

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

Институт машиностроения  
(наименование института полностью)

Кафедра «Промышленная электроника»  
(наименование)

11.03.04 Электроника и микроэлектроника  
(код и наименование направления подготовки)

Электроника и робототехника  
(направленность (профиль) / специализация)

## ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)

на тему «Лабораторный блок питания с быстродействующей защитой»

Обучающийся

Д.И. Марков

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

к.т.н., доцент, А.В. Прядилов

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

Тольятти 2024

## Аннотация

Наименование выпускной квалификационной работы: «Лабораторный блок питания с быстродействующей защитой».

Объём 65 страниц, 32 рисунка, 3 таблицы, 25 источников, 3 чертежа и 1 электрическая принципиальная схема на листе формата А1.

Выпускная работа состоит из трёх разделов, пояснительной записки и графической части.

Целью ВКР является разработка лабораторного блока питания с быстродействующей защитой в соответствии с заданными параметрами.

Выпускная работа делится на следующие взаимосвязанные части: введение, небольшая подборка существующих блоков питания, рассмотрение требований, предъявляемых к блокам питания, определение достоинств и недостатков различных типов блоков питания, выбор подходящего нам варианта, разработка принципиальной схемы блока питания, расчет и выбор основных элементов. Для достижения намеченной цели были исследованы различные аспекты разработки БП с быстродействующей защитой, а также проведён анализ заданных требований к устройству и применению на практике в работе.

В заключении, я хотел бы отметить, что само создание лабораторного блока питания с быстродействующей защитой представляет собой актуальную задачу, чем было обусловлено принятие не самых простых стандартных решений.

## **Abstract**

Title of final qualifying work: “Laboratory power supply with high-speed protection.”

Volume 65 pages, 32 figures, 3 tables, 25 sources, 3 drawings and 1 electrical circuit diagram on A1 sheet.

The final work consists of three sections, an explanatory note and a graphic part.

The goal of the FQW is to develop a laboratory power supply with high-speed protection in accordance with the specified parameters.

The final work is divided into the following interrelated parts: introduction, a small selection of existing power supplies, consideration of the requirements for power supplies, determination of the advantages and disadvantages of various types of power supplies, selection of the option that suits us, development of a circuit diagram of the power supply, calculation and selection of basic elements. To achieve the intended goal, various aspects of the development of a power supply with high-speed protection were investigated, as well as an analysis of the specified requirements for the device and practical use in work.

In conclusion, I would like to note that the very creation of a laboratory power supply with high-speed protection is an urgent task, which led to the adoption of not the simplest standard solutions.

## Содержание

Введение.....	5
1 Состояние вопроса.....	6
1.1 Обзор лабораторных блоков питания с аналогичными функциями.....	6
1.2 Критерии для разработки .....	11
1.3 Классификация линейных и импульсных блоков питания. Выбор рабочего варианта .....	19
2 Разработка лабораторного блока питания с быстродействующей защитой .....	22
2.1 Разработка электрической принципиальной схемы блока питания .....	22
2.2 Выбор схемотехнических решений.....	25
2.3 Построение модуля регулятора .....	36
2.4 Модуль контроллера. Назначение элементов .....	38
3 Технологический раздел .....	43
3.1 Конструирование устройства, описание конструкции модулей и общего вида .....	43
3.2 Проектирование печатной платы .....	45
Заключение .....	53
Список используемой литературы и используемых источников.....	54
Приложение А Исходный код программы. ....	57

## Введение

В электротехнике лабораторный блок питания – это блок питания (БП), дополненный определённым набором служебных функций и имеющий документированную реакцию на различные нештатные ситуации, происходящие с подключенной к нему нагрузкой. С точки зрения метрологии, это измерительный прибор, хранящий эталон как минимум одной физической величины (электрическое напряжение) и воспроизводящий её с целью произведения электрических измерений в сопрягаемых приборах и их отладки. В наше время, электроника стала очень важной частью повседневной жизни. Разработка лабораторного БП с быстродействующей защитой требует детального подхода, а также понимания электронных компонентов.

Целью ВКР является разработка лабораторного блока питания с быстродействующей защитой, согласно заданным параметрам. Для достижения намеченной цели мы будем исследовать различные аспекты разработки БП с быстродействующей защитой, анализировать заданные требования к устройству и применять на практике в работе.

Лабораторные блоки питания служат источниками вторичного питания различных радиоэлектронных устройств. Они обеспечивают стабилизированным выходным напряжением и током электронные схемы при проведении лабораторных исследований или в процессе ремонта электрического или электронного оборудования. Важным моментом в выполнении ВКР является учет современных требований к БП с быстродействующей защитой, а также требования к энергоэффективности и безопасности.

## 1 Состояние вопроса

### Обзор лабораторных блоков питания с аналогичными функциями

Лабораторные блоки питания (ЛБП) отличаются от «обычных» тем, что позволяют изменять, а также держать под контролем свои параметры, а именно напряжение и ток, подстраивая эти параметры под требования питаемого устройства.

К лабораторным блокам питания также часто применяются повышенные требования по «чистоте» выходного напряжения, но единых требований в этом отношении нет — всё зависит от области применения. Лабораторные блоки питания существуют с весьма давних времён, и кое-где даже до сих пор используются древнесоветские изделия (а собственно, почему бы и нет, если они пребывают в хорошем и работоспособном состоянии?!).

Лабораторные блоки питания (ЛБП) могут быть импульсными и линейными, а также иметь аналоговую или цифровую регулировку параметров.

Кроме лабораторных блоков питания, существуют и, так скажем «попроще», они же регулируемые блоки питания. Регулируемые блоки питания позволяют только установить напряжение на выходе, а самого контроля и регулировки выходного тока не имеют. Регулируемый источник постоянного тока также ещё именуют «линейным источником питания», его схемы встраиваются и содержатся в различных блоках. Регулируемый блок питания принимает на входе переменный ток и даёт на выходе постоянный. Рассмотрим небольшую подборку лабораторных блоков питания.

Начнём с простого, но достаточно мощного импульсного лабораторного блока питания LW-K3010D, увидеть его мы можем на рисунке 1.



Рисунок 1 – Импульсный лабораторный блок питания LW-K3010D

Касаемо маркировки современных ЛБП, их максимальные выходные напряжение и ток указываются прямо в наименовании (как правило). Например, для обозреваемого блока это — 30 Вольт и 10 Ампер.

Но данный ЛБП всё-таки будет исключением: на самом деле он может отдать более высокое напряжение — до 32 Вольт («бонус» в 2 Вольт от производителя). По току он просто соответствует заявленным характеристикам без запаса. Этот блок имеет чисто аналоговую настройку выходных параметров. При этом напряжение устанавливается довольно точно (до 0.1 В) с помощью многооборотного переменника; а величина выходного тока стабилизации — наоборот, устанавливается довольно грубо с помощью «обычного» переменника. К положительным качествам этого блока можно отнести не только высокую отдаваемую мощность, но и вертикальную конструкцию, занимающую мало места на столе. [4]

Далее рассмотрим семейство импульсных лабораторных блоков питания от того же производителя (Longwei), но более продвинутых и дорогих: от PS-

302DF (30 В, 2 А) и до PS-1003DF (100 В, 3 А); всего — целых 10 (!) вариантов комбинаций напряжения и тока: это семейство блоков питания имеет всё ещё чисто аналоговое управление, но уже улучшенное: имеются регуляторы грубой и точной настройки как по напряжению, так и по току.

Кроме того, улучшена индикация: добавлены показания мощности; и все индикаторы сделаны четырёхзначными. А ещё, эти блоки имеют выход USB 5V 2A для зарядки мобильных телефонов.

Существует также серия похожих по параметрам импульсных блоков питания компании WANPTEK, но уже с другим дизайном. Данная серия включает восемь блоков с разными комбинациями токов и напряжений: от NPS306W (30 В, 6 А) и до NPS1203W (120 В, 3 А). Изображён на рисунке 2.

[6]



Рисунок 2 – Импульсный блок питания Wanptek

Один из серии этих блоков может отдать напряжение до 120 В; в то время, как у конкурентов максимум обычно составляет 100 В. Эти блоки



питания имеют узкую конструкцию, а плюс их в том, что они занимают мало места на рабочем столе. Индикация может быть трёх- или четырёхзначной; имеется индикатор мощности, отдаваемой в нагрузку.

Рассмотрим ещё один, на мой взгляд, самый необычный из рассматриваемых лабораторных блоков питания — это трёхканальный линейный лабораторный блок питания KORAD KA3305P, изображённый на рисунке 3.



Рисунок 3 – 3х-канальный линейный лабораторный блок питания KORAD KA3305P

Как и полагается линейным блокам питания, представленный блок содержит большое количество металла в виде трансформаторов и радиаторов, отсюда и следует, то, что он очень тяжелый, а если быть точнее вес данного линейного блока составляет 9,4 кг. [10]

Один из его каналов — фиксированный, поэтому отдаёт напряжение 5 В при токе до 3 Ампер. Остальные два канала уже идут регулируемые в пределах 0-30 В с током 0-5 А. Регулируемые каналы могут функционировать как «сами по себе», так и включены в параллельный или последовательный режим.

Кроме того, этот блок питания имеет возможность запоминания нескольких настроек и интерфейс USB для связи с компьютером. Ещё хочется отметить, что этот блок питания нужно эксплуатировать с особой осторожностью.

Рассмотренная нами и приведённая небольшая подборка, конечно же не может охватить всё многообразие моделей лабораторных блоков питания, но показывает основные их классы.

Лабораторные блоки питания могут отличаться не только по мощности, но и по способу управления (цифровое или аналоговое), наличию памяти режимов, индицируемым параметрам, количеству каналов, и, наконец, по способу формирования выходного напряжения — импульсные или линейные блоки питания. Линейные блоки питания — самые дорогие и тяжелые, поэтому их применение должно быть технически оправдано, не стоит их использовать без надобности. Приобретая источник питания, потребитель должен в полной мере представлять реальную стоимость владения устройством. Учитываются потенциальные потери, которые происходят из-за простоя аппаратуры, затраты на защиту ЛБП, возможный ремонт, степень надежности БП. Обычно они применяются в тех сферах, где предъявляются повышенные требования к уровню высокочастотных пульсаций и помех. Во всех остальных случаях можно применять импульсные блоки питания, цена на которые — достаточно гуманная. Подводя итог, хочется отметить, что лабораторный источник питания — это электронное устройство, которое формирует и регулирует напряжение и ток, а при изменении напряжения питающей сети, сопротивления нагрузки, поддерживает заданные значения с высокой точностью. Линейный лабораторный блок питания обладает большим быстродействием в сравнении с импульсным блоком питания и более предпочтителен для отладки устройств т.к. в случае нештатных ситуаций вероятность, что блок питания «спасет» устройство значительно выше. Если выбор пал на импульсный лабораторный блок питания следует быть более внимательным при отладке устройств. Для питания «прожорливых» устройств

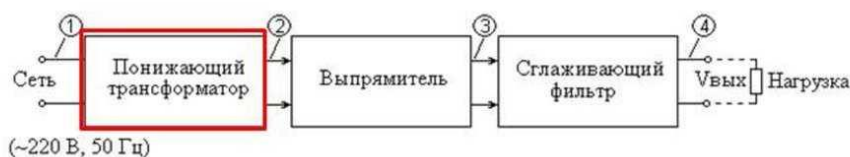
с током потребления более 5А предпочтительными будут импульсные лабораторные блоки питания. При этом следует выбирать качественные блоки питания проверенных фирм. [7]

## Критерии для разработки

По способу преобразования поступающего на вход напряжения блоки питания подразделяются на импульсные и линейные. И импульсный и линейный блоки питания выдают на выходе постоянное напряжение.

Для большего понимания вопроса, на рисунке 4 рассмотрим структуру построения импульсных и трансформаторных блоков питания.

### Линейный источник питания



### Импульсный источник питания



Рисунок 4 – Структура построения импульсных и трансформаторных блоков питания

Ввиду большой мощности ( $27 \text{ В} * 20 \text{ А} = 540 \text{ Вт}$ ), построение линейного регулятора напряжения неизбежно столкнется с рядом трудностей, которые тем сильнее себя проявляют, чем больше токи и рассеиваемая мощность на

регулирующих элементах. В связи с этим целесообразно выполнить сравнительную оценку двух типов регуляторов: линейного и импульсного. [8]

Ниже, в таблице 1 приведены сравнительные характеристики и оценки основных или важных с точки зрения разработки и эксплуатации, по моему мнению, характеристик этих двух типов регуляторов.

Таблица 1 – Сравнительные характеристики и оценки основных или важных с точки зрения разработки и эксплуатации

Параметр	Линейный	Импульсный	Предпочтение
Диапазон регулировки напряжений	Легко обеспечить регулировку от 0 до максимального напряжения	Имеется ряд ограничений	Лин.
Точность регулировки	Сравнительно легко обеспечить высокую точность установки напряжения	Точность установки ограничена пульсациями	Лин.
Качество выходного напряжения: шумы, пульсации, радиопомехи	Легко обеспечить низкий уровень шумов, пульсаций и практически отсутствие радиопомех	Трудно обеспечить низкий уровень помех и пульсаций	Лин.
Мощность в нагрузке	Трудно обеспечить большую мощность в нагрузке, превышающую несколько сотен Вт	Относительно просто достигается мощность в нагрузке до нескольких кВт	Имп.

Продолжение таблицы 1

КПД	Низкий КПД, обычно в среднем не выше 50%	Высокий КПД, близкий к	Имп.
Схемотехнические особенности	Применение трансформаторов, конденсаторов большой емкости, мощных полупроводниковых приборов на теплоотводах большой площади.	Применение импульсных трансформаторов, преобразование высокого напряжения непосредственно в напряжение нагрузки, наличие быстродействующих п/п приборов, LC – фильтров в цепях нагрузки.	Имп.
Сложность, надежность, безотказность, ремонтпригодность	Схемотехнически как правило более простые. Относительно надежны, долговечны. В основном отказы носят износочный характер. Как правило неисправности легко диагностируются и устраняются.	Схемотехнически как правило более сложные. Надежность и долговечность ниже линейных. Отказы бывают как износочными, так и катастрофическими без видимых причин. Сложны в диагностике и ремонте.	Лин.
Габариты, вес, стоимость	Большие габариты и вес. Высокая стоимость. Высокие требования к обеспечению теплового режима.	Малые габариты и вес. Низкая стоимость. Умеренные требования к обеспечению теплового режима.	Имп.

Сравнение в таблице 1 показывает, что серийно выпускаемые блоки питания большой мощности, у которых небольшой диапазон регулировки напряжений и невысокие требования к качеству стабилизированного напряжения, следует проектировать импульсными. Напротив, источники

питания небольшой мощности, для которых важно обеспечение высокой стабильности напряжения в широком диапазоне, низкого уровня шумов, пульсаций, помех, например, лабораторных источников питания, следует выполнять линейными. [16]

В нашем случае по большинству пунктов предпочтительнее импульсный источник питания. Тем не менее, я пришел к решению построить линейный источник питания, так как считаю пункты 2, 3, 7 более весомыми (имеющими больший весовой коэффициент при оценке по некоторому комплексному критерию), чем остальные.

Это решение основано на следующих выводах:

– Диапазон выходных напряжений более чем 2-кратный, имеются высокие требования к узлу защиты от перегрузок в широком диапазоне токов, имеются требования в отношении удобства и наглядности регулировок, индикации и сигнализации.

Это позволяет сделать вывод о том, что разрабатываемый источник предполагается использовать как универсальный (лабораторный) источник питания. В этом случае требования к КПД, размерам, весу и стоимости не имеют, как правило, решающего значения. Зато требования к качеству стабилизированного напряжения, надежности, ремонтпригодности являются наиболее значимыми.

– Наиболее сложные с точки зрения обоснования решения пункты – это использование габаритных силовых трансформаторов, батареи конденсаторов большой емкости в выпрямителе, превышение допустимой мощности рассеивания на регулирующих полупроводниковых приборах, низкий КПД и трудности обеспечения отвода тепла.

С целью частичного преодоления этих недостатков линейных регуляторов была предпринята попытка применить не совсем стандартные схемотехнические приемы, суть которых сведена в таблицу 1.2, которая представлена ниже.

Таблица 2 – Схемотехнические приёмы

Проблема	Способ преодоления	Оценка результата
<p>Большие габариты и масса силовых трансформаторов, большие габариты и масса батареи конденсаторов, Низкий коэффициент использования по току трансформаторов и выпрямительных диодов, многократная перегрузка при включении за счет больших зарядных токов конденсаторов.</p>	<p>Предлагается использовать трехфазную сеть переменного тока. Применение трехфазного трансформатора несколько сокращает габариты и вес. Трехфазная сеть также позволит увеличить коэффициент использования силовых трансформаторов и диодов по току и отказаться от применения батареи конденсаторов большой емкости.</p>	<p>Некоторое снижение габаритов и массы силового трансформатора, «разгрузка» выпрямительных диодов, возможность использовать электролитические конденсаторы относительно небольшой емкости. Все вместе устраняет проблему перегрузки по току при включении. Основной недостаток: необходимость наличия трехфазной сети, что резко ограничивает применение устройства в домашних условиях. Однако в условиях лаборатории, для которых предположительно и разрабатывается это устройство, этот недостаток не является критическим.</p>

Продолжение таблицы 2

Проблема	Способ преодоления	Оценка результата
<p>Большая мощность рассеивания на регулирующих приборах, низкий КПД,</p>	<p>Следующие схемотехнические решения:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- параллельное включение нескольких транзисторов с уравнивающими резисторами в эмиттерной цепи;</li> <li>- использование ступенчатого выпрямленного напряжения и ступенчатого выходного каскада регулятора.</li> </ul> <p>Применение автоматического переключения отдельных ступеней с применением диодных развязок.</p>	<p>Параллельное включение транзисторов позволяет увеличить рассеиваемую мощность на каждой ступени до 200-400 Вт.</p> <p>С учетом того, что выпрямленное напряжение питания ступени превышает стабилизированное не более, чем на 10-15В, это позволит обеспечить требуемый ток в нагрузке.</p> <p>При этом КПД может быть более 50% при максимальном для ступени выходном напряжении.</p> <p>Например, напряжение питания первой ступени около 25В, а максимальное напряжение этой ступени (когда транзисторы еще открыты почти полностью) – около 15В.</p> <p>В этом случае  <math>\text{КПД} \approx (15/25) * 100\% = 60\%</math>.</p>
<p>Большое выделение тепла, сложность охлаждения, теплонагруженных приборов, опасность перегрева.</p>	<p>Применение принудительного обдува охладителей при помощи кулеров.</p> <p>Использование аварийного биметаллического датчика перегрева охладителей.</p>	<p>Компьютерные кулеры просты в применении, весьма эффективны в соответствии со своим основным назначением.</p> <p>Имеются кулеры с выводом контроля оборотов вала, что позволяет контролировать их работоспособность.</p> <p>Срабатывание аварийного датчика перегрева мгновенно обесточит устройство и предупредит опасный перегрев.</p>



Ниже, на рисунках 5 - 8 приведены упрощенные схемы, иллюстрирующие предлагаемые технические решения с целью частичного преодоления основных проблем проектирования источника питания.

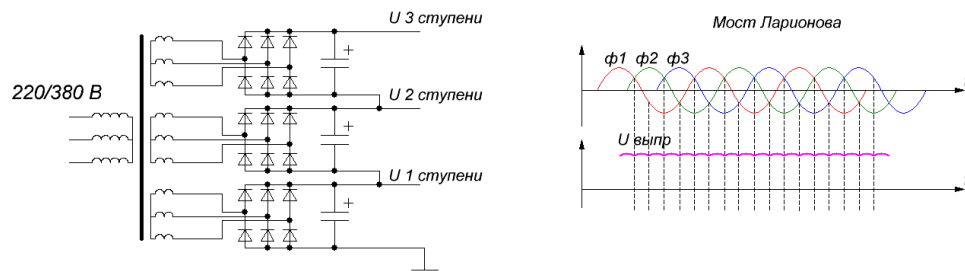


Рисунок 5 – Применение трёхфазного трансформатора моста Ларионова и иллюстрация функционирования моста Ларионова

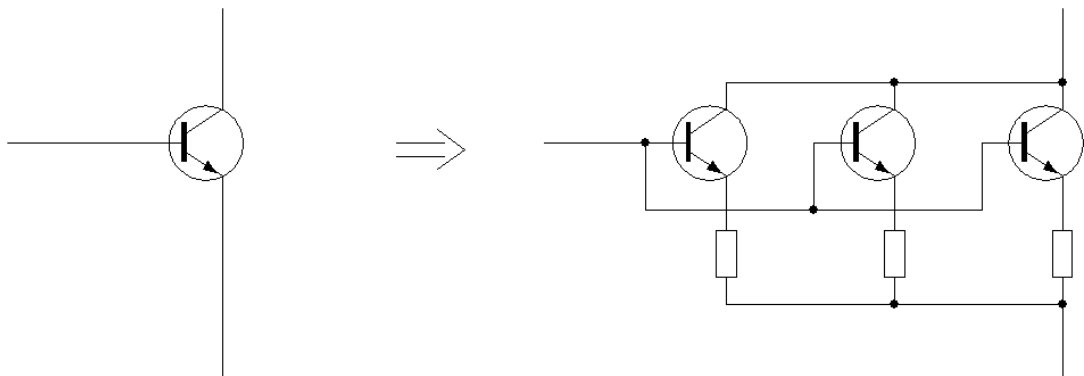


Рисунок 6 – Параллельное включение биполярных транзисторов с уравнивающими резисторами в цепях эмиттеров.

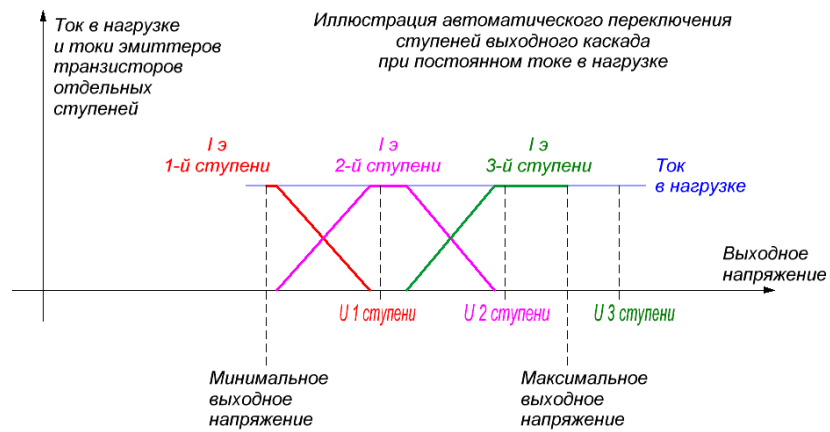
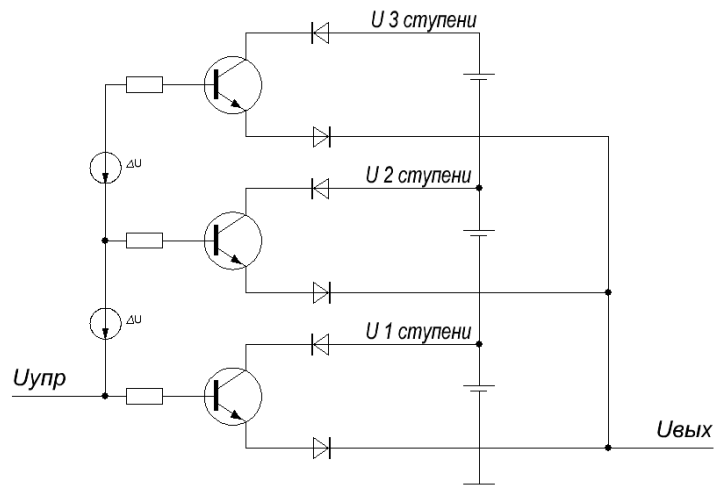


Рисунок 7 – Многоступенчатый выходной каскад регулятора и иллюстрация работы отдельных ступеней.

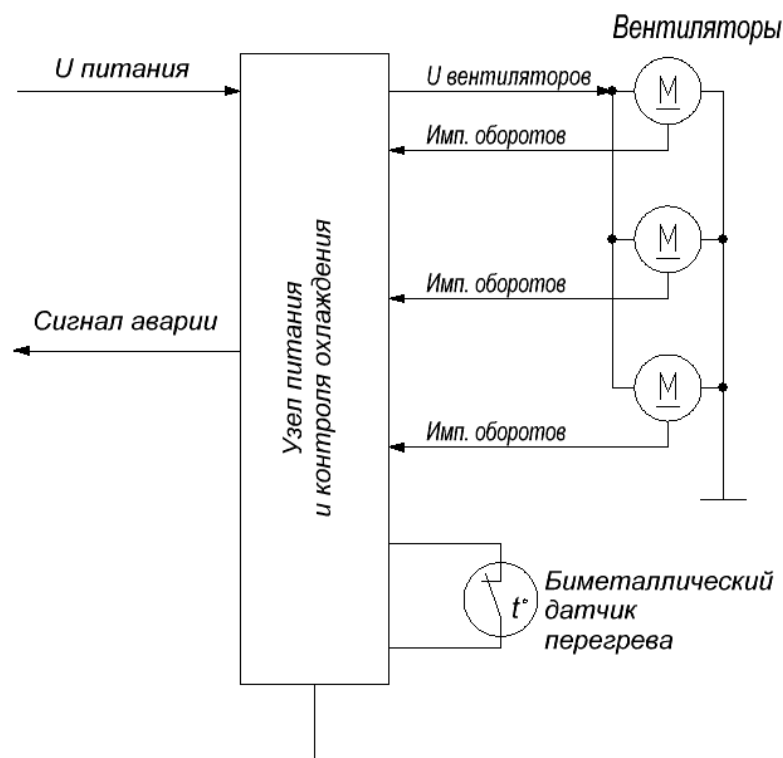


Рисунок 8 – Охлаждение теплоотводов посредством принудительного обдува вентиляторами (кулерами), контроль исправности вентиляторов и перегрева теплоотвода (охладителя).

### 1.3 Классификация линейных и импульсных блоков питания. Выбор рабочего варианта

В линейных (БП) основной процесс преобразования электроэнергии выполняется с использованием трансформатора. Его первичная обмотка спроектирована для сетевого напряжения, а вторичная, как правило, предназначена для понижения напряжения. Следующим компонентом является выпрямитель, на котором синусоида уравнивается и преобразуется в пульсирующее напряжение. Этот этап реализуется с использованием выпрямительных диодов. Диод может быть одиночным, или же может быть установлен диодный мост (мостовая схема). Основное различие между ними заключается в частоте импульсов, которые формируются на выходе. Затем

следует стабилизатор и фильтр, которые придают выходному напряжению необходимый уровень и форму. В результате получается постоянное напряжение на выходе.

В отличие от линейных источников питания, импульсные источники питания используют твердотельные компоненты для модуляции и регулирования входящих напряжений. Эти источники питания основаны на высокочастотной коммутации с использованием силовых транзисторов, что делает их шумными, но при этом очень энергоэффективными, легкими и компактными.

В импульсных блоках питания на входе устанавливается сетевой фильтр, который выполняет задачу фильтрации высокочастотных колебаний, чтобы избежать их попадания в сеть. Такие колебания могут повлиять на работу соседних устройств, исказив их работу. Затем идет сглаживающий фильтр, который выпрямляет синусоидальное напряжение. После этого сигнал поступает на инвертор, который преобразует его в импульсы с положительной и отрицательной полярностью. Параметры этих импульсов, такие как частота и скважность, устанавливаются с помощью блока управления. Высокочастотные импульсы поступают на трансформатор, который выполняет гальваническую развязку от сети. Эти трансформаторы обычно небольшие, поскольку с увеличением частоты требуется всё меньше материала для их сердечников. Здесь важно отметить, что сердечник трансформатора может быть сделан из ферромагнитных пластин (в отличие от линейных блоков питания, где требуется более дорогая электромагнитная сталь). [13]

Можно сделать вывод, что у каждого типа этих преобразователей есть свои плюсы и минусы, компенсирующие друг друга. Просто нужно эти преобразователи применять каждые для своих целей. Иногда также встречаются гибридные системы. Сначала высокое напряжение понижается до более низкого за счёт импульсного преобразователя. А потом на выходе стоит

линейный преобразователь. Это способствует большому КПД устройства. И хорошей фильтрации выходного напряжения.

Подводя итог анализа выше, было принято решение выбрать линейный регулируемый стабилизатор напряжения с быстродействующей защитой от перегрузок и коротких замыканий в нагрузке. Отдаю предпочтение линейному, так как предполагаю, что он лабораторный, и в этом случае низкие шумы и отсутствие помех гораздо важнее КПД, веса, размеров и стоимости. ЛБП должен быть стабильным, малошумящим и не создавать помех. То есть требования к качеству выходного напряжения у них выше, чем для «обычных» БП.

## 2 Разработка лабораторного блока питания с быстродействующей защитой

### Разработка электрической принципиальной схемы блока питания

Питание стабилизатора осуществляется от трехфазной сети переменного тока 220/380 В 50 Гц. Такой выбор обусловлен стремлением упростить цепи выпрямления и сглаживания выпрямленного напряжения. Считаю, что ограничения, связанные с необходимостью наличия трехфазной сети, являются приемлемыми, так как предполагается использовать разрабатываемое устройство в условиях лаборатории. На рисунке 9 рассмотрим структурную схему электрического блока питания.

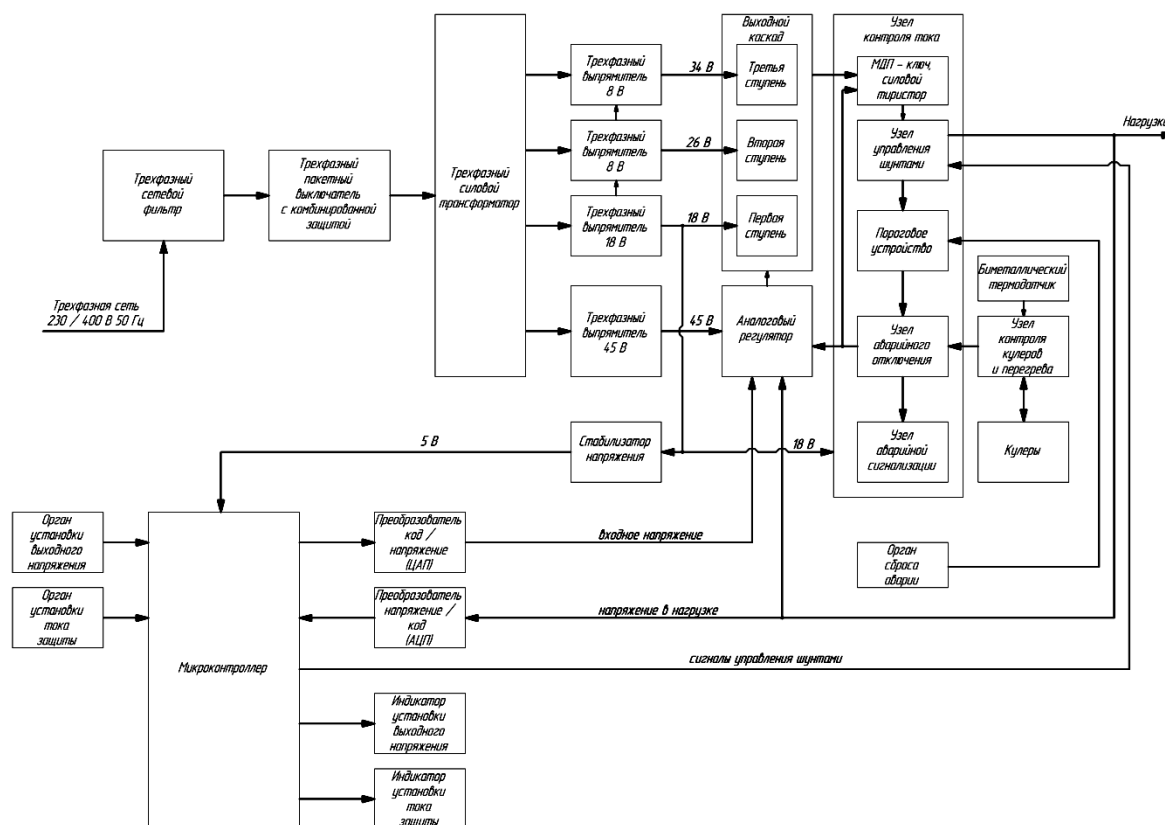


Рисунок 9 – Описание структурной электрической схемы.

Сетевой трехфазный фильтр снижает уровень высокочастотных помех, проникающих из трехфазной сети, а также проникновение помех в трехфазную сеть при включении и отключении устройства. Трехфазный

трансформатор имеет множество групп вторичных обмоток, нагруженных на соответствующие выпрямители. Каждый выпрямитель представляет собой мост Ларионова с емкостным сглаживанием выпрямленного напряжения. Благодаря тому, что частота пульсаций равна ушестеренной частоте сети, а размах пульсаций не превышает 14% среднего выпрямленного напряжения, снижается запас по минимальному питающему напряжению выходного каскада стабилизатора.

Выпрямители 18В, 8В и 8В рассчитаны на большие токи. Они предназначены для питания ступеней выходного каскада напряжениями 18В, 26В и 34В. (Ранее рассмотрен принцип построения многоступенчатого выходного каскада, позволяющий снизить рассеивание мощности на регулирующих полупроводниковых приборах и повысить КПД стабилизатора). Выпрямитель 45В предназначен для питания слаботочных схем аналогового регулятора, который управляет выходным каскадом. Выходное напряжение через узел контроля тока заводится в нагрузку и подается на вход обратной связи аналогового регулятора. Стабильность выходного напряжения и низкое выходное сопротивление стабилизатора достигается за счет большого усиления аналогового регулятора, выполненного на базе высоковольтного операционного усилителя.

Узел контроля тока состоит из следующих структурных элементов:

- МДП ключ и силовой тиристор;
- Узел управления шунтами;
- Пороговое устройство;
- Узел аварийного отключения;
- Узел аварийной сигнализации;
- Узел охлаждения.

Выделение перечисленных элементов в отдельный узел вызвано высокими требованиями к быстродействию защиты при превышении тока в нагрузке.

Теперь кратко опишем перечисленные элементы.

МДП ключ представляет собой схему на базе мощного МДП транзистора, который нормально открыт и представляет собой низкое сопротивление току в нагрузке (единицы миллиом). Силовой тиристор нормально закрыт, поэтому ток через него практически не протекает.

При срабатывании узла аварийного отключения МДП ключ запирается, отсекая выход стабилизатора от нагрузки, а тиристор открывается, быстро разряжая конденсаторы большой емкости, включенные параллельно выходу стабилизатора (и, возможно, в самой нагрузке). Благодаря большому допустимому неповторяющемуся току силового тиристора он выдерживает очень большой ток короткого замыкания и обеспечивает тем самым требуемое малое время для обесточивания нагрузки.

Узел управления шунтами состоит из набора шунтов, предназначенных для измерения тока в нагрузке и ключей для коммутации этих шунтов с использованием сильноточных электромагнитных реле. В зависимости от установленного тока срабатывания защиты (от 50 мА до 20А) подключается необходимый шунт, падение напряжения на котором заводится на вход порогового устройства.

Пороговое устройство представляет собой узел на базе дифференциального усилителя, аналогового компаратора и триггера. Превышение допустимого тока вызывает превышение допустимого падения напряжения на шунте, превышение порога компаратора и взведение триггера. Этот триггер управляет узлом аварийного отключения и узлом аварийной сигнализации.

Сброс аварии производится сбросом триггера посредством органа сброса аварии – кнопки или переключателя.

Узел аварийного отключения управляет отключением аналогового регулятора, дополнительно запирающим МДП транзистора и отпиранием силового тиристора. Он представляет собой различные транзисторные ключи.

Узел аварийной сигнализации построен на базе светодиодных индикаторов и т.н. «баззера» (buzzer, электронного зуммера).



Управление (кроме аварийного отключения и сигнализации) и индикация устройства производятся под управлением микроконтроллера.

Узел охлаждения управляет кулерами (вентиляторами) и контролирует состояние биметаллического термодатчика (термостата) с НЗ контактами.

Остановка вентилятора на несколько секунд (отсутствие импульсов оборотов) или размыкание контактов термодатчика приведет к срабатыванию порогового устройства, аварийной сигнализации и отключению нагрузки.

Управление выходным напряжением осуществляется посредством органа управления выходным напряжением – пары кнопок или поворотного энкодера. Микроконтроллер управляет ЦАП, который генерирует требуемое напряжение, которое заводится на вход аналогового регулятора.

Фактическое выходное напряжение заводится на вход АЦП, откуда уже в виде кода вводится в микроконтроллер. Микроконтроллер управляет индикаторами отображения напряжения на выходе стабилизатора.

Ток срабатывания защиты аналогично устанавливается посредством органа управления выходным напряжением – пары кнопок или поворотного энкодера. Микроконтроллер управляет ключами узла управления шунтами и индикаторами отображения тока защиты. Отдельные узлы устройства питаются различными напряжениями.

Так, например, узел контроля тока питается относительно низким напряжением первой ступени выходного каскада (18В). От этого же напряжения питается стабилизатор +5В, обеспечивающий питанием микроконтроллер. Аналоговый регулятор питается напряжением 45В от отдельного выпрямителя.

## **Выбор схемотехнических решений**

На схеме ниже приведена модель узла контроля тока (согласно схеме электрической структурной). Рассмотрим устройство и функционирование этого узла на рисунке 10.

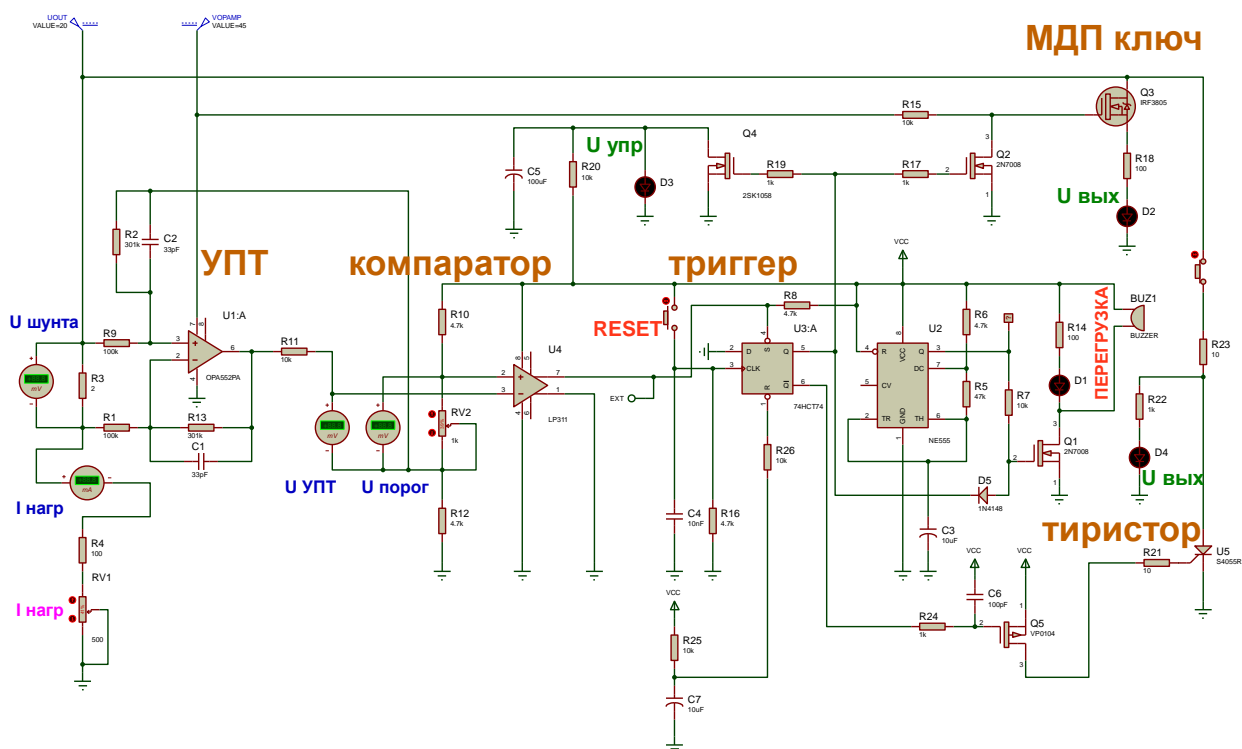


Рисунок 10 – Модель узла контроля тока.

В приведенной модели выходное напряжение стабилизатора символизирует источник постоянного напряжения  $U_{OUT}=20V$ , шунт для измерения тока символизирует  $R3=2\text{ Ом}$ , исследование производится при токе срабатывания  $50\text{ мА}$ . Отметим, что все шунты (для всех пределов тока срабатывания) выбраны так, чтобы при токе срабатывания падение напряжения на шунте равнялось  $0.1V$ .

Соответственно, при токе  $50\text{ мА} = 0.05A$  получим сопротивление шунта  $0.1V/0.05A = 2\text{ Ом}$ .

Рассмотрим таблицу 3.1 сопротивлений шунтов, рассчитанных подобным образом, для разных токов срабатывания приведена ниже.

Таблица 3 – Сопротивлений шунтов.

Ток, А									
--------	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Сопротивление, Ом									
----------------------	--	--	--	--	--	--	--	--	--

При исследовании модели неважно, каков ток срабатывания, поэтому выберем минимальный (50 мА), для которого шунт имеет максимальное сопротивление. Это обусловлено тем, что входное сопротивление усилителя на ОУ U1:A несравнимо выше сопротивления шунта и не оказывает на него заметного влияния. Протекание тока через шунт вызывает падение напряжения на нем. Ток устанавливаем потенциометром RV1 и контролируем миллиамперметром PA1. Падение напряжения на шунте контролируем милливольтметром PV1. Падение напряжения на шунте подводится к входам дифференциального усилителя на базе ОУ U1:A. Усилитель имеет коэффициент передачи  $K=3$ , поэтому при падении напряжения на шунте в 0.1В увеличение выходного напряжения ОУ равно 0.3В. Ввиду однополярного питания ОУ выходное напряжение смещено примерно на 2В, что достаточно для обеспечения линейного режима работы ОУ. Это смещение достигается при помощи резистивного делителя R10, R12, RV2. Реостатом RV12 устанавливается порог переключения компаратора U4, примерно равный 0.3В. Точное значение этого порога зависит от величины напряжения смещения и входных токов компаратора, которые вносят некоторую погрешность. Превышение прироста выходного напряжения над порогом, установленным реостатом RV2, вызывает переключение компаратора: его выходной потенциал из высокого становится низким и взводит триггер U3:A. Триггер, в свою очередь, разрешает работу МДП ключа на транзисторе Q1. Генератор на базе U2 генерирует периодический сигнал в форме меандра со скважностью примерно 2 и частотой примерно 2 Гц. Этот сигнал периодически отпирает МДП транзистор Q1, который включает светодиодный индикатор D1 и баззер BUZ1. Кроме того, этот генератор используется в узле контроля охлаждения.

Таким образом, превышение потребляемого тока вызывает включение прерывистой световой и звуковой сигнализации. Кроме того, производится

отключение и закорачивание нагрузки и входного (управляющего) напряжения линейного регулятора. Для удобства моделирования отключение и закорачивание нагрузки разделены: нагрузка, которую символизирует цепь R18, D2, отключается МДП транзистором Q2, а закорачивание производится цепи R22, D4 тиристором U5. При этом ток КЗ, достаточный для удержания тиристора в открытом состоянии, ограничен резистором R23 на уровне примерно 2А.

Входное напряжение линейного регулятора закорачивается МДП транзистором Q4. Такие отклонения от реальной схемы устройства вызваны стремлением наглядно проиллюстрировать процесс срабатывания схемы защиты от перегрузки и восстановления работоспособности после сброса аварии. После включения триггер U3:A оказывается принудительно сброшенным импульсом низкого уровня на входе R, который формируется цепочкой R25, C7. Триггер запирает МДП ключ Q2 подачей низкого уровня на его затвор через диод D5. При этом транзисторы Q2, Q4 (с каналом N-типа) оказываются запертыми низким уровнем на затворах, а Q5 (с каналом P-типа) заперт высоким уровнем на затворе.

Соответственно:

- так как Q4 заперт, управляющее напряжение на входе линейного регулятора присутствует (что символизируется свечением светодиода D3);
- на стоке Q2 высокий потенциал, который присутствует на затворе Q3, транзистор Q3 открыт и его канал представляет мизерное сопротивление для тока в нагрузке, нагрузка подключена к выходу стабилизатора, что символизирует свечение светодиода D2;
- поскольку Q5 заперт, тиристор U5, также, заперт и нагрузка не закорочена, что символизирует свечение светодиода D4.

При превышении тока защиты триггер U3:A взводится. При этом происходит следующее:

– транзистор Q4 закорачивает вход линейного регулятора и его управляющее напряжение становится практически равным нулю, что символизирует гашение светодиода D3;

– транзистор Q2 отпирается и запирает Q3, последний отключает нагрузку от выхода стабилизатора, что символизирует гашение светодиода D2;

– транзистор Q5 отпирается и вызывает протекание отпирающего тока в цепи управляющего электрода тиристора U5; тиристор отпирается и закорачивает нагрузку, что символизирует гашение светодиода D4.

Кроме того, периодически (примерно 2 раза в секунду) включается светодиод «Перегрузка» и раздается звуковой сигнал, так как было описано выше.

Заметим, что вход S триггера D3:A является приоритетным по сравнению с входом D синхронной записи. Поэтому пока на входе S присутствует низкий уровень (из-за переключения компаратора вследствие перегрузки по току), сбросить триггер нельзя.

Когда ток в нагрузке отсутствует, можно произвести сброс аварии нажатием кнопки RESET. При этом на входе С триггера появляется перепад уровня «0»→«1», который записывает в триггер «0», то есть сбрасывает его.

При этом происходит следующее:

– транзистор Q4 запирается, раскорачивает вход управления линейного регулятора и по мере зарядки конденсатора C5 управляющее напряжение плавно достигает установленного значения; плавность увеличения выходного напряжения предотвращает бросок тока через конденсатор большой емкости параллельно нагрузке, который вызвал бы ложное срабатывание защиты;

– транзистор Q2 запирается, Q3 отпирается и подсоединяет нагрузку к выходу стабилизатора;

– транзистор Q5 запирается и выключает ток управляющего электрода тиристора U5; реально U5 к тому времени заперт, так как на самом деле через

него не протекает ток удержания вследствие того, что транзистор Q3 отключает нагрузку.

Напомним: в модели цепи отключения и закорачивания намеренно разнесены с целью удобства демонстрации работы модели схемы защиты.

Ниже, на рисунках 11 - 16 приведены скриншоты симуляции процесса срабатывания и сброса.

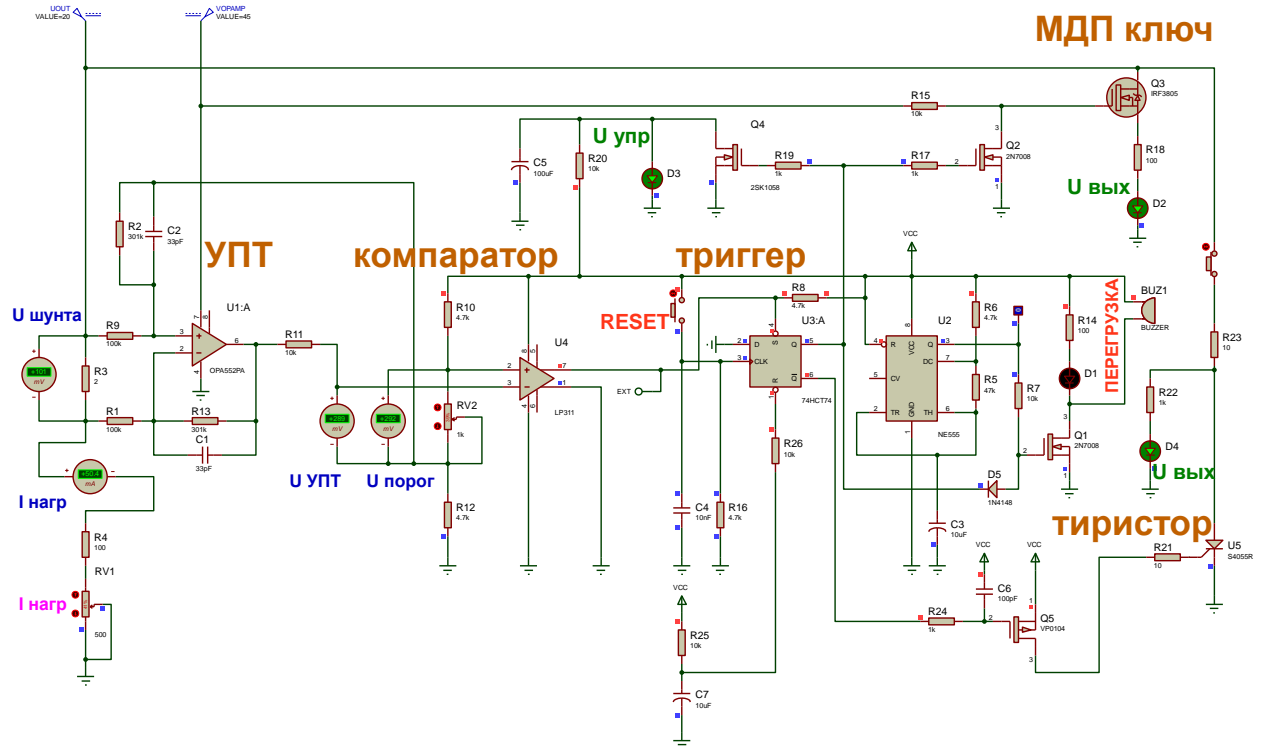


Рисунок 11 – Скриншот симуляции процесса срабатывания и сброса

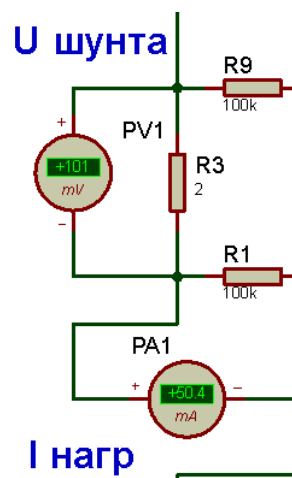


Рисунок 12 – Скриншот симуляции процесса срабатывания и сброса.

Включение, ток в нагрузке равен предельному (с некоторой погрешностью 50 мА). Зеленые светодиоды своим свечением символизируют наличие управляющего и выходного напряжений.

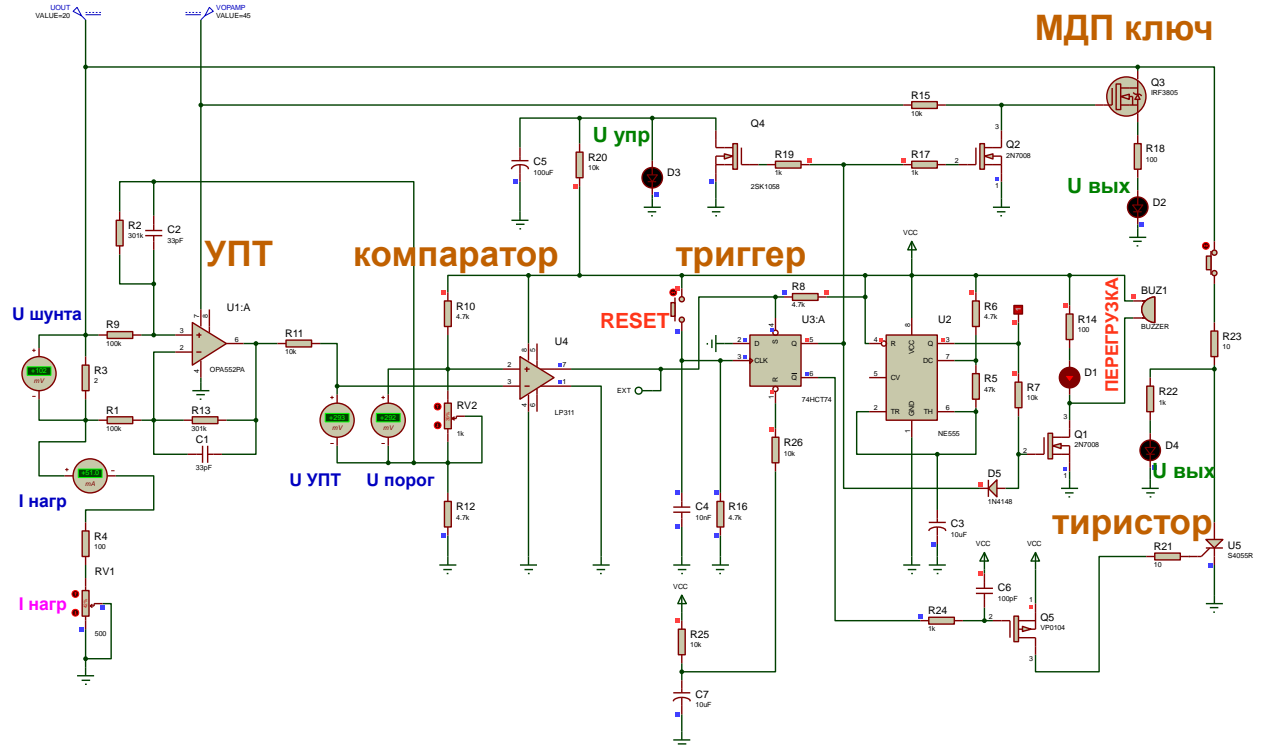


Рисунок 13 – Скриншот симуляции процесса срабатывания и сброса.

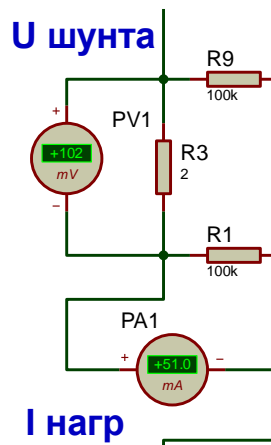


Рисунок 14 – Скриншот симуляции процесса срабатывания и сброса.

Ток нагрузки превысил порог. Срабатывание схемы защиты. Напряжение управления отсутствует, нагрузка отключена и замкнута, что

символизируют погашенные зеленые светодиоды. Красный светодиод периодически включается вместе с баззером, сигнализируя о перегрузке. В этом состоянии нажатие на кнопку RESET не дает эффекта сброса. Восстановим исходные условия (ток меньше порогового) и нажмем кнопку RESET.

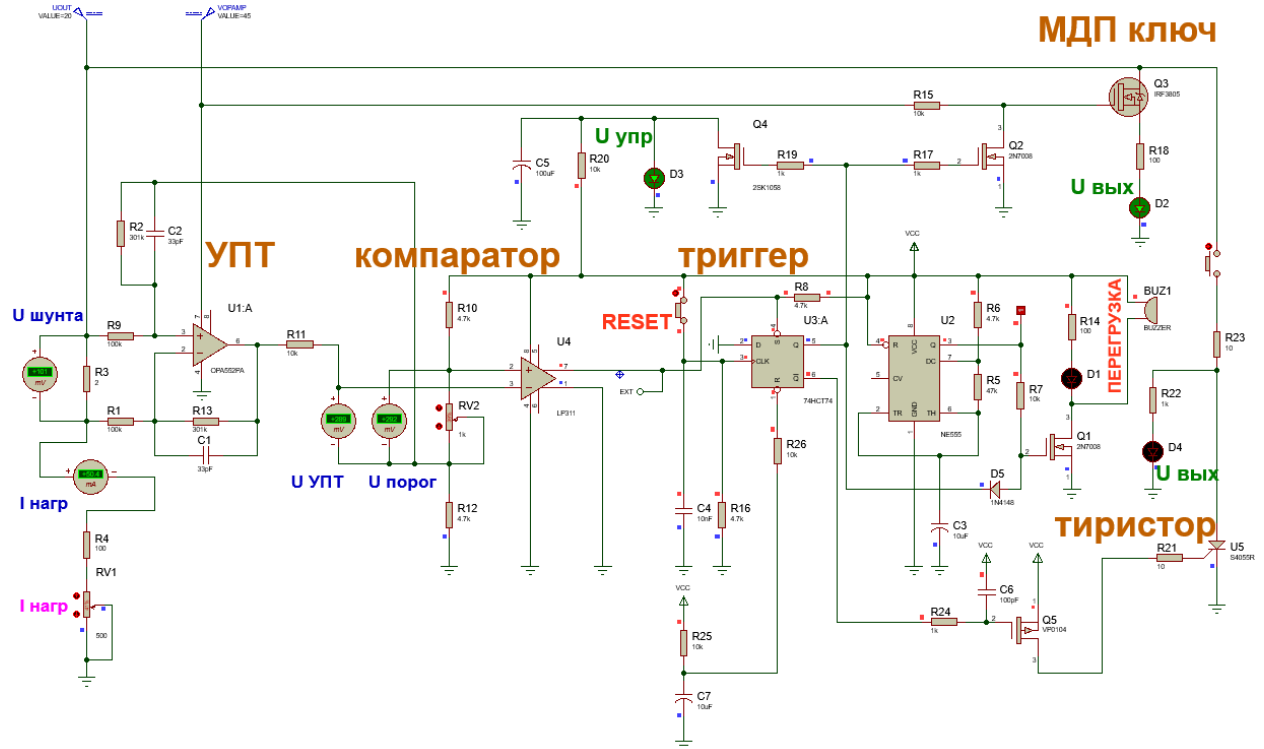


Рисунок 15 – Скриншот симуляции процесса срабатывания и сброса

После отпускания RESET схема находится в исходном состоянии.

Модель узла контроля кулеров и перегрева рассмотрим отдельно.



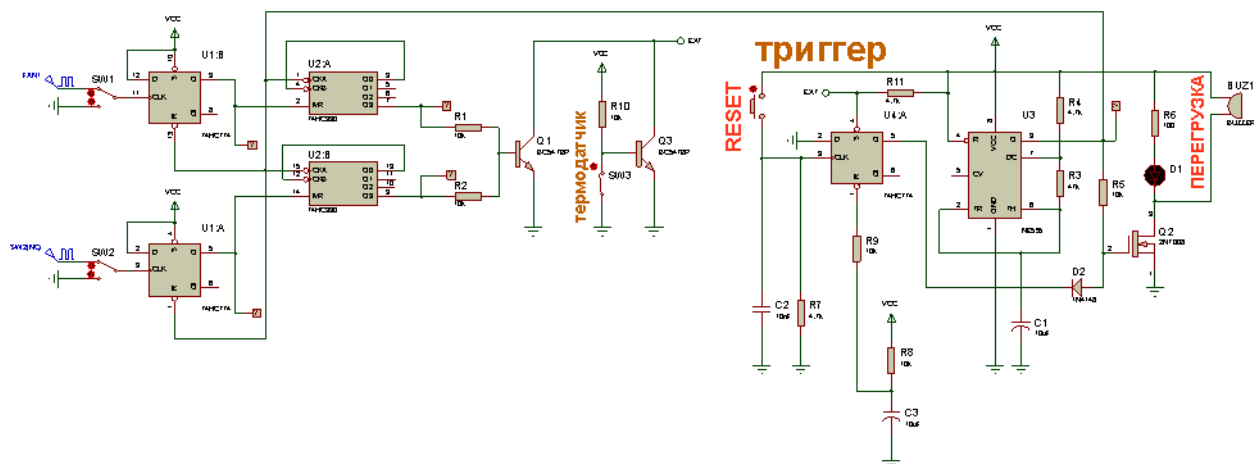


Рисунок 16 – Модель узла контроля кулеров и перегрева

Собственно узел контроля кулеров и перегрева включает в себя триггеры U1, счетчики U2 и транзисторные ключи Q1, Q3. Остальные элементы – триггер U4, генератор U3, ключ Q2 и связанные с ними радиоэлементы – это часть модели узла контроля тока, рассмотренные выше.

Кулеры – это низковольтные вентиляторы на базе бесщеточных двигателей постоянного тока, имеющие выход датчика оборотов вала. Датчики оборотов кулеров подключены к входам D – триггеров U1:A, U1:B, поэтому каждый импульс оборота взводит соответствующий триггер. Взведенный триггер производит сброс (установку в нуль) соответствующего счетчика. Импульсы от генератора с частотой около 2 Гц сбрасывают D – триггеры и одновременно поступают на счетные входы счетчиков. Часто следующие импульсы оборотов взводят триггеры в отсутствие импульсов сброса. Поэтому счетчики сбрасываются часто и не успевают досчитать до кода 1000 (8). Остановка одного из кулеров приводит к тому, что соответствующий триггер не будет взведен и соответствующий счетчик не будет сброшен. Если такая ситуация сохранится в течение 8 импульсов генератора, на выходе Q3 соответствующего счетчика появится высокий потенциал, который откроет транзистор Q1. При этом низкое напряжение на его коллекторе вызовет взведение триггера U4. Результат будет таким же, как

и в случае перегрузки по току: отключение и закорачивание нагрузки, снятие напряжения управления на входе линейного регулятора и включение периодической световой и звуковой сигнализации. К такому же результату приведет и размыкание контактов термодатчика SW3, вызванное перегревом теплоотвода силовых транзисторов выходного каскада стабилизатора. Ниже приведены скриншоты моделирования узла контроля кулеров и перегрева.

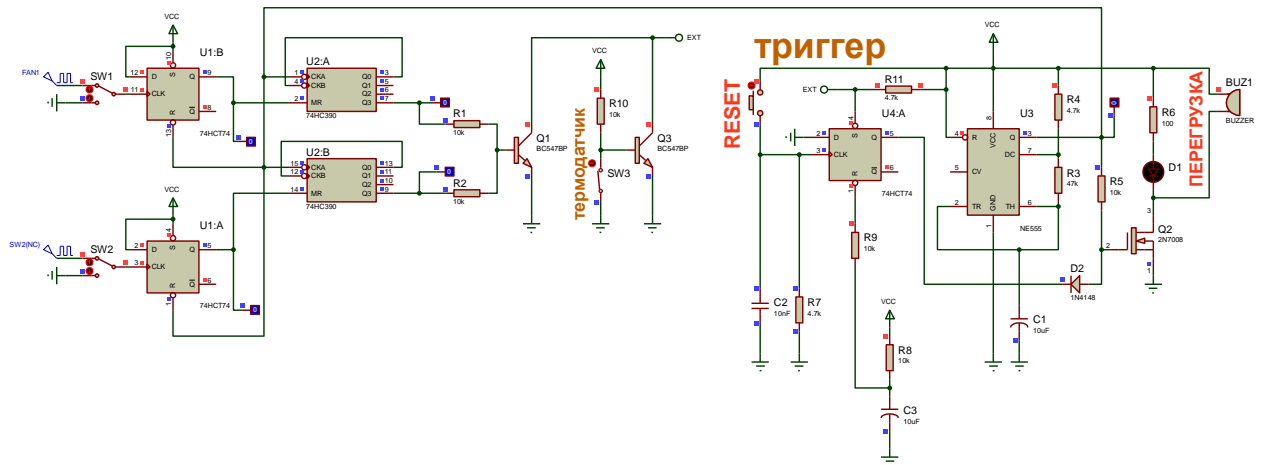


Рисунок 17 – Скриншот моделирования узла контроля кулеров и перегрева

Нормальная работа: счетчики периодически сбрасываются, контакты термодатчика замкнуты.

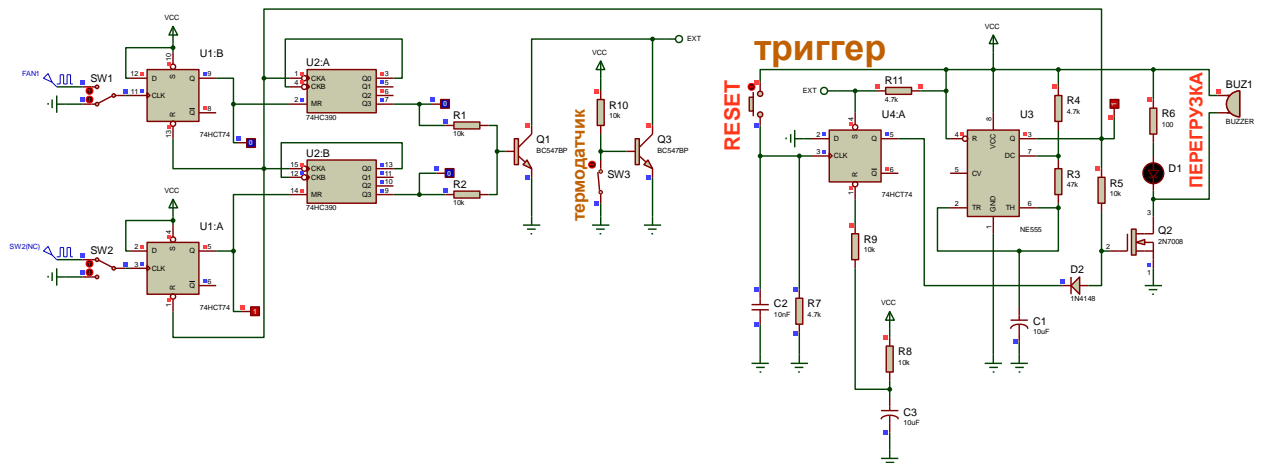


Рисунок 18 – Скриншот моделирования узла контроля кулеров и перегрева

Неисправен, верхний по схеме, кулер. Идёт счёт верхнего счетчика.

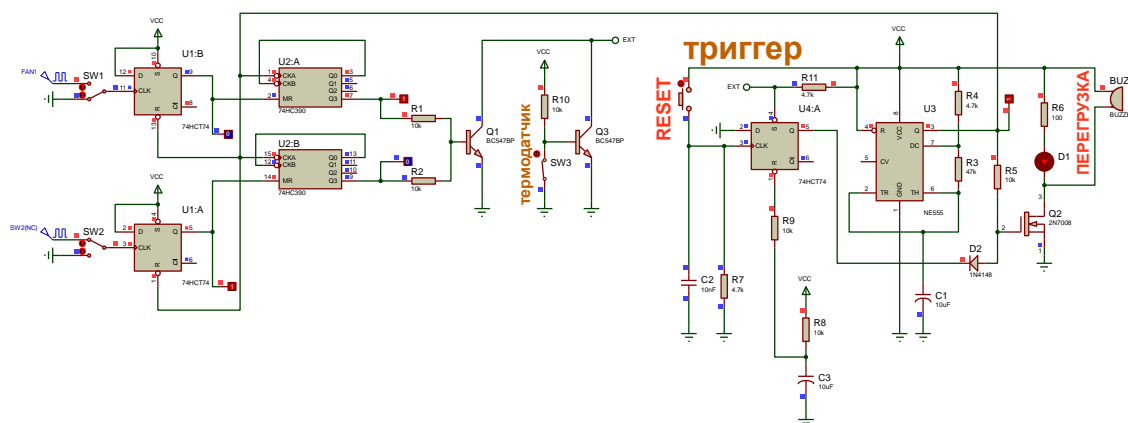


Рисунок 19 – Скриншот моделирования узла контроля кулеров и перегрева

Верхний по схеме счетчик досчитал до 1000 (8) и вызвал срабатывание схемы защиты (включилась световая и звуковая сигнализация).

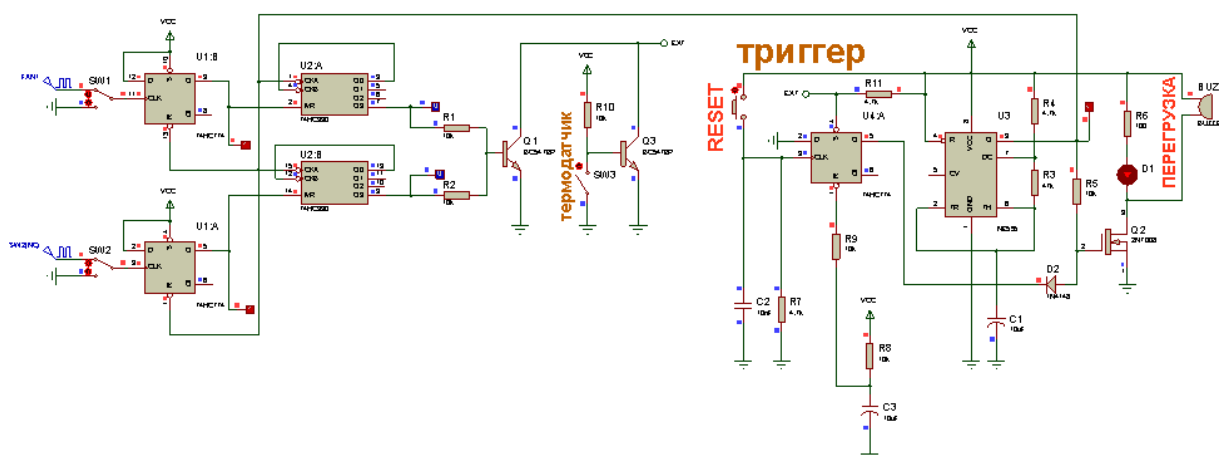


Рисунок 20 – Скриншот моделирования узла контроля кулеров и перегрева

Срабатывание схемы аварийной защиты вызвано размыканием контактов термодатчика (перегревом теплоотвода). Приведенные скриншоты убеждают в работоспособности узлов контроля тока, контроля кулеров и перегрева.

Проверить скорость срабатывания защиты на модели затруднительно, однако, приняты достаточные меры для достижения требуемых параметров. Ввиду того, что суммарное время срабатывание компаратора и триггера не превышает 150-200 нс, время выключения нагрузки определяется следующими факторами, которые трудно поддаются достоверному моделированию.

Это следующие факторы:

– время реакции усилителя, которое сильно зависит от условий, при которых произошло превышение тока в нагрузке (короткое замыкание ненагруженного стабилизатора или превышение тока нагрузки уже на пределе допустимого); оно зависит от максимальной скорости нарастания выходного напряжения ОУ, которое достигает 24В/мкс, это позволяет надеяться, что задержка за счет инерционности ОУ не превысит десятков наносекунд;

– время отпирания Q2 и запираания Q3;

– время лавинообразного увеличения тока через тиристор и разряд выходной емкости стабилизатора.

Эти параметры могут быть проверены на макете, собранном из реальных радиоэлементов.

### **2.3 Построение модуля регулятора**

В качестве упрощенной схемы рассмотрим модель устройства, построенную в среде интерактивного симулятора Proteus8. Изображена на рисунке 2.13. [15]

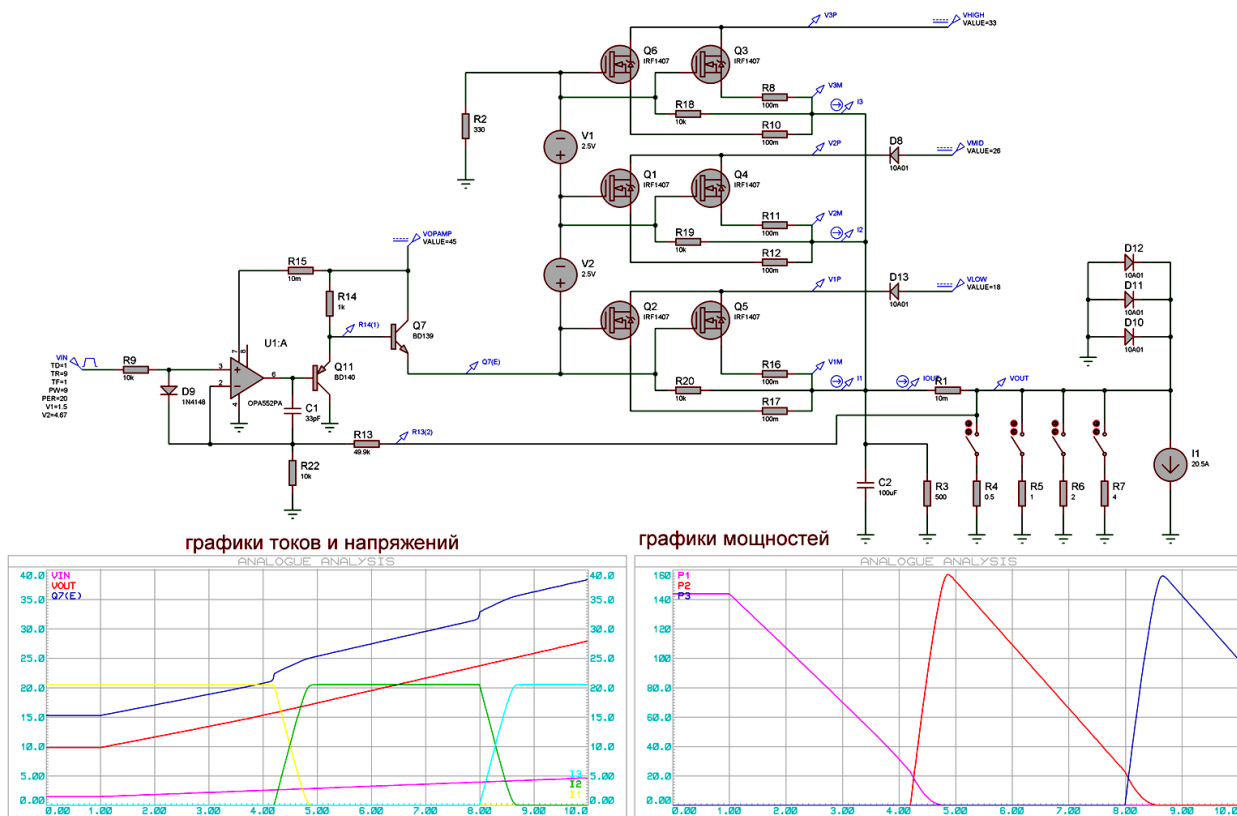


Рисунок 21 – Модель устройства, построенная в среде интерактивного симулятора Proteus8

Данная схема включает основные узлы устройства: аналоговый регулятор и трехступенчатый выходной каскад. На схеме отсутствуют узлы микроконтроллера, органов управления и индикации, защиты и сигнализации, и связанные с ними узлы.

Аналоговый регулятор построен на базе высоковольтного ОУ U1:A, и эмиттерных повторителей Q11, Q7, выполняющих функцию усилителя тока.

На неинвертирующий вход ОУ подается задающее напряжение, на инвертирующий вход – напряжение обратной связи, т.е. выходное напряжение устройства, поделенное в 6 раз делителем R13, R22.

Резистор R1 символизирует сопротивление шунта. Конденсаторы необходимы для обеспечения устойчивости работы стабилизатора.

Усилитель тока нагружен на цепь R2, V1, V2. Источники напряжения V1 и V2 необходимы для создания смещения напряжений на затворах

регулирующих мощных МДП транзисторов. Пары транзисторов (Q2, Q5), (Q1, Q4) и (Q6, Q3) включены параллельно для снижения тока и рассеиваемой мощности на каждом из транзисторов. Токи истоков уравниваются при помощи низкоомных резисторов, включенных в цепи истоков.

Эти пары образуют соответственно первую, вторую и третью ступень выходного каскада и питаются от различных источников напряжения (18В, 26В и 34В) через развязывающие диоды D8 и D13.

При изменении выходного напряжения в пределах от 9В до 28В (соответствующих изменениям управляющего напряжения от 1.5В до 4.66В) происходит плавное переключение ступеней выходного каскада.

Графики напряжений и токов отображает входное напряжение ( $V_{IN}$ ), выходное напряжение ( $V_{OUT}$ ), управляющее напряжение на затворах Q2, Q5 (Q7(E)) и выходные токи ступеней (I1, I2, I3) при постоянном токе нагрузки 20.5А, которое определяется источником тока ( $i_1$ ).

Плавное изменение токов и управляющего напряжения наглядно иллюстрирует процесс автоматического переключения ступеней выходного каскада. Графики мощностей иллюстрируют изменение мощностей (P1, P2, P3), рассеиваемой отдельными ступенями выходного каскада.

#### **.4 Модуль контроллера. Назначение элементов**

Модуль контроллера включает узлы функциональной схемы, изображенные на рисунке 2.14.

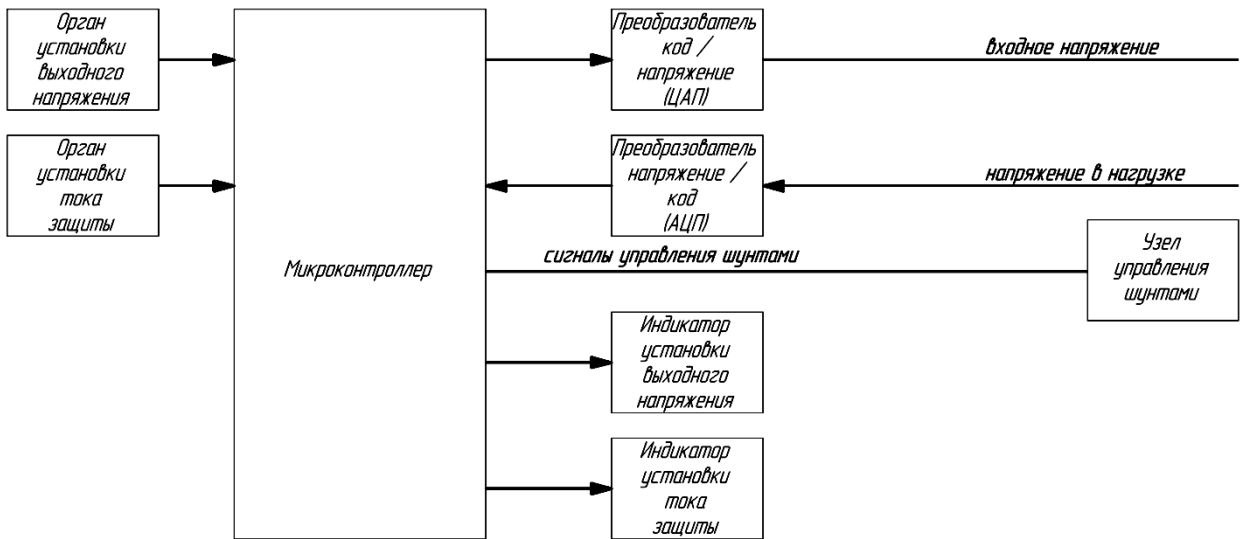


Рисунок 22– Модуль контроллера

На рисунке 23 представлена модель реализации этих узлов.

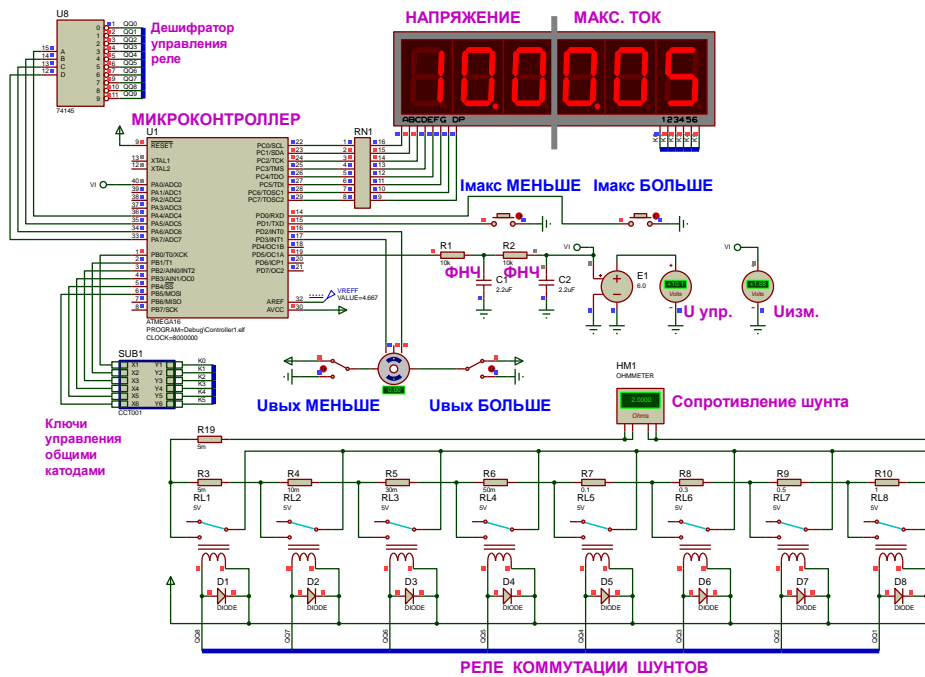


Рисунок 23 – Модель реализации узлов

Основу модуля представляет МК U1 типа ATmega16. [21]

Это универсальный высокопроизводительный 8-разрядный МК с ядром структуры AVR, содержащий большое разнообразие периферийных модулей,

поэтому значительная часть узлов реализуется при помощи этих модулей, что сокращает количество внешних радиоэлементов. Так органы установки выходного напряжения и тока защиты – это энкодер и две тактовые кнопки, которые непосредственно подсоединяются к линиям МК. Преобразователь кода в напряжение (ЦАП) реализован с помощью ШИМ с использованием встроенного 16-разрядного счетчика таймера 1. Поэтому внешние радиоэлементы ЦАП – это несколько резисторов и конденсаторов – R1, R2, C1, C2, образующих фильтр нижних частот (ФНЧ), необходимый для преобразования импульсного напряжения (меандра с регулируемым заполнением) в постоянное напряжение.

АЦП также реализован с использованием встроенного 10-разрядного АЦП МК. Из внешних элементов используется только делитель выходного напряжения (в модели не представлен) и источник опорного напряжения на базе прецизионного программируемого стабилизатора (представлен источником напряжения  $V_{REF} = 4.667V$ ). Наблюдение выходного напряжения и тока срабатывания защиты осуществляется на цифровых индикаторах. В качестве индикаторов выходного напряжения и тока защиты используется 6-разрядный светодиодный семисегментный индикатор (или два 3-разрядных) с общими катодами. Из внешних элементов используется только одна ИМС – матрицы ключей Дарлингтона для управления общими катодами индикаторов, представленная в модели под схемой SUB1, и токоограничивающие резисторы в цепях сегментов (анодов), управляемых непосредственно выходными линиями порта МК, представленные резисторной матрицей RN1.

Узел управления шунтами – это внешний узел, построенный на базе двоично-десятичного дешифратора U8 с мощными выходами типа «открытый коллектор»). Эти выходы управляют катушками электромагнитных реле RL1 – RL8, которые коммутируют шунты R3 – R10, R19 в соответствии с установленным диапазоном тока защиты. Ввиду отсутствия модели «ручного» энкодера использована модель двигателя с энкодером и два моментальных



переключателя « $U_{\text{вых}}$  больше» и « $U_{\text{вых}}$  меньше». Нажатие правой клавишей мышки на эти переключатели во время моделирования вызывает вращение вала двигателя влево (уменьшение) или вправо (увеличение) и выработку соответствующих сигналов энкодера (А и В). Для наблюдения напряжения управления служат виртуальные вольтметры  $U_{\text{упр}}$  (на самом деле он показывает уже выходное напряжение) и  $U_{\text{изм}}$  (это как раз управляющее напряжение).

В модели вместо стабилизатора напряжения используется аналоговый примитив E1 – зависимый источник напряжения, управляемый напряжением. Его передаточный коэффициент равен 6.0, поэтому изменение управляющего напряжения в пределах от 1.667В до 4.500В вызывает изменение выходного напряжения от 10В до 27В.

Управление током срабатывания защиты производится нажатием кнопок « $I_{\text{макс.}}$  больше» и « $I_{\text{макс.}}$  меньше». Наблюдение тока защиты производится на цифровом индикаторе. Наблюдение сопротивления шунтов производится с помощью виртуального омметра NM1.

Для управления МК построена программа на языке С в среде (IDE) Microchip Studio 7. Она состоит из основного модуля «Controller1.c» и пользовательской библиотеки сканирования входных линий «scan.h».

Программа снабжена построчными комментариями и приведена в приложении.

Программа реализует алгоритм управления, изображенный на рисунке 24.

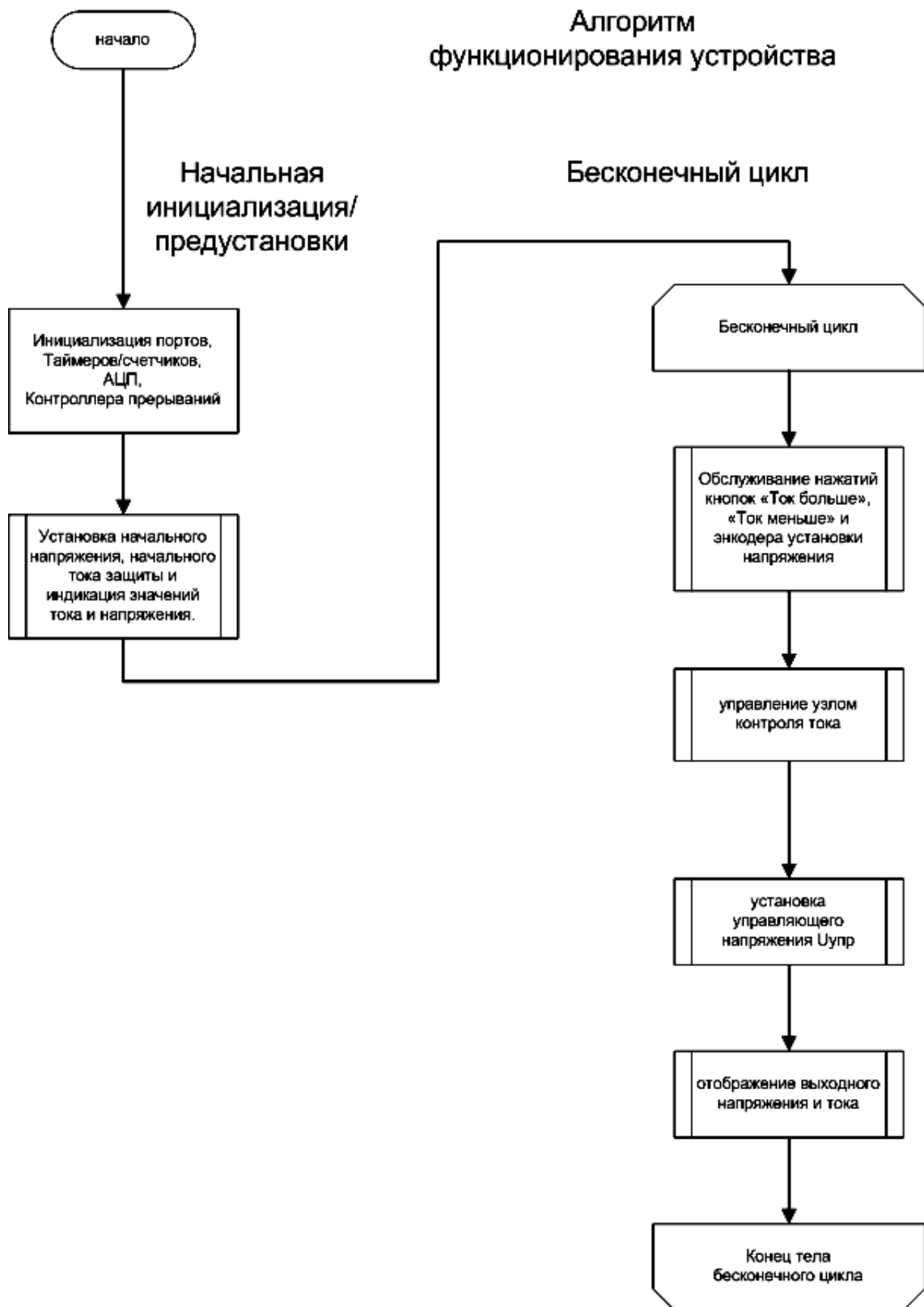


Рисунок 24 – Алгоритм управления



Два из них выполнены печатным монтажом. Это модуль контроллера и модуль регулятора. Третий модуль – силовой. Смонтирован на днище корпуса (шасси) навесным монтажом. [14]

Конструкция силового модуля (трансформатор, выключатель, фильтр, выпрямителя, гнезда) предусматривает крепление крупногабаритных и массивных элементов на корпусные детали. [9]

Корпус устройства разборный, выполнен из листов алюминиевого сплава методом гибки. На днище корпуса расположены 4 ножки по краям, для обеспечения зазора между поверхностью стола и днищем для подсоса воздуха.

Задняя и нижняя корпусные детали имеют перфорацию для обеспечения принудительной вентиляции теплонагруженных элементов (в первую очередь – радиатора с расположенными на нем регулирующими транзисторами). Такая конструкция обеспечивает засасывание воздуха вентиляторами снизу, обдува радиатора и выхода нагретого воздуха через заднюю стенку корпуса.

Конструкция модуля регулятора представляет собой печатную плату, прикрепленную посредством стоек к радиатору штыревого типа, на котором размещены мощные силовые приборы, вентиляторы и датчик температуры. Радиатор обращен к задней стенке, при этом воздух засасывается снизу и выдувается сзади. Отметим сразу, что ввиду сложности всего проекта в целом, детализация конструкции этого модуля, опущена. [16]

Модуль контроллера расположен за передней панелью. Через прорези в передней панели оператору виден индикатор и доступны органы регулировки. Наличие многочисленных отверстий в корпусе обеспечивают беспрепятственную слышимость звука сигнализатора перегрузки/аварии.

Сбоку на передней панели размещен трехфазный выключатель-автомат, над ним крепится светодиод индикации аварии в соответствующем держателе. Оставшаяся площадь передней панели занята платой модуля контроллера. [12]

На ней находятся органы регулировки:

- энкодер установки напряжения,
- 2 кнопки установки тока срабатывания,

– 2 трехразрядных 7-сегментных индикатора.

Прочие радиоэлементы согласно схеме модуля.

В результате анализа ТЗ я столкнулся с рядом требований, предъявляемых к устройству, часть из которых вступает в противоречие с другими.

К тому же имелись у меня имелись представления об объекте проектирования и субъективные предпочтения, которые усугубили эти противоречия.

По моему мнению, схема и конструкция лабораторного источника питания с быстродействующей защитой реализует обоснованный компромисс между этими противоречивыми требованиями.

В результате их преодоления удалось создать концепцию устройства и структурную схему, а также детализировать ее до создания электрической принципиальной схемы и конструкции одного выбранного узла.

### **3.2 Проектирование печатной платы**

После того, как была спроектирована электрическая принципиальной схема, приступим к разработке печатной платы (ПП) узла контроллера.

Для трассировки ПП выбрано приложение DipTrace [18]. Выбор этого приложения обусловлен следующими факторами:

- Доступность бесплатной версии приложения.
- Полная интеграция приложений пакета: изменение, выполненное в одном приложении, немедленно вызывает изменения в остальных открытых приложениях.
- Хорошая документированность; обилие мануалов на русском языке.
- Простой и дружелюбный интерфейс.
- Неограниченные возможности создания собственных компонентов.

– Разнообразие форматов выходных данных для создания файлов управления различным технологическим оборудованием.

Как нетрудно убедиться, мне удалось спроектировать устройство, которое удовлетворяет требованиям ТЗ. Принятие дополнительных требований (таких, как, например, построение маломощного источника питания, не являющегося источником помех), и, связанный, с ними способ реализации (разработка аналогового регулятора) привели к весьма громоздким, но неизбежным, техническим решениям. Это, в свою очередь, потребовало усложнение электрической схемы и декомпозиции ее на модули, что осложнило конструирование устройства.

Ввиду чисто академического характера настоящей ВКР было принято решение не выполнять полностью конструирование спроектированного устройства, ограничившись разработкой ПП лишь одного модуля – модуля контроллера.

Изготовление ПП начинаем с подбора и создания собственных компонентов. Подавляющее большинство компонентов уже имеется в библиотеках пакета. Однако, например, такой компонент, как энкодер, пришлось создать самостоятельно. Это, однако, заняло немного времени и не потребовало больших усилий, так как для создания компонентов необходимо выполнить небольшое число интуитивно понятных действий.

При наличии всех компонентов можно приступить к созданию электрической схемы конструируемого узла.

На рисунке 26 представлена электрическая схема узла в приложении Schematic Capture пакета DipTrace.

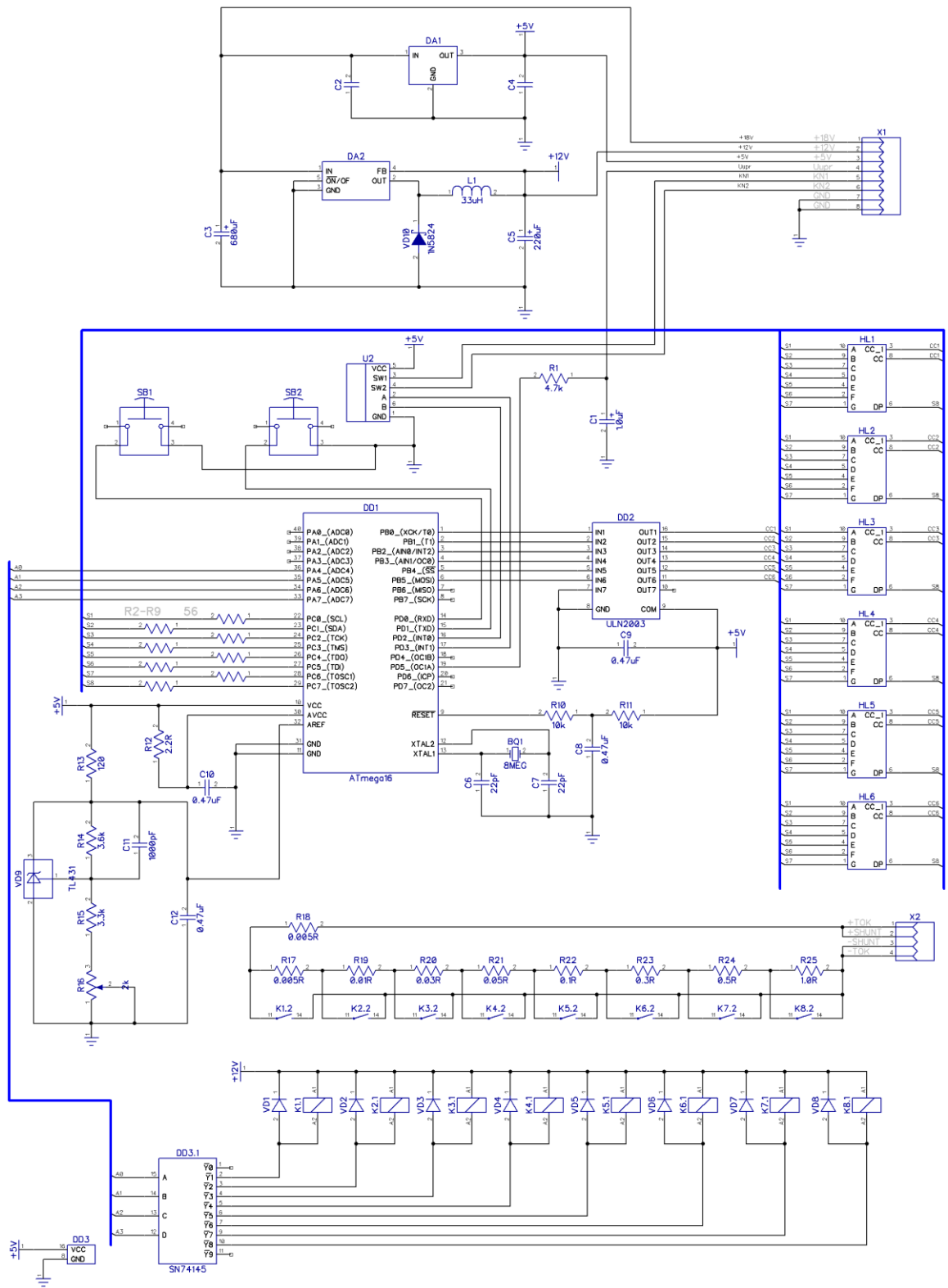


Рисунок 26 – Электрическая схема проектируемого узла (узла контроллера)

Результатом ручного размещения и автоматической трассировки с последующей ручной корректировкой как размещения, так и трассировки

стала модель двусторонней ПП узла с металлизацией отверстий и односторонним размещением радиоэлементов с односторонней пайкой.

На рисунках 27 - представлены фрагменты ПП: слои проводников, маркировка, размещение отверстий.

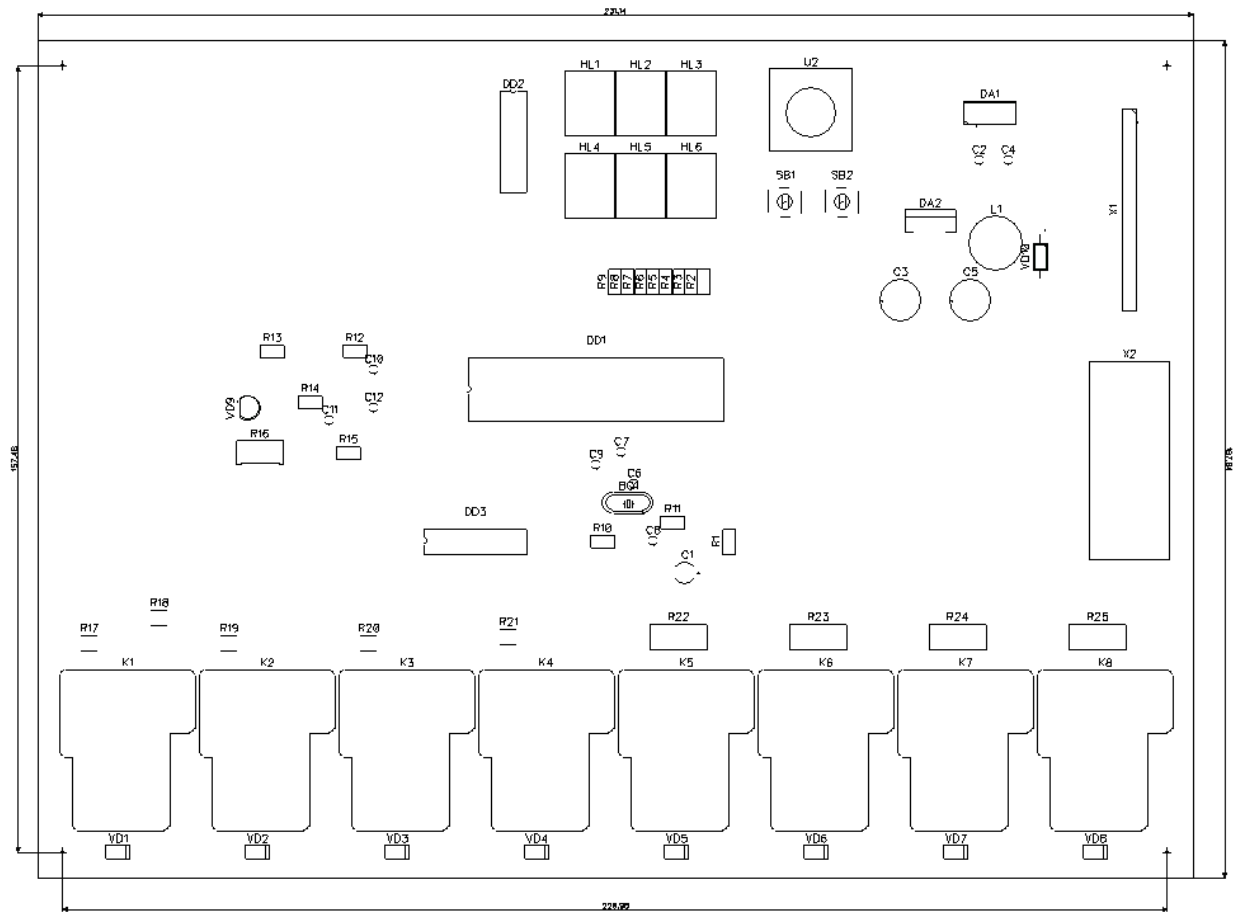


Рисунок 27 – Общий вид ПП узла контроллера



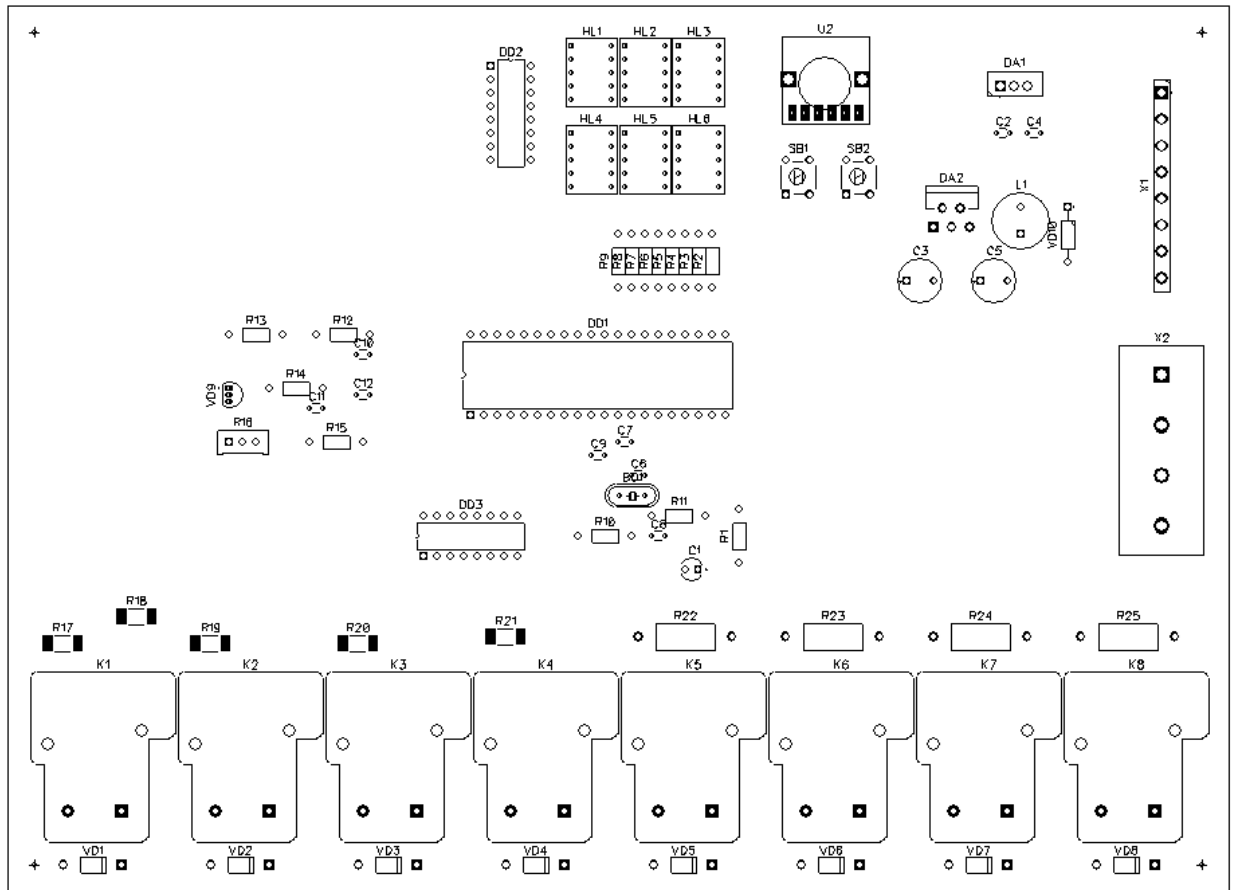


Рисунок 28 – Размещение радиоэлементов на ПП (SILK)

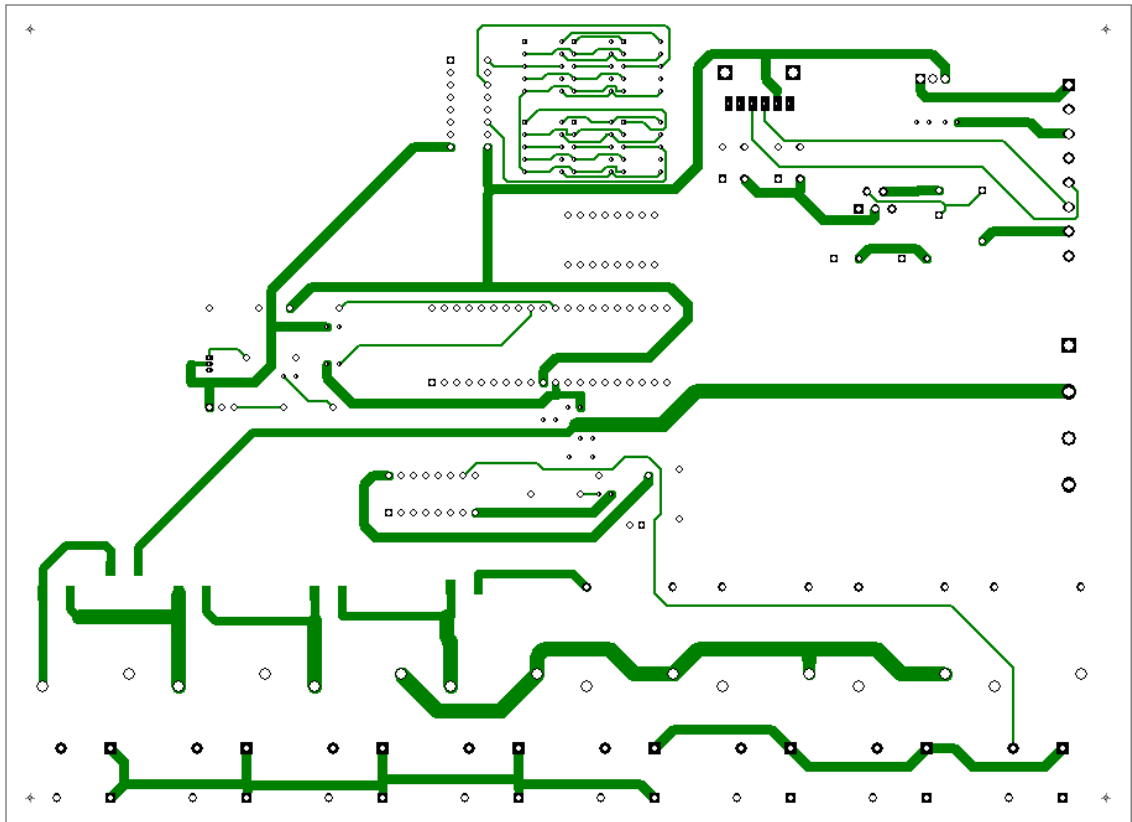


Рисунок 29 – Вид проводников со стороны размещения радиоэлементов (TOP)

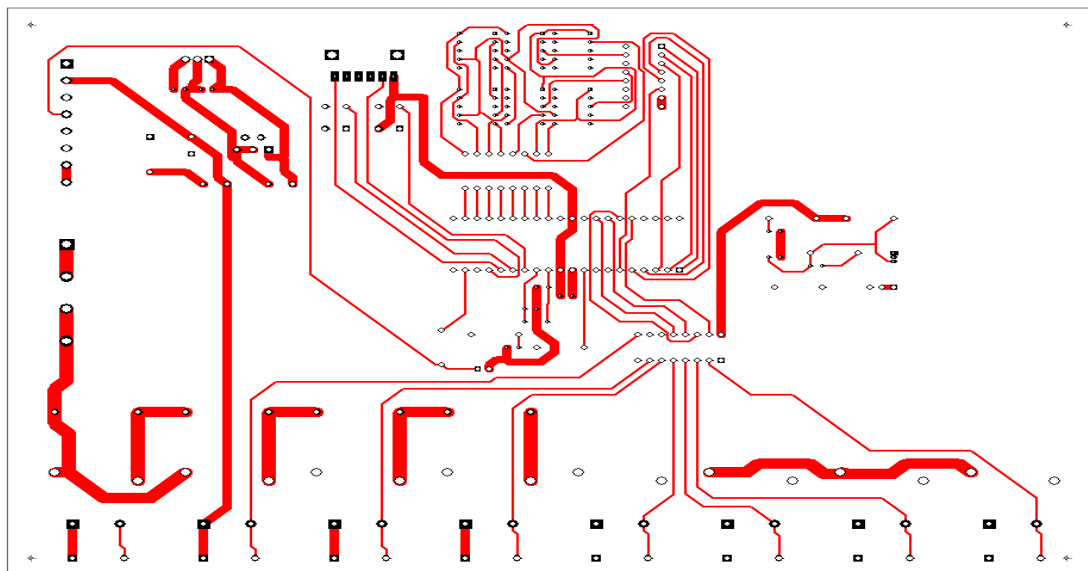


Рисунок 30 – Вид проводников со стороны пайки (BOTTOM)

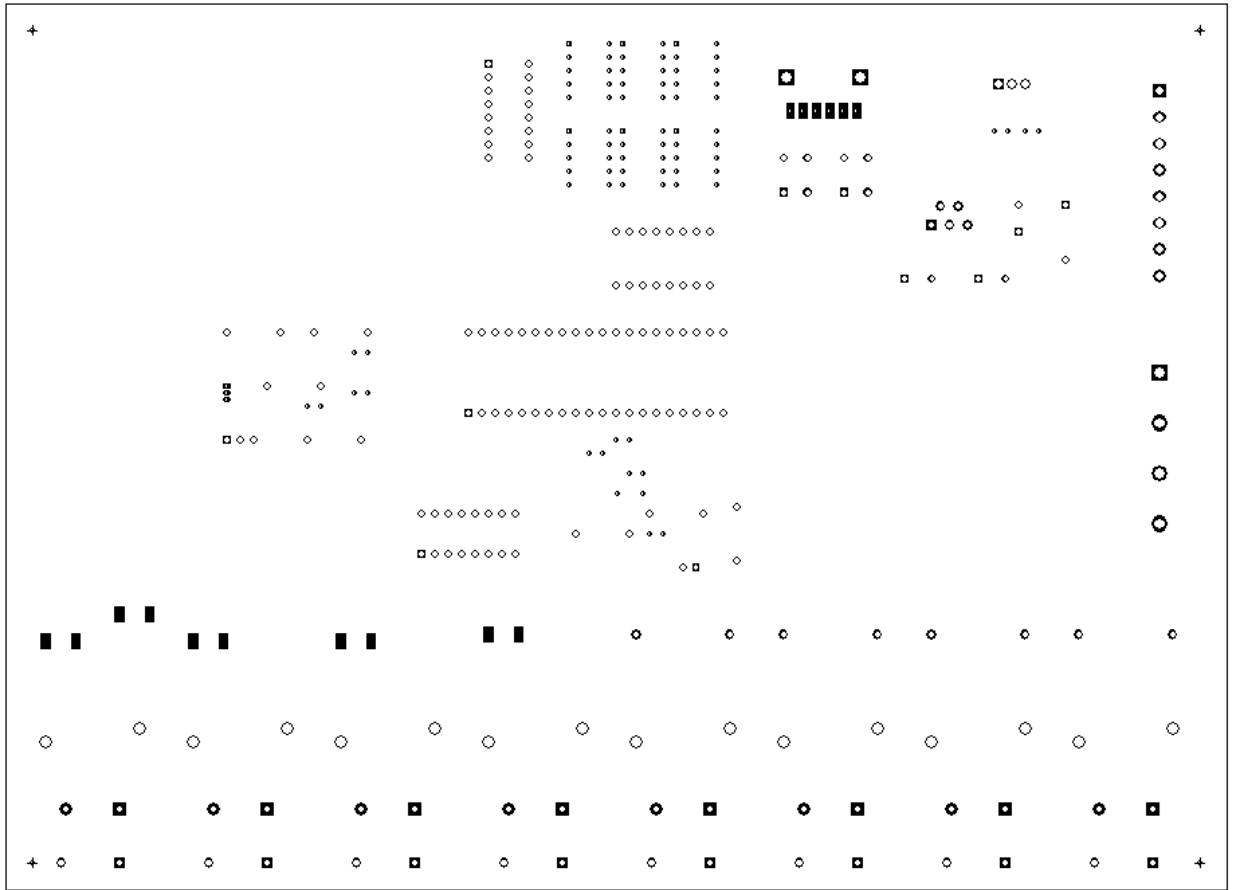


Рисунок 31 – Вид платы с отверстиями (DRILL)

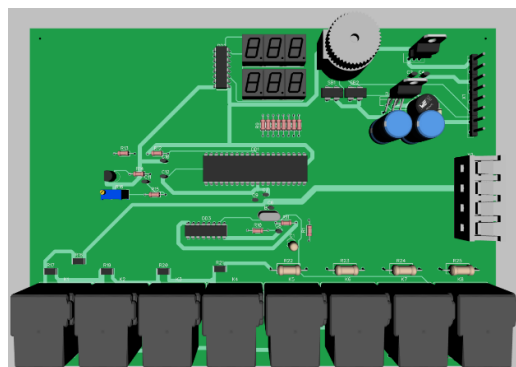
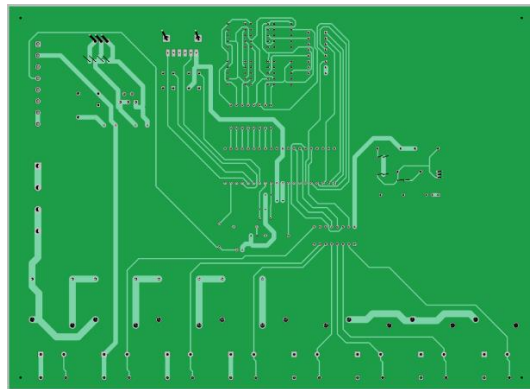
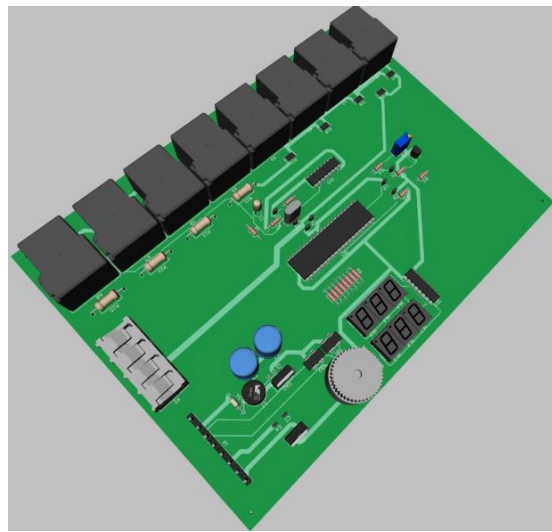
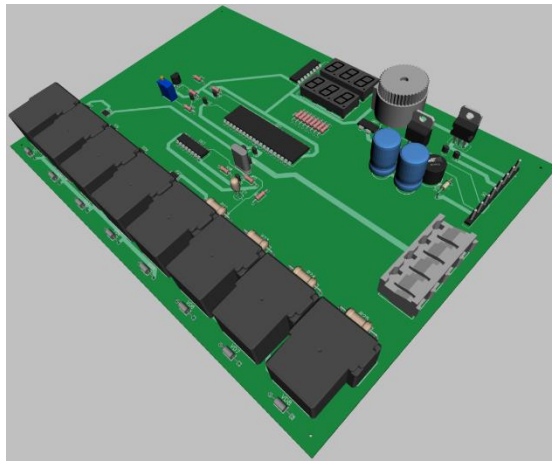


Рисунок 32– 3D визуализация ПП в сборе

## Заключение

В рамках выполнения ВКР мною был спроектирован лабораторный блок питания с быстродействующей защитой в соответствии с формальным ТЗ и личными представлениями о разрабатываемом изделии. После проведенного анализа обнаруженных аналогов, были проанализированы их достоинства и недостатки. Результатом анализа и поиска технических решений, позволяющих достичь требуемых параметров устройства и, при этом, снизить негативное влияние неизбежных недостатков явилась структурная схема устройства.

При этом были заложены принципы стабилизации и регулировки выходного напряжения, измерения тока нагрузки, функционирования быстродействующей защиты, а также учтены требования, касающиеся управления, индикации и сигнализации.

Путем декомпозиции функциональной схемы на группы блоков удалось построить принципиальную схему в виде трех относительно автономных функционально законченных модулей.

Личная оценка выполненной работы заключается в следующем.

Само создание лабораторного блока питания с быстродействующей защитой представляет собой актуальную задачу, чем было обусловлено принятие не самых простых стандартных решений.

Я сознательно принял эти непростые решения, при этом выполнил исследовательскую работу, направленную на повышение эффективности, а также частичному устранению недостатков устройства, связанных с такими решениями.

В процессе выполнения настоящей работы я ознакомился с пакетами прикладных программ (ППП), необходимых для создания графических документов, разработки схемы и конструкции изделия, и выполнению моделирования электрических схем. Это Proteus Design Suite 8.7 и DipTrace 4.3.

## Список используемой литературы и используемых источников

1. Александров, А.А. Электротехнические чертежи и схемы / Александров К.К., Кузьмина Е.Г.- М.:Энергоатомиздат, 1990. - 288с. (дата обращения: 18.01.2024)
2. Блок питания: импульсный или трансформаторный? Разбираем преимущества и недостатки [Электронный ресурс] / URL: [https://supereyes.ru/articles/power\\_supply/laboratornyy\\_blok\\_pitaniya\\_impulsnyy\\_ili\\_lineynyy\\_kakoy\\_vybrat/](https://supereyes.ru/articles/power_supply/laboratornyy_blok_pitaniya_impulsnyy_ili_lineynyy_kakoy_vybrat/) (дата обращения: 12.12.2023).
3. Вересов Г.П. Смуряков Ю.Л. Стабилизированные источники питания радиоаппаратуры: [Электронный ресурс]. URL: <https://www.elec.ru/library/nauchnaya-i-tehnicheskaya-literatura/stabilizirovannyye-istochniki-pitaniya/> (дата обращения: 19.02.2024).
4. Выбор лабораторного блока питания [Электронный ресурс] / URL: <https://www.e-core.ru/vyibor-laboratornogo-bloka-pitaniya/> (дата обращения: 15.12.2023).
5. ГОСТ Р 21.1101-2013 «СПДС. Общие требования к проектной и рабочей документации».
6. Импульсный блок питания [Электронный ресурс] / URL: <https://elektroznatok.ru/info/elektronika/impulsnyj-blok-pitaniya> (дата обращения 23.12.2023).
7. Источники питания лабораторные [Электронный ресурс] / Информационный ресурс «Микромир Электроникс» URL: <https://micromir-nn.ru/publ/8> (дата обращения 13.12.2023).
8. Как сделать самодельный регулируемый блок питания – подборка схем [Электронный ресурс] / URL: <https://acums.ru/bespereboyniki-i-bloki-pitaniya/reguliruemyi-svoimi-rukami> (дата обращения 14.12.2023).
9. Краус Л.А. Проектирование стабилизированных источников электропитания радиоэлектронной аппаратуры: [Электронный ресурс]. URL:

[https://www.studmed.ru/kraus-la-proektirovanie-stabilizirovannyh-istochnikov-elektropitaniya-radioelektronnoy-apparatury\\_f709312саба.html](https://www.studmed.ru/kraus-la-proektirovanie-stabilizirovannyh-istochnikov-elektropitaniya-radioelektronnoy-apparatury_f709312саба.html) (дата обращения: 04.03.2024)

10. Лабораторные блоки питания — какие они бывают [Электронный ресурс] / Информационный ресурс «Электрооборудование, кабель, светотехника» URL: <https://www.ixbt.com/live/hans-kristian/laboratornye-bloki-pitaniya-kakie-oni-byvayut-podborka-putevoditel.html> (дата обращения 02.12.2023).

11. Лабораторный блок питания с быстродействующей защитой [Электронный ресурс] / Информационный ресурс «Каталог радиолобительских схем» URL: <https://fancydev.ru/bp/lbp08.htm> (дата обращения: 27.01.2024).

12. Печатные платы [Электронный ресурс] / Информационный ресурс «PCBtechnology» URL: [http://www.pcbtech.ru/pages/view\\_article/23](http://www.pcbtech.ru/pages/view_article/23) (дата обращения 18.12.2023).

13. Порядок обеспечения самостоятельности выполнения письменных работ в ТГУ: [Электронный ресурс]. URL: [https://yadi.sk/d/Fs-9ts\\_VInrE3Q/ВКР\\_\(Diplom\)](https://yadi.sk/d/Fs-9ts_VInrE3Q/ВКР_(Diplom)) / Положение о Антиплагиате (Дата обращения: 15.02.2024)

14. Постановление Правительства РФ от 18.02.2008 №87 «О составе разделов проектной документации и требованиях к их содержанию». [Электронный ресурс] / URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_75048/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_75048/) (дата обращения 23.12.2023).

15. Программа для моделирования электронных схем Proteus Design Suite 8.7 [Электронный ресурс] / URL: <https://www.labcenter.com/whatsnew/8.7/> (дата обращения 12.03.2024).

16. Разновидности печатных плат [Электронный ресурс] / Информационный ресурс «ОЭС» URL: <https://oessp.ru/articles/raznovidnosti-pechatnykh-plat/> (дата обращения 18.12.2023).

17. Репозиторий тольяттинского государственного университета: [Электронный ресурс]. URL: <https://dspace.tltsu.ru/handle/123456789/80> (Дата обращения: 16.12.2023)
18. САПР проектирования печатных плат – DipTrace 4.3 [Электронный ресурс] / URL: <https://diptrace.com/rus/> (дата обращения 09.04.2024).
19. Стабилизированный блок питания: [Электронный ресурс] / URL: [https://spravochnick.ru/elektronika\\_elektrotehnika\\_radiotekhnika/stabilizirovannyy\\_blok\\_pitaniya/](https://spravochnick.ru/elektronika_elektrotehnika_radiotekhnika/stabilizirovannyy_blok_pitaniya/) (дата обращения: 15.12.2023).
20. Устройство блоков питания и методика их тестирования [Электронный ресурс] / Информационный ресурс «3DNews» URL: <https://3dnews.ru/911366/ustroystvo-kompyuternih-blokov-pitaniya-i-metodika-ih-testirovaniya> (дата обращения 26.01.2024).
21. 8-bit microcontroller ATmega16A-PU datasheet [Электронный ресурс] / URL: <https://www.promelec.ru/fs/sources/94/85/6f/be/9c2589b708b060da8df2a4ef.pdf> (дата обращения 11.03.2024).
22. Circuit chip SN74145 datasheet [Электронный ресурс] / URL: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/211806/TI/SN74145.html> (11.03.2024)
23. Matrix of 7 Darlington transistors ULN2003A [Электронный ресурс] / URL: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/25566/STMICROELECTRONICS/ULN2003A.html> (11.03.2024)
24. Step-down DC-DC converter LM2596 datasheet [Электронный ресурс] / URL: <https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/lm2596-d.pdf> (дата обращения 11.03.2024).
25. Voltage stabilizer L7805 datasheet [Электронный ресурс] / URL: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/l78.pdf> (дата обращения 11.03.2024).



## Приложение. Исходный код программы.

```
/* Controller1.c
 *
 * Created: 09.04.2024 21:17:04
 * Author: Markov D.I.
 */

// подключаем стандартные библиотеки
#include <avr/io.h> // глобальные объявления
// и имена регистров

#include <avr/interrupt.h> // поддержка прерываний

#define F_CPU 8000000 // тактовая частота МК

#include <util/delay.h> // функции задержек

#include "scan.h" // пользовательская библиотека
// обслуживания входных линий и определение нажатых кнопок

#define COMMA 0x80 // символ "десятичная точка"
#define BLANK 0x0F // код символа "пусто"

#define VMIN 99L // минимальное напряжение 9.9В
#define VMAX 271L // максимальное напряжение 27.1В
#define VMAX2 280L // опорное напряжение,
// соответствующее 28В

// Опорное напряжение на входе AREF
#define ADC_VREF_TYPE 0x00
// массив декодированных символов
// для отображения на 7-сегментном индикаторе
// с общим катодом
const char SYMB[]={
// 0 1 2 3
// 4 0x3f, 0x06, 0x5b, 0x4f,
// 5 0x66, 0x6d, 0x7d, 0x07,
// 8 9 A B
// c 0x7f, 0x6f, 0x77, 0x7c,
// C E blank
0x39, 0x5e, 0x79, 0x00
};

// массив для отображения тока срабатывания защиты
const char CURR[9][3] = {
{0|COMMA, 0, 5}, // 0.05
{BLANK, 0|COMMA, 1}, // _0.1
{BLANK, 0|COMMA, 2}, // _0.2
{BLANK, 0|COMMA, 5}, // _0.5
{BLANK, BLANK, 1|COMMA}, // _1.
{BLANK, BLANK, 2|COMMA}, // _2.
{BLANK, BLANK, 5|COMMA}, // _5.
{BLANK, 1, 0|COMMA}, // _10.
{BLANK, 2, 0|COMMA} // _20.
};

// массив кодов символов для отображения на
// 6 - разрядном 7-сегментном индикаторе
char buffer[6] = {0,0,0,0,0,0};

// номер предельного тока срабатывания в массиве CURR
uint8_t current_limit = 0;

// задаваемое значение управляющего напряжения
unsigned int volt= VMIN;

// переменная для управления ШИМ
unsigned long pwm_control,
```

```

// и истинное значение выходного напряжения
vv;

unsigned char  flag=1,          // признак "напряжение изменено"
               refresh=1;     // признак необходимости обновления данных

/*****
// Обработчик прерывания External Interrupt 0
// сигнал энкодера A
ISR (INT0_vect)
{
    unsigned char enc;        // состояние входов A и B
    //      encoder      buttons
    //      B      A      <      >
    //      D3     D2     D1     D0
    //      3      2      1      0

    // считываем 2 разряда      BA
    enc=PIND & 0x0C;
    switch(enc) // в зависимости от BA
    {
        case 0b0000:          // 00
        case 0b1100:          // 11
            // инкрементируем управляющее напряжение
            volt++;

            if (volt > VMAX) // если больше максимального
                volt = VMAX; // то ограничиваем максимальным
            break;

        case 0b0100:          // 01
        case 0b1000:          // 10
            // декрементируем управляющее напряжение
            volt--;

            if (volt < VMIN) // если меньше минимального
                volt = VMIN; // то ограничиваем минимальным
            break;
    }
    flag=1;                  // взводим признак "напряжение изменено"
}

/*****
// Обработчик прерывания External Interrupt 1
ISR (INT1_vect)
{
    unsigned char enc;        // состояние входов A и B
    //      encoder      buttons
    //      B      A      <      >
    //      D3     D2     D1     D0
    //      3      2      1      0

    // считываем 2 разряда      BA
    enc=PIND & 0x0C;
    switch(enc) // в зависимости от BA
    {
        case 0b0100:          // 01
        case 0b1000:          // 10
            // инкрементируем управляющее напряжение
            volt++;

            if (volt > VMAX) // если больше максимального
                volt = VMAX; // то ограничиваем максимальным
            break;

        case 0b0000:          // 00
        case 0b1100:          // 11
            // декрементируем управляющее напряжение
            volt--;

            if (volt < VMIN) // если меньше минимального
                volt = VMIN; // то ограничиваем минимальным
    }
}

```

```

        break;
    }
    flag=1;    // взводим признак "напряжение изменено"
}

/*****/
// обработчик прерывания Timer2 по совпадению OCR
// в этом обработчике выполняется динамическая индикация
ISR (TIMER2_COMP_vect)
{
    static unsigned char p=0;    // текущий номер знакоместа
    char    s;                    // текущий символ

    s = buffer[p];                // считываем из буфера
    // код текущего символа

    PORTB = 0;                    // гасим все знакоместа
    // заносим декодированный символ
    // вместе с десятичной точкой
    PORTC = SYMB[s & 0x0F] | (s & COMMA);

    PORTB = 1<<p;    // включаем текущее знакоместо

    p++;                // переходим к следующему знакоместу
    if (p>5)            // если его номер больше 5
        p=0;            // то начинаем заново с нулевого знакоместа
}

/*****/
// обработчик прерывания Timer 0 по переполнению
// примерно 1 раз в 16 мс
ISR (TIMER0_OVF_vect)
{
    // num - программный счетчик прерываний
    static unsigned char num=0;

    // Реинициализируем Timer 0
    TCNT0=0x83;

    // инкрементируем программный счетчик прерываний
    num++;

    if (num == 10)    // если достигло значения 10
        // то есть прошло 16*10=160 мс = 0,16 с
        {
            num = 0;        // то обнуляем счетчик
            refresh=1;    // и взводим признак необходимости
                            // обновить показания дисплея
        }
}

/*****/
// функция поддержки встроенного
// 10-разрядного АЦП
unsigned int read_adc
(unsigned char adc_input)    // номер входного канала АЦП
{
    // настраиваем входной мультиплексор
    ADMUX=adc_input | ADC_VREF_TYPE;
    // задержка примерно 10 мс на завершение
    // переходных процессов в устройстве выборки/хранения
    _delay_us(10);

    // старт преобразования
    ADCSRA|=(1<<ADSC);

    // ожидаем окончания преобразования - взведение флага
    while ((ADCSRA & (1<<ADIF))==0);

    ADCSRA|=(1<<ADIF);    // сбрасываем флаг

    return ADCW;        // возвращаем преобразованное значение
}

```

```

/*****
// функция заполнения знакомест с 4 по 6 значением тока защиты
void fill_current(void)
{
    uint8_t i; // индексная переменная

    for(i=0; i<3; i++) // в цикле для 3 цифр
        // заполняем буфер кодами отображаемых цифр
        buffer[3+i]=CURR[current_limit][i];
}

/*****
// функция заполнения знакомест с 1 по 3 значением выходного напряжения
void fill_voltage(void)
{
    if (!refresh) // если не обнаружен признак обновления показаний
        return; // то покидаем функцию

// а если такой признак есть, то выполняем следующие действия
refresh = 0; // сбрасываем признак
// выполняем А/Ц преобразование и вычисляем значение вых. напряжения
vv = VMAX2 * read_adc(0)/ 1023L;

buffer[0]=vv / 100; // первая цифра - десятки вольт
// вторая цифра - единицы вольт и десятичная точка
buffer[1]=( (vv / 10) % 10) | СОММА;

// третья цифра - десятые доли вольта
buffer[2]=vv % 10;
}

/*****
// функция управления отображением тока защиты
// и переключением токовых шунтов узла контроля тока
void control_current(void)
{
    switch(touch) // опрос нажатых кнопок
    {
        case 1: // если нажата кнопка "Больше"
            current_limit++; // увеличиваем ток защиты

            if (current_limit > 8) // если больше максимального
                current_limit = 8; // то фиксируем максимальное значение

            // управляем дешифратором переключения шунтов
            PORTA = current_limit<<4;

            // отображаем новое значение тока защиты
            fill_current();
            break;

        case 2: // если нажата кнопка "Меньше"
            current_limit--; // уменьшаем ток защиты

            if (current_limit < 0) // если меньше минимального
                current_limit = 0; // то фиксируем минимальное значение

            // управляем дешифратором переключения шунтов
            PORTA = current_limit<<4;

            // отображаем новое значение тока защиты
            fill_current();
            break;
    }
}

/*****
// функция формирования управляющего напряжения
// при помощи ШИМ
void control_voltage(void)

```

```

{
    if (flag) // если был повернут вал энкодера
    // и, соответственно, взведен флаг "напряжение изменено"
    {
        cli(); // запрещаем прерывания
        flag=0; // сбрасываем флаг
        sei(); // снова разрешаем прерывания

        // вычисляем значение заполнения ШИМ
        // 16384 соответствует выходному напряжению 30В
        pwm_control = (((16384L * volt) / 300L) & 0xFFFF) - 1;

        // заносим значения заполнения ШИМ
        OCR1AH = pwm_control >> 8; // в старший регистр OCR1A
        OCR1AL = pwm_control & 0xFF; // и в младший регистр OCR1A
    }
}

/*****
                                ГЛАВНАЯ ФУНКЦИЯ ПРОГРАММЫ
*****/
int main(void)
{
    // фрагмент инициализации/предустановки
    // выполняется однократно после включения МК

    // инициализация портов ввода/вывода
    // Port A
    // функции линий: Bit7=Out Bit6=Out Bit5=Out Bit4=Out Bit3=In Bit2=In Bit1=In
    Bit0=In
    DDRA=0xFE;
    // защелка: Bit7=0 Bit6=0 Bit5=0 Bit4=0 Bit3=P Bit2=P Bit1=P Bit0=T
    PORTA=0x00;

    // Port B
    // функции линий: Bit7=Out Bit6=Out Bit5=Out Bit4=Out Bit3=Out Bit2=Out
    Bit1=Out Bit0=Out
    DDRB=0xFF;
    // защелка: Bit7=0 Bit6=0 Bit5=0 Bit4=0 Bit3=0 Bit2=0 Bit1=0 Bit0=0
    PORTB=0x00;

    // Port C
    // функции линий: Bit7=Out Bit6=Out Bit5=Out Bit4=Out Bit3=Out Bit2=Out
    Bit1=Out Bit0=Out
    DDRC=0xFF;
    // защелка: Bit7=0 Bit6=0 Bit5=0 Bit4=0 Bit3=0 Bit2=0 Bit1=0 Bit0=0
    PORTC=0x00;

    // Port D
    // функции линий: Bit7=Out Bit6=Out Bit5=Out Bit4=Out Bit3=In Bit2=In Bit1=In
    Bit0=In
    DDRD=0xF0;
    // защелка: Bit7=0 Bit6=0 Bit5=0 Bit4=0 Bit3=P Bit2=P Bit1=P Bit0=P
    PORTD=0x0F;

    /* инициализация Timer/Counter 0
    * таймер управления периодическим обновлением
    * показаний выходного напряжения
    Источник тактирования: System Clock
    Предделитель: N = 1024 (частота Fin = 7813 гц)
    Режим: Normal top=0xFF
    Период переполнения: T=16 ms=0.016
    Расчет TCNT0
    TCNT0 = 256 - (F_OSC * T / N) =
    = 256 - (8000000 * 0.016 / 1024)
    = 131(dec) = 0x83
    */
    // настройка предделителя
    TCCR0=(1<<CS02) | (1<<CS00);
    // инициализация TCNT0 - счетного регистра
    TCNT0=0x83;
    // обнуление OCR0 на всякий случай

```

```

OCR0=0x00;

/* Инициализация Timer/Counter 1
Используется в качестве формирователя ШИМ
для генерации управляющего напряжения Uупр

    Источник тактирования: System Clock
    Предделитель: N= (Fin = 8000000 Гц)
    Режим: Fast PWM top=ICR1
    Выход OC1A: Non-Inverted PWM
    Период ШИМ: 2,048 мс = 0.002048 с

Параметры выходных импульсов на выходе OC1A:
    период: 2,048 мс
    длительность: 0.67584 мс (2.048мс * 9.9в / 30в)

Расчет заполнения ШИМ
OCR1A(HL) = (ICR1(HL) + 1) * Uупр / 30 - 1 =
= (0x3FFF+1) * 9.9 / 30 - 1 =
= 16384 * 9.9 / 30 - 1 = 5406 (dec) = 0x151E
Таким образом, OCR1AH=0x15, OCR1AL=0x1E
*/

// выключение счетчика
TCCR1A=0x00;
TCCR1B=0x00;

// инициализация счетных регистров
TCNT1H=0x00;
TCNT1L=0x00;

// установка периода ШИМ
ICR1H=0x3F;
ICR1L=0xFF;

// установка начальной длительности
OCR1AH=0x15;
OCR1AL=0x1E;

// обнуление OCR1B на всякий случай
OCR1BH=0x00;
OCR1BL=0x00;

// установка режима работы и предделителя
TCCR1A=(1<<COM1A1) | (1<<WGM11);
TCCR1B=(1<<WGM13) | (1<<WGM12) | (1<<CS10);

/* Инициализация Timer/Counter 2
Таймер используется для реализации
динамической индикации

    Источник тактирования: System Clock
    Предделитель: N = 64 (Fin = 125000 Гц)
    Режим: CTC top=OCR2A
    Период сравнения OCR2A: T = 2 мс = 0.002 с

Расчет OCR2A
OCR2A = F_OSC * T / N - 1 =
= 8000000 * 0.002 / 64 - 1 =
= 249 (dec) = 0xF9
*/

// Режим работы и предделитель
ASSR=0x00;
TCCR2=(1<<WGM21) | (1<<CS22);

// инициализация счетного регистра
TCNT2=0x00;
// установка периода сравнения
OCR2=0xF9;

// Демаскирование прерываний от таймеров

```

```

// Таймер 0 (переполнение)
// Таймер 2 (сравнение OCR2)
    TIMSK=(1<<OCIE2) | (1<<TOIE0);

// инициализация контроллера внешних прерываний
// External Interrupt 0 и External Interrupt 1
    // INT0: включен
    // Режим: по любому фронту
    // INT1: включен
    // Режим: по любому фронту
    // INT2: отключен
// демаскирование INT1 и INT0
    GICR|=(1<<INT1) | (1<<INT0);
// установка режима
    MCUCR=(1<<ISC10) | (1<<ISC00);
// инициализация контроллера прерываний
    MCUCSR=0x00;
// сброс флагов внешних прерываний
    GIFR=(1<<INTF1) | (1<<INTF0);

/* инициализация 10-разрядного АЦП
Использован для измерения фактического выходного напряжения

    Предделитель: 64 (частота тактирования АЦП: 125000 Гц)
    Источник опорного напряжения: AREF pin
    Режим: свободное преобразование по ADSC
    Состояние: ADC Stopped
*/
// установка мультиплексора и источника опорного напряжения
    ADMUX=ADC_VREF_TYPE;
// установка режима АЦП
    ADCSRA=(1<<ADEN) | (1<<ADPS2) | (1<<ADPS1);
// сброс специальных функций
    SFIOR=0x00;

// предустановки (начальное состояние устройства)
// установка начального управляющего напряжения Uупр
    control_voltage();
// отображение выходного напряжения
    fill_voltage();
// отображение тока защиты
    fill_current();

// разрешение всех немаскированных прерываний
    sei();

// бесконечный цикл - выполняется до выключения МК
// прерывается TC0-(ovf), TC2-(OCR), INT0 и INT1 (энкодер)
    while (1)
    {
        scan(); // определяем нажатые кнопки
        control_current(); // управление узлом контроля тока
        control_voltage(); // установка управляющего напряжения Uупр
        fill_voltage(); // отображение выходного напряжения
    }
} // конец программы

//=====
//=====

// scan.h
// обработка нажатых клавиш
// с функцией подавления дребезга контактов

#define    MAXCYCLES    10 // к-во циклов опроса
// Если по достижении его входные сигналы кнопок
// остаются неизменными
// то их значения принимаются истинными
//-----

// глобальные переменные

```

```

static uint8_t
    ain, // входы кнопок
    touch = 0; // нажатие/отпускание кнопок

//-----
void scan(void) // опрос кнопок
// программное подавление дребезга контактов
{
    // внутренние статические переменные
    static uint8_t
        iold = 0, // новое значение входов
        inew = 0, // старое значение входов
        oldain = 0, // старое значение кнопок
        cycles; // счетчик циклов
    //опрос входов
    inew = (~PIND) & 0x0F; // биты 0...3 порта D

    // Равно ли старое значение новому ?
    if(inew != iold)
    {
        // если нет
        cycles = 0; // сброс
        iold = inew; // обновление старого
        // значения входов
    }
    else // а если равно
    {
        cycles++; // инкрементируем счетчик циклов
        if(cycles <= MAXCYCLES) return;
        // если не достигнуто предельное значение

        cycles = MAXCYCLES; // ограничиваем счетчик циклов
        ain = inew; // вычисляем новое значение кода
        //с учетом инверсии битов
    }

    touch = ain & (~oldain); //состояние кнопки изменилось
    oldain = ain; //переписываем прежнее состояние кнопки новым
}

```