. Давлатов, З.Г. Гадоев // Всероссийская студенческая научно-практическая междисциплинарная конференция «Молодежь. Наука. Общество»: Тольятти, ТГУ 2019. (5.12.2019)
41. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники. Т.т. 1-2. - М., Мир, 1998.
42. Шнеерсон М.Б., Майоров В.В. Наземная невзрывная сейсморазведка.- М.: Недра, 1988.-237с.

43. Электрические конденсаторы и конденсаторные установки: Справочник /В.П. Берзан, Б.Ю. Геликман, М.Н. Гураевский и др.: Под ред. Г.С. Кучинского. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 656 с., ил.

44. Яблонский А.А. и Норейко С.С. Курс теории колебаний. Учеб. пособие для студентов вузов. Изд.3-е, М., «Высш.школа», 1975, 248 с.

45. Ямпурин Н. П. Электроника: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / Н. П. Ямпурин, А. В. Баранова, В. И. Обухов. - М. : Академия, 2011.

46. Agilent Technologies [Электронный ресурс]. URL:<http://www.agilent.com>. (дата обращения: 01.05.2021).

47. Electrical resistance and conductance [Электронный ресурс]. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Electrical\\_resistance\\_and\\_conductance](https://en.wikipedia.org/wiki/Electrical_resistance_and_conductance) (дата обращения: 17.05.2021)

48. Electronic Components Datasheets [Электронный ресурс] URL: <http://www.datasheets.ru> (дата обращения: 17.02.2021)

49. International Rectifier. [Электронный ресурс]. URL: [www.irf.com](http://www.irf.com) (дата обращения: 01.05.2017).

50. LM78XX / LM78XXA 3-Terminal 1 A Positive Voltage Regulator [Электронный ресурс]. URL:<https://static.chipdip.ru/lib/164/DOC001164647.pdf> (дата обращения: 17.05.2021)

## Приложение А

### Перечень элементов

Таблица А.1 – Перечень элементов

Зона	Поз. обозначение	Наименование	Кол.	Примечание
1	2	<u>3</u>	4	5
		<u>Конденсаторы</u>		
	C1	К 50-35 1000 мкФ х 35 В	1	
	C2	К 10-17Б 240 нФ Y5V	1	
	C3	К 10-17Б имп. 560 пФ NPO 5%	1	
	C4	К 50-35 33 мкФ х 35 В	1	
	C5	К 50-35 2200 мкФ х 35 В	1	
	C6	К 10-17Б 1.5 мк Y5V	1	
	C7	КМ 5Б Н30 0.022 мкФ	1	
	C8	К 50-35 10 мкФ х 35 В	1	
	C9, C10	К15-5 1500 пФ х 1600 В	2	
	C11	К15-5 2700 пФ х 2000 В	1	
	C12	К 10-17Б 10 нФ Y5V	1	
	Cн	К75-80 1000мкФ 1600В	2	
		<u>Микросхемы</u>		
	DA1	7812	1	
	DA2	КР1211ЕУ1	1	
	DA3	IR4427	1	
	DA4	TL431 ILP	1	
		<u>Светоизлучающие диоды</u>		
	HL1	АЛ307(кр.)	1	
		<u>Предохранители</u>		
	FU1	30А		

Продолжение Приложения А

Продолжение таблицы А.1

1	2	3	4	5
		<u>Реле</u>		
	K1	TR90-24VDC-SC-A	1	
		<u>Дроссели</u>		
	Lнас	дроссель насыщения 1 виток на кольцевом сердечнике K45x28x16 из феррита 1000НМ		
	L1, L2	Балластные дроссели 8 витков на кольцевом сердечнике K45x28x16 из феррита 1000НМ	2	
		<u>Резисторы</u>		
	R1	МЛТ-0,25-1.5 кОм ±10%	1	
	R2	МЛТ-0,25-10 кОм ±10%	1	
	R3	МЛТ-0,25-560 Ом ±10%	1	
	R4	МЛТ-0,25-1.2 кОм ±5%	1	
	R5	МЛТ-0,25-12 кОм ±10%	1	
	R6	МЛТ-0,25-39 Ом ±10%	1	
	R7, R8	МЛТ-0,25-18 Ом ±10%	2	
	R9	МЛТ-1-360 Ом ±10%	1	
	R10-R12	SQP 0,1 Ом 10Вт	3	
	R13	МЛТ-0,25-1.2 кОм ±10%	1	
	R14	SQP 47 Ом 10Вт	1	
	R15	SQP 3.9 к Ом 10Вт	1	
	R16, R17	МЛТ-1-470 кОм ±5%	2	
	R18	ОС СП5-1ВА 5.1 кОм±5%	1	
	R19	МЛТ-0,25-2,7 кОм ±5%	1	
	Rш	Токовый шунт 100 А / 75 мВ	1	

Продолжение Приложения А

Продолжение таблицы А.1

1	2	3	4	5
		<u>Тумблеры и кнопки</u>		
	SB1	Тумблер П2Т-1		«Питание»
	SB2	Кнопка КМ1-1		«Разряд»
		<u>Трансформаторы</u>		
	TV1		1	Ч48 – 2 шт. I,II–2вит. 4.3мм <sup>2</sup> III–2вит. 0.24 мм <sup>2</sup>
		<u>Полупроводниковые модули</u>		
	V	МДТО1-80-15-2А	1	
		<u>Оптроны</u>		
	V1	TLP521-1	1	
		<u>Диоды</u>		
	VD1, VD2, DV4, VD7	КД522Б	4	50V, 100mA
	VD3	1N4007	1	1A, 1000V
	VD5, VD6	SF14	2	1A/30A,
	VD8,VD9	CSD05120A	2	диод Шоттки
		<u>Транзисторы</u>		
	VT1, VT2	IRFP064N	2	
		<u>Обмотки</u>		
	Z		-	Обмотка электромаг нита