

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

**ИНСТИТУТ ЭНЕРГЕТИКИ И ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ**  
(институт)

Кафедра «Промышленная электроника»  
(наименование кафедры)

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

Промышленная электроника  
(направленность (профиль))

**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

на тему Стенд для индукционного нагрева

Студент	<u>А.А. Титов</u> (И.О. Фамилия)	_____	(личная подпись)
Руководитель	<u>В.П. Певчев</u> (И.О. Фамилия)	_____	(личная подпись)
Консультанты	<u>О.Н. Брега</u> (И.О. Фамилия)	_____	(личная подпись)

**Допустить к защите**

Заведующий кафедрой к.т.н., доцент А.А. Шевцов  
(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

\_\_\_\_\_ (личная подпись)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_\_ г.

Тольятти 2017

## АННОТАЦИЯ

Объем 50 с., 31 рис., 2 табл., 24 источников.

Объектом проектирования является стенд для индукционного нагрева.

Цель работы — промоделировать в программной среде схему стенда, получить диаграммы работы, разработать схему управления.

Работа состоит из четырех глав, в которых решены упомянутые задачи.

В первой главе рассмотрено состояние вопроса по индукционному нагреву и его актуальность на сегодняшний день. Так же уделяется внимание применению данного метода и его основных преимуществ и недостатков. Произведен обзор одного из видов вариантов схемы индукционного нагрева.

Во второй главе разработка принципиальной схемы устройства для индукционного нагрева, что включает в себя разработку принципиальной схемы генератора импульсов тока и описание его работы.

В третьей главе происходит моделирование работы разработанного ранее генератора импульсов токов. Для этого были определены задачи моделирования и произведен анализ моделируемой схемы. Установлены упрощающие допущения, для облегчения моделирования, и схема генератора импульсов тока разложена на функциональные узлы. После чего произведен анализ полученных результатов, что позволило выбрать параметры элементов схемы ГИТ.

В четвертой главе описана разработка конструкции устройства системы управления и разработана печатная плата для нее. А также произведен расчет и выбор элементов. С помощью программного обеспечения сконструирована печатная плата.

## **Abstract**

The design object is a stand for induction heating.

The purpose of the work is to simulate the scheme of the stand in the software environment, to obtain the work diagrams, to develop the control scheme.

The paper consists of four chapters, in which the above problems are solved.

In the first chapter, the state of the question on induction heating and its relevance for today are considered. The same attention is paid to the application of this method and its main advantages and disadvantages. A review of one of the types of induction heating circuit options has been made.

In the second chapter, the development of a schematic diagram of the device for induction heating, which includes the development of a circuit diagram of the current pulse generator and a description of its operation.

In the third chapter, a simulation of the work of the previously developed current pulse generator occurs. For this purpose, modeling tasks were determined and the simulated circuit was analyzed. Simplified assumptions have been established to facilitate modeling, and the current pulse generator circuit is decomposed into functional nodes. After that the analysis of the received results is made, which allowed to select the parameters of the elements of the GIT scheme.

The fourth chapter describes the development of the design of the control system device and designed a printed circuit board for it. And also the calculation and selection of elements. A printed circuit board is constructed using the software.

## Список обозначений и сокращений

А	Амперы
А/мкс	Ампер/микро секунду
БУ	Блок управления
В	Вольт
ГИТ	Генератор импульсов тока
Гц	Герц
мкс	Микро секунда
мс	Мили секунда
МОм	Мега Ом
мГ	Мили Генри
МГц	Мега Герц
НФ	Низкочастотный фильтр
ПРН	Преобразователь напряжения
СВ	Сетевой выпрямитель
УЗК	Устройство ограничения зарядного тока

## Содержание

1 Состояние вопроса по индукционному нагреву	6
1.1 Введение	6
1.2 Обзор сведений об индукционном нагреве.	9
2 Разработка принципиальной схемы устройства	19
2.1 Разработка и расчет параметров индуктора	23
3. Моделирование работы устройства	27
3.1 Выбор элементов ГИТ	39
4. Разработка конструкции устройства и печатной платы системы управления	41
4.1 Расчет элементов блока управления	46
4.2 Расчет задающего генератора	50
4.3 Расчет блока питания схемы управления силовым тиристором	54
4.4 Расчет схемы управления коммутирующим тиристором	55
4.5 Разработка печатной платы	56
Заключение	62
Список используемой литературы	63

# 1 Состояние вопроса по индукционному нагреву.

## 1.1 Введение

Установка для индукционного нагрева состоит из следующих элементов:

- 1) Генератор высокой частоты;
- 2) Индуктор, представляющий собой спираль нужной формы поперечного сечения, или проводник определенной формы, в зависимости от типа и геометрических параметров нагреваемого объекта;
- 3) Конденсаторная батарея, которая будет компенсировать малый коэффициент мощности индуктора;

Для того чтобы нагреть деталь или предмет, необходимо поместить его во внутрь индуктора (спирали) или поместить ее рядом. Магнитное переменное поле индуктора вызовет появление тока индукции в детали или предмете, и в результате происходит быстрый и сильный нагрев заготовки.

Индукционный нагрев металлов основан на двух физических законах: законе электромагнитной индукции Фарадея-Максвелла и законе Джоуля-Ленца. Металлические тела (заготовки, детали) помещают в переменное магнитное поле, которое возбуждает в них вихревое электрическое поле. При приближении металлической заготовки к индуктору, изменяющееся магнитное поле вызывает появление ЭДС

$$E = \frac{d\Phi}{dt} \quad (1.1)$$

Где: E- мгновенное значение ЭДС

$\Phi$  - мгновенное значение магнитного потока

ЭДС индукции определяется скоростью изменения магнитного потока. Под действием ЭДС индукции в телах протекают вихревые (замкнутые внутри тел) токи, выделяющие теплоту по закону Джоуля-Ленца. Эта ЭДС создает в металле переменный ток, тепловая энергия, выделяемая данными токами, является причиной нагрева металла. Индукционный нагрев является прямым и бесконтактным. Он позволяет достигать температуры, достаточной для плавления самых тугоплавких металлов и сплавов.

При этом активная удельная мощность, выделяющаяся в нагреваемой заготовке будет иметь следующую зависимость

$$P = 2 * 10^{-4} * I * \omega^2 \overline{\rho * \mu_r * f * F} \quad (1.2)$$

Где: P – мощность, отдаваемая нагреваемым телом и отнесенная к единице энергоспринимающей поверхности заготовки Вт/см<sup>2</sup> ;

I – ток индуктора , А ;

$\omega$  – число витков индуктора ;

$\rho$  – удельное сопротивление изделия для нагрева Ом \* см;

$\mu_r$  – относительная магнитная проницаемость материала изделия;

f - частота тока Гц;

F – функция, которая зависит от геометрических размеров изделия и частоты ток.

Рассмотрим два основных способа индукционного нагрева заготовки:

- 1) Одновременный нагрев;
- 2) Непрерывно – последовательный нагрев;

В одновременном нагреве индуктор охватывает всю поверхность заготовки для нагрева, и при этом нагрев каждой точки детали происходит одновременно. Температура поверхности и ее распределение по глубине зависят от времени и энергии, переданной в деталь за время нагрева.

В непрерывно – последовательном нагреве индуктор имеет более меньшие размеры и передвигается вдоль нагреваемой детали. Для поверхностной закалке из индуктора или специального прибора, расположенного около него, на деталь подается охлаждающая жидкость, чаще всего вода. В этом случае глубина нагрева и температура поверхности определяется скоростью движения индуктора вдоль заготовки, его шириной и мощностью, отдаваемую в нагреваемую деталь.

Индукционный метод обеспечивает нагрев на больших удельных мощностях и, следовательно, высокую скорость нагрева, недостижимую при других методах, кроме контактного. По сравнению с другими методами, при индукционном нагреве передача энергии в нагреваемую деталь производится без участия конвективного

или лучистого теплообмена. Какие – либо контактные устройства тоже отсутствуют. Также имеется ряд технологических преимуществ, которые часто оказываются решающими при выборе способа нагрева:

- а) компактность индукционных нагревателей;
- б) постоянная готовность индукционной установки к работе, так как не требуется практически никаких подготовительных работ;
- в) автоматизация и простота управления нагрева;
- г) хорошая ремонтпригодность оборудования и узлов индукционных нагревателей;
- д) хорошие санитарно – гигиенические условия при работе с индукционными нагревательными установками.



## 1.2 Обзор сведений об индукционном нагреве.

Генераторы импульсов тока (ГИТ) – это класс устройств преобразовательной техники, служащих для получения в нагрузке импульсов тока заданных параметров. Чаще всего они представляют собой устройства, содержащие накопители энергии и переключающие цепи, служащие для зарядки накопителя энергии от источника электрической энергии и разрядки накопителя на нагрузку. Генераторы импульсов тока в общем виде состоят из:

- 1) Источник электроэнергии;
- 2) Зарядное устройство;
- 3) Накопитель энергии;
- 4) Разрядное устройство;
- 5) Блок управления;
- 6) Другие вспомогательные устройства (например защиты и т.д.);
- 7) Нагрузка;

В качестве источника электроэнергии можно использовать различные устройства: аккумуляторы, генераторы, сети переменного тока и т.д.

Зарядное устройство зависит от типа источника электроэнергии и чаще всего представляет собой выпрямитель с индуктивным элементом на выходе, который питается от сети переменного тока.

Накопитель энергии может быть разным, в зависимости от того, сколько нужно запаса энергии, чаще всего в роли накопителя используют аккумуляторы, конденсаторы, реакторы.

Чтобы использовать запасенную энергию в накопителе путем создания импульсов тока в нагрузку, применяют разрядные цепи. Они построены с использованием, так называемых полупроводниковых ключей, управляемых и не управляемых. К ним относятся всевозможные коммутаторы, тиратроны, электронные реле и лампы и также целый ряд полупроводниковых приборов (тиристоры, диоды и т.д.). Полупроводниковые приборы нашли большое применение в качестве ключевых приборов в ГИТ, а именно тиристоры и диоды.

Управления ключевыми приборами как и в ГИТ, так и в других схемах, должно подчиняться определенному алгоритму. Соблюдение этого алгоритма обеспечивает блок управления (система управления). В большинстве случаев, блок управления БУ выполняет ряд других вспомогательных функций необходимых для нормальной работы ГИТ. Например, защита от аномальных или опасных режимов, стабилизации напряжения, защита от короткого замыкания КЗ, включение от отключения, автоматическое повторное включение и т.д.

Как и в любом другом генераторе, нагрузка оказывает существенное влияние на электрические и переходные процессы в ГИТ. В тех случаях, когда это влияние слишком большое, нагрузку относят к элементам генератора.

Одна из схем генератора импульсов тока изображена на рисунке 1.1[6]

Данная схема работает следующим образом.

Питается установка от сети. Переменный ток проходит через неуправляемый выпрямительный мост состоящий из 4х диодов (VD1-VD4) и токоограничивающего реактора (L1). Далее происходит заряд накопителей емкости, в данной схеме используются конденсаторы (C1 и C2).

В момент времени  $t_1$  блок управления посылает отпирающие импульсы на силовые тиристоры VS1 и VS2. При включении тиристоров коммутирующая конденсаторная батарея, конденсатор C3, быстро заряжается по цепи C1 C2 – VS1 – VD6 – C3 – VS2 – C1 C2 и принимает значение близкое значению напряжения источника питания. Накопительные емкости, конденсаторы C1 и C2 разряжаются на индуктивную нагрузку L2, где будет нарастать ток. В результате разряда напряжение U1 на накопители емкости, C1 и C2, уменьшается по косинусоидальному закону.

В момент времени  $t_2$  импульсом со схемы управления открывается тиристор VS3. В результате чего происходит закрытие силовых тиристоров VS1 и VS2 так как к ним прикладывает обратное напряжение. Ток нагрузки перехватывается в цепь коммутирующей емкости C3, которая начинает быстро разряжаться.

В момент времени  $t_3$  конденсатор C3 разрядился до значения напряжения на накопительной батарее C1 и C2. С момента времени  $t_2$  и  $t_3$  на силовые тиристоры

было приложено обратное напряжение, вследствие чего они восстановили свои запирающие свойства.

Конденсатор  $C3$  разряжается до нуля и перезаряжается до напряжения равному сумме напряжения на конденсаторе  $C2$  и пороговому напряжению срабатывания динистора  $VD5$ , включенного в цепь с тиристором  $VS4$  для его управления.

После закрытия силовых тиристоров  $VS1$  и  $VS2$  накопительная емкость подзаряжается от сети

В момент времени  $t4$  тиристор  $VS3$  закрывается, так как обесточивается. При включении динистора  $VD5$  тиристор  $VS4$  открывается, приходя в проводящее состояние. Энергия магнитного поля обмотки возбуждения, начиная с этого времени регенируется в конденсаторе  $C2$ . Диод  $VD7$  закрывается и конденсатор  $C1$  заряжается от сети .

В момент времени  $t5$  ток нагрузки снижается до 0 и тиристор  $VS4$  закрывается. Открывается диод  $VD6$  и конденсатор  $C3$  начинает перезаряжаться до первоначального значения энергией, которая осталась в индуктивной нагрузке.

Диод  $VD7$  остается закрытым до тех пор, пока напряжение на конденсаторе  $C1$  не достигнет значения напряжения конденсатора  $C2$ . Тогда  $VD7$  открывается и накопитель снова дозаряжается от сети.

При поступлении последующих управляющих импульсов на силовые тиристоры  $VS1$  и  $VS2$  процессы в схеме повторяются.

Генераторы импульсов тока применяются для питания разнообразных устройств, которые применяются в различных отраслях промышленности. В том числе и для питания высокочастотных индукторов, служащих для индуктивного нагрева металлических изделий.

Временные диаграммы представлены на рисунках 1.2 и 1.3.

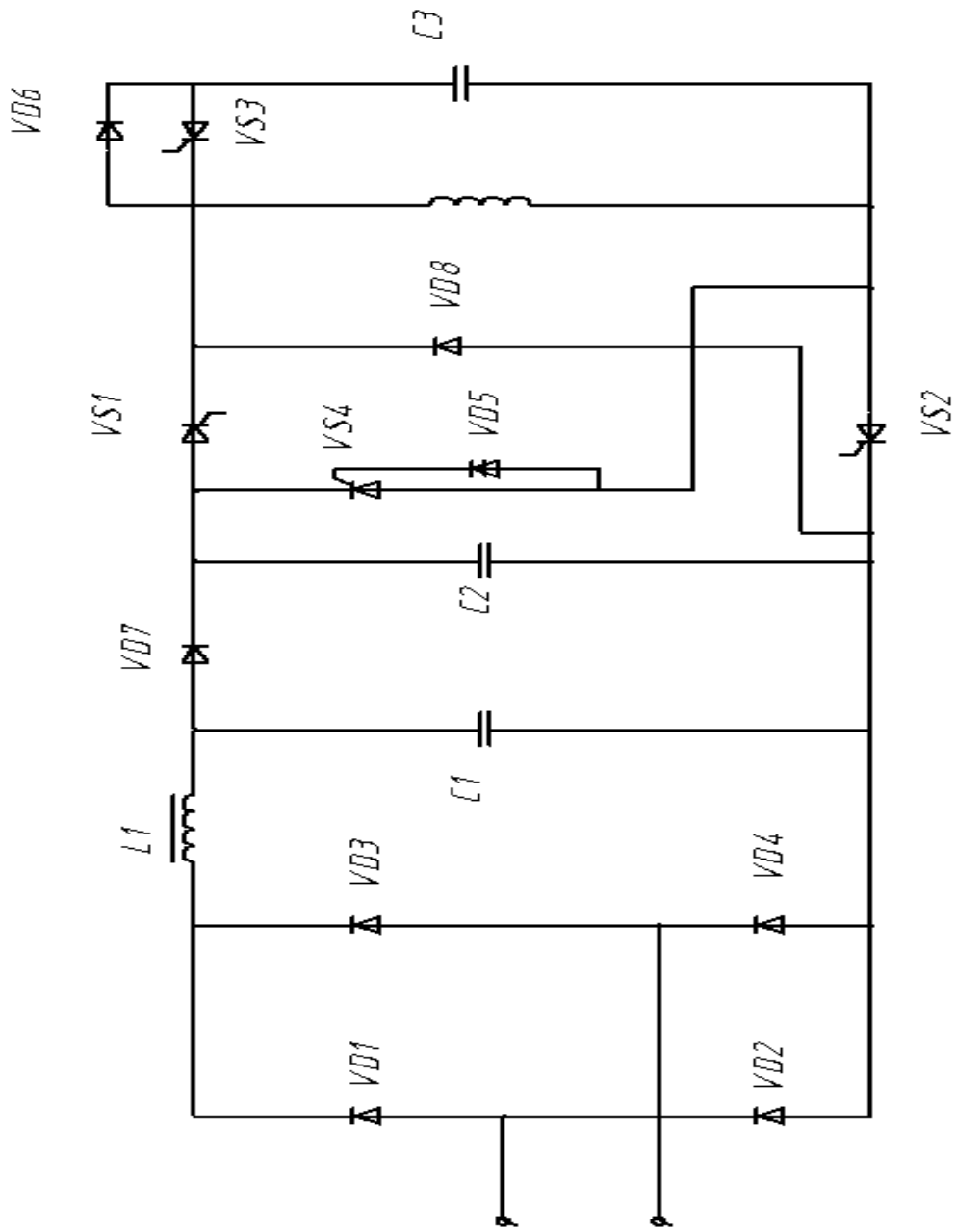


Рисунок 1.1.

Принципиальная схема генератора импульсов

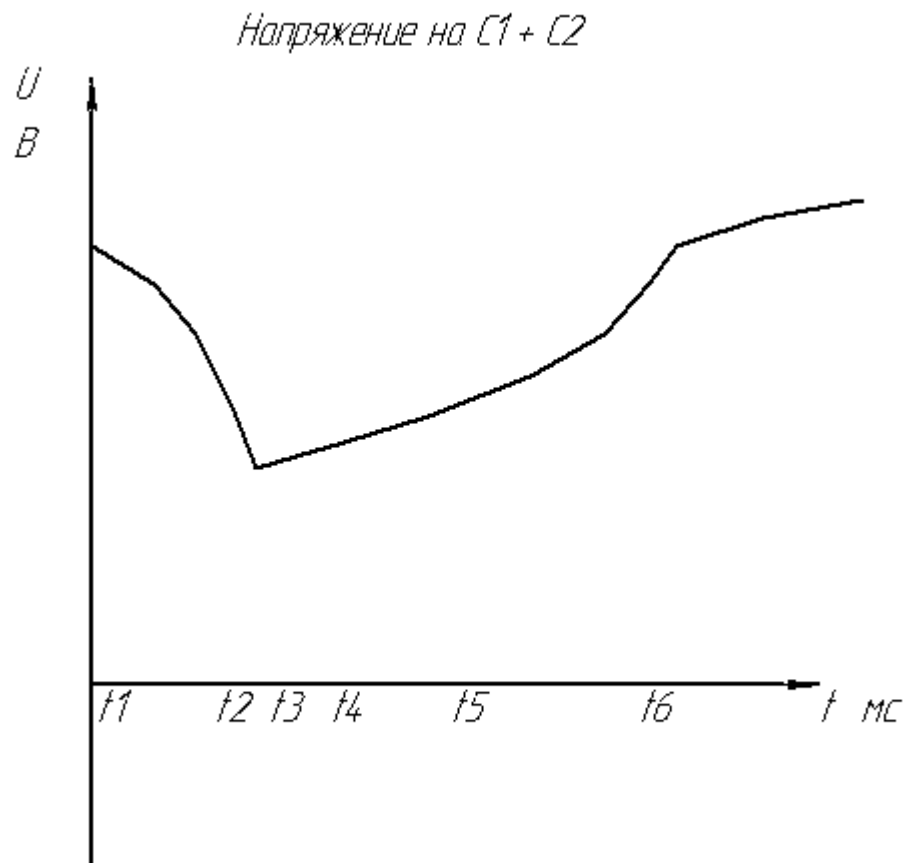


Рисунок 1.2. График напряжения на конденсаторах C1 и C2.

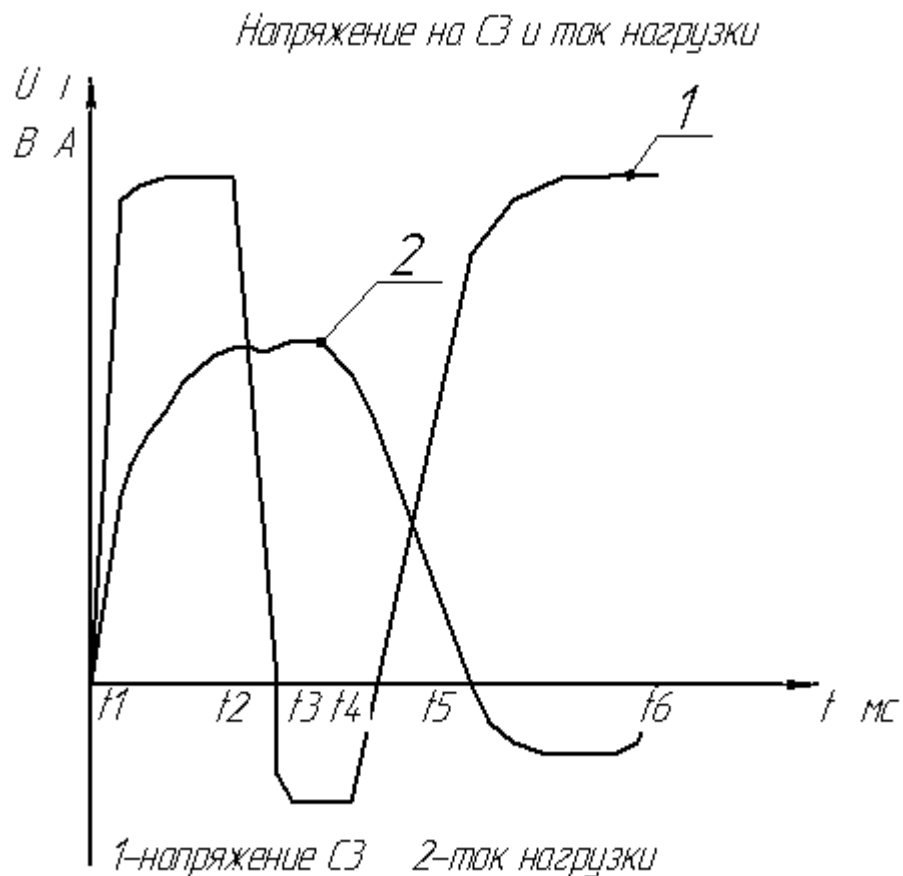
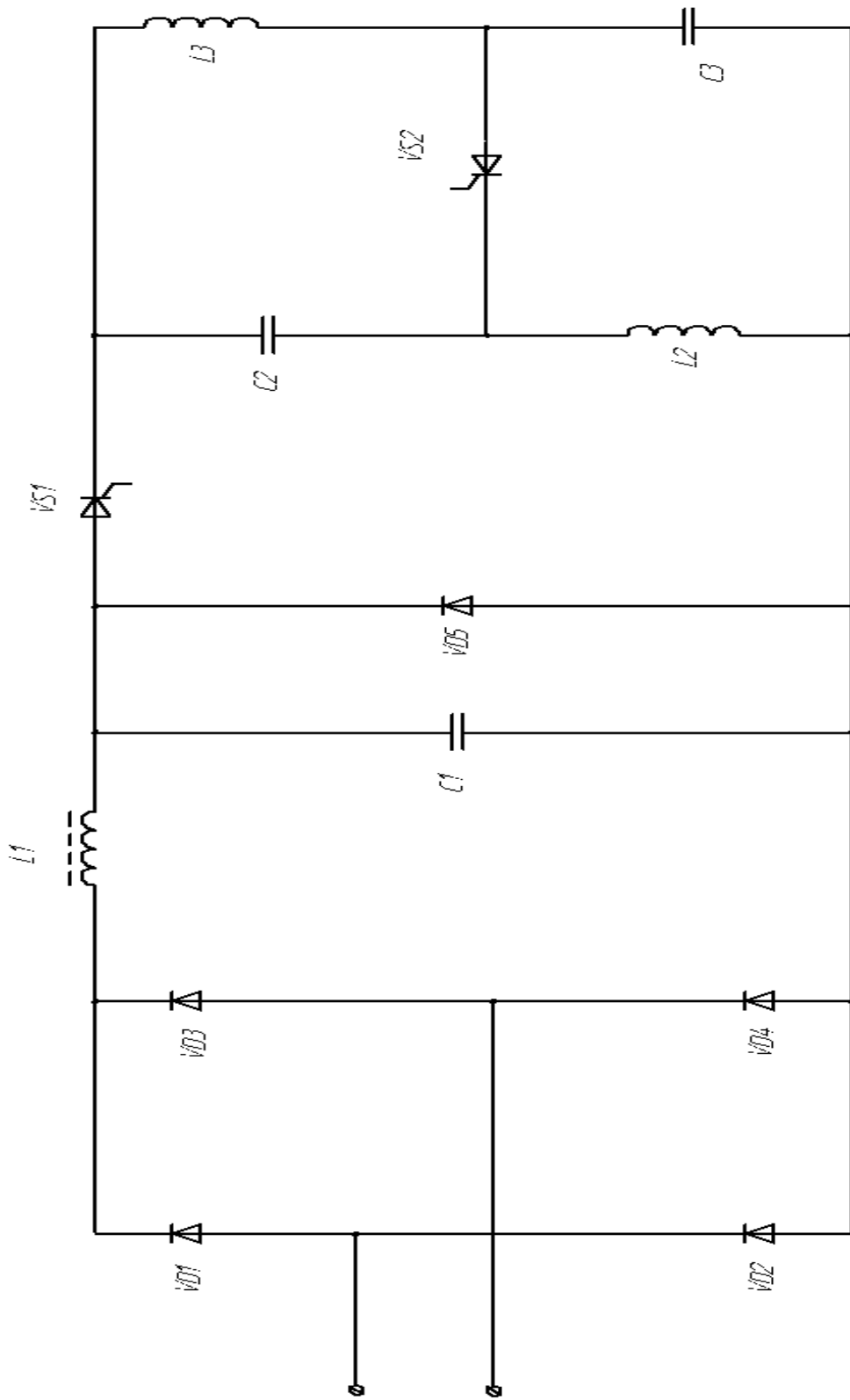


Рисунок 1.3. График напряжения и тока.

Так как, данная схема содержит большое количество полупроводниковых приборов, что делает ее дороже, сложнее в производстве и моделировании, вероятность поломки так же выше, так как при выходе из строя одного из приборов, схема перестанет работать, либо будет работать неправильно.

Для устранения данных недостатков, для моделирования будет использована схема рисунок 1.4 с меньшим количеством полупроводниковых приборов, что удешевит и упростит схему.



В

Рисунок 1.4. Принципиальная схема генератора импульсов тока

исходном  
состояние  
накопительные  
конденсаторы C2 и  
C3 и  
коммутирующий  
конденсатор C1  
предварительно  
заряжены до

максимального напряжения  $U_m$  через зарядный дроссель и неуправляемый выпрямитель, состоящий из четырех диодов VD1 – VD4 от сети переменного тока. Все тиристоры закрыты.

На рисунках 1.6 – 1.8 представлены теоретические диаграммы работы.

В момент времени  $t_1$  на управляющий электрод VS2 подается отпирающий импульс с блока управления и тиристор VS2 открывается. Накопительные конденсаторы C2 и C3, предварительно заряженные до максимального напряжения  $U_m$  разряжаются на обмотки индуктора. Соответственно C2 на L3, а C3 на L2 рисунок 1.5.

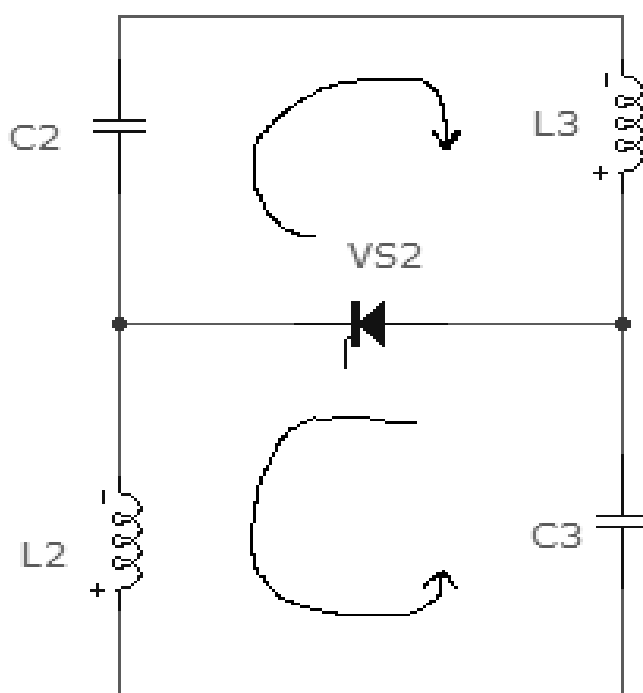


Рисунок 1.5. Схема разрядки накопительных конденсаторов C2 и C3

В индукторе начинает возрастать ток, который изменяется по закону:

$$j = \frac{U_{mc}}{\omega L} * e^{-bt} * \sin \omega t \quad (2.1)$$

Где  $U_{mc}$  - амплитуда напряжения на емкостях C2 и C3;

$\omega$  - частота колебательного контура;

$b$  – коэффициент затухания контура;

$L$  – индуктивность индуктора.



В момент времени  $t_2$ , определяемый временем восстановления запирающих свойств тиристора VS2, за интервал времени между  $t_2$  и  $t_3$  с блока управления подается импульс на управляющий электрод другого тиристора VS1, что приводит к его открытию. А тиристор VS2 закрывается, так как к нему прикладывается обратное напряжение с конденсаторов C2 и C3  $U_{c1} = (U_{c2} + U_{c3})$ . Ток с катушки L2 начнет протекать по цепи L2 – C1 – VS1 – C2 – L2. Ток с катушки L3 по цепи L3 – C3 – C1 – VS1 – L3. Накопительные конденсаторы C2 и C3 заряжаются токами катушке индуктора L2 и L3 соответственно. Коммутирующий конденсатор C1 будет разряжаться суммарными токами катушке L2 и L3  $(j_{L1} + j_{L2})$ . Напряжение на конденсаторе C1 изменяется почти по линейному закону.

К моменту времени  $t_4$  коммутирующий конденсатор C1 разряжается практически до 0 и открывается диод VD5. Токи катушек индуктора L2 и L3 перехватываются в цепи с диодом VD5, конденсаторы C2 и C3 дозаряжаются токами катушек (C2 от L3, а C3 от L2) за счет энергии запасенной в них магнитным полем.

В момент времени  $t_5$  значение тока индуктора достигает нуля, вследствие чего ток между катодом и анодом тиристора VS1 равен нулю и тиристор закрывается, диод VD5 так же обесточивается и закрывается. К тиристору прикладывается обратное напряжение с накопительных конденсаторов C2 и C3. Коммутирующий конденсатор заряжается от сети через неуправляемый диодный выпрямитель и зарядный дроссель L1. Далее схема возвращается в исходное состояние. Последующие поступления импульсов на управляющие электроды тиристоров VS1 и VS2 с блока управления повторяют описанный выше процесс.

Таким образом, в обмотках индуктора L2 и L3 формируются импульсы тока, величины которых напрямую зависят от частоты отпирающих импульсов и параметров схемы ГИТ.

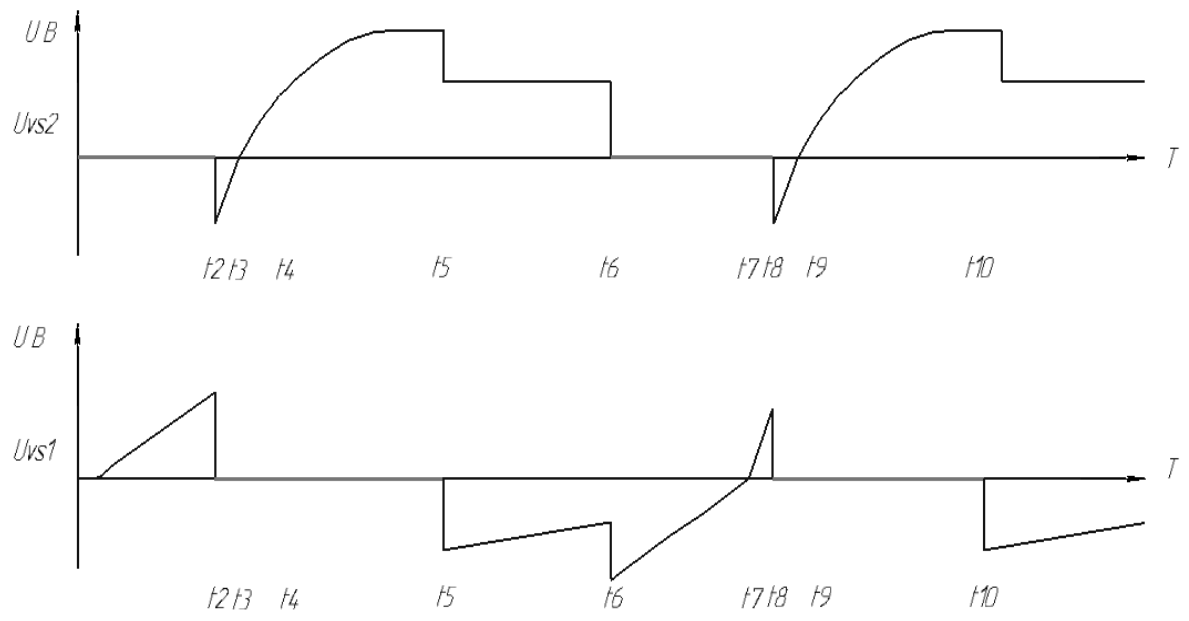


Рисунок 1.6. Напряжения на тиристорах.

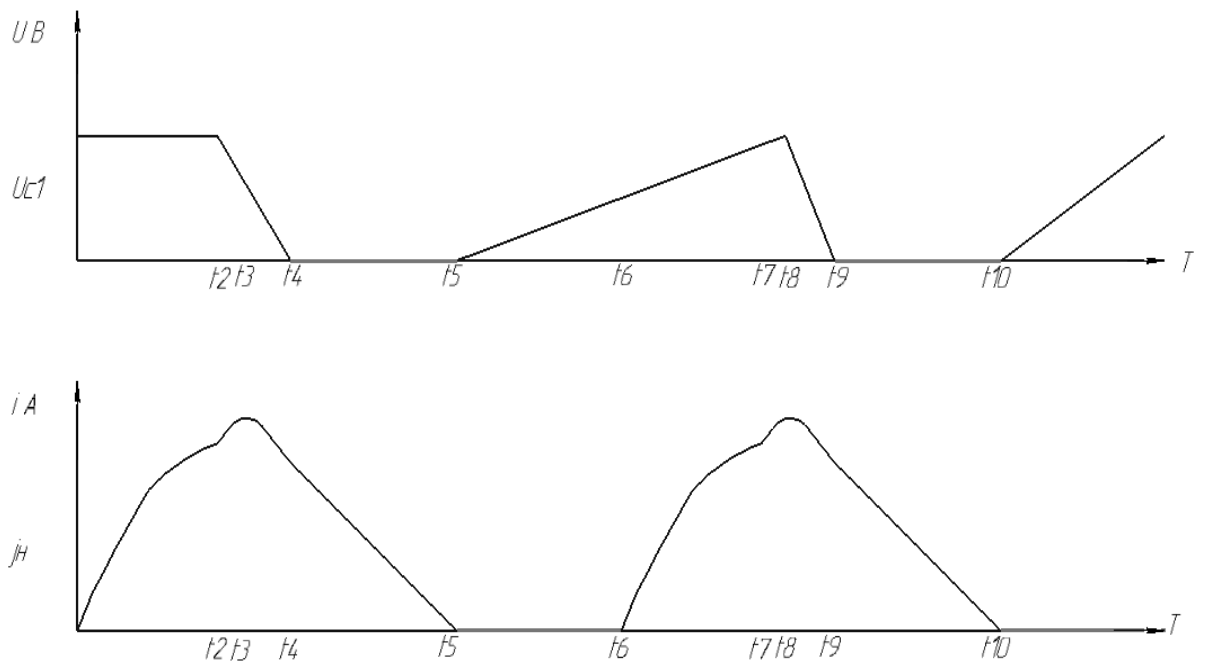


Рисунок 1.7. Ток нагрузки и напряжение на C1.

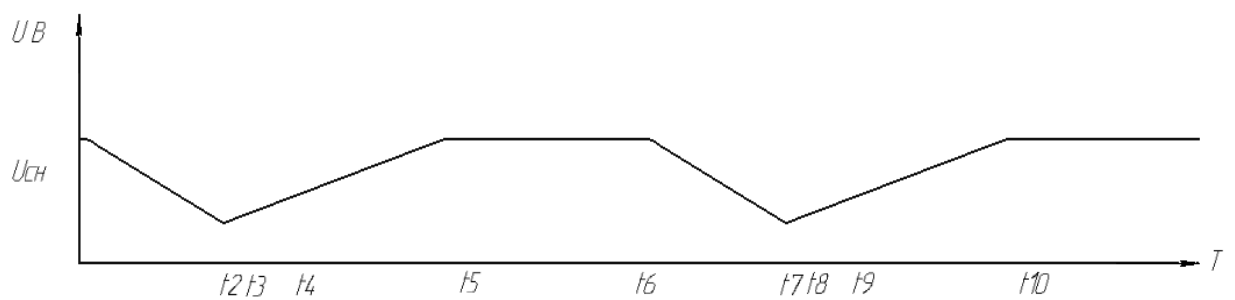


Рисунок 1.8. Напряжение на C2.

## 2 Разработка принципиальной схемы устройства.

Генератор импульсов тока состоит из:

- 1) Неуправляемый выпрямитель;
- 2) Зарядный дроссель L1;
- 3) Коммутирующий конденсатор C1;
- 4) Диод VD5;
- 5) Силовой и коммутирующий тиристоры VS2 и VS1;
- 6) Две катушки индуктора в паре с накопительными конденсаторами C2 L3

и C3 L2.

Выпрямительные диоды применяются в цепях управления, коммутации, в источниках питания и т.д. для преобразования формы напряжения, или выпрямление переменного напряжения в постоянное. Исходя из значений максимального выпрямляемого тока диоды разделяются на:

- 1) маломощные  $I_{прmax} \leq 0,3$  Ампера;
- 2) средней мощности  $0,3 \text{ Ампера} < I_{прmax} \leq 10$  Ампер;
- 3) большой мощности  $I_{прmax} > 10$  Ампер;

Выпрямитель, применяемый в схеме ГИТ, представлен на рисунке 2.1. Он состоит из 4х выпрямительных диодов, включенных по мостовой схеме, и предназначен для выпрямления напряжения от источника питания рисунок 2.2.

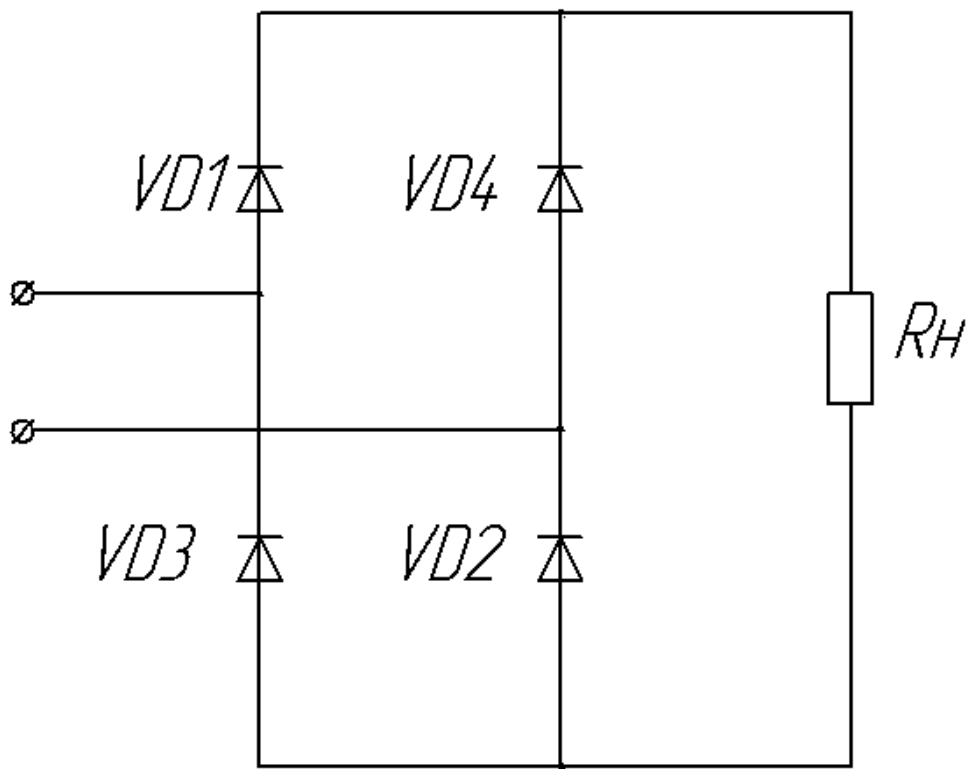


Рисунок 2.1 Схема принципиальная выпрямителя

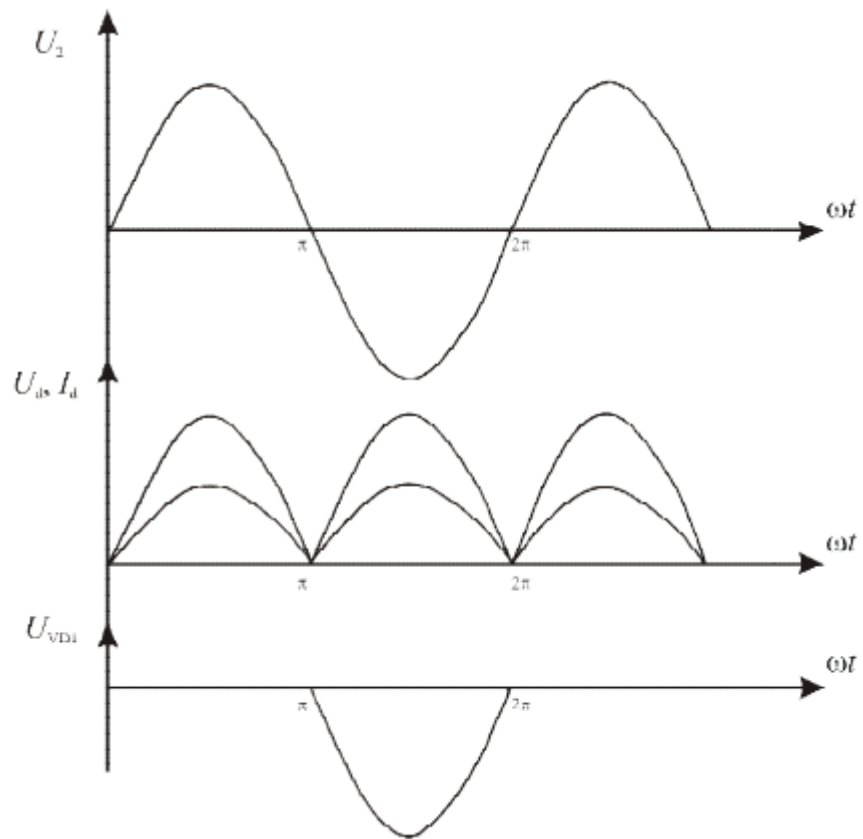


Рисунок 2.2 временные диаграммы выпрямителя.

Зарядный дроссель L1 служит для зарядки коммутирующего конденсатора C1, а уже коммутирующий конденсатор при разряде, будет открывать диод VD5, чтобы перезарядились емкостные конденсаторы C2 и C3. Рисунок 2.3

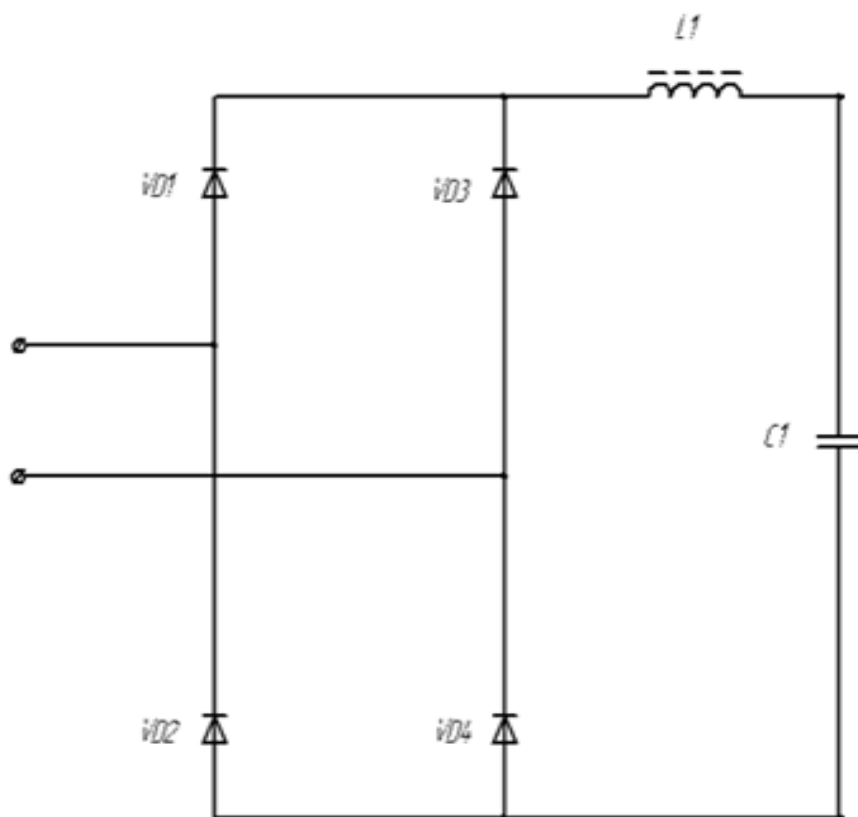


Рисунок 2.3 Схема зарядки коммутирующего конденсатора.

Силовой и коммутирующий тиристоры, по сути являются силовыми электронными не полностью управляемыми ключами. Подавая открывающие импульсы на их управляющие электроды, добиваемся их открытия. Тиристоры проводят ток только в одном направлении. А в закрытом состоянии выдерживают как прямое, так и обратное напряжение. Для открытия тиристора необходимо приложить положительное напряжение между анодом и катодом и подать управляющий импульс. Для закрытия необходимо снизить ток между катодом и анодом до нуля и выдержать обратное напряжение между анодом и катодом на время не меньшее времени восстановления запирающих свойств тиристора. Время восстановления запирающих свойств необходимо смотреть в паспорте прибора.

Индуктор нагревательный представляет собой один или несколько витков проводника, в котором с помощью мощного генератора переменного тока создаются

электрические колебания высокой частоты (от нескольких кГц до 5 МГц). Внутри витков помещают заготовку из электропроводящего материала.

При включении генератора вокруг индуктора возникает интенсивное электромагнитное излучение, которое поглощается заготовкой и разогревает её.

Система индуктор-заготовка представляет собой бессердечниковый трансформатор, в котором индуктор является первичной обмоткой. Заготовка является вторичной обмоткой, замкнутой накоротко. Магнитный поток между обмотками замыкается по воздуху (либо по вакууму, по защитному газу, по жидкости и т. д.)

Трубчатые заготовки могут надеваться на спираль индуктора снаружи, плоские — размещаться у торца.

Также индуктор может выполняться в виде «змейки» для нагрева плоских поверхностей, трехлистного клевера для нагрева уголков, восьмерки для нагрева зубьев зубчатых колес, иметь другую причудливую форму.

Индукторы делятся на два класса:

1) Низкочастотные (большое число витков и большой диаметр) — предназначены для разогрева как правило крупных заготовок либо плавления металла в индукционных печах. Имеют большую индуктивность, на них не подают напряжение с частотой выше нескольких десятков кГц.

2) Высокочастотные (один виток небольшого диаметра) — в основном предназначены для разогрева мелких деталей. Имеют небольшую индуктивность, запитываются напряжением от сотен кГц до 5 МГц.

Индукторы маломощных установок или установок, работающих в кратковременном режиме (секунды) не успевают сильно нагреваться. Их достаточно изготовить из достаточно массивного медного провода возможно обычного изолированного.

## 2.1 Разработка и расчет параметров индуктора

Индукционный нагрев стальной заготовки.

При частоте тока  $f$  около 2кГц, относительной магнитной проницаемости

$\mu r_{Fe} = 500$   $P_{Fe} = 80,6$  Вт/см<sup>2</sup>, удельное сопротивление стали

$$\rho_{Fe} = 2 * 10^{-5} \text{ Ом} * \text{ см}$$

Данные взяты из [2]

Индукционный нагрев медной заготовки, с удельным сопротивлением  $\rho_{Cu} =$

$0,175 * 10^{-5}$  Ом \* см, относительной магнитной проницаемости  $\mu r_{Fe} = 1$   $P_{Cu} =$

6.4 Вт/см<sup>2</sup>

Число витков индуктора определяется следующей формулой:

$$\omega = \frac{P_{Fe}}{2 * 10^{-4} * I_{cp} * \frac{\rho_{Fe} * \mu r_{Fe} * f * F}{\rho_{Fe} * \mu r_{Fe} * f * F}} = 120 \text{ витков (2.1)}$$

Где  $I_{cp} = 40$ А, [15]

$F$  – функция, зависящая от геометрических параметров и размеров изделия и частоты тока  $F = 2,45$

$$\text{Длина индуктора } l = l_3 + \frac{0,85}{1,5} * d_1 = 140 \text{ мм}$$

Где  $l_3$  – длина заготовки

$d_1$  – внутренний диаметр обмотки индуктора = 35 мм

Площадь сечения проводника индуктора:

$$S_{пр} = \frac{I_{cp}}{\delta} = 8 \text{ см}^2 \text{ (2.2)}$$

Где  $\delta$  плотность тока в проводнике индуктора = 5А/см<sup>2</sup>

Номинальные размеры проводов без изоляции:  $a^* = 2,63$  мм и  $b^* = 3,8$  мм.

С изоляцией  $a = 3$ мм,  $b = 4,17$  мм.

Число витков одной обмотки в одном слое индуктора

$$\omega_{сл} = \frac{l-2h}{2a} * R_{укл} = 20 \text{ витков (2.3)}$$

Где  $h$  – толщина основания катушки индуктора = 2мм

$R_{укл}$  – коэффициент укладки = 0,85

Толщина обмотки индуктора:

$$H = n * b * R_{\text{укл}} = 29 \text{ мм} \quad (2.4)$$

Где  $n$  – это число слоев обмотки  $\frac{\omega}{\omega_{\text{сл}}} = 6 \quad (2.5)$

Наружный диаметр индуктора:

$$D = d_1 + 2H = 93 \text{ мм} \quad (2.6)$$

Средняя длина витка обмотки:

$$l_{\text{ср}} = \pi * d_{\text{ср}} = 201 \text{ мм} \quad (2.7)$$

Где  $d_{\text{ср}}$  это средний диаметр обмотки индуктора  $d_{\text{ср}} = 64 \text{ мм}$

Длина намоточного провода:

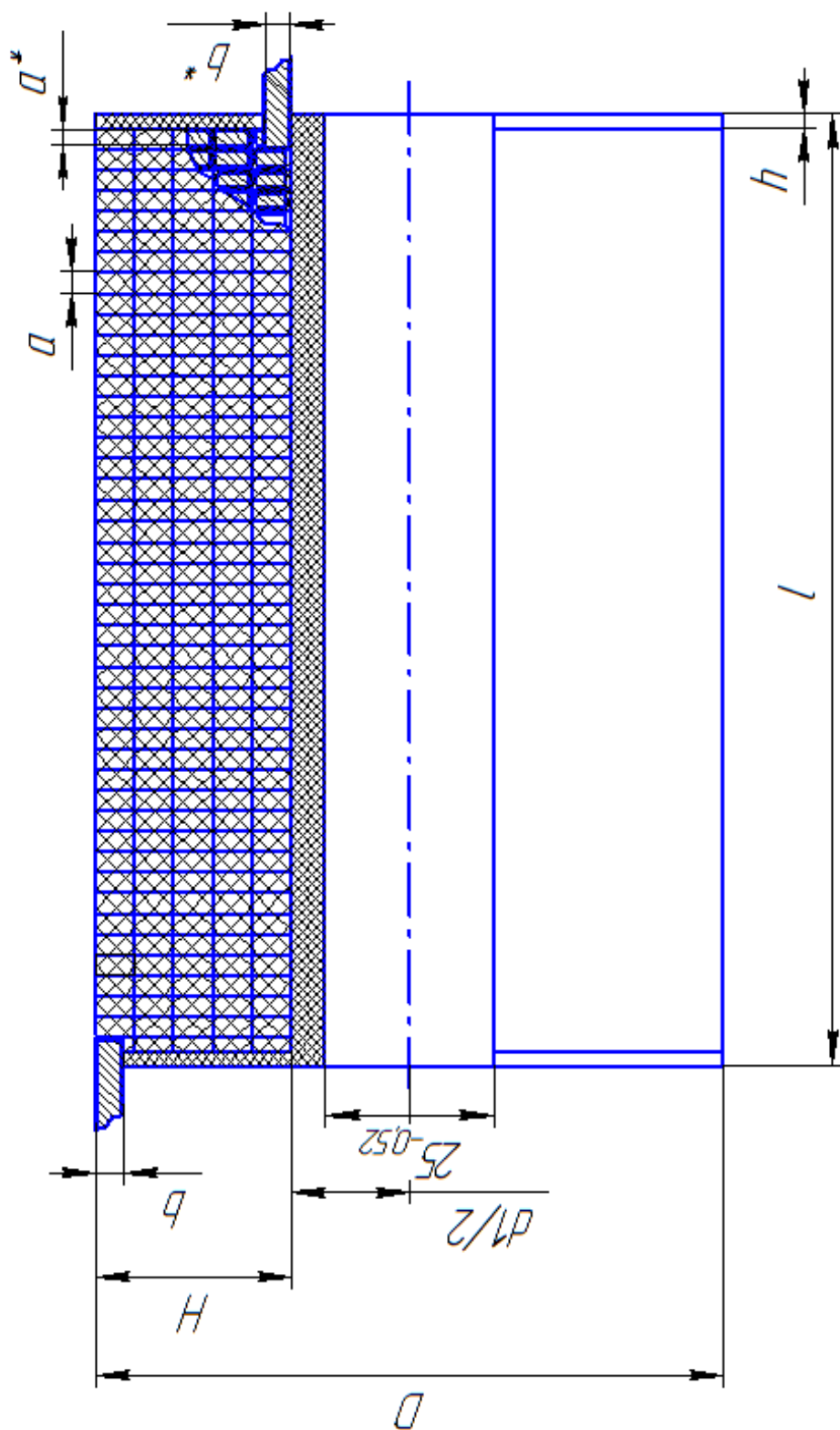
$$l_1 = l_{\text{ср}} * \omega = 24,12 \text{ м} \quad (2.8)$$

На рисунке 2.4 изображен индуктор лабораторной установки для индукционного нагрева. Все данные приведены в таблице 2.1

Таблица 2.1 данные индуктора.

	Размер (мм)	обозначение
a	3	Провод в изоляции
b	4,17	Провод в изоляции
a*	2,63	Провод без изоляции
b*	3,8	Провод без изоляции
H	29	Толщина обмотки индуктора
h	2	Толщина основания катушки индуктора
l	140	Длина индуктора
D	93	Наружный диаметр индуктора
d <sub>1</sub>	35	Внутренний диаметр обмотки индуктора





Наматывание катушки происходит двумя параллельными проводами, которые находятся на общем каркасе. Провода изолированы друг от друга по всей длине индуктора. Это делается для того, чтобы обмотки были связаны между собой одним и тем же магнитным потоком. На индукторе есть

Рисунок 2.4. Индуктор лабораторной установки

специальные отверстия, входа, для проводов.

### **3. Моделирование работы устройства**

Программа MicroCap на данный момент является свободно распространяемой демоверсией профессиональной программы машинного моделирования электронных схем . Несмотря на то, что MicroCap является

демоверсией, он обладает практически всеми качественными возможностями полнофункциональной версии. Недостатки демоверсии имеют количественный характер. Так максимальное количество элементов в схеме для анализа в MicroCap не более 50. В платной версии больше. Также расчеты ряда схем происходит незначительно медленнее, чем в полнофункциональной версии. Библиотеки MicroCap ограничены, что является единственным значительным минусом, нет встроенной программы подготовки собственных моделей и некоторых других дополнительных функций.

В MicroCap анализ схем можно проводить 5ю разными способами:

- 1) Анализ переходных процессов ( Transient)
- 2) Частотный анализ (AC)
- 3) Анализ по постоянному току ( DC)
- 4) Динамический анализ по постоянному току ( Dynamic DC )
- 5) Динамический частотный анализ ( Dynamic AC )

Библиотеки основных элементов:

- 1) Analog Primitives (резисторы, конденсаторы, индуктивности диоды и т.д.)
- 2) Analog Library ( транзисторы)
- 3) Digital Primitives
- 4) Digital Library
- 5) Animation
- 6) Import

Для получения графиков и подбора численных значений компонентов ГИТ используется анализ переходных процессов. Остальные анализы частотный и по постоянному току, в данной работе применяться не будет, в этом нет необходимости.

Для того, чтобы упростить задачу моделирования, сократим схему. То есть, заменим источник питания на батарею. В этом случае отпадает и выпрямитель, состоящий из 4х диодов (рисунок 3.1).

На рисунке 3.1 представлена схема для анализа. Схему необходимо заземлить. Вместо источника питания и выпрямителя используется батарея V1 и

резистор R1. Остальные элементы такие как коммутирующий конденсатор C1, диод VD5, силовой и коммутирующий тиристоры VS1 и VS2, накопительные конденсаторы C2 и C3 и катушки индуктора L3 и L2, зарядный дроссель L1 полностью соответствуют элементам установки.

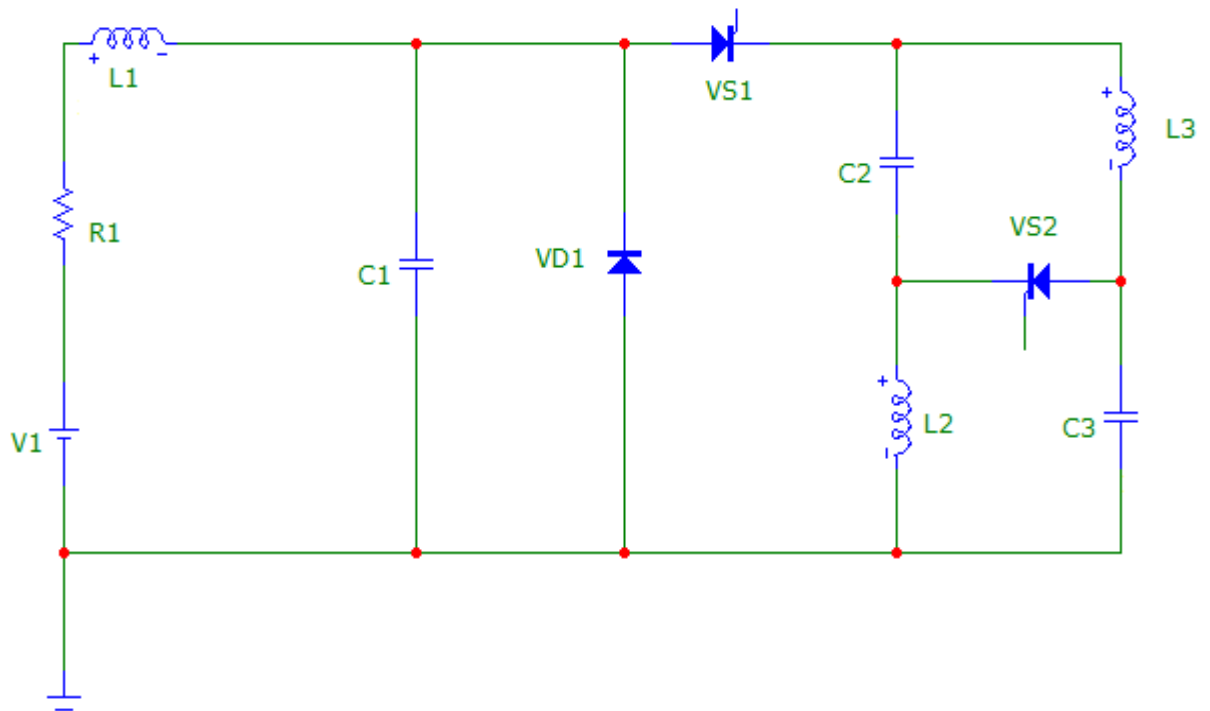


Рисунок 3.1. Схема ГИТ для моделирования в MicroCAP.

Подавать импульсы на силовые тиристоры VS1 и VS2 будем с помощью источников тока ( current source). Для это подключим их к управляющим электродам силовых тиристоров ( рисунок 3.2 ).

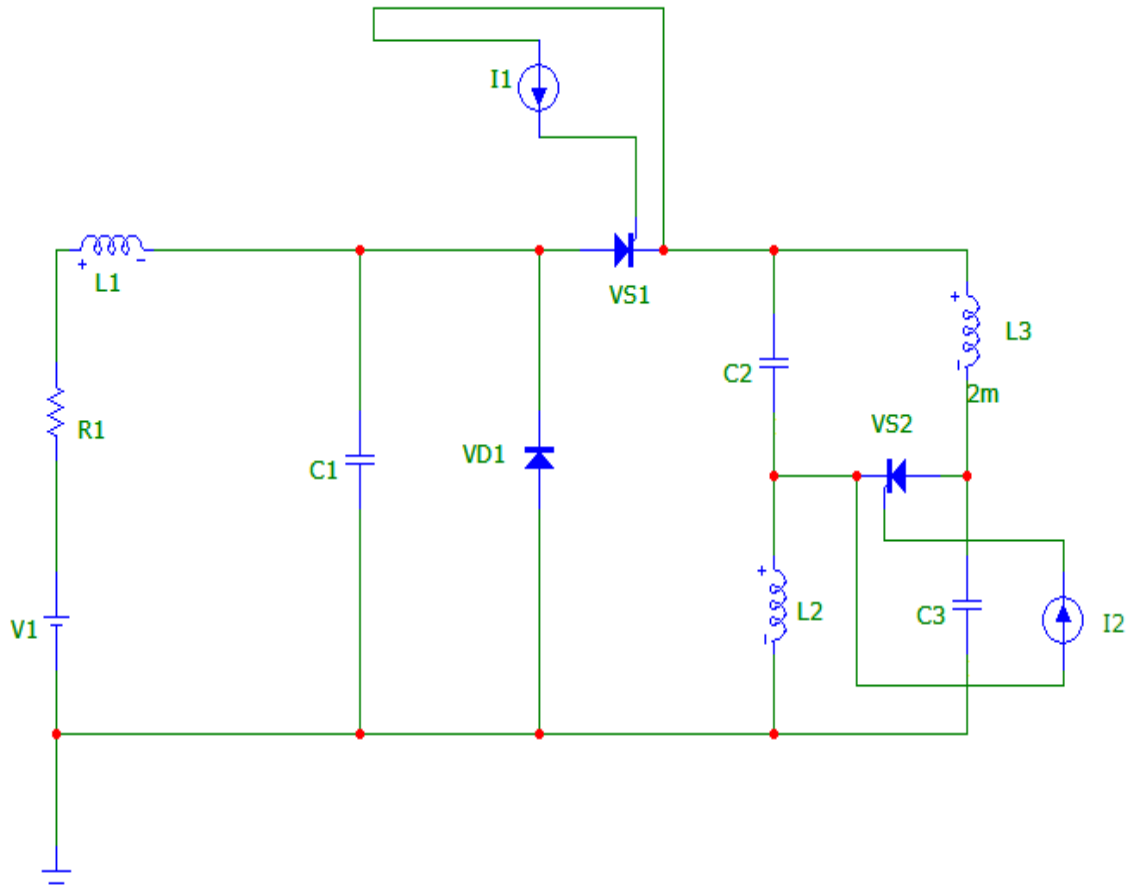


Рисунок 3.2. Схема ГИТ с источниками тока.

Источники тока I1 и I2 будут посылать импульсы тока, чтобы открывать тиристоры VS1 и VS2. Время и длительность импульсов задается вручную, через параметры источников.

В MicroCAP приставки для образования кратных и дольных единиц вводятся следующим образом:

Таблица 3.1 приставки СИ для MicroCAP.

Фемто	F	$10^{-15}$
Пико	P	$10^{-12}$
Нано	N	$10^{-9}$
Микро	U	$10^{-6}$
Милли	M	$10^{-3}$

Кило	K	$10^3$
Мега	MEG	$10^6$
Гига	G	$10^9$

Для того, чтобы программа могла начать моделирование необходимо проставить номера узлов. MicroCAP автоматически проставляет номера узлов, нужно только выключить эту функцию. Теперь на схеме видно номера узлов и численные значения элементов. Хотя узлы и ставятся автоматически, их также можно редактировать для удобства.

Установим добавочные резисторы во входную цепь последовательно с дросселем, и в цепь C2 – L3 – VS2 для получения более достоверных данных.

Экспериментальным путем подбираем значения элементов так, чтобы получить объективные диаграммы.

Значения элементов:

$$V_1 = 220 \text{ Вольт}$$

$$R_1 = 1 \text{ Ом}$$

$$R_2 = 1 \text{ микро Ом}$$

$$R_3 = 1 \text{ микро Ом}$$

$$C_1 = 30 \text{ Микро Фарад}$$

$$C_2 = 50 \text{ Микро Фарад}$$

$$C_3 = 50 \text{ Микро Фарад}$$

$$L_1 = 3.6 \text{ Милли Генри}$$

$$L_2 = 4 \text{ Милли Генри}$$

$$L_3 = 4 \text{ Милли Генри}$$

Значения источников токов  $I_1$  и  $I_2$ :

Длительность фронта: 10 нано секунд;

Длительность среза: 10 нано секунд;

Длительность вершина: 100 нано секунд.

У  $I_1$ :

Время до начало фронта: 1 мили секунда;

Период: 1 мили секунда;

Импульсное значение тока: 5 Ампер.

У  $I_2$ :

Время до начало фронта: 1.5 мили секунд;

Период: 1 мили секунда.

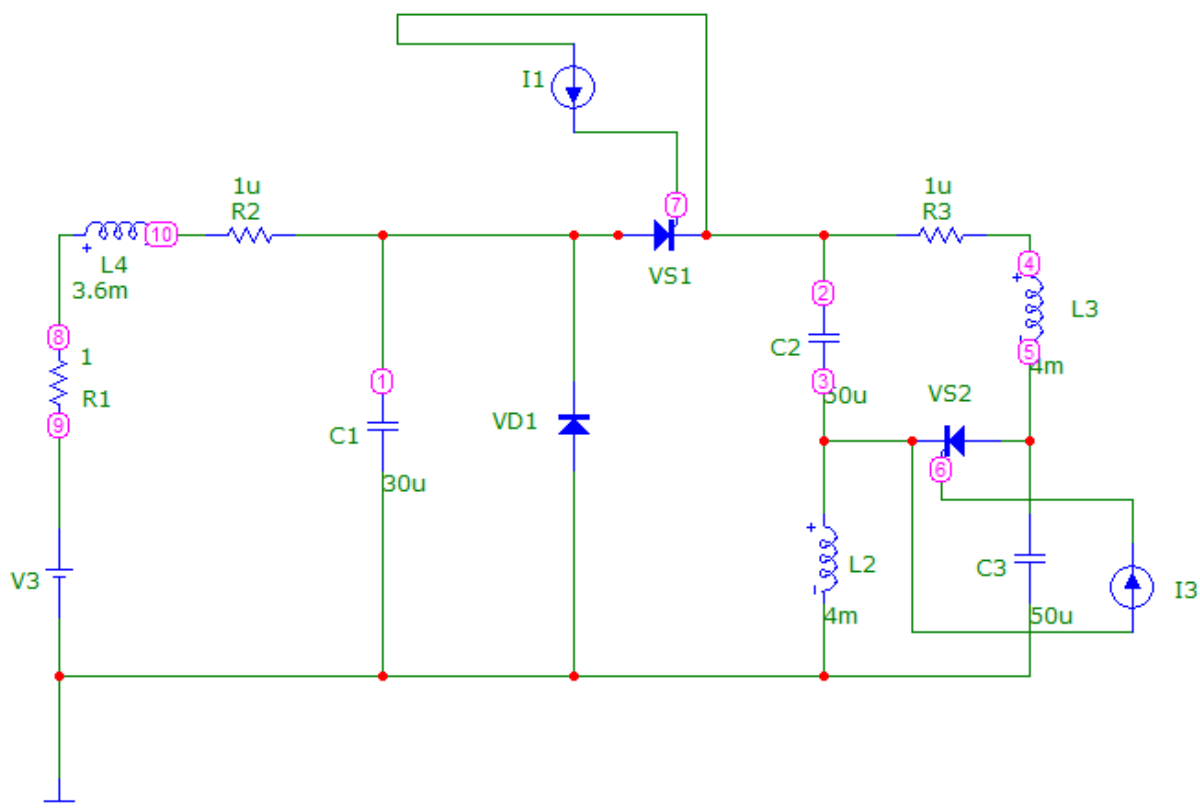


Рисунок 3.3. Схема ГИТ с добавочными резисторами R2 и R3.

Для моделирования нужно задать параметры тиристоров. Чтобы максимально приблизить моделируемую схему к реальной, зададимся параметрами реальных тиристоров. Возьмем тиристор ТЧ50-9.

Технические характеристики:

Максимальное среднее за период значение тока в открытом состоянии: 50 А

Максимально допустимая температура корпуса: 70 С

Максимальное повторяющееся импульсное напряжение в закрытом состоянии: 900 В

Повторяющийся импульсный ток в открытом состоянии: 500 мА

Ударный ток в открытом состоянии: 1700 А

Критическая скорость нарастания напряжения в закрытом состоянии: 100, 200 В/мкс

Критическая скорость нарастания тока в открытом состоянии: 100 А/мкс

Максимальный прямой импульсный ток управления: 25 А

Максимальное прямое импульсное напряжение управления: 24 В

Время включения: 5 мкс

Время выключения: 12...30 мкс

Введем данные значения в MicroCAP для VS1 и VS2.

В окне ввода параметров, можно вводить следующее:

Тиристор: IH-ток удержания, IGT-ток включения, TON-время включения, VTMIN-минимальное напряжение анод-катод во включенном состоянии, VDRM-максимум повторного напряжения в состоянии выключено, DVDT-критическая скорость нарастания напряжения выключения, TQ-время выключения, K1-фактор ширины для DV/DT, K2-фактор ширины для TQ.[17]

После ввода данных в программу, начинаем моделирование.

Необходимо получить следующие диаграммы:

Напряжение на конденсаторах C1 и C2, напряжение на тиристорах VS1 и VS2, ток на катушке L2. Ток на катушке L3 получать нет необходимости, так как L2=L3.

Для получения нужных диаграмм, в окне «установки анализа переходных процессов (рисунок 3.4) заполним «выражение по оси Y» .



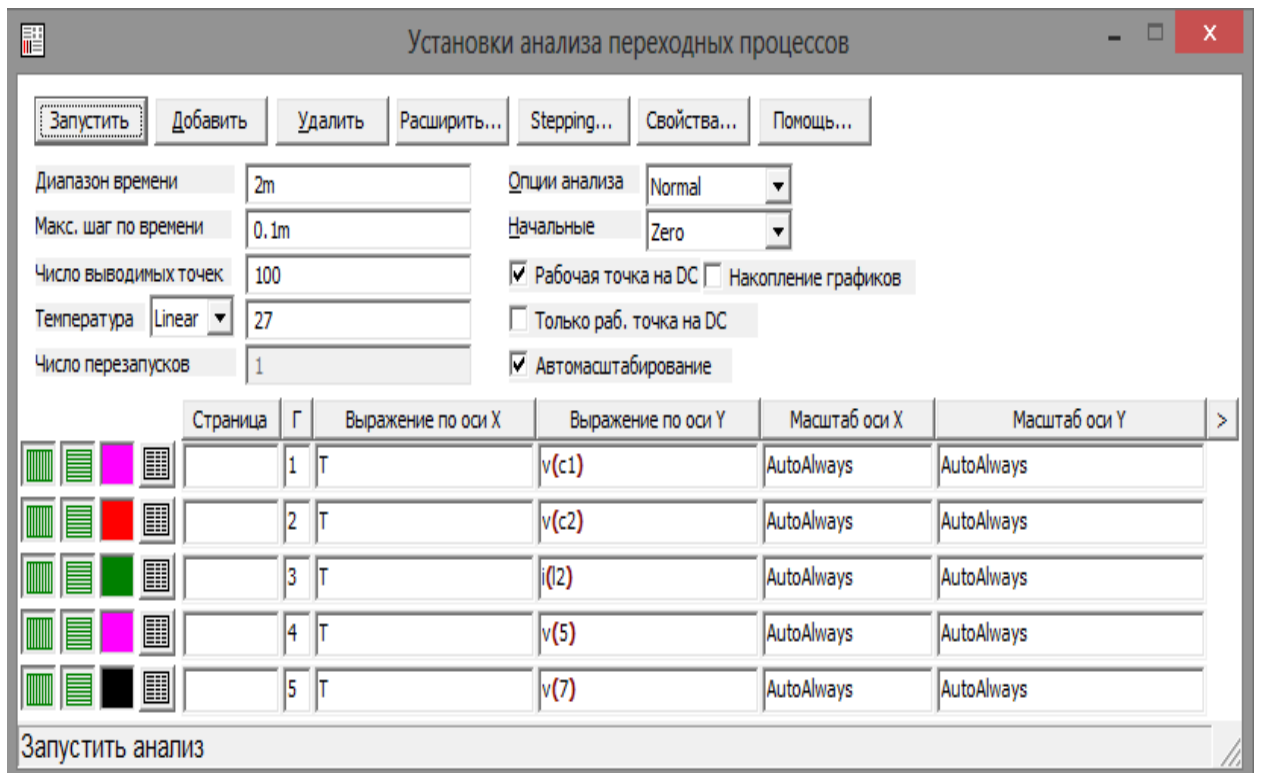


Рисунок 3.4. Установки для анализа переходных процессов.

Диапазон времени в пределах 2 мс, выражения  $V(C2)$ ,  $V(C1)$ ,  $I(L2)$  задают программе, делать расчеты напряжения на C2, C1 и тока на L2.  $V(5)$  и  $V(7)$  узлы тиристоров, где снимаем напряжения на них.

Полученные диаграммы:

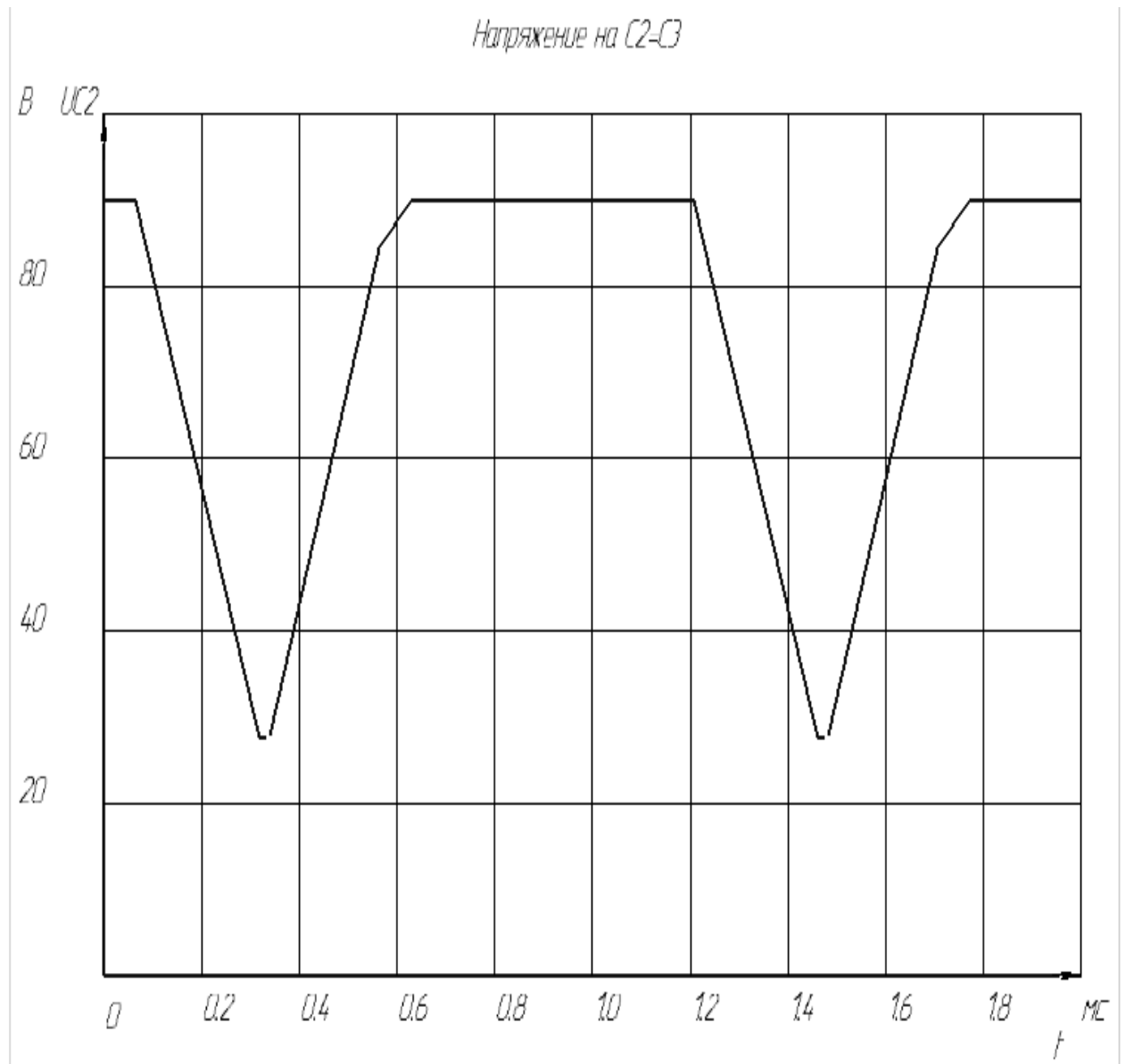


Рисунок 3.5. Напряжение на конденсаторе C2.

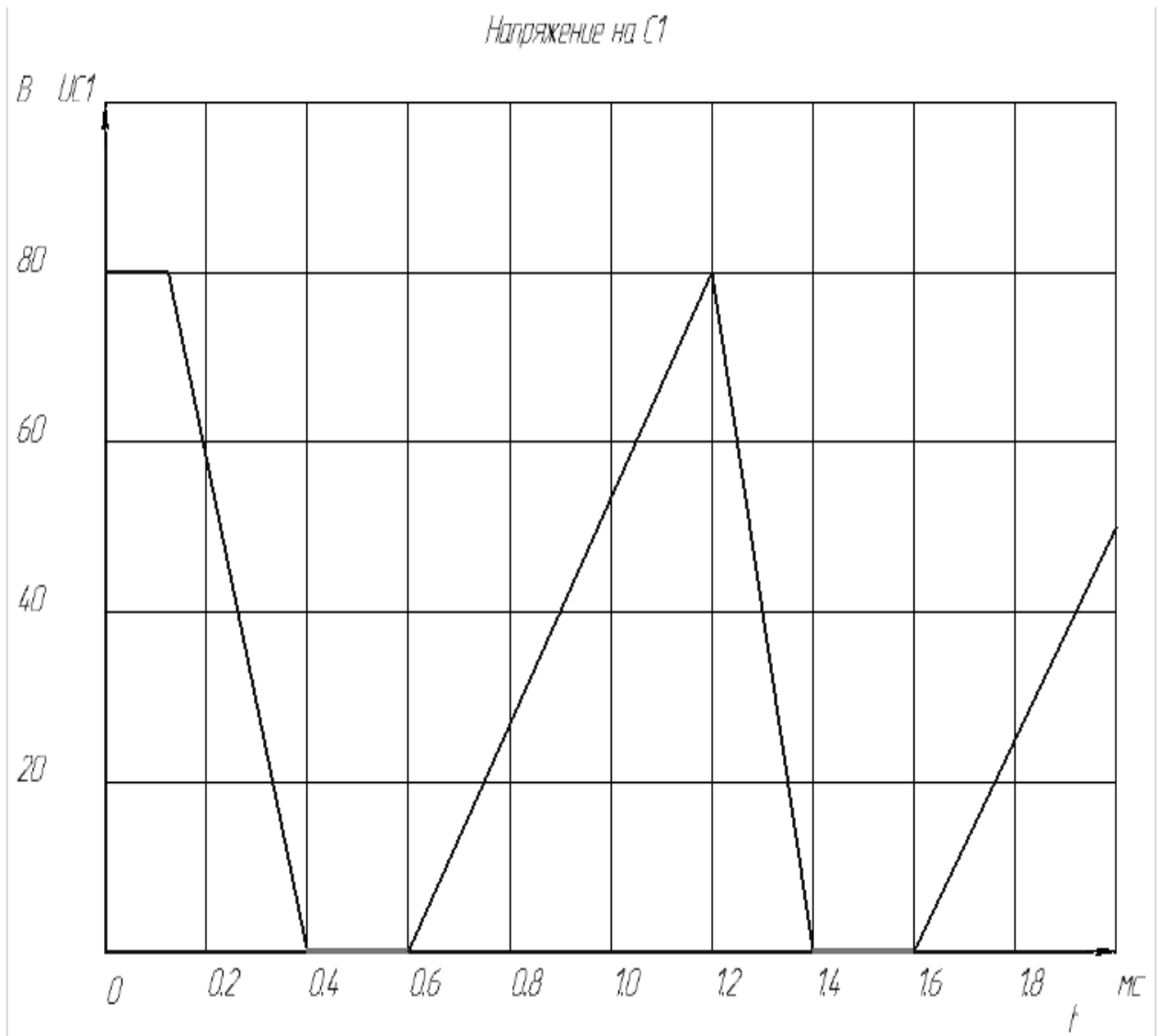


Рисунок 3.6. Напряжение на конденсаторе C1

Ток  $L_2$

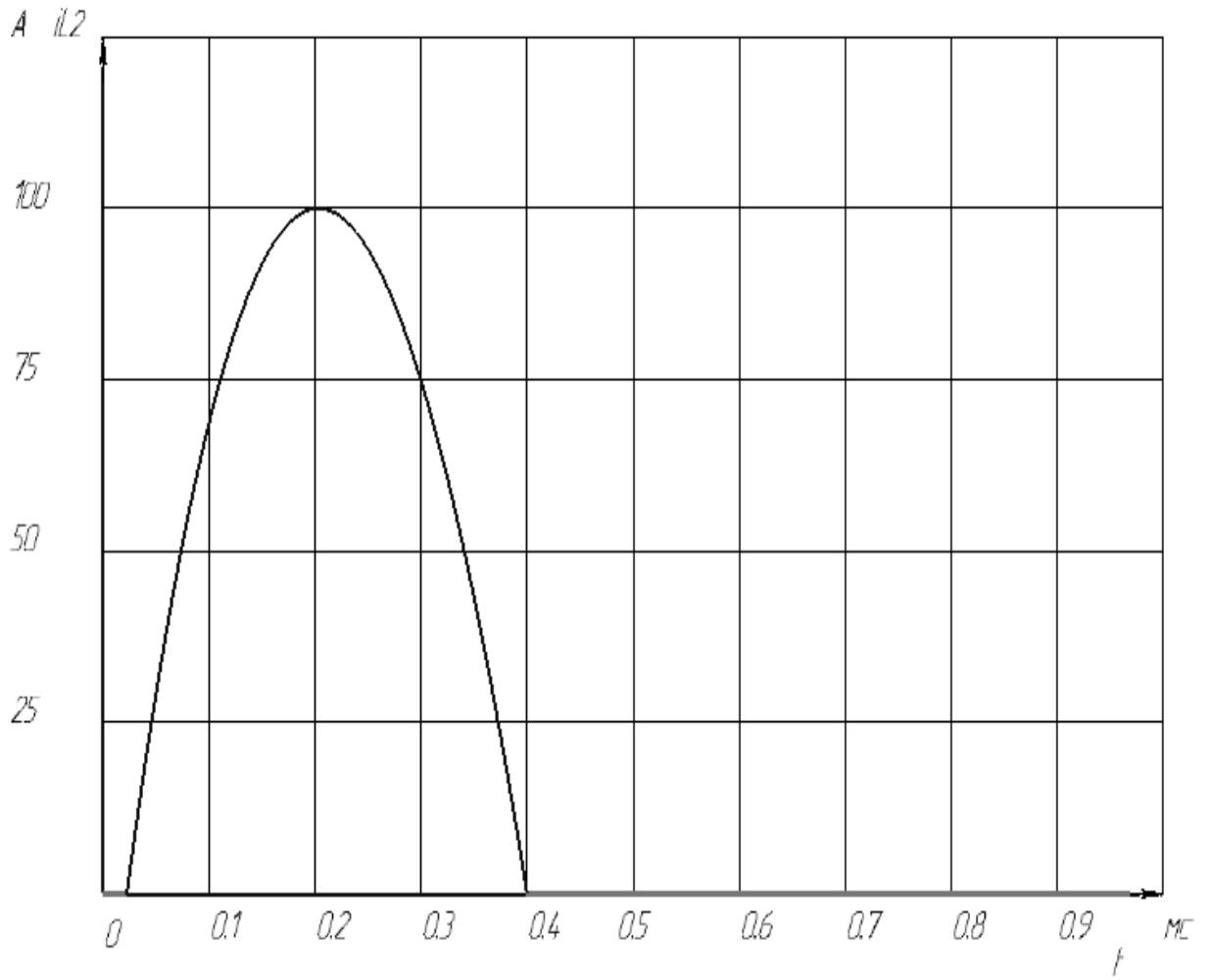


Рисунок 3.7. Ток индуктора

Напряжение на силовом тиристоре VS2

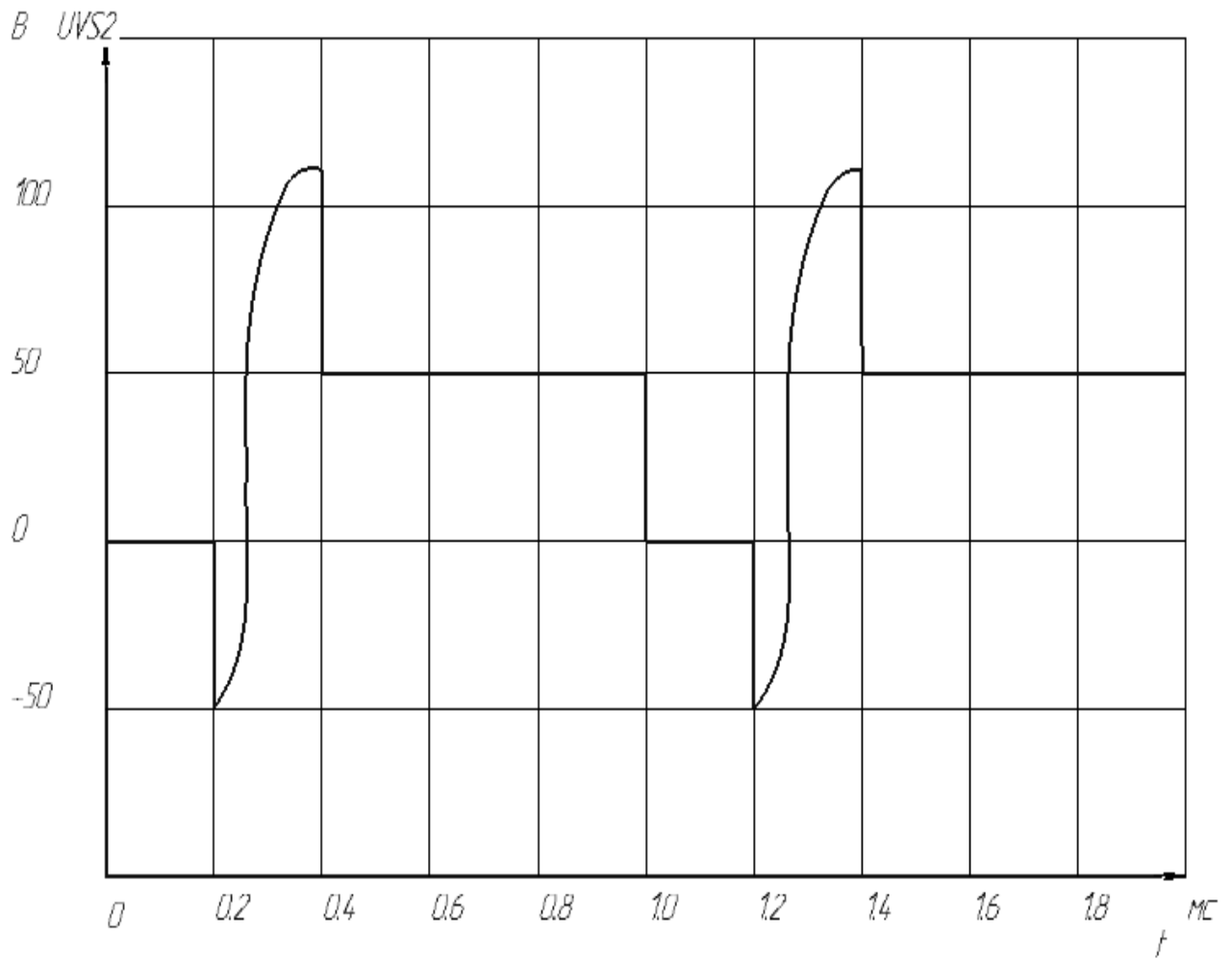


Рисунок 3.8. Напряжение на силовом тиристоре VS2

Напряжение на коммутирующем тиристоре VS1

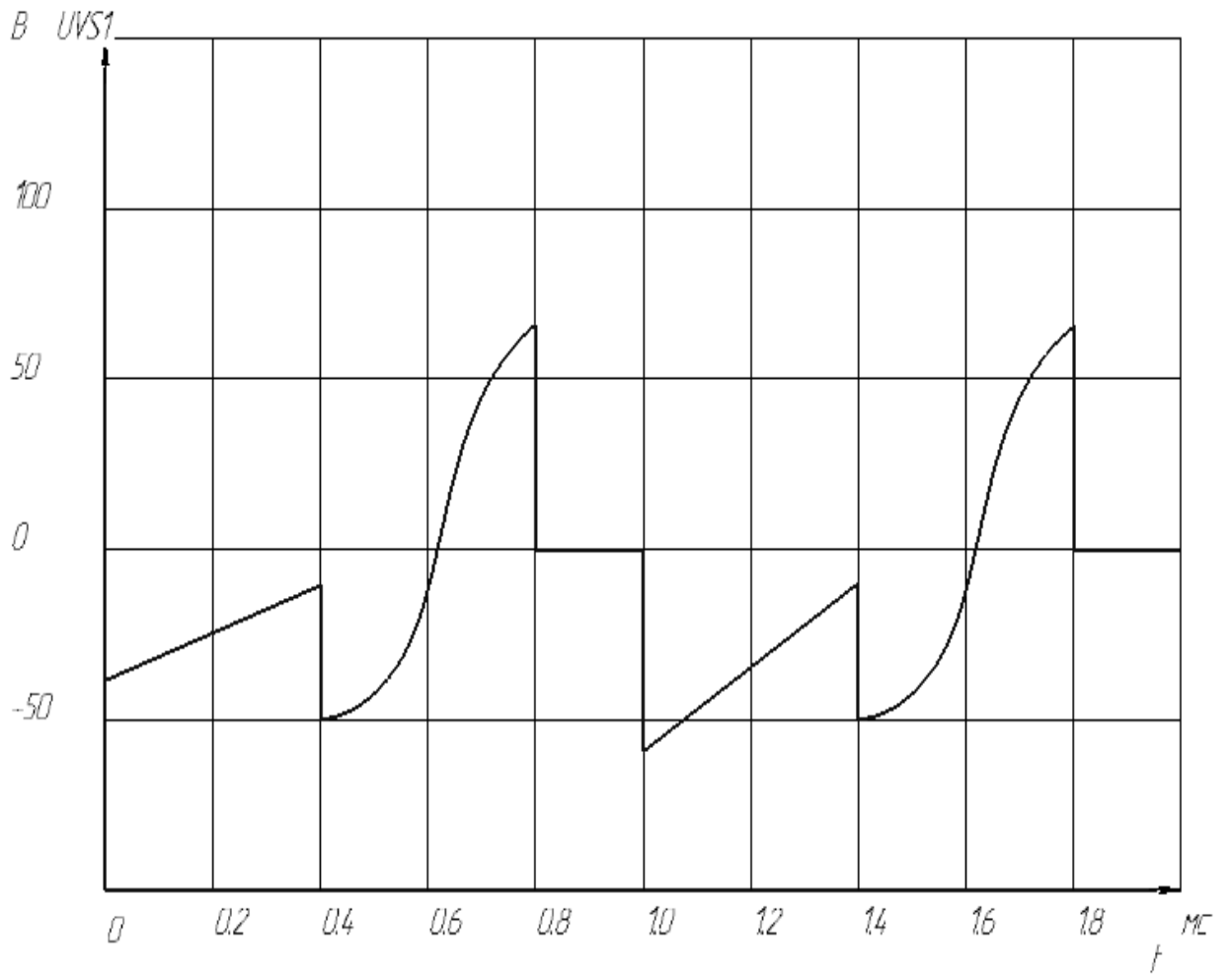


Рисунок 3.9. Напряжение на коммутирующем тиристоре VS1.

### 3.1 Выбор элементов ГИТ

Тиристоры VS1 и VS2 выбраны типа ТЧ50-9

Технические характеристики:

Максимальное среднее за период значение тока в открытом состоянии: 50 А

Максимально допустимая температура корпуса: 70 С

Максимальное повторяющееся импульсное напряжение в закрытом состоянии: 900 В

Критическая скорость нарастания напряжения в закрытом состоянии: 100, 200 В/мкс

Критическая скорость нарастания тока в открытом состоянии: 100 А/мкс

Максимальный прямой импульсный ток управления: 25 А

Максимальное прямое импульсное напряжение управления: 24 В

Время включения: 5 мкс

Время выключения: 12...30 мкс

Из справочника [14] выбираем диоды для моста типа Д232.

Технические характеристики:[19]

Максимальный допустимый средний ток: 10 А

Максимальное импульсное напряжение: 400 В

Максимальный допустимый ток перегрузки: 100 А

Максимальная температура: 120 С

Из справочника [10] выбираем диод VD5 типа В50-6.

Технические характеристики:

Предназначен для работы в цепях статических преобразователей электроэнергии постоянного и переменного токов на частотах до 2 кГц.

Выпускаются в металлокерамическом корпусе с гибким выводом.

Средний прямой ток - 50 А

Повторяющееся импульсное обратное напряжение - 600 В

Из справочника [11] выбираем накопительные конденсаторы С2 и С3 типа К50-6 и коммутирующий конденсатор С1 типа КБГ-МН-30мкФ.

Основные параметры конденсаторов К50-6:

- Номинальное напряжение: 6,3... 200 В

- Номинальная емкостей: 50мкФ
- Допускаемые отклонения емкости:  $\pm 80\% \dots -20\%$
- Интервал рабочих температур:  $-10 \dots +70$  °С

#### Основные параметры конденсаторов МБГО

- Номинальное напряжение : 160 В, 315 В, 400 В, 500В, 630 В;
- Номинальная емкость: от 1мкФ до 30 мкф;
- Допускаемое отклонение емкости :  $\pm 10\%$ ;  $\pm 20\%$ ;
- Тангенс угла диэлектрических потерь, не более, - 0,015;
- Сопротивление изоляции между выводами, для конденсаторов с номинальной емкостью до 0,25 мкФ, не менее 800 МОм;
- Сопротивление изоляции между соединенными вместе выводами и корпусом конденсатора, не менее 5000 Мом.

Зарядный дроссель выбираем типа B82720S2601N040 на 4.4 мГ.

Тип: b82720s

Технические данные:

Исполнение: сдвоенный

Номинальный ток, А: 0.6

Номинальное напряжение, В 250

Индуктивность обмотки, мГн 4.4

Активное сопротивление, Ом 0.4



#### **4. Разработка конструкции устройства и печатной платы системы управления.**

Блок управления служит для формирования отпирающих импульсов тиристорам генератора импульсов тока установки для индукционного нагрева.

Блок управления силовым тиристором построен на основе преобразователя с регулируемой частотой и с бестрансформаторным блоком питания.

Схема управления силовым и коммутирующим тиристорами состоит из:

- 1) Блок питания; (рисунок 4.1)
- 2) Задающий генератор; (рисунок 4.2)
- 3) Выходной формирователь импульсов. (рисунок 4.3)

Блок питания, как правило, содержит фильтр с емкостной реакцией, то есть он имеет достаточно большую емкость конденсатора, используемого в фильтре. Исходя из того, что полное сопротивление зарядной цепи достаточно мало, то для исключения больших зарядных токов, перегружающих входную сеть и элементы сетевого выпрямителя ( СВ ), в цепь заряда конденсатора низкочастотного фильтра ( НФ ) устанавливают устройство ограничения зарядного тока конденсатора ( УЗК ). В данной схеме роль УЗК применяется конденсатор С1 выполняющий роль ограничивающего сопротивления.

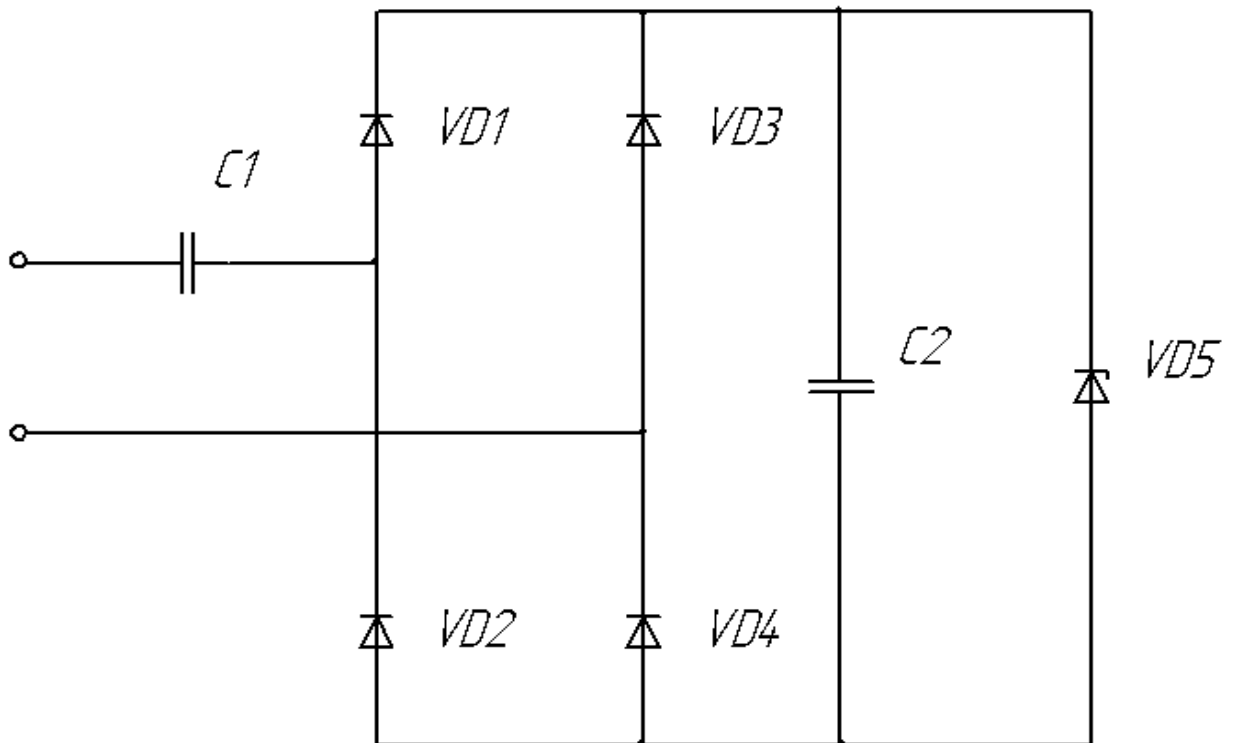


Рисунок 4.1.Блок питания.

Выходное переменное напряжение сети поступает через УЗК на сетевой выпрямитель, состоящий из выпрямительного моста на диодах  $VD1 - VD4$ .

На выходе выпрямительного моста стоит НФ, собранный из конденсатора большой емкости  $C2$  и преобразователя напряжения ( ПРН ), который служит для ограничения выпрямленного и сглаженного напряжения. Состоит из стабилитрона  $VD5$ .

Так как схема управления должна иметь маленький ток потребления, удобно работающий генератор выполнить на каскаде с однопереходным транзистором.

Задающий генератор служит для задачи частоты отпирающих импульсов, которые подаются на тиристоры ГИТа.

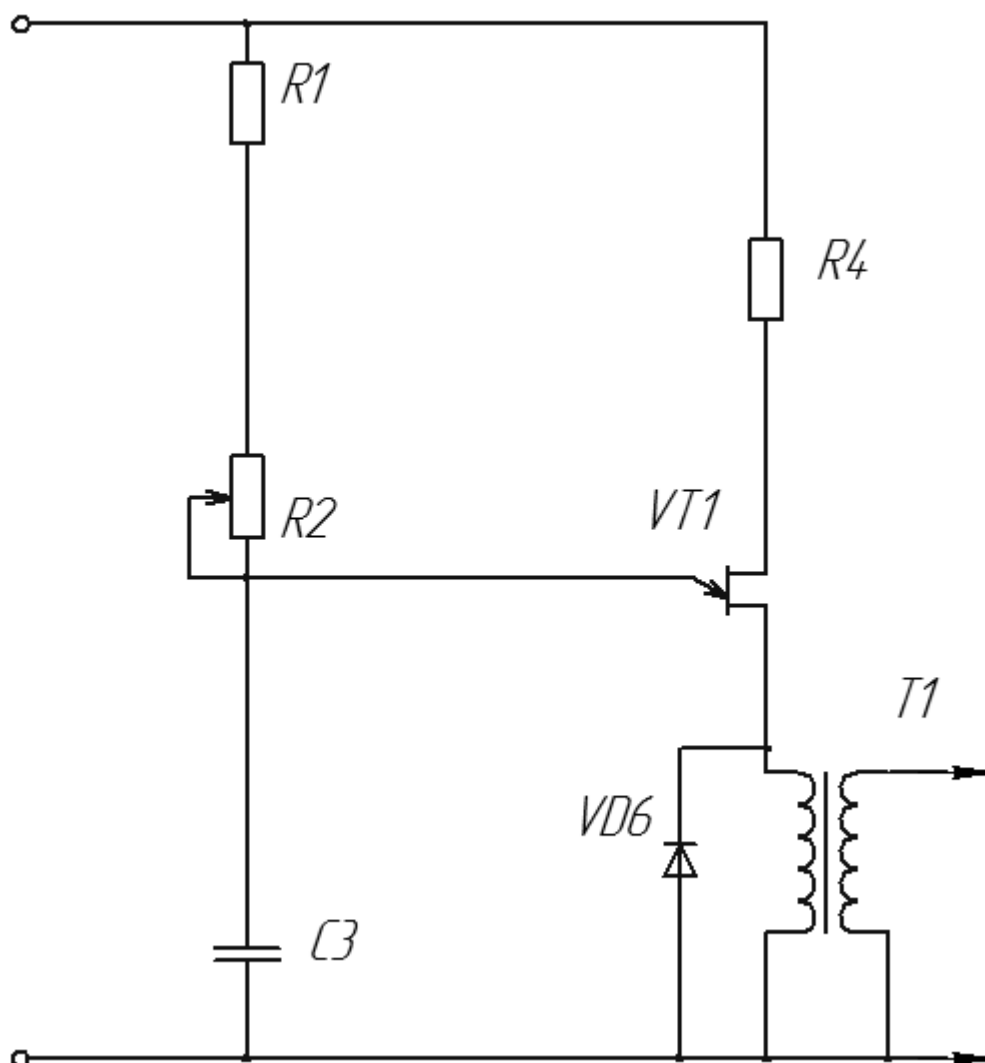


Рисунок 4.2. Схема задающего генератора.

Емкость  $C3$  заряжается от источника постоянного тока через ограничивающий верхний предел частоты резистора  $R1$  и переменный резистор  $R2$ , который создает возможность регулировать частоту задающих импульсов.

Когда конденсатор  $C3$  зарядится до напряжения, равного напряжению срабатывания однопереходного транзистора  $VT1$ , транзистор открывается и  $C3$  начинает разряжаться на первичную обмотку импульсного трансформатора  $T1$ . На выходе задающего генератора формируется короткий импульс.

Трансформатор  $T1$  служит для предотвращения попадания постоянной составляющей на базу силового транзистора выходного формирователя импульсов (ВФИ). (Рисунок 4.4)

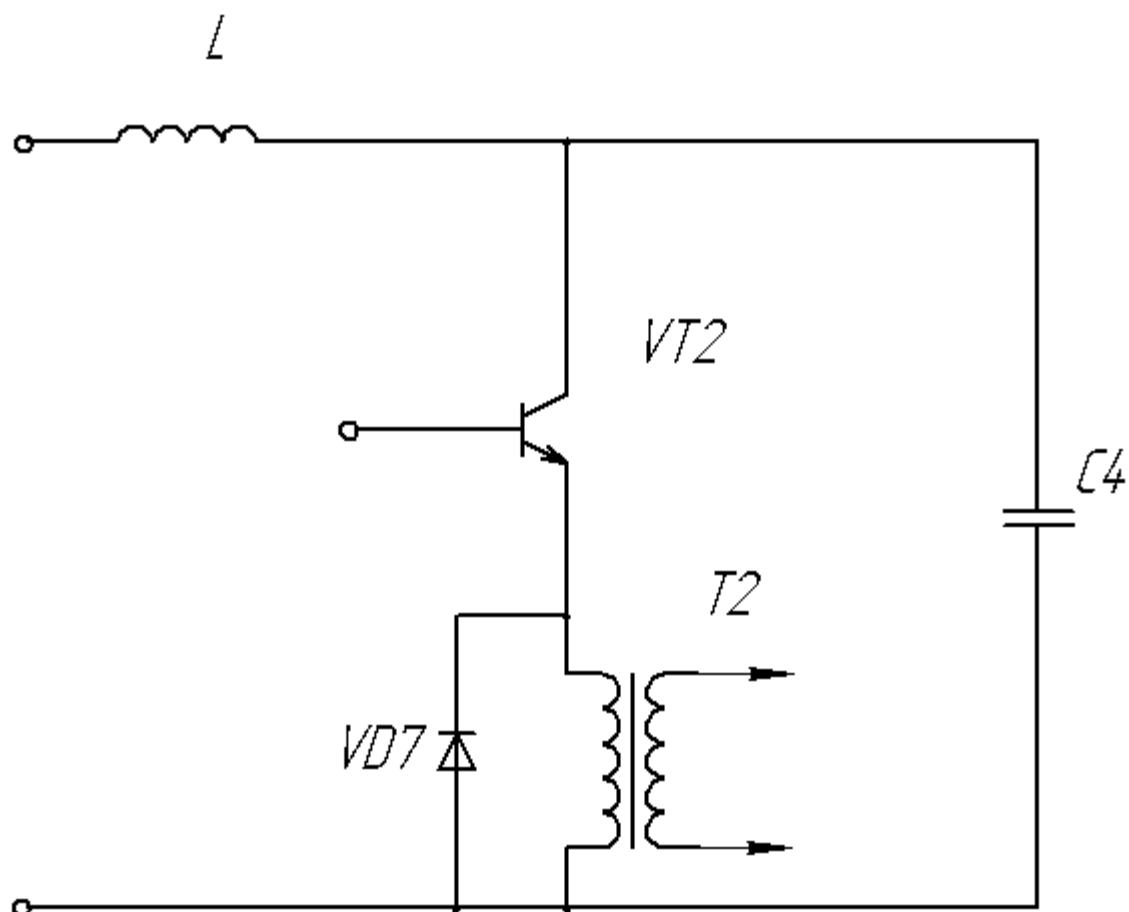


Рисунок 4.3.Выходной формирователь импульсов.

Сформированный импульс поступает на базу силового транзистора VT2. Транзистор открывается, а конденсатор C4, предварительно заряженный через ограничивающий зарядный ток дроссель L. Разряжается конденсатор C4 через коллекторно – эмиттерный переход транзистора VT2 на первичную обмотку силового импульсного трансформатора T2. На выходе в ВФИ формируется импульс, открывающий силовой тиристор в ГИТ.

Диоды VD6 и VD7 служат для сброса накопленной энергии в первичных обмотках трансформаторов T1 и T2 соответственно. На рисунке 4.4 схема системы управления.

формирователя импульсов:

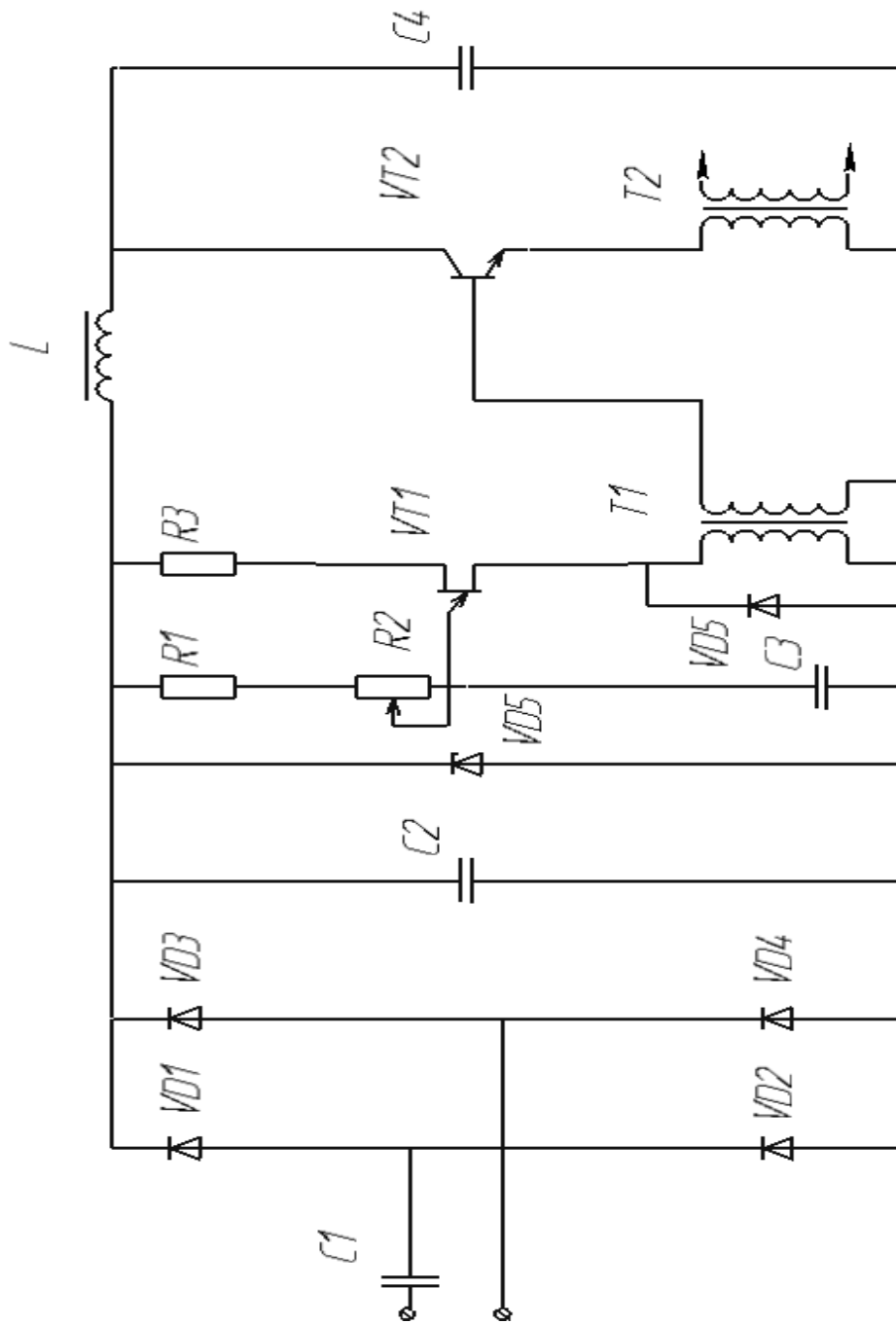


Рисунок 4.4 .Схема системы управления.

**4.1**  
**Расчет**  
**элементов**  
**блока**  
**управления**  
Расчет  
выходного

Зададимся исходными данными:

Напряжение питания: 22 В;

Длительность импульса: 50 мкс;

Амплитуда выходного импульса: 4 В;

Частота выходных импульсов: 500 Гц;

Мощность выходного импульса: 4 Вт.

Мощность отдаваемая конденсатором С4 при разряде на первичную обмотку трансформатора Т2:

$$P = \frac{W_c}{t_{\text{раз}}} = \frac{E^2 * C_4}{2t_u} \quad (4.1)$$

Отсюда емкость конденсатора С4

$$C_4 = \frac{2 * P_u * t_u}{E^2} = 8.3 * 10^{-6} \text{ Ф} \quad (4.2)$$

Из справочника [11] выбираем конденсатор С4 САР 8 мФ 450В

Характеристики:

Емкость: 4 мФ

Максимальное напряжение: 400 В.

Трансформатор Т1 будет типа МИТ-4В

Ток протекаемый по первичной обмотке трансформатора в момент разряда С4:

$$I_1 = \frac{P}{E} = 0.22 \text{ А} \quad (4.3)$$

Имея мощность 4 Вт, ток 0.22 А, напряжение 22 В из справочника [8] выбираем силовой транзистор VT2 и типа КТ817В, имеющий следующие характеристики:

Коэффициент передачи тока:  $\geq 25$ ;

Максимальное допустимое напряжение К-Э: 25 В;

Граничная частота:  $\geq 3$  МГц;

Максимально допустимый ток коллектора: 3 А;

Мощность коллектора: 25 Вт

Из справочника [13] исходя из максимального значения тока 0.22 А выбираем диод VD7 Д229А.

Основные технические характеристики диода Д229А:

$U_{обр\ max}$  - Максимальное постоянное обратное напряжение: 400 В;

$I_{пр\ max}$  - Максимальный прямой ток: 400 мА;

$f_d$  - Рабочая частота диода: 1 кГц;

$U_{пр}$  - Постоянное прямое напряжение: не более 1 В при  $I_{пр}$  400 мА;

$I_{обр}$  - Постоянный обратный ток: не более 50 мкА при  $U_{обр}$  400 В

Расчет силового трансформатора:

Индуктивность намагничивания первичной обмотки силового трансформатора Т2:

$$L_{\mu_1} = \frac{1}{c_4} * \frac{t_4}{\pi} * \frac{t_4}{\pi} = 0.253 \text{ мГ} \quad (4.4)$$

Ток вторичной обмотки трансформатора:

$$I_2 = \frac{E * I_1}{U_2} = 1.21 \text{ А} \quad (4.5)$$

Коэффициент трансформации:

$$K_{тр} = \frac{U_2}{U_{1m}} = 0.19 \quad (4.6)$$

Где:  $U_{1m}$  - амплитудное значение напряжения на первичной обмотке, равное 21.3 (  $E - U_{кэ}$ )  $U_{кэ} = 0.7 \text{ В}$  напряжение коллектор – эмиттер силового транзистора.

Из таблицы п.1[9] выбираем сердечник из феррита марки М2000ММ1-А

Количество витков первичной обмотки:

$$\omega_1 = 100 * \frac{\sqrt{l_{ср} * L_{\mu_1}}}{0.26 * S_{см}} = 254 \text{ витка} \quad (4.7)$$

Где  $l_{ср}$  и  $S_{см}$  данные из таблицы п.1[9]

Количество витков вторичной обмотки:

$$\omega_2 = \omega_1 * K_{тр} = 48 \text{ витков} \quad (4.8)$$

Из таблицы п2[9] выбираем провода обмоток типа ТЭТВ.

Средняя длина витка при намотке первичной и вторичной обмоток:

$$l_{ср1} = 0.12 * D_{из} - D + 2H = 6.72 \quad (4.9)$$

Где:  $D_{из}$   $D$   $2H$  данные из п2[9]

$$l_{ср2} = 0.14 * D_{из} - D + 2H = 7.84 \quad (4.10)$$

Длина проводов, необходимая для намотки первичной и вторичной обмоток:

$$l_{1h} = l_{cp1} * \frac{\omega_1}{100} = 17.1 \text{ м (4.11)}$$

$$l_{2h} = l_{cp2} * \frac{\omega_2}{100} = 3,76 \text{ м (4.12)}$$

Индуктивность ограничивающего дросселя:

$$L \leq \frac{1}{\omega^2 * C_4} = 13.5 \text{ мкГ (4.13)}$$

Где  $\omega^2$  частота колебательного контура.

Ток, протекающий через дроссель в момент заряда  $C_4$

$$I = \frac{E * C_4}{2 * (T - t_4)} = 0.025 \text{ А (4.14)}$$

Диаметр провода дросселя равен 0.122мм, из таблицы п2[9]выбираем провод ПЭТВ с диаметром провода с изоляцией 0.15мм, без изоляции 0.12мм.

Высота катушки порядка  $h = 1.2$  мм отсюда внутренний диаметр катушки  $2 * 1.2 = 2.4$ мм

Наружный диаметр:  $2.4 * 2 = 4.8$  мм

Число витков в одном слое дросселя: 8 витков

Число слоев катушки: 8 витков, отсюда получаем число витков дросселя:

64витка

Полученная индуктивность дросселя: 12.5 мкГ.

Ограничивающий дроссель  $L$  наматывается на резистор диаметром  $d = 2.4$  мм и имеет большое сопротивление в 8 слоев по 8 витков в слое проводом диаметра 0.15мм.

Выбираем дроссель ДПМ0.2-40

В зависимости от типономинала дроссели типа ДПМ имеют следующие технические характеристики:

- индуктивность ..... от 1 до 500 мкГн;
- минимальный ток ..... от 0,1 до 3 А;
- добротность ..... от 2 до 100 ед;
- работа в области частот до 35 МГц при температуре ..... от  $-60^\circ\text{C}$  до  $+85^\circ\text{C}$ ;



- относительная влажность ..... 93-98% при температуре 40°C;
- минимальная наработка ..... 10000 час;
- климатическое исполнение ..... всеклиматическое;
- диаметр дросселя ..... от 0,6 до 0,8 мм;
- длина ..... от 11,5 до 21,5 мм;
- длина вывода дросселя ..... от 62 до 72 мм;
- масса дросселя ..... от 0,7 до 2,0 г.

## **4.2 Расчет задающего генератора**

Из справочника [10] выбираем однопереходной транзистор VT1 типа КТ117Г.

Основные технические характеристики транзистора КТ117Г:

- Структура транзистора: n-база
- $P_{k \max}$  - Постоянная рассеиваемая мощность коллектора: 300 мВт;
- $f_{\max}$  - Максимальная частота генерации: 0,2 МГц;
- $U_{кбо \text{ проб}}$  - Пробивное напряжение коллектор-база при заданном обратном токе коллектора и разомкнутой цепи эмиттера: 30 В;
- $U_{эбо \text{ проб}}$  - Пробивное напряжение эмиттер-база при заданном обратном токе эмиттера и разомкнутой цепи коллектора: 30 В;
- $h_{21э}$  - Статический коэффициент передачи тока транзистора в режиме малого сигнала для схем с общим эмиттером: 0,65... 0,9

Так как сопротивление между базами транзистора составляет несколько кило Ом, то выбираем резистор типа МЛТ – 0.25 – 510 Ом  $\pm$  5% ( )

Отношение порога срабатывания транзистора к напряжению питания с учетом в базовой цепи R4 из справочника:

$$\gamma_{\min}=0.61$$

$$\gamma_{\max}=0.86$$

Сопротивление резистора R1, ограничивающего верхний предел частоты:

$$R1 = \frac{1.2}{1.5} * \frac{E}{I_{\text{выкл}}} = 30 \text{ кОм} \quad (4.15)$$

Выбираем резистор типа МЛТ-0.125 30К

Основные технические характеристики резисторов МЛТ-0,125:

- Диапазон номинальных сопротивлений: 1 Ом... 10 МОм
- Номинальная мощность: 0,125 Вт
- Предельное напряжение: 200 В
- Допускаемые отклонения сопротивлений:  $\pm 1$ ;  $\pm 2$ ;  $\pm 5$ ;  $\pm 10$  %
- Диапазон температур: -60... +70 °С

- Минимальная наработка: 30000 ч

- Срок сохраняемости: 25 лет

Конденсатор С3 имеет достаточно малую емкость, выбираем типа Тип К10-17Б на 6.8 нФ

Технические параметры:

Тип К10-17Б

Рабочее напряжение, В 50

Номинальная емкость 6,8

Единица измерения нФ

Допуск номинала, % 5

Температурный коэффициент емкости NPO

Рабочая температура, С -55...125

Выводы/корпус радиал. пров.

Длина корпуса L, мм 4.2

Ширина корпуса W, мм 3.2

Подстроечный резистор R2 необходимый для регулировки верхнего предела частоты из за разброса параметров VT 1

$$R2 = \frac{\tau_{max}}{C3} - R1 = 40.3 \text{ кОм} \quad (4.16)$$

Где  $\tau_{max}$  478 мкс

Выбираем резистор типа СП4-1-0.5 – 47 кОм

Основные технические характеристики резисторов СП4-1А:

- Диапазон номинальных сопротивлений: 100 Ом... 4,7 МОм

- Номинальная мощность: 0,5 Вт

- Предельное напряжение: 250 В

- Допускаемые отклонения сопротивлений:  $\pm 20$ ;  $\pm 30$  %

- Диапазон температур: -60... +98 °С

- Функциональная характеристика: А

- Минимальная наработка: 10000 ч

- Срок сохраняемости: 15 лет

Для регулирования частоты, необходим переменный резистор R3.

Выбираем резистор типа СП5-16ВА

Основные технические характеристики резисторов СП5-16ВА:

- Диапазон номинальных сопротивлений: 3,3... 33000 Ом
- Номинальная мощность: 0,5 Вт
- Предельное напряжение: 128 В
- Допускаемые отклонения сопротивлений:  $\pm 5$ ;  $\pm 10$  %
- Диапазон температур: -60... +70 °С

В качестве импульсного трансформатора Т1 выбираем малогабаритный импульсный трансформатор типа МИТ – 3В

Основные технические характеристики трансформаторов типа МИТ:

- Длительность импульсов ..... от 0,04 до 4 мкс;
- Частота следования импульсов ..... от 0,1 кГц до 10 кГц;
- Ток намагничивания ..... от 45 до 210 мА;
- Максимально допустимое рабочее напряжение ..... до 300 В;
- Максимально допустимый ток в обмотках (импульсный) ..... до 2 А;
- Сопротивление изоляции между обмотками ..... не менее 5000 МОм;
- Температура окружающей среды ..... -60...+85 °С;
- Относительная влажность воздуха при температуре +40 °С ..... 98 %;
- Габаритные размеры ..... диаметр 22 мм, высота 13 мм;
- Минимальная наработка ..... 100000 часов;
- Срок сохраняемости ..... 25 лет;
- Маркировка «В» - высота корпуса с выводами 55 мм;
- Маркировка «М» - высота корпуса с выводами 22 м.

Диод VD7 типа Д9Г.

Основные технические характеристики диода Д9Г:

- $U_{обр\ max}$  - Максимальное постоянное обратное напряжение: 30 В;
- $I_{пр\ max}$  - Максимальный прямой ток: 30 мА;
- $f_d$  - Рабочая частота диода: 100 кГц;
- $U_{пр}$  - Постоянное прямое напряжение: не более 1 В при  $I_{пр}$  30 мА;
- $I_{обр}$  - Постоянный обратный ток: не более 250 мкА при  $U_{обр}$  30 В

### 4.3 Расчет блока питания схемы управления силовым тиристором

Выбираем стабилитрон с напряжением стабилизации 22В типа Д816А.

Основные технические параметры стабилитрона Д816А:

- Разброс напряжения стабилизации: 19,6... 24,2 В при  $I_{ст}$  150 мА;
- Температурный коэффициент напряжения стабилизации: 0,12 %/°С;
- Временная нестабильность напряжения стабилизации:  $\pm 5$  %;
- Постоянное прямое напряжение: 1,5 В при  $I_{пр}$  500 мА;
- Дифференциальное сопротивление стабилитрона : 7 Ом;
- Минимально допустимый ток стабилизации: 10 мА;
- Максимально допустимый ток стабилизации: 230 мА;
- Максимально-допустимая рассеиваемая мощность на стабилитроне: 5 Вт;
- Рабочий интервал температуры окружающей среды: -60... +120 °С

Сопротивление нагрузки для низкочастотного фильтра порядка 800 Ом.

Емкостной конденсатор С2 для низкочастотного фильтра выбираем типа К50-20  
200 мкф 350 в

Основные параметры конденсаторов К50-20:

- Диапазон номинальных емкостей: 1...5000 мкф
- Номинальное напряжение: 6,3... 450 В
- Допускаемые отклонения емкости: - 20...+50 %
- Диапазон температур: -25...+70°С
- Минимальный срок сохраняемости: 10 лет
- Минимальная наработка: 10000 ч

Диоды для моста выбираем типа Д229Е, имеющие следующие параметры:

Допустимое обратное напряжение: 400В

Максимальный прямой ток: 0,4 А

Токоограничивающий конденсатор С1 выбираем типа КБГ – МН - 2мкФ

Основные характеристики конденсаторов КБГ-МН:

- Номинальная ёмкость: 0,25 ... 10 мкф
- Номинальное напряжение: 200; 400; 600; 1000; 1500 В

- Допустимые отклонения ёмкости:  $\pm 5$ ;  $\pm 10$ ;  $\pm 20$  %
- Интервал рабочих температур:  $-60 \dots +70$  C°

#### 4.4 Расчет схемы управления коммутирующим тиристором

Схема управления коммутирующим тиристором состоит из цепочки динисторов с суммарным пороговым напряжением, необходимым для нормальной выходной мощности ГИТ. Цепочка динисторов включается в цепь управления тиристора VS1.

Из справочника выбираем 4 динистора с суммарными пороговыми напряжениями 200В типа КН 102 В, порог срабатывания которых 50 В (VD8-VD11)

Технические характеристики:

Минимальный ток в открытом состоянии: при  $-60^{\circ}\text{C}$  15 мА при  $+100^{\circ}\text{C}$  0.1 мА

Напряжение в открытом состоянии при  $I_{\text{откр}} = 200$  мА, не более 1.5В

Время выключения при максимальном напряжении,

$I_{\text{откр, и}} = 1000$  мА,  $t_{\text{и}} = 10$  мкс, не более 40 мкс • Общая ёмкость при  $U_{\text{обр}} = 0$  В,  $f = 1 \div 10$  МГц, не более 80 пФ

Ток в закрытом состоянии при максимальном напряжении, не более: при  $+25^{\circ}\text{C}$  80 мкА при  $+100^{\circ}\text{C}$  150 мкА

Обратный ток при  $U_{\text{обр}} = 10$  В, не более 500 мкА

## 4.5 Разработка печатной платы.

Рисунок печатной платы будет разрабатываться с помощью программного обеспечения, а именно с помощью программы Dip Trace.

Простой и удобный DipTrace не требует времени на освоение и отлично подходит для небольших радиолюбительских поделок. Программа состоит из следующих модулей:

- 1) Schematic (для создания многолистовых многоуровневых схем с встроенным простейшим симулятором),
- 2) PCB Layout (для разработки плат с помощью ручной или автоматической трассировки и систем оптимизации расположения компонентов и размеров плат),
- 3) Pattern Editor (для редактирования корпусов)
- 4) Component Editor (для редактирования компонентов)

DipTrace содержит минимально возможное количество управляющих элементов, при работе редактируемые объекты подсвечиваются, что позволяет наглядно оценивать ситуацию. Изменение одного элемента схемы или платы отражается на всех зависящих от него объектах.

Автотрассировщик неплохо справляется со сложными многослойными платами, имеющими различные типы радиодеталей, а поддержка файлов Specstra DSN/SES дает возможность подключить сторонний разводчик.

Программа проводит многочисленные проверки проекта (новых элементов в библиотеке, допустимости и целостности соединений, зазоров, размерностей) на разных этапах работы, что позволяет обнаружить и исправить ошибки «на лету».

Создание SPICE netlist позволяет промоделировать проект на любом внешнем симуляторе, функции экспорта/импорта делают возможным продолжить работу в других приложениях, таких как:(P-CAD, PADS, OrCAD, Eagle), а также использовать нетлисты Accel, Mentor, Allegro, Tango и Protel.

DipTrace экспортирует платы в необходимые для производства форматы DXF, Gerber RS-274X (с поддержкой TrueType шрифтов и растровых монохромных изображений), Excellon N/C Drill.



Стандартные библиотеки программы включают в себя больше 100 000 элементов от наиболее известных производителей, а удобные средства разработки позволяют за несколько минут самостоятельно изготовить радиодетали любого размера и сложности. [23]

Первым делом построим схему блока управления в программе.

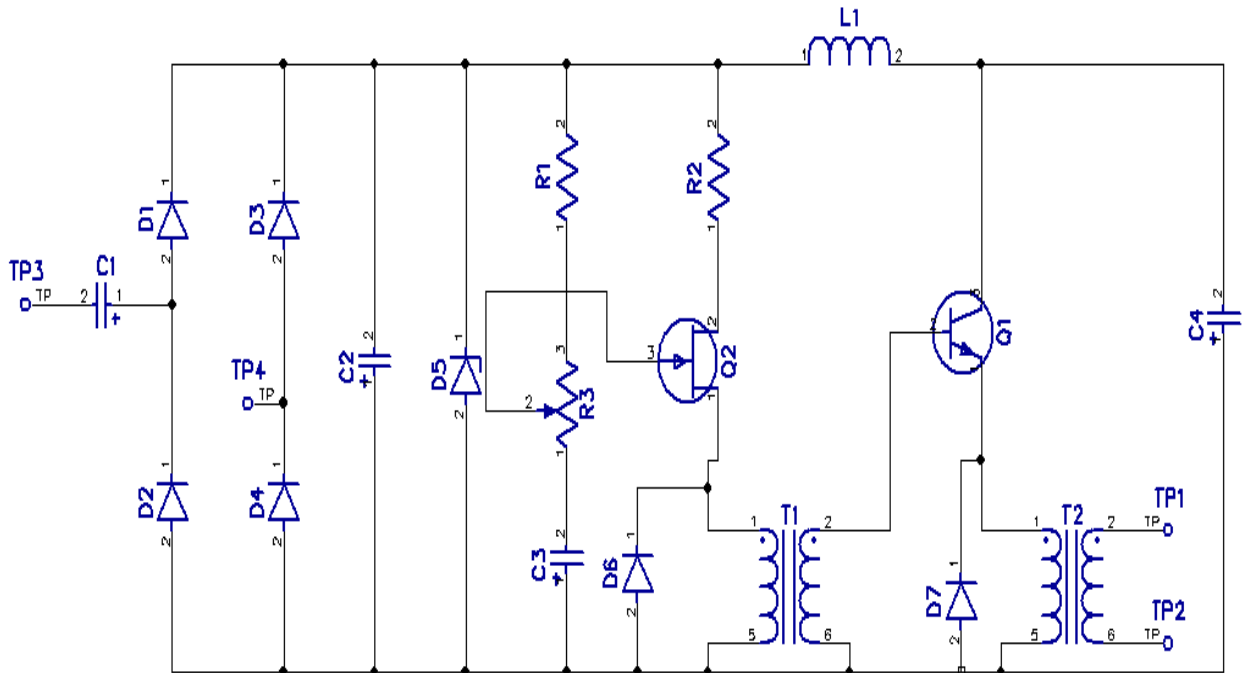


Рисунок 4.5 схема блока управления.

На рисунке 4.5 схема блока управления. Точки TP1 и TP2 это выхода системы управления. К ним либо крепятся, либо припаиваются провода и идут на генератор импульса токов. Точки TP3 и TP4 это входа для питания установки. К ним либо припаиваются, либо крепятся провода для питания. Далее идет блок питания, задающий генератор и выходной формирователь импульсов. Резисторы R1, R2 и R3 обозначаются не по ГОСТу.

Используем функцию преобразовать в плату. На рисунке 4.5 полученные результаты.

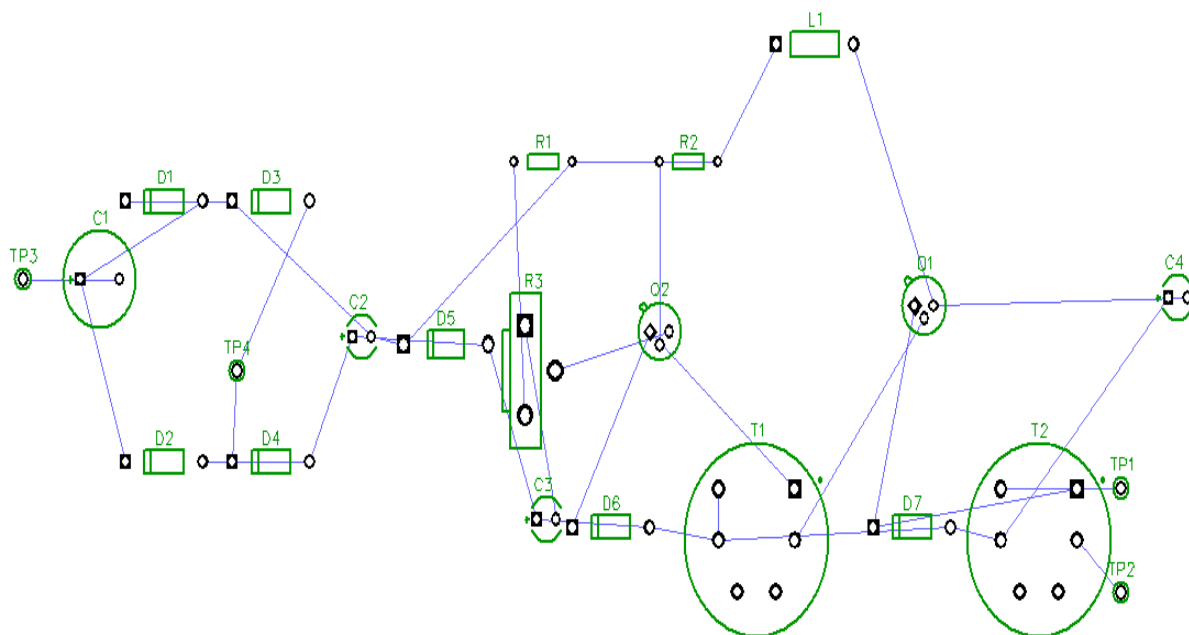


Рисунок 4.6. Полученные результаты преобразования схемы в плату.

Далее можно либо вручную размещать элементы схемы, либо запустить функцию для автоматического позиционирования элементов. После запуска функции автоматического позиционирования и упорядочивания элементов получаем расстановку элементов приведенной на рисунке 4.6.

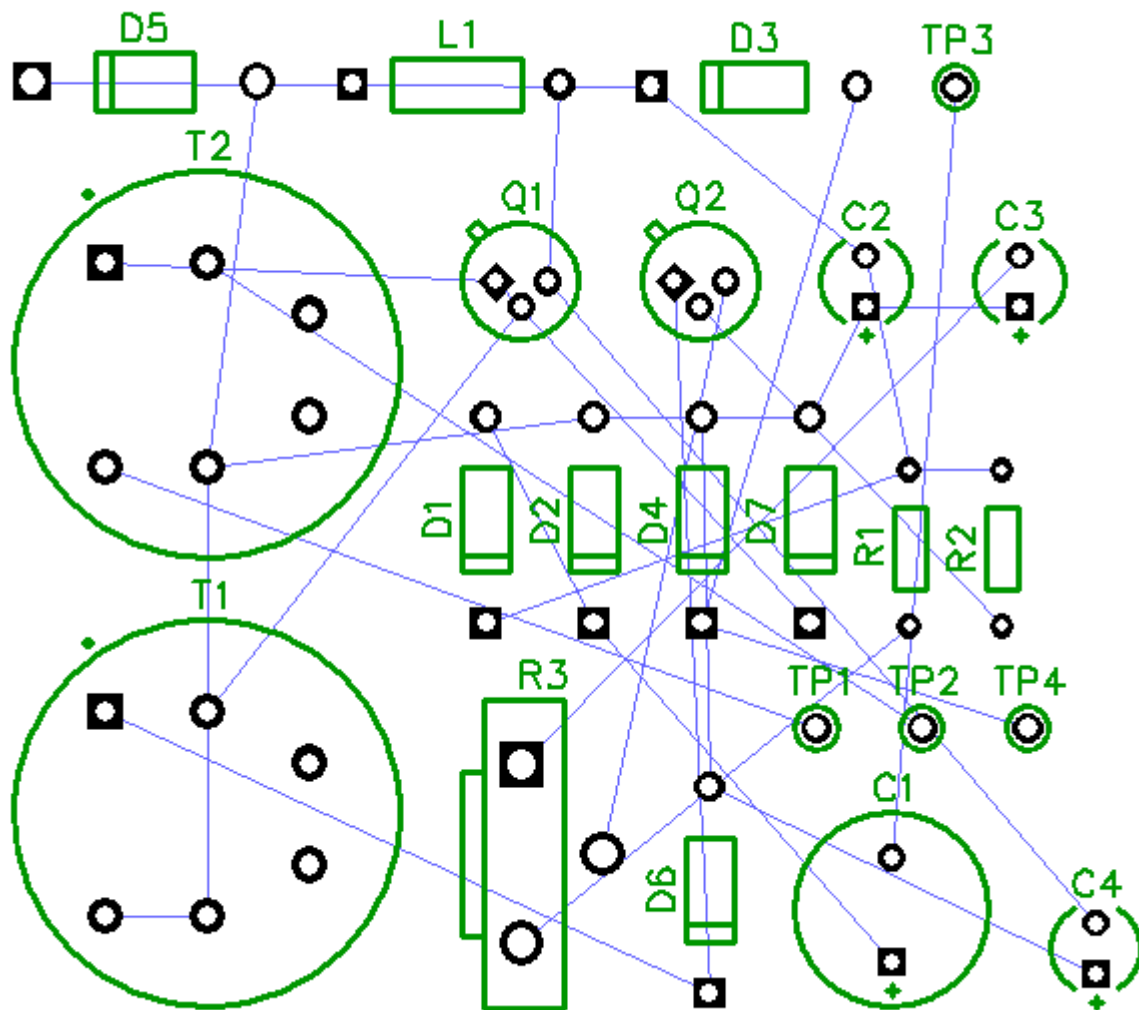


Рисунок 4.7. Расстановка элементов схемы управления.

Синими линиями проведены дорожки. Далее запускаем автотрассировку.

Трассировка соединений является, как правило, заключительным этапом конструкторского проектирования радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) и состоит в определении линий, соединяющих эквипотенциальные контакты элементов, и компонентов, составляющих проектируемое устройство.

Задача трассировки — одна из наиболее трудоёмких задач, возникающих при автоматизации проектирования. Сложность объясняется, в частности многообразием способов конструктивно-технологической реализации соединений, для каждого из которых при алгоритмическом решении задачи применяются специфические критерии оптимизации и ограничения. С математической точки

зрения трассировка — задача выбора оптимального решения из огромного числа вариантов.[24]

В конечном итоге получаем проводящий рисунок на двух сторонах платы. Электрическая связь слоев печатного монтажа осуществляется с помощью металлизации отверстий. Двусторонние печатные платы обладают повышенной плотностью монтажа и надежностью соединений.

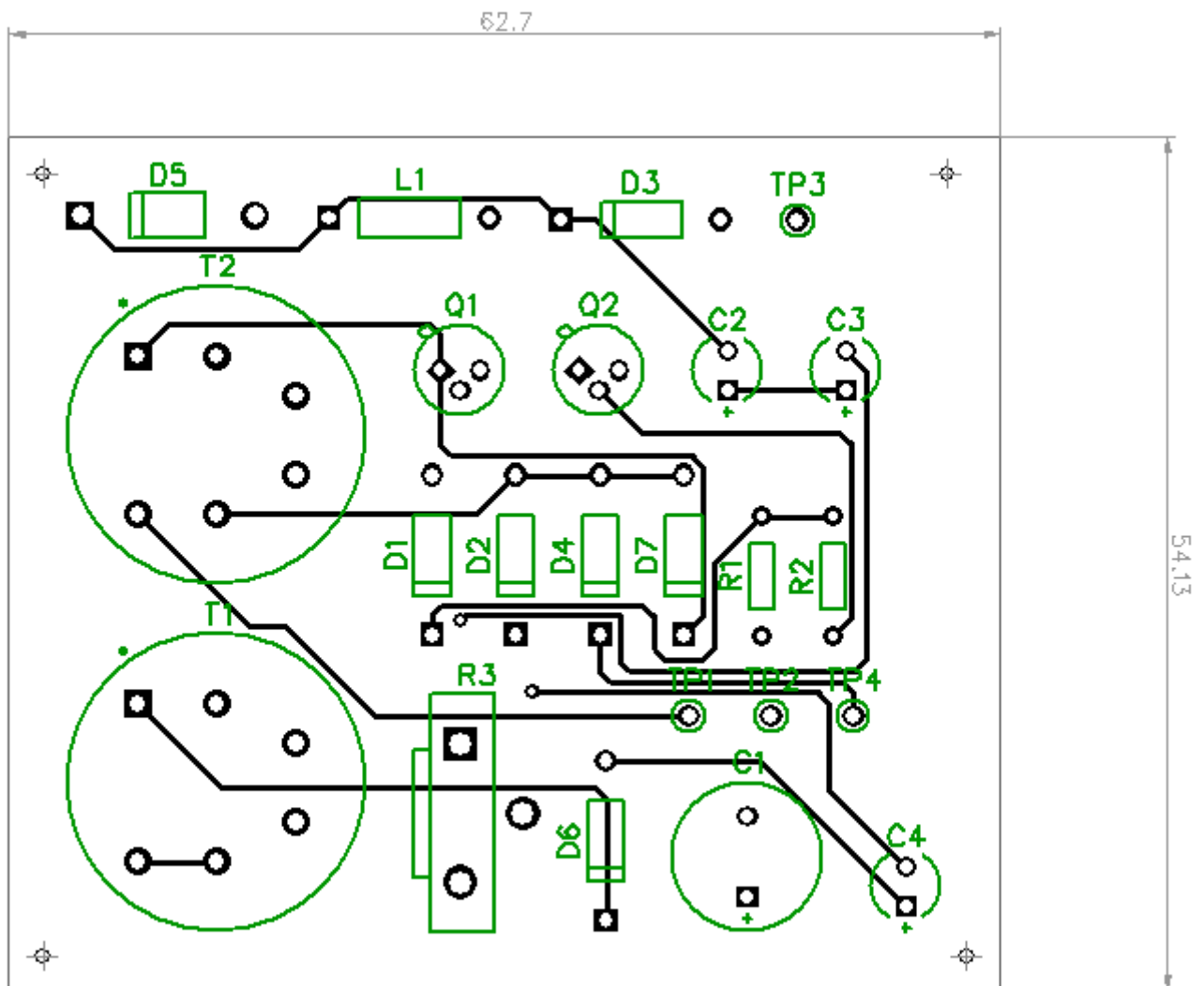


Рисунок 4.8. Печатная плата верхняя сторона

Отверстия по бокам платы, являются технологическими и служат для крепления или монтажа платы. Размеры указаны в миллиметрах.

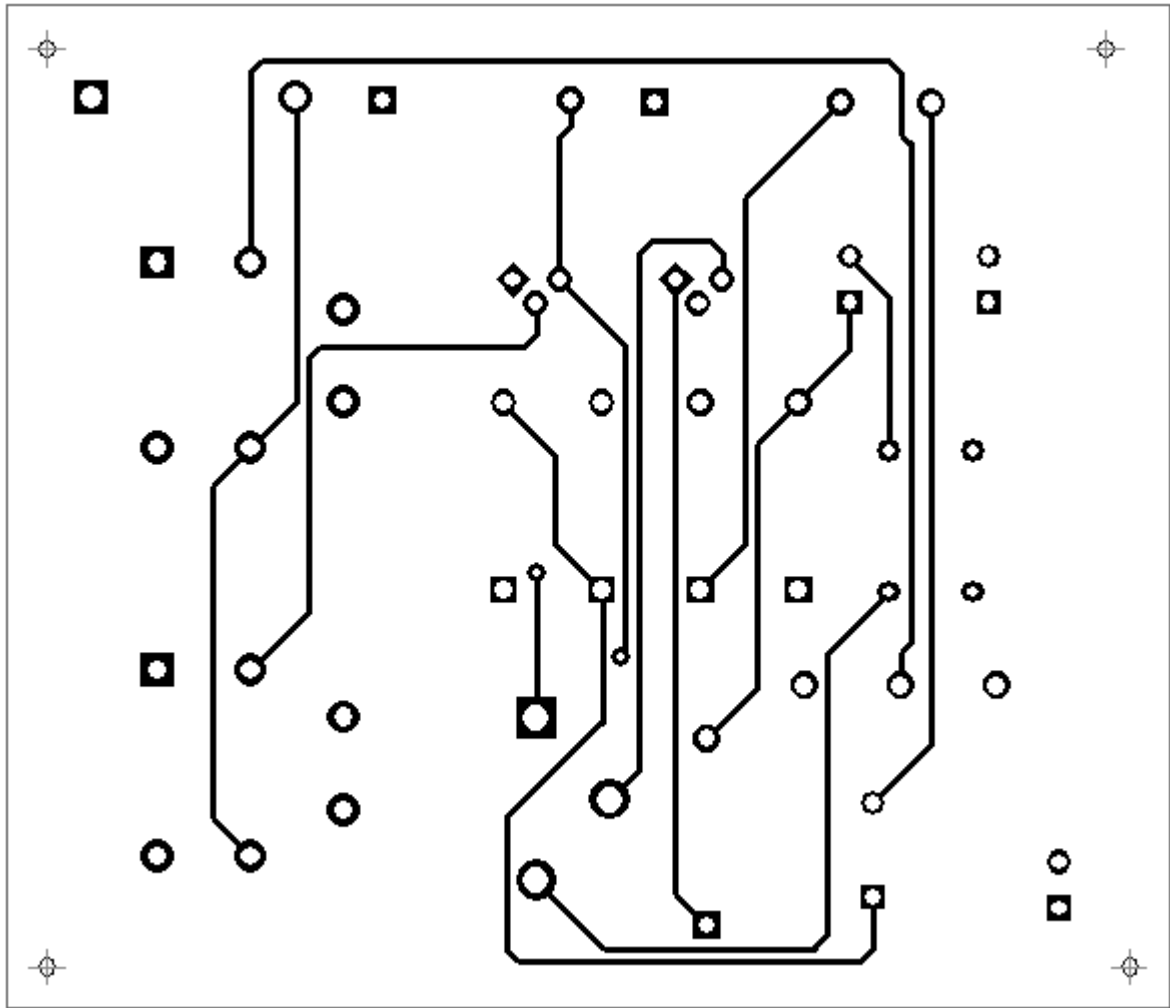


Рисунок 4.9. Печатная плата, нижняя сторона.

## **Заключение**

В ходе выполнения бакалаврской работы осуществлен обзор сведений об индукционном нагреве металлов. Приведен пример установки для нагрева.

Разработана принципиальная схема для стенда индукционного нагрева на основе технического задания.

В программной среде MicroCAP промоделированная работа стенда, получены диаграммы работ установки, рассчитаны и выбраны элементы для стенда.

Разработана и рассчитана схема управления, которая обеспечивает работу установки. Разработана печатная плата для схемы управления.

## Список используемой литературы

1. Гуревич С.Г., Моргун В.В. Источники питания для установок индукционного нагрева – Л: машиностроение, 1980 – 64с., ил.
2. Простяков А.А. Индукционные нагревательные установки – М: Энергия, 1970-120с., ил.
3. Слухоцкий А.Е., Рыскин С.Е. Индукторы для индукционного нагрева – Л: Энергия, 1974-264сю., ил.
4. Гинсбург С.Г. Методы решения задач по переходным процессам в электрических цепях – М: Высшая школа, 1967-387с.
5. Эраносян С.А. Сетевые блоки питания с высокочастотными преобразователями – Л: Энергоатомиздат, 1991 – 176с., ил.
6. Силовые полупроводниковые и импульсные электромеханические преобразовательные устройства под ред. В.В. Ивашина – Куйбышев, 1976-152с.
7. Бочелис Д.С. Электрические кабели, провода и шнуры. Справочник – М: Энергия, 1971-704с., ил.
8. Галкин В.И. Полупроводниковые приборы. Справочник –Мн: Беларусь, 1987-283с., ил.
9. Калантаров П.А. Расчет индуктивностей. Справочник –Л: Энергоатомиздат, 1986-488с., ил.
10. Чебовский О.Г. Силовые полупроводниковые приборы. Справочник –М: Энергия, 1975-515с., ил.
11. Электрические конденсаторы и конденсаторные установки. Справочник / под ред. Г.С. Кучинского –М: Энергоатомиздат, 1987-655с., ил.
12. Воробьев Н.И. Проектирование электронных устройств – М: Высшая школа, 1989-223с., ил.
13. Диоды. Справочник /под ред. О.П. Григорьева –М: Радио и связь, 1990-336с., ил.
14. Медведев В.А. Автономные преобразователи: учеб. пособие / В.А. Медведев. – Тольятти: ТГУ, 2009.-135с.

15. Медведев В.А. Расчет Автономных резонансных инверторов для индукционного нагрева: учеб.-метод. пособие / В.А. Медведев. – Тольятти: ТГУ, 2010-47с.
16. Чип и Дип – интернет магазин. [Электронный ресурс] URL: <https://www.chipdip.ru>
17. Амелина М.А., Амелин С.А. Программа схемотехнического моделирования Micro-Cap 8: справочное издание, М.: Горячая линия - Телеком, 2007. - 466 с.
18. Datasheet [Электронный ресурс] URL: <http://www.club155.ru/datasheet/D232>
19. Компания электроника и связь. [Электронный ресурс] URL: <http://www.eandc.ru/catalog/?q=%CC%C8%D2>
20. Плескачевский Ю.М. Элементы привода приборов. Расчет, конструирование, технологии: Беларуская Навука, 2012-770с.
21. Simon Monk [Dangerously Mad Projects for the Evil Genius](#): McGraw-Hill Education, 2011-242с.
22. Джонсон Г. Грэхэм М, Конструирование высокоскоростных цифровых устройств.: Вильямс 2017-624с
23. Сайт паяльник [Электронный ресурс] URL <http://сhem.net/software/diptrace.php>
24. Трассировка печатных плат [ Электронный ресурс] URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Трассировка\\_печатных\\_плат](https://ru.wikipedia.org/wiki/Трассировка_печатных_плат)