

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

**ИНСТИТУТ МАШИНОСТРОЕНИЯ**

(наименование института полностью)

Кафедра

**«Промышленная электроника»**

(наименование)

**11.03.04 Электроника и нанoeлектроника**

(код и наименование направления подготовки)

**Промышленная электроника**

(направленность (профиль))

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА  
(БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)**

на тему **«Регулируемый источник питания 0...15В, 5А с микроконтроллерным управлением»**

Обучающийся

**Т.В. Адельшинова**

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

**Ст. преподаватель А.К. Кудинов**

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

Тольятти 2023

## Аннотация

Выпускная квалификационная работа страниц, 15 рисунков, 15 таблиц, 22 источника, 6 листов графического материала.

Импульсный источник питания, вторичные источники питания, ИИП, транзистор, ключевой режим работы, мостовая схема, сетевой выпрямитель, сетевой фильтр, импульсный трансформатор, инвертор, широтно-импульсная модуляция.

Результатом данной ВКР является разработка импульсного источника вторичного питания. Методологическую и теоретическую основу исследования составляют практические разработки и концепции авторов по разработке и проектированию импульсных блоков питания.

В работе проанализировано техническое задание на изделие была изучена техническая литература по САПР P-CAD и проектированию печатных плат, нормативные документы по данной теме, рассмотрено устройство и его применение, произведена характеристика электрической принципиальной схемы, выбран тип конструкции блока, компоновочной структуры ячеек и конструкции ПП, определен класс точности, метод и материалы изготовления.

Графическая часть проекта выполнена с использованием современного программного обеспечения САПР P-CAD, AutoCAD, пояснительная записка оформлена с помощью программы MS Office. Материал изложен грамотно. Документация оформлена с соблюдением норм ЕСКД и соответствующих ГОСТов.

## Содержание

Введение.....	5
1 Общие сведения об импульсных источниках питания, обзор литературы.....	8
1.1 Типы систем питания.....	8
1.2 Патентно-информационные исследования.....	9
1.3 Отечественные и зарубежные производители импульсных источников питания. Продукция, технические показатели, сравнительные характеристики.....	10
1.4 Основные принципы работы импульсных источников питания с ШИМ.	13
2 Разработка структурной схемы источника питания.....	17
2.1 Структурная схема ИИП.....	17
2.2 Описание структурной схемы ИИП.....	19
2.2.1 Фильтр помех.....	19
2.2.2 Входной выпрямитель и фильтр.....	19
2.2.3 Импульсный преобразователь.....	19
2.2.4 Выходные выпрямители и фильтры.....	20
2.2.5 Блок контроля и защиты.....	20
2.3 Функциональная схема ИИП.....	21
3 Выбор элементной базы.....	23
3.1 Выбор микросхемы ШИМ-контроллера.....	23
3.2 Выбор микроконтроллера.....	25
3.3 Выбор дисплея.....	29
4 Разработка принципиальной схемы источника питания.....	30
4.1 Эскизный расчет параметров ИИП.....	30
4.2 Расчет параметров входной цепи и схемы преобразователя.....	31
4.3 Электрический расчет схемы ШИМ-контроллера.....	36
4.4. Расчет схемы микроконтроллера.....	38
4.5 Разработка блок-схемы алгоритмов работы.....	40
5 Разработка конструкции источника питания.....	47

5.1 Анализ технических требования к конструкции устройства .....	47
5.2 Разработка конструкции печатной платы. Требования к формовке выводов, лужению и пайке.....	48
5.3 Расчёт надёжности .....	51
5.4 Разработка конструкции модуля .....	52
Заключение .....	53
Список используемых источников.....	54

## Введение

На современном этапе развития человечества, как, впрочем, и во все времена, наиболее ценным становятся топливно-энергетические ресурсы, необходимые для производства энергии. В преддверии мирового энергетического кризиса особое значение приобретают методы энергосбережения и оптимального использования энергии. В частности, это отражается на повышении требований к качеству и эффективности работы вторичных источников электропитания (ИВЭП).

Одной из основных тенденций развития электронной техники является повышение энергоэффективности и снижение потребляемой мощности. При этом особые требования предъявляются к качеству источников питания, которые должны обеспечивать радиоэлектронную аппаратуру (РЭА) стабильным напряжением питания с заданными и постоянными характеристиками.

На современном этапе данным требованиям, предъявляемым к ИВЭП отвечают только импульсные источники питания (ИИП). Несмотря на то, что основные принципы, используемые в работе импульсных источников питания, были известны еще более 100 лет назад, широкое распространение и производство данного типа блоков питания было ограничено уровнем развития электроники. Начиная со второй половины XX века с началом широкого развития полупроводниковой схемотехники, а затем и микроэлектроники становится возможной разработка и производство недорогих и миниатюрных, а главное качественных импульсных источников электропитания.

Импульсные источники питания опережают линейные сразу по нескольким параметрам. Во-первых, линейные источники питания имеют достаточно низкий коэффициент полезного действия (КПД), максимальное значение которого редко превышает 70 %, тогда как импульсный источник питания, той же мощности, будет иметь КПД более 85 %.

Во-вторых, импульсные преобразователи энергии, за счет высокой частоты преобразования, позволяют использовать импульсные трансформаторы намного меньшей массы, нежели линейные блоки питания (БП).

В-третьих, импульсные источники питания, для постоянного напряжения, могут быть как понижающими, так и повышающими источниками питания, в отличие от линейных преобразователей.

Таким образом, несмотря на более высокую трудоемкость изготовления и проектирования, ИИВП позволяют получить намного более высокие характеристики в сравнении с линейными источниками питания. Отсюда следует, что проектирование качественных и высокоэффективных импульсных источников питания является актуальной темой и на данный момент. Также, актуальность данной теме добавляет постоянно модернизируемая элементная база, позволяющая значительно улучшать и оптимизировать характеристики проектируемых источников питания.

На основании всего вышесказанного, тема данной ВКР – разработка регулируемого источника питания, является актуальной на данный момент.

Актуальность темы исследования связана с интенсивным развитием схемотехники импульсных источников питания, предназначенных для электропитания широкого класса средств электронной техники и направлена на закрепление, расширение, углубление и систематизацию знаний, полученных при изучении специальных дисциплин технического обслуживанию и ремонту радиоаппаратуры.

# 1 Общие сведения об импульсных источниках питания, обзор литературы

## 1.1 Типы систем питания

Внутри системы питания можно рассматривать следующие три основные технологии питания[1]:

- линейные стабилизаторы;
- импульсные источники питания с широтно-импульсной модуляцией (pulse- width modulation, PWM);
- резонансная технология импульсных источников питания с высоким КПД.

Все рассмотренные технологии имеют свои достоинства и недостатки и выбор той или иной должен быть выполнен на основании перечня решаемых задач.

### Линейный стабилизатор

Линейные стабилизаторы часто используются в стационарном оборудовании. В этом случае избыточное тепловыделение и относительно низкий КПД не являются важными параметрами в данных ИС. С другой стороны, это решение использует недорогие готовые микросхемы и, следовательно, имеет быстрое время обработки. Эти типы стабилизаторов наиболее популярны, когда они монтируются на панель и имеют напряжение питания менее 40 В. В этом случае они достаточно эффективны. Средняя эффективность каждого линейного регулятора составляет от 35 до 50 процентов. Потери связаны с диссипацией тепловой энергии [1].

### Импульсные источники питания с ШИМ

Импульсные источники питания с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) представляют собой намного более универсальный и эффективный вариант преобразования напряжения нежели линейные стабилизаторы. Как

правило область их применения связана с необходимостью получения высокого КПД и низких показателей тепловыделения: переносные устройства, портативные измерительные изделия, авиация, автономные приборы и т.д.

Данный тип преобразователя имеют меньший вес, в сравнении с линейными аналогами, за счет применения менее громоздких систем теплоотвода. Такие источники питания, однако, более дорогостоящи и требуют больше времени на разработку. [2]

Резонансная технология импульсных источников питания с высоким КПД.

Источники питания, построенные по данному принципу, имеют наименьшие масс-габаритные параметры из рассмотренных выше. Также данный тип ИВП позволяет обеспечить наименьший уровень излучения (помех), что может оказывать влияние для решения специальных задач. Зачастую ИВП, использующие резонансную технологию применяют в оборудовании летательных аппаратов, космических кораблей и ином оборудовании, критичном к весу конструкции.

Недостатком данной технологии является более высокая сложность проектирования устройств, а также их более высокая стоимость относительно ИВП, выполненных по иным технологиям. [4]

В таблице 1 подведены некоторые итоги, которые помогут принять компромиссное решение в отношении выбора подходящей технологии проектируемого источника питания.

Таблица 1 Сравнение четырех технологий источников питания

Показатель	Линейный стабилизатор	Импульсный стабилизатор с ШИМ	Импульсный стабилизатор с резонансным переходом	Квазирезонансный импульсный стабилизатор
Стоимость	Низкая	Высокая	Высокая	Очень высокая
Масса	Большая	Небольшая	Небольшая	Небольшая
RF-шум	Отсутствует	Высокий	Средний	Средний
КПД	35-50%	80-90%	90-95%	90-97%
Несколько выходов	Нет	Есть	Есть	Есть



## 1.2 Патентно-информационные исследования

### Справка

#### О патентных исследованиях по НИР

#### Импульсные источники питания

---

(наименование проекта)

Цель патентных исследований: установление уровня техники

1. Задание на проведение патентного поиска

Название предметов поиска, подлежащих патентной разработке[5]:

Импульсные источники питания

Таблица 2 – Страны и глубина поиска:

РФ	2005 – 2015	Великобритания	2005 – 2019
Япония	2005 – 2015	Франция	2005 – 2019
США	2005 – 2015	Германия	2005 – 2019

Таблица 3 – Результаты проведения патентного поиска

Страны	Индекс МКИ <sup>2</sup> - 7МПК	Вид использованных источников информации	Глубина поиска	Выявленные аналоги
РФ	<u>H02K 5700</u> <u>H02K</u> <u>17/18</u>	<a href="http://www.freepatent.ru">http://www. freepatent.ru</a> [7]		Пат. РФ №2411625 2011.10.02 МПК <u>H02K 57/00</u> <u>H02K 1718</u>
РФ	<u>H02J7/02</u>	<a href="http://www.freepatent.ru">http://www. freepatent.ru</a> [8]		Пат. РФ № 2513902 2014.20.04 МПК <u>H02J7/02</u>
РФ	<u>H02K57/00</u>	<a href="http://www.freepatent.ru">http://www. freepatent.ru</a> [9]		Пат. РФ № 2340996 2008.10.12 МПК <u>H02K57/00</u>
РФ	<u>H05B41/30</u> <u>H02M7/53</u>	<a href="http://www.freepatent.ru">http://www. freepatent.ru</a> [10]		Пат. РФ № 2271079 2006.27.02 МПК <u>H05B41/30</u> <u>H02M7/53</u>

Продолжение Таблицы 3

Страны	Индекс МКИ <sup>2</sup> - 7МПК	Вид использованных источников информации	Глубина поиска	Выявленные аналоги
США	H01F30/04	<a href="https://patents.google.com/patent/US7218534">https://patents.google.com/patent/US7218534</a> [11]		Пат. США №7218534 2007.15.05
США	G06F1/26	<a href="https://patents.google.com/patent/US7539023B2/en">https://patents.google.com/patent/US7539023B2/en</a> [12]		Пат. США №7539023 2009.26.05

### 1.3 Отечественные и зарубежные производители импульсных источников питания. Продукция, технические показатели, сравнительные характеристики

В настоящее время более 50 компаний, среди которых имеются отечественные, и зарубежные производители, проектируют и производят импульсные источники питания, предназначенные для применения в компьютерной технике (блоки питания форм-факторов АТХ, ВТХ и т.д.), а также в различных областях радиоэлектроники, ориентированных на массовое и специальное потребление. В таблице 4 представлены импульсные источники питания, производимые крупнейшими отечественными и зарубежными производителями, их основные технические показатели и целевое назначение (область применения).

Таблица 4 – Импульсные источники питания крупнейших отечественных и зарубежных производителей, области применения ИИП

Производитель	Продукция /серия	Тип преобразователя	Диапазон выходных мощностей, Вт	КПД, %	Регулировка выходных напряжений и токов	Применение
АЕДОН, Россия	МАО-СБ	АС/DC	20 – 1200	80	+	Промышленная и специальная аппаратура
	МАО-СГ	АС/DC	30 – 3000	90	+	
	КАН	АС/DC	25 – 1000	90	+	
	КАН-Д	АС/DC	50 – 600	90	+	

Продолжение таблицы 4

Производитель	Продукция /серия	Тип преобразователя	Диапазон выходных мощностей, Вт	КПД, %	Регулировка выходных напряжений и токов	Применение
КОНТЭЛ, Россия	КИ	AC/DC	4 – 24	85	-	Промышленная аппаратура малой и средней мощности
	DR	AC/DC	12 – 14	85	-	
	MDR	AC/DC	10 – 60	85	-	
ФАРАДЕЙ ЭЛЕКТРОНИКС, Россия	FARADAY	AC/DC	18 – 240	80	-	Промышленная аппаратура средней и высокой мощности
ВМП, Россия	ВМП3	DC/DC	2.5 – 3	80	-	Промышленная и специальная аппаратура малой и средней и высокой мощности
	ВМП6	DC/DC	5 – 6	80	-	
	ВМП10	DC/DC	9 – 10	80	-	
	ВМП15	DC/DC	12 – 15	80	-	
	ВМП50	DC/DC	40 – 50	80	-	
	ВМПС60	DC/DC	50 – 60	80	-	
	ВМПК150	DC/DC	50 – 150	80	-	
	ВСМ6	DC/DC	6	80	-	
	ВСМ15	DC/DC	15	80	-	
	ВСМ20	DC/DC	20	80	-	
	ВСМ30	DC/DC	30	80	-	
ВСМ100	DC/DC	90 – 100	80	-		
MEAN WELL, Тайвань	G3	AC/DC	15 – 150	80	-	Промышленная аппаратура малой и средней мощности
	NE	AC/DC	15 – 350	80	-	
	LRS	AC/DC	35 – 350	80	-	
	SE	AC/DC	100 – 1500	80	-	
	PFC	AC/DC	75 – 750	80	-	
	Moving Sign	AC/DC	150 – 400	80	-	
	SPV	AC/DC	150 – 1500	80	-	
	U-Bracket	AC/DC	150 – 500	80	-	
	RSP	AC/DC	75 – 3000	85	-	
	RST	AC/DC	5000 – 10000	90	-	
	G5	AC/DC	75 – 600	80	-	
	MSP	AC/DC	100 – 600	80	-	
HEP	AC/DC	100 – 600	80	-		

Продолжение таблицы 4

Производитель	Продукция /серия	Тип преобразователя	Диапазон выходных мощностей, Вт	КПД, %	Регулировка выходных напряжений и токов	Применение
AIMTEC, Канада	AME1	AC/DC	1	80	-	Промышленная аппаратура малой и средней мощности
	AME2	AC/DC	2	80	-	
	AME3	AC/DC	3	80	-	
	AME5	AC/DC	5	80	-	
	AME10	AC/DC	10	80	-	
	AME12	AC/DC	12	80	-	
	AME15	AC/DC	15	80	-	
	AME20	AC/DC	20	80	-	
	AME25	AC/DC	25	80	-	
	AME30	AC/DC	30	80	-	
	AME40	AC/DC	40	80	-	
	AME60	AC/DC	60	80	-	
	AME90	AC/DC	90	80	-	
	AME120	AC/DC	120	80	-	
AME150	AC/DC	150	80	-		
POWER-ONE, США	ABC	AC/DC	40 – 600		-	Промышленная и специальная аппаратура малой и средней и высокой мощности
	MBC	AC/DC	40 – 450	80	-	
	MAP	AC/DC	40 - 140	80	-	
	MPB	AC/DC	125 – 150	80	-	
	MPU	AC/DC	150 – 200	80	-	
	PFC	AC/DC	250 – 500	80	-	
	MODULAR	AC/DC	900 – 1600	80	-	
	FXP	AC/DC	6000 – 18000	80	-	
	TCP	AC/DC	3500	80	-	
	BREU	AC/DC	2000 – 3000	80	-	
CHINFA, Тайвань	KAM	AC/DC	7 – 15	80	-	Промышленная аппаратура малой и средней мощности
	KAMN	AC/DC	25 – 40	80	-	
	DRA	AC/DC	5 – 480	80	-	
	DRAN	AC/DC	30 – 120	80	-	
	WRA	AC/DC	120 – 960	80	-	
	DBR	AC/DC	30 – 60	80	-	
	FDD	DC/DC	1 – 25	80	-	
	RDD	DC/DC	5 – 8	80	-	
	TDD	DC/DC	5 – 40	80	-	
	IDD	DC/DC	5 – 15	80	-	

## 1.4 Основные принципы работы импульсных источников питания с ШИМ

Проанализировав типовые схемы построения преобразователей напряжения можно сделать вывод, что любая схема построения устройства имеет как преимущества, так и недостатки. Схема построения преобразователя напряжения влияет не только на мощностные характеристики, но также и стоимостные. Заданные технические требования могут обеспечить несколько схемотехнических решений построения источников питания, но только одно из них обеспечит оптимальные рабочие характеристики.

Основными факторами, определяющими оптимальный выбор типа преобразователя, являются следующие:

- Наличие гальванической развязки входного и выходного напряжений.
- Понижающий или повышающий преобразователь.
- Пиковые значения тока и напряжения в нагрузке.
- Предельное напряжения на ключевых элементах.

Сопоставление преимуществ различных типов преобразователей приведено в таблице 5. Варианты построения импульсных преобразователей без изолирующих трансформаторов, как правило применяются для устройств, которые монтируются на печатной плате. Зачастую они используются для электропитания устройств, имеющих распределенную систему питания, в которых устройство содержит несколько печатных плат, и на каждой плате сформированы собственные ИВП[1].

Повышение рабочего напряжения, с которым работает ИИП, накладывает дополнительные требования на используемые компоненты. При импульсном режиме работы возникает риск того, что максимально допустимые параметры компонентов будут превышены и они выйдут из зоны устойчивого функционирования (safe operating area, SOA), что в итоге приведет к выходу их из строя.

Для топологий с изолирующим трансформатором, промышленное производство было распределено по топологиям, в зависимости от различных диапазонов выходной мощности как показано на в таблице 5 [2].

При выходной мощности от 150 до 1000 Вт оптимальным вариантом становится полумостовая (half-bridge) топология, в которой стоимость элементов выше, однако еще в разумных пределах. В полумостовом преобразователе на первичную обмотку подается только половина входного напряжения, благодаря чему пиковые токи не достигают предельных значений для полупроводниковых ключей[13].

Таблица 5 – Сравнение топологий импульсных источников питания с ШИМ

Топология	Диапазон мощностей, Вт	Диапазон напряжений Vin(DC)	Изоляция Вход/выход	Типичный КПД, %	Относительная стоимость элементов
Понижающие преобразователи	0 – 1000	5 – 40	Нет	78	1.0
Повышающие преобразователи	0 – 150	5 – 40	Нет	80	1.0
Инвертирующие преобразователи	0 – 150	5 – 40	Нет	80	1.0
Однотранзисторные Прямоходовые преобразователи	0 – 150	5 – 500	Да	78	1.4
Обратноходовые преобразователи	0 – 150	5 – 500	Да	80	1.2
Пушпульные преобразователи	100 – 500	5 – 1000	Да	75	2.0
Полумостовые преобразователи	100 – 500	5 – 1000	Да	75	2.2
Полномостовые преобразователи	400 – 2000+	5 – 1000	Да	73	2.5

Произведенный выше обзор типов импульсных преобразователей позволяет выбрать для проектирования источника питания в соответствии с заданными техническими параметрами схему полумостового преобразователя, как наиболее полно отвечающую заданным требованиям (рис. 1). [17]



Рисунок 1 – Применение различных типов преобразователей

#### Выводы по главе

В данной главе проводилось исследование современных технических решений в области разработки схемотехники источников питания и методов их проектирования.

#### Основные этапы работы:

- Дано общее описание импульсного источника питания, чем он отличается от других типов вторичных источников питания, перечислены достоинства и недостатки ИИП;
- Представлена общая классификация ИИП, перечислены задачи, решаемые ИИП, рассмотрены области применения ИИП;
- Выполнен анализ и сравнение основных топологий построения ИИП;
- Выполнен патентный поиск по теме данной работы.

## 2 Разработка структурной схемы источника питания

### 2.1 Структурная схема ИИП

Структурная схема импульсного источника питания состоит из следующих блоков[6]:

– Входной фильтр. Данный фильтр предназначен для изолирования высокочастотных колебаний в источнике питания и предотвращения попадания данных помех в питающую сеть. Поскольку преобразователь в импульсном блоке питания работает на высокой частоте, то в процессе работы ИБП происходит генерация высокочастотных помех. Величина помех обусловлена от частоты, на которой работают силовые ключи, а также от качества монтажа и совокупной длины проводников на плате. Необходимость изоляции первичной сети от внутренней схемы блока питания обусловлена требованиями техники безопасности и помехоустойчивости функционирования электронной аппаратуры.

– Выпрямитель. Задача выпрямителя преобразование переменного напряжения сети питания в постоянное напряжение, которое и будет поступать на преобразователь напряжения. Как правило, схема выпрямителя выполняется по мостовой схеме выпрямления, что обеспечивает необходимое качество выпрямления и сглаживания напряжения.

– Каскад силовых ключей. Данный блок предназначен для коммутации выпрямленного постоянного напряжения и преобразования постоянного напряжения в импульсное с высокой частотой следования импульсов. Данный прием позволяет существенно уменьшить масса-габаритные параметры импульсного трансформатора, а также его стоимость.

В качестве транзисторов могут быть использованы мощные биполярные, полевые или IGBT транзисторы, но на практике чаще всего применяют MOSFET-транзисторы.



– ШИМ-контроллер. Данный блок представляет собой схему управления силовым каскадом транзисторов и предназначен для выработки правильных сигналов для управления транзисторами. ШИМ-контроллер, как правило, выполнен на интегральной микросхеме с необходимой дополнительной обвязкой. В зависимости от величины выходного сигнала контроллер генерирует управляющие импульсы для силовых ключей (ШИМ-модуляция). Также в задачу контроллера входит обеспечение защиты транзисторов от сквозного тока между ними, и перегрузки в момент старта при зарядке емкостей электролитических конденсаторов.

– Импульсный трансформатор и выпрямитель.

Данный блок как раз и производит преобразование напряжения и его уровня. После прохождения трансформатора, переменное напряжение выпрямляется и подается на сглаживающий фильтр.

В отличие от традиционных трансформаторов низкой частоты, применяемых в трансформаторных источниках питания, импульсный трансформатор предназначен для работы на высоких частотах и передачи сигналов с быстрыми фронтами. Данные особенности накладывают существенные требования как к конструкции трансформатора, так и к типу материалов, используемых при его изготовлении. При этом размеры импульсного трансформатора много меньше размеров низкочастотного трансформатора[22].

В связи с высокой частотой преобразования энергии, к выпрямителю также приводятся дополнительные требования. В отличие от выпрямителей низкочастотных сигналов, в данном случае вместо диодов используются быстродействующие диоды Шоттки.

– Выходной фильтр обеспечивает эффективное сглаживания выпрямленного высокочастотного напряжения в соответствии с заданными требованиями.

– Источник дежурного питания

Структурная схема проектируемого источника питания представлена на рисунке 2

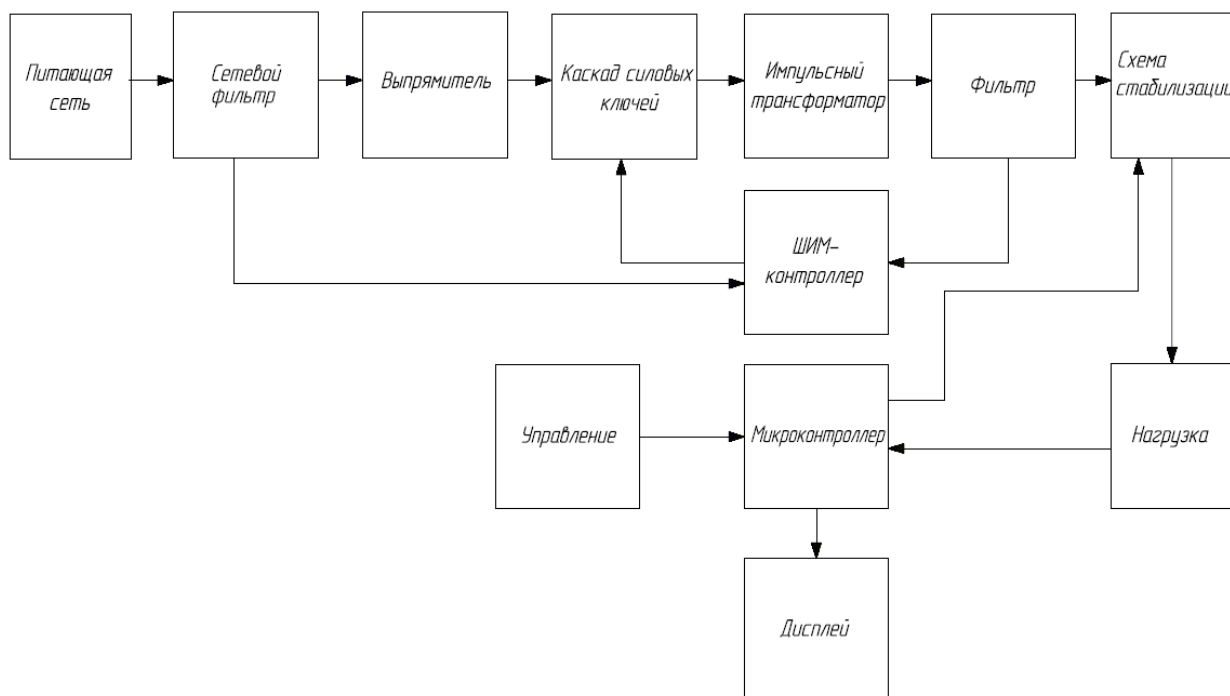


Рисунок 2 – Структурная схема источника питания

## 2.2 Описание структурной схемы ИИП

### 2.2.1 Фильтр помех

Фильтр помех необходим для фильтрации входного переменного тока от электромагнитных помех (EMI), обеспечения частоты 50 Гц колебаний входного тока, свободного от каких-либо искажений.

### 2.2.2 Входной выпрямитель и фильтр

Функциональным назначением входного выпрямительного каскада является формирование в нагрузке однополярных импульсов напряжения. Для питания большинства электронных схем аппаратуры РЭА требуется постоянное напряжение, в связи, с чем принимаются специальные меры для устранения пульсаций выходного напряжения мостового выпрямителя. Устранение пульсаций на выходе выпрямителя достигается подключением к

нему сглаживающего фильтра, простейшим таким фильтром является конденсатор С, включенный на выходе выпрямителя параллельно нагрузке.

Для питания каждого конкретного устройства аппаратуры РЭА в его технической документации обязательно указывается кроме номинального питающего напряжения, допустимый коэффициент пульсаций напряжения, размах пульсаций или допустимый процент отклонения входного напряжения от номинального. Поэтому источник питания должен быть спроектирован так чтобы удовлетворять этим требованиям и не превышать допустимые ограничения[6].

Функциональным назначением входного выпрямительного каскада является формирование в нагрузке однополярных импульсов напряжения заданной формы. Для питания большинства электронных схем аппаратуры РЭА требуется постоянное напряжение, в связи, с чем принимаются специальные меры для устранения пульсаций выходного напряжения мостового выпрямителя. Устранение пульсаций на выходе выпрямителя достигается подключением к нему сглаживающего фильтра, простейшим таким фильтром является конденсатор С1.[23-26]

Для питания каждого конкретного устройства аппаратуры РЭА в его технической документации обязательно указывается кроме номинального питающего напряжения, допустимый коэффициент пульсаций напряжения, размах пульсаций или допустимый процент отклонения входного напряжения от номинального. Поэтому источник питания должен быть спроектирован так чтобы удовлетворять этим требованиям и не превышать допустимые ограничения.

### **2.2.3 Импульсный преобразователь**

Высокочастотный трансформатор, транзисторный преобразователь (ключи), устройство управления вместе образуют – импульсный преобразователь. Импульсные преобразователи бывают индуктивного или емкостного типа[1].

Глубина широтно-импульсной модуляции характеризуется коэффициентом заполнения

$$\gamma = t_{и} / T,$$

где  $t_{и}$  – длительность импульса управления;  $T = f^{-1}$  – период повторения.

В общем случае коэффициент заполнения  $0 \leq \gamma \leq 100\%$  [3].

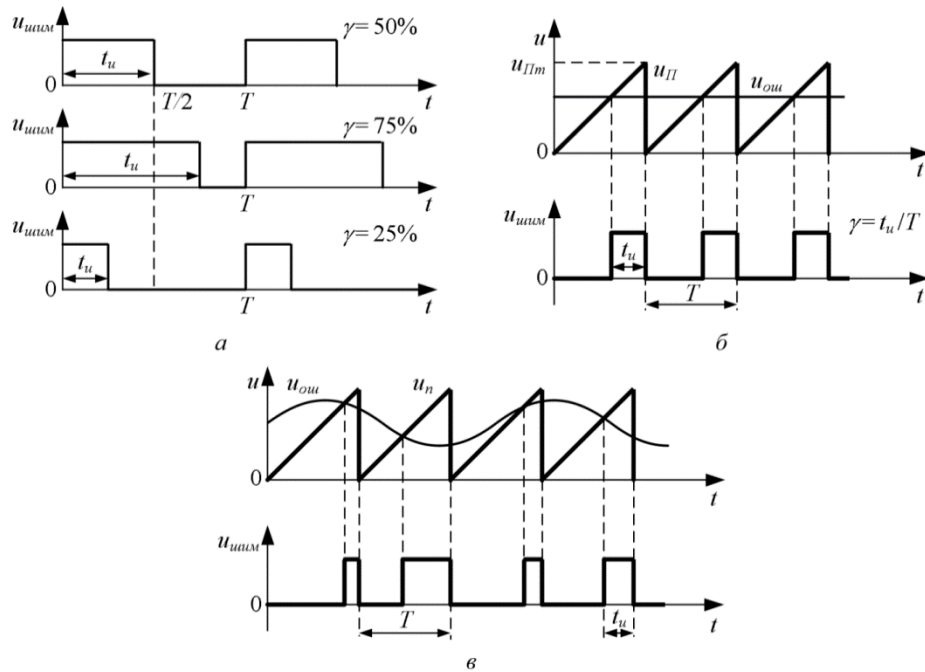


Рисунок 3 – Широтно-импульсная модуляция: форма импульсов (а); способ получения импульсов (б); временные диаграммы, иллюстрирующие работу модулятора (в)

### 2.2.4 Выходные выпрямители и фильтры

Целью этого блока является генерация напряжения питания. Через вторичную цепь высокочастотного трансформатора, созданного для каждого из пяти источников питания, напряжение поступает на выпрямительный диодный мост, создающий однополярный импульс напряжения, который затем сглаживается LC-фильтром. [8]

### 2.2.5 Блок контроля и защиты

Блок контроля

Функциональным назначением данного блока является выработка сигнала ошибки по напряжению и его подача на устройство управления. Ошибкой сигнала напряжения является разность между номинальным или требуемым выходным напряжением и реальным выходным напряжением.

#### Блок защиты

Функциональным назначением данного блока является предотвращение аварийных ситуаций, таких, например, как короткие замыкания в выходном каскаде. В этом случае блокируется питание микросхемы ШИМ-контроллера в результате чего прекращается работа импульсного трансформатора и выходная цепь изолируется от источника питания. Также к функциям данного блока можно отнести выработку специального сигнала “питание в норме по англ. Power Good”, который является контрольным для запуска питания потребителя энергии.

### **2.3 Функциональная схема ИИП**

На основании структурной схемы ИИП, приведенной на рис. 2, разработана электрическая функциональная схема ИИП, показана на рис. 2.4.

Схема управления то же что и драйвер транзисторного моста – представляет собой специализированную микросхему, предназначенную для формирования сигналов управления транзисторами.[4]

Использование драйверов обеспечивает ряд преимуществ:

- формирование необходимых уровней сигналов управления транзисторами;
- защита транзисторов от превышения тока;
- защита транзисторных полумостов от сквозных токов;
- выдерживание временной задержки между выключением верхнего и включением нижнего транзисторов полумоста;
- блокировка неправильных команд управления.

Инвертор на рис. 2.4 обозначен как высокочастотный инвертор, так как с целью снижения массовых и габаритных показателей трансформаторов для их работы выбираются высокие частоты  $f > 3$  кГц. В результате, габариты, массу и стоимость блока питания удастся уменьшить при сохранении высокого уровня КПД  $> 0.9$ .

ШИМ-контроллер, драйвер моста и высокочастотный инвертор вместе образуют импульсный преобразователь.

#### Выводы по главе

В данной главе выполнена разработка структурной и функциональной схем импульсного источника питания в соответствии с требованиями технического задания, описаны входящие в ИИП функциональные блоки, их назначение и функции.

#### Основные этапы работы:

- Приведена обобщенная структурная схема ИИП, описаны ее структурные блоки, их назначение и функции;
- Разработана функциональная схема ИИП, выполнено описание ее работы.

### 3 Выбор элементной базы

#### 3.1 Выбор микросхемы ШИМ-контроллера

Микросхема TL494

Микросхема TL494 состоит из ШИМ - контроллера и линейки компараторов, которые предназначены для отслеживания выходных напряжений и участвуют в формировании выходного сигнала P.G. Так же в микросхеме присутствует согласующий каскад, состоящий из трансформатора и транзисторных ключей. Аналогом TL494 является микросхема MPC494 фирмы NEC.

Внешний вид и цоколевка представлены на рисунке 5, а функциональная схема TL494 приведена на рисунке 4

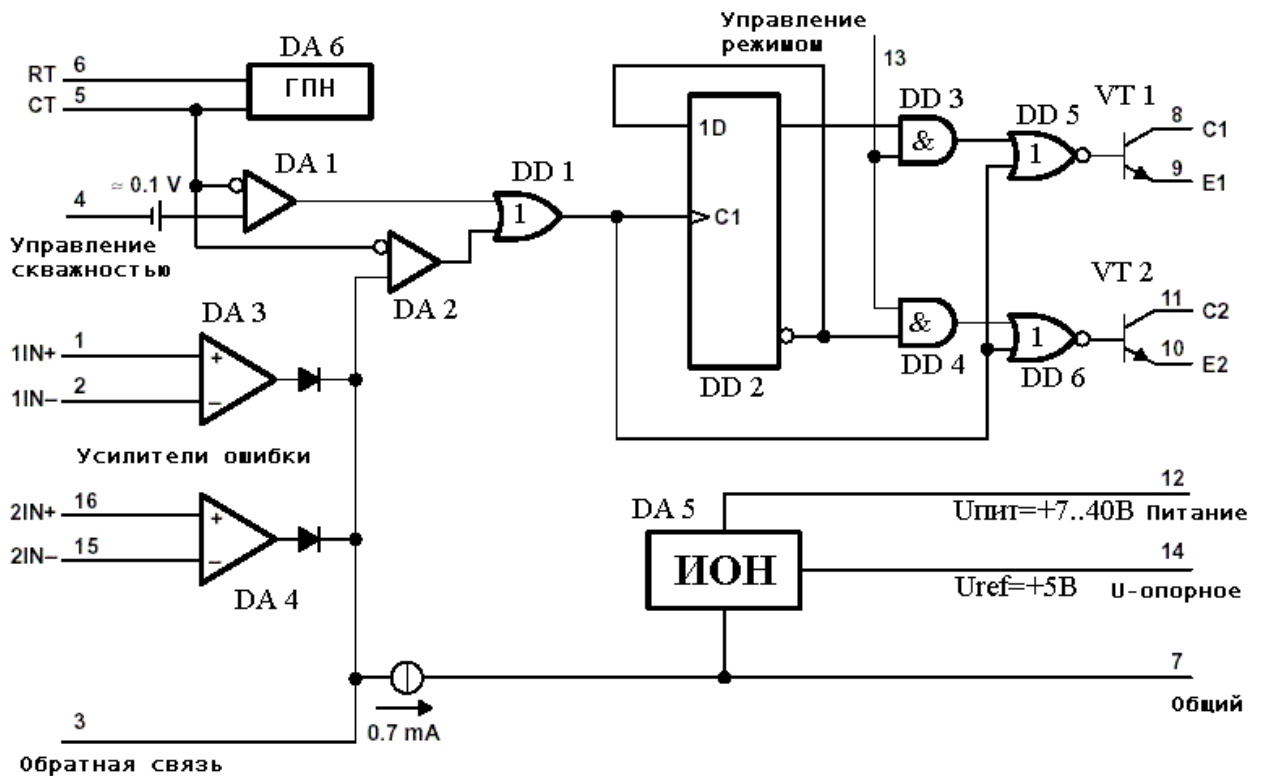


Рисунок 4 – Функциональная схема ИМС TL494

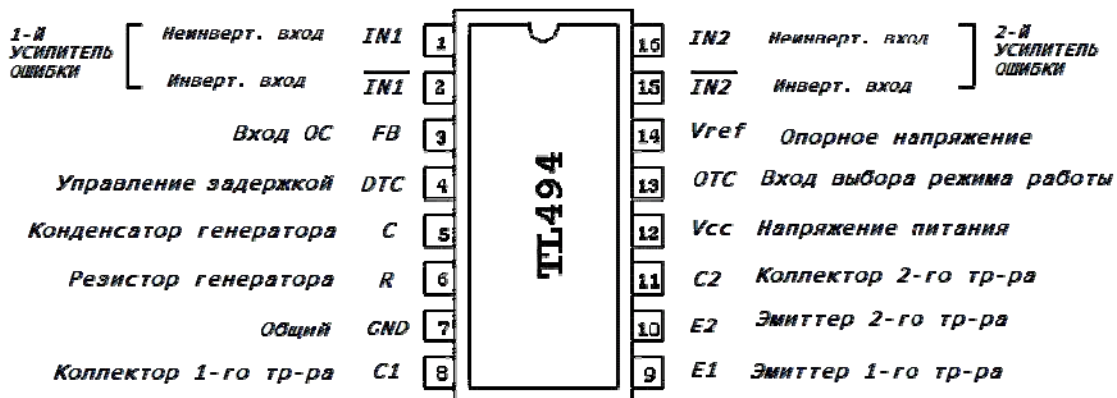


Рисунок 5 – Цоколевка микросхемы TL494

В составе данной ИМС TL494 входят следующие блоки:

- генератор пилообразного напряжения (ГПН);
- компаратор регулировки мертвого времени (DA1);
- компаратор регулировки ШИМ (DA2);
- усилитель ошибки 1 (DA3), используется в основном по напряжению;
- усилитель ошибки 2 (DA4), используется в основном по сигналу ограничения тока;
- стабильный источник опорного напряжения (ИОН) на 5В (вывод 14);
- схема управления работой выходного каскада.

Технические характеристики микросхемы TL494 представлены в таблице 6.



Таблица 6 – Рекомендуемые рабочие параметры

Параметры	Мин.	Макс.	Ед. Изм.
VCC Напряжение питания	7	40	В
VI Напряжение на входе усилителя	-0,3	VCC – 2	В
VO Напряжение на коллекторе		40	В
Ток коллектора (каждого транзистора)		200	мА
Ток обратной связи		0,3	мА
fOSC Частота генератора	1	300	кГц
CT Емкость конденсатора генератора	0,47	10000	нФ
RT Сопротивление резистора генератора	1,8	500	кОм
TA Рабочая температура TL494C TL494I	0	70	°C
	-40	85	°C

### 3.2 Выбор микроконтроллера

Для разработки системы ПОС решено использовать микроконтроллер компании Atmel, поскольку они являются одними из лидеров по соотношению цена/функциональные возможности [1]. Отличительные особенности контроллера ATmega 164[10]:

- Высокопроизводительный, маломощный 8-разрядный AVR-микроконтроллер
- Развитая RISC-архитектура
- 133 мощных инструкций, большинство из которых выполняются за один машинный цикл

Ввод-вывод и корпуса

- 53 –программируемые линии ввода-вывода
- 64-выв. корпус TQFP
- Рабочие напряжения
- 1.7 - 5.5В для ATmega164L

- 4.5 - 5.5В для ATmega164
- Градации по быстродействию
- 0 - 8 МГц для ATmega164L
- 0 - 16 МГц для ATmega164 [7]

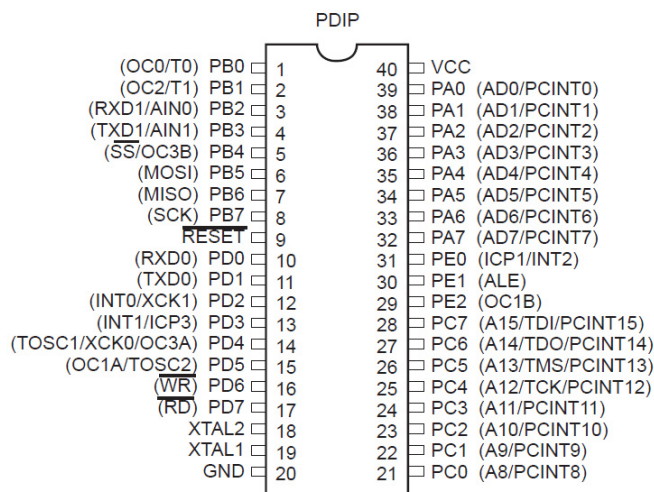


Рисунок 6 – Расположение выводов у ATmega164

ATmega 164 – маломощный 8-разр. КМОП микроконтроллер, основанный на расширенной AVR RISC-архитектуре.

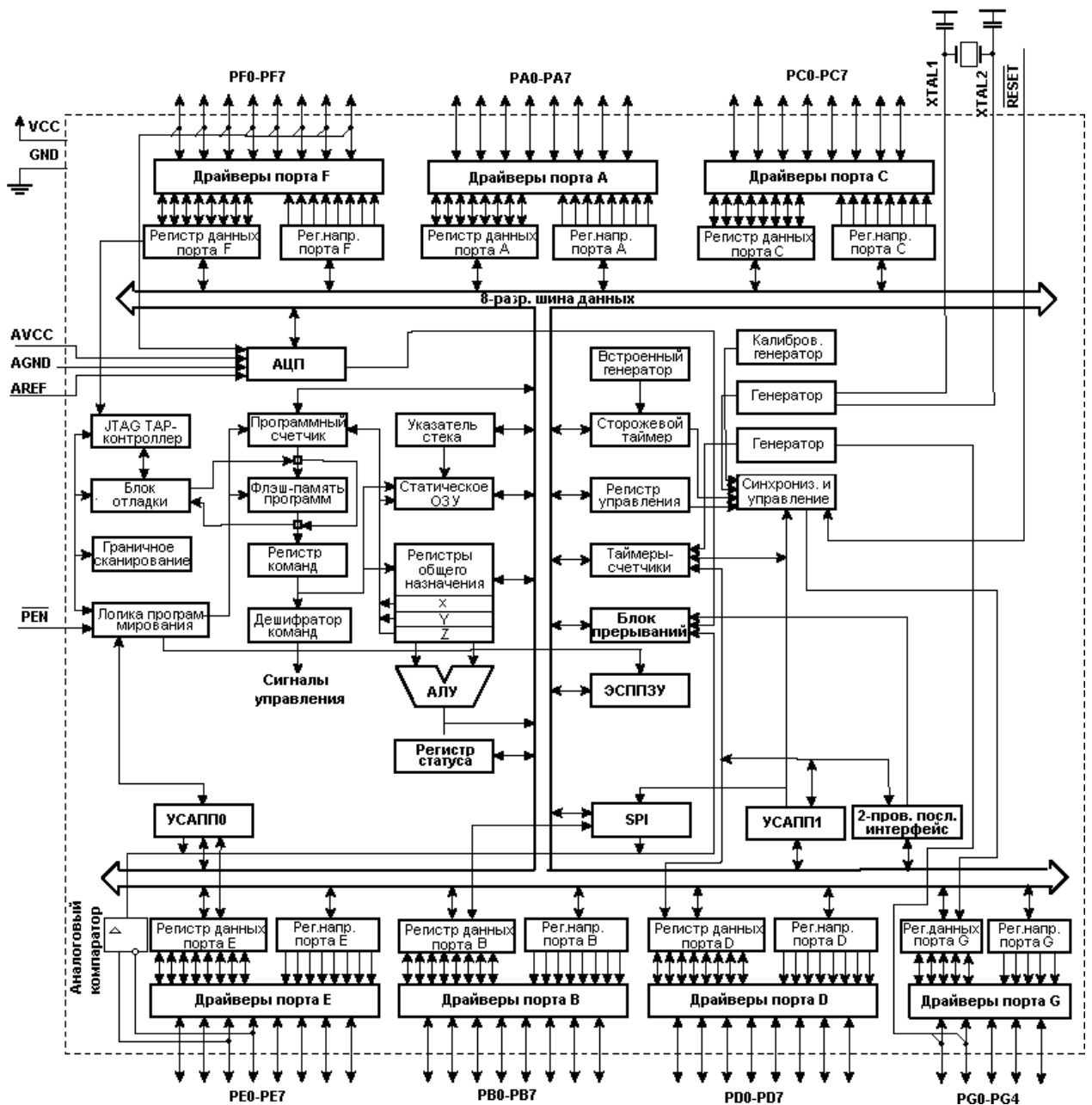


Рисунок 7 – Функциональная схема

### 3.3 Выбор дисплея

В качестве устройства для отображения информации используем ЖК дисплей МТ-16S2Н. Помимо того, что данный дисплей отечественного производства, он также имеет хорошие показатели параметров/стоимость. Данный дисплей МТ-16S2Н состоит из контроллера LSI и ЖК-панели. Контроллер управления KB1013VG6 товару ОАО «АНГСТРЕМ», аналогичный HD44780 от HITACHI и KS0066 от Samsung [16]. Модуль доступен со встроенной светодиодной подсветкой. Модуль отображает 2 строки из 16 символов. Символы отображаются в матрице 5x8 точек. Между символами являются интервалы шириной одной отраженной точки. Внешний вид показан на рисунке 8.



Рисунок 8 – ЖКИ МТ-16S2Н

Описание выводов дисплея и технические параметры представлены на рисунках 2 и 3.

Таблица 7 – Назначение внешних выводов

Вывод	Обозначение	Назначение вывода
1	GND	Общий вывод (0V)
2	Vcc	Напряжение питания (5V)
3	Vo	Управление контрастностью
4	A0	Адресный сигнал — выбор между передачей данных и команд управления
5	R/W	Выбор режима записи или чтения
6	E	Разрешение обращений к модулю (а также строб данных)
7	DB0	Шина данных (8-ми битный режим) (младший бит в 8-ми битном режиме)
8	DB1	Шина данных (8-ми битный режим)
9	DB2	Шина данных (8-ми битный режим)
10	DB3	Шина данных (8-ми битный режим)
11	DB4	Шина данных (8-ми и 4-х битные режимы) (младший бит в 4-х битном режиме)
12	DB5	Шина данных (8-ми и 4-х битные режимы)
13	DB6	Шина данных (8-ми и 4-х битные режимы)
14	DB7	Шина данных (8-ми и 4-х битные режимы) (старший бит)
15	+LED	+ питания подсветки
16	-LED	- питания подсветки

Таблица 8 – Основные технические характеристики МТ–16S2Н

Наименование		Обозначение	Мин.	Ном.	Макс.	Единицы измерения
Напряжение питания	логическое	Vcc-GND	4,5	5,0	5,5	В
	ЖКИ	Vcc-Vo	4,8	5,0	5,2	В
Ток потребления		Icc	—	0,8	1,0	мА
Входное напряжение высокого уровня		U <sub>IH</sub>	2,4	—	Vcc+0,6	В
Входное напряжение низкого уровня		U <sub>IL</sub>	-0,6	—	0,8	В
Напряжение питания подсветки при токе 70 мА			—	4,1	4,5	В
Ток подсветки			—	—	150,0	мА

## 4 Разработка принципиальной схемы источника питания

### 4.1 Эскизный расчет параметров ИИП

1. Вычислим максимальную выходную мощность

$$P_{\text{макс}} = U_{\text{out}} * I_{\text{out}} = 15 * 5 = 75 \text{ Вт}$$

2. Потребляемая мощность:

$$P_{\text{пот}} = P_{\text{макс}} / \eta = 75 / 0,8 = 93,75 \text{ Вт},$$

где  $\eta = 80\%$  – средний КПД преобразователя.

3. Среднее значение входного тока:

$$I_{\text{ном}} = P_{\text{пот}} / U_{\text{out}} = 93,75 / 220 = 0,42 \text{ А},$$

где  $U_{\text{ном}} = 220$  – напряжение питающей сети

4. Вычислим пиковый ток в зависимости от типа преобразователя:

$$I_{\text{пик}} = k * P_{\text{макс}} / U_{\text{out}} = 2,9 * 75 / 220 = 0,98 \text{ А},$$

где  $k = 2,3$  – коэффициент, зависящий от типа преобразователя.

5. Расчет однофазного мостового автономного инвертора напряжения выполняем согласно методике, приведенной в [1].

6. Для определения коэффициента трансформации задаемся максимальным коэффициентом скважности  $\gamma_{\text{max}} = 0,9$ .

## 4.2 Расчет параметров входной цепи и схемы преобразователя

Блок питания

Блок питания предназначен для обеспечения рабочих режимов всех электронных компонентов.

Входное переменное напряжение 220 В поступает через на разъем ХР1.

Сетевой плавкий предохранитель предназначен для защиты питающей сети от перегрузки и возможных коротких замыканиях (КЗ) в первичной цепи и практически не защищает схему от внутренних перегрузок и КЗ в нагрузке.[24] Номинал предохранителя выбирается по максимальному значению входного тока:

$$I_{FU} = I_{2\_MAX} \cdot K_3 = 9 \cdot 1,2 = 10,8 A \quad (4.1)$$

Соответственно используем предохранитель выберем с током до 11А, номинальное напряжение до 380В.

Для получения выпрямленного напряжения использован блок выпрямительных диодов VD2

– Выберем диодный мост входной цепи по следующим параметрам.

Максимальное напряжение на диоде:

$$U_{VD2} = U_C \cdot K_3 \cdot \sqrt{2} = 242 \cdot 1,1 \cdot 1,41 = 375,4 B, \quad (4.2)$$

где  $U_C = 242B$  – максимальное напряжение в питающей сети;

$K_3 = 1,1$  – коэффициент запаса;

Найдем среднее напряжение диода[10]:

$$\int U_{CF} = \frac{2}{T} \int_0^T E_m \cdot \sin(\omega t) d\omega t = 2 \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi E_m \cdot \frac{\sin(\omega t) d\omega}{\pi} = 2 \frac{E_m}{\pi}, \quad (4.3)$$

где  $E_m$  – амплитуда напряжения, подаваемого на мост, отсюда:

$$U_{CF} = \frac{2}{\pi} \sqrt{31} \cdot 1 = \sqrt{19} \cdot 8$$

Максимальное обратное напряжение равно:

$$U_{I\_OVB\_Pmax} = E_m \cdot \sqrt{2} = \pi/2 U_{CF} = \sqrt{31} \cdot 1 B \quad (4.4)$$

Максимальный ток диода:

$$I_{VD_{\max}} = \frac{\pi}{2} I_2 = \frac{\pi}{2} 6 = 7,89 \text{ A} \quad (4.5)$$

Постоянная составляющая тока, проходящего через диод, может быть найдена по следующему выражению:

$$I_{VD_{CP}} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot I_2 = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot 6 = 5,38 \text{ A} \quad (4.6)$$

Для данной задачи выбираем диодную сборку – КВU8М с параметрами:

$$U_{\max} = 600 \text{ В}$$

$$I_{\max} = 8 \text{ А}$$

Временем восстановления составляет 30 мкс.

Конденсатор С7 выполняет роль фильтра, сглаживающего пульсации выпрямленного напряжения и тока. Частота сети 50Гц, суммарное падение напряжение на выпрямительных диодах составляет 1,4 В. Коэффициент пульсаций на выходе входного фильтра 5 %.[10]

Максимальное напряжение на конденсаторе:

$$U_{C6} = U_C \cdot K_3 \cdot \sqrt{2} = 242 \cdot 1,1 \cdot 1,41 = 375,4 \text{ В} , \quad (4.7)$$

Ток, протекающий через фильтрующую емкость:

$$i_c = C \frac{\Delta U_C}{\Delta t} \quad (4.8)$$

В конечных приращениях

$$C = \frac{i_c \cdot \Delta t}{\Delta U_C} , \quad (4.9)$$

где  $\Delta t$  - время разряда конденсатора;  $i_c$  - ток через конденсатор;  $\Delta U_C$  - изменение напряжение на конденсаторе за время разряда.

$$\Delta U_C = q \cdot U_{dc} = 0,05 \cdot 310 = 15,5 \text{ В}$$

Так как пульсации малы, то можно сделать допущение о постоянстве выпрямленного тока:

$$i_c = 6 \text{ А}$$

Время разряда конденсатора составляет половину периода колебания



напряжения питания на выходе ПЧ, которое при номинальной частоте преобразований в 10 кГц составляет:

$$\Delta t = \frac{1}{2 \cdot f} = 500 \text{ мкс} \quad (4.10)$$

Емкость конденсатора: 
$$C_6 = \frac{6 \cdot 500 \cdot 10^{-6}}{15,5} = 239,5 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$$

Соответственно, выбираем конденсатор номиналом 470 мкФ. Данный конденсатор также должен быть рассчитан на работу при напряжении 400 В и более. [3]

Для получения напряжения +5 В и +15 В использован понижающий трансформатор Т1 к которому подключен блок выпрямительных диодов VD1 (W06) Диодный мост предназначен для преобразования переменного напряжения в постоянное и защиты схемы при смене полярности входного напряжения. Для получения стабилизированного напряжения +15 В использован интегральный стабилизатор серии LM 78XX – LM7815, соответственно. [18] Конденсаторы С4 и С5 необходимы для «сглаживания» низкочастотных пульсаций питающего напряжения, их емкость равна 470 и 0.33 мкФ соответственно. Конденсатор С8 и С9 необходимы для «сглаживания» высокочастотных пульсаций питающего напряжения, емкость равна 1 мкФ. Номиналы фильтрующих конденсаторов соответствуют рекомендуемым значениям, приведенным в технической документации на данные ИМС. [21]

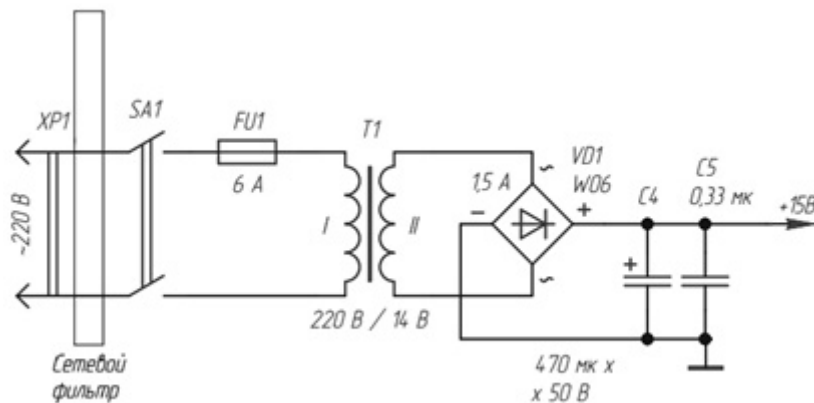


Рисунок 9 – Схема источника питания на 15 В

Расчет потерь

Вычислим величину потерь на диоде VD2:

$$P_{Din} = 2 \times I_{PRMS} \times V_F = 2 \times 4.23 A \times 0.6 B = 5.076 Bm .$$

Вычислим сопротивление первичной обмотки:

$$R_{PCu} = \frac{l_n \times N_P \times P_{100}}{A_P} = \frac{0,0644 \times 16 \times 17,2}{0,5} = 64. мОм ;$$

Вычислим величину сопротивление вторичной обмотки:

$$R_{SCu} = \frac{n \times l_n \times N_S \times P_{100}}{A_S} = \frac{8 \times 0,0644 \times 10 \times 17,2 \frac{мОм \times мм^2}{м}}{0,6 мм^2} = 2,01 мОм ,$$

где: удельное сопротивление меди  $P_{100} = 0,0172 Ом \times мм^2 / м$ .

Вычислим величину потерь в меди на первичной обмотке:

$$P_{PCu} = I_{LPK}^2 \times D_{max} \times \frac{1}{3} \times R_{PCu} = (4,6 A)^2 \times 0,5 \times \frac{1}{3} \times 64 \times 10^{-3} = 0,262 Bm ;$$

Вычислим величину потерь в меди во вторичной обмотке:

$$P_{SCu} = I_{SRMS}^2 \times D_{max} \times \frac{1}{3} \times R_{SCu} = (15 A)^2 \times 0,5 \times \frac{1}{3} \times 2,01 \cdot 10^{-3} = 0,075 Bm ;$$

Найдем суммарные потери в первичной и вторичной обмотках трансформатора [7, 15]:

$$\Sigma P_{Cu} = P_{PCu} + P_{SCu} = 0,262 Bm + 0,075 Bm = 0,337 Bm .$$

Потери на силовом транзисторе

Из таблицы характеристик транзистора имеем:  $C_0 = 50 n\Phi$  – выходная емкость сток-исток транзистора;  $R_{DSon} = 1,6 Ом (150 C^0)$  – выходное сопротивление сток-исток транзистора.

Расчет проведем при входном напряжении  $V_{DCmin} = 200 B$ ;

Найдем потери при включении транзистора:

$$P_{Son} = \frac{1}{2} \times C_0 \times V_{DCmin}^2 \times f = \frac{1}{2} \times 50 \times 10^{-9} \times (200 B)^2 \times 60 \times 10^3 = 0,3 Bm ,$$

где  $f = 60 кГц$  – рабочая частота преобразователя.

Найдем потери при выключении транзистора:

$$P_{Soff} = \frac{1}{6} \times (V_{DCmin} + V_R) \times I_{LPK} \times f \times t_r = \frac{1}{6} \times (200 + 100) \times 4,6 \times 60 \times 10^3 \times 30 \cdot 10^{-9} = 0,4Bm ;$$

Вычислим величину потерь на сопротивлении сток-исток при открытом транзисторе:

$$P_D = R_{DSon} \times I_{LPK}^2 \times D_{max} = 0,2 \times (4,6A)^2 \times 0,5 = 2,1Bm ;$$

Подсчитаем общие потери на транзисторе:

$$P_{LOSES} = P_{Son} + P_{Soff} + P_D = 0,3Bm + 0,4Bm + 2,1Bm = 2,8Bm ;$$

Коэффициент полезного действия трансформатора

$$\eta = \frac{P_{mp} - \Delta P_{сум}}{P_{mp}} = \frac{400 - (2,86 + 0,337 + 0,075 + 0,262 + 5,076)}{400} = 0,914 = 91,4\%$$

Рассчитаем параметры выходного конденсатора.

Параметры конденсатора должны отвечать следующим условиям:

- Емкость конденсатора должна быть достаточной для обеспечения стабильной петлю обратной связи. Повышение емкости позволит максимально сгладить величину выбросов при изменении нагрузки, а также снизить уровень пульсаций выходного напряжения

- Необходимо выбирать в качестве данного конденсатора модель с наименьшим эквивалентным последовательным сопротивлением (ESR). Это позволит снизить потери и нагрев при протекании импульсных токов большой величины

Максимальная импульсная нестабильность выходного напряжения в соответствии с ТЗ составляет:

$$V_{out} = \frac{12 \cdot 1\%}{100} = 0,12B ;$$

Минимальная емкость конденсатора:

$$C_{out} = \frac{I_{outmax}}{\Delta V_{out} \times f} = \frac{25}{0,12 \times 60 \cdot 10^3} = 397,2\mu\Phi ;$$

Выбираем конденсатор на 470 мкФ – 63В.

### 4.3 Электрический расчет схемы ШИМ-контроллера

Тоже вывод ГПН, предназначенный для подключения к нему времязадающего резистора  $R_t$ , второй конец которого подсоединяется к общему проводу.

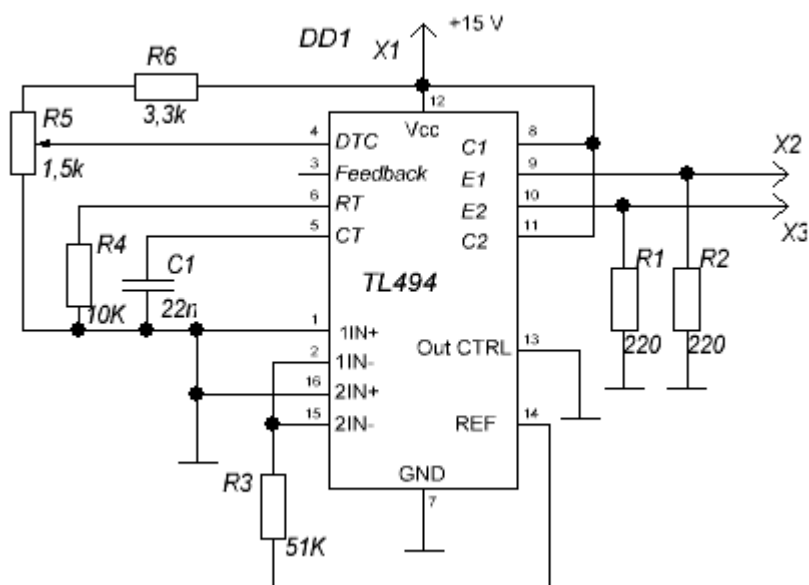


Рисунок 10 – Схема включения преобразователя ШИМ-контроллера

Величины  $R_t$  и  $C_t$  определяют выходную частоту ГПН, и рассчитываются по формуле для одноктного режима работы;

$$f_{osc} = \frac{1}{R \cdot C}$$

где  $F$ ,  $R$ ,  $C$  - кГц, кОм,

мкФ. Для двухтактного режима работы формула имеет следующий вид;

$$f_{osc} = \frac{1}{2R \cdot C}$$

Для ШИМ-контроллеров

других фирм, частота рассчитывается по такой же формуле, за исключением - цифру 1 необходимо будет поменять на 1,1.

#### 4.4 Расчет схемы микроконтроллера

Подробное описание используемых элементов было предоставлено в предыдущих разделах.

Напряжение питания микроконтроллера, в соответствии с техническим описанием, соответствует уровню + 5В. При работе микроконтроллера, поскольку плата работает в составе сети и присутствует передача данных, в качестве тактового генератора выступает кварцевый резонатор на 16 МГц. Схемы подключения всех используемых компонентов выполнены в соответствии с рекомендациями производителей, представленных в технических описаниях на данные микросхемы. Номиналы элементов ремня также взяты из описания микросхемы.

Микроконтроллер имеет ограничение по суммарному току, протекающему через любой вывод питания, составляющий 300 мА. Максимальный ток через любой другой вывод не должен превышать 40 мА[10]. Для защиты выходных линий контроллера используем токоограничивающие резисторы. Из [11] предельный ток вывода контроллера равен 10 мА

$$I = 10 \text{ мА}$$

$$R4 = \frac{U_{num}}{I} = \frac{5}{10 \cdot 10^{-3}} = 500 \text{ Ом} (560 \text{ Ом E24})$$

Рассчитаем требуемую мощность для 1 блока питания:

1. Потребление микроконтроллера АТМега 164 при частоте работы 16 МГц составляет 9 мА. Следовательно, потребляемая мощность  $P_{DS1}$  равна:

$$P_{DS1} = I_{DS1} \cdot U_{num} = 9 \cdot 10^{-3} \cdot 5 = 45$$

где  $I_{DS1}$  – потребляемый ток микросхемы

$U_{num}$  – напряжение питания

2. Потребление ИМС составляет 53 мА, следовательно, потребляемая мощность равна:

$$P_{DD2,DD3} = I_{DD2,DD3} \cdot U_{num} = 53 \cdot 10^{-3} \cdot 5 = 165 \text{ мВт},$$

где  $I_{DD2,DD3}$  – ток потребления микросхем.

3. Потребление блока индикации в максимальном режиме  $P_{SVD}$

$$P_{SVD} = I_{LCD} \cdot U_{num} = 150 \cdot 5 \cdot 10^{-3} = 0.75 \text{ Вт},$$

$I_{LCD}$  – ток потребления ЖК индикатора я подсветкой.

Суммарная потребляемая мощность  $P_{сум}$  равна:

$$P_{сум1} = 45 + 165 + 750 = 960 \text{ мВт}.$$

1. Максимальный выходной ток стабилизатора  $I_{DA2}$

$$I_{DA2} = P_{сум} / U_{num} = 960 / 5 = 192 \text{ мА}, \quad (2.12)$$

где  $P_{сум}$  – суммарная потребляемая мощность.

Расчет гальванической развязки схемы управления на оптронах:

1. Из [11] выберем номинальный ток диода оптрона  $I_D = 10 \text{ мА}$

2. Определим номинал резистора  $R9$ :

$$R9 = \frac{U_{num} - U_{над} - R_{BX} \cdot I_D}{I_D} = \frac{5 - 1,2 - 20 \cdot 10 \cdot 10^{-3}}{10 \cdot 10^{-3}} = 327 \text{ Ом} (330 \text{ Ом E24}),$$

где  $U_{над}$  – падение напряжения на диоде оптрона,  $U_{num}$  – напряжение питания 5В,  $R_{BX}$  – выходное сопротивление портов микроконтроллера.

3. Рассчитаем ток коллектора  $I_K$ :

$$I_K = \frac{CTR \cdot I_D}{100\%} = \frac{100\% \cdot 10 \cdot 10^{-3}}{100\%} = 10 \text{ мА},$$

где  $CTR = 100\%$  – коэффициент передачи тока.

4. Рассчитаем номинал резистора  $R6$ :

$$R7 = K \cdot \frac{U_{num} - U_{нас}}{I_K} = 5 \cdot \frac{9 - 0,4}{10 \cdot 10^{-3}} = 4,38 \text{ кОм} (4,7 \text{ кОм, ряд E24}).$$

где  $U_{нас}$  – напряжение насыщения база-эмиттер.

Коэффициент  $K = 5$  – глубина насыщения.

Данный интерфейс обеспечивает надежную гальваническую развязку/

Микросхемы *DD1* и *DD2* представляют собой приемопередатчики соответствующих стандартов необходимые для осуществления связи с центром мониторинга и передачи данных о состоянии здоровья пользователя системы.

Микроконтроллер *DS1* выполняет необходимые расчеты и измерения параметров, а также организует работу системы мониторинга, управляя остальными модулями. Для индикации режима работы предназначен ЖКИ индикатор *HI*.

Принципиальные схемы устройства представлены на рисунках 11 и 12.

#### **4.5 Разработка блок-схемы алгоритмов работы**

На рисунке 13 представлена блок схема алгоритма работы микроконтроллера модуля сбора данных.

При подаче питания микроконтроллер инициализирует порты ввода-вывода, переводя их в высокоимпедансное состояние, производит настройку и запуск таймера. Таймер отсчитывает время между выборками. При переполнении таймера генерируется запрос на прерывание и происходит запуск подпрограммы управления АЦП, ее блок-схема представлена на рисунке 14.

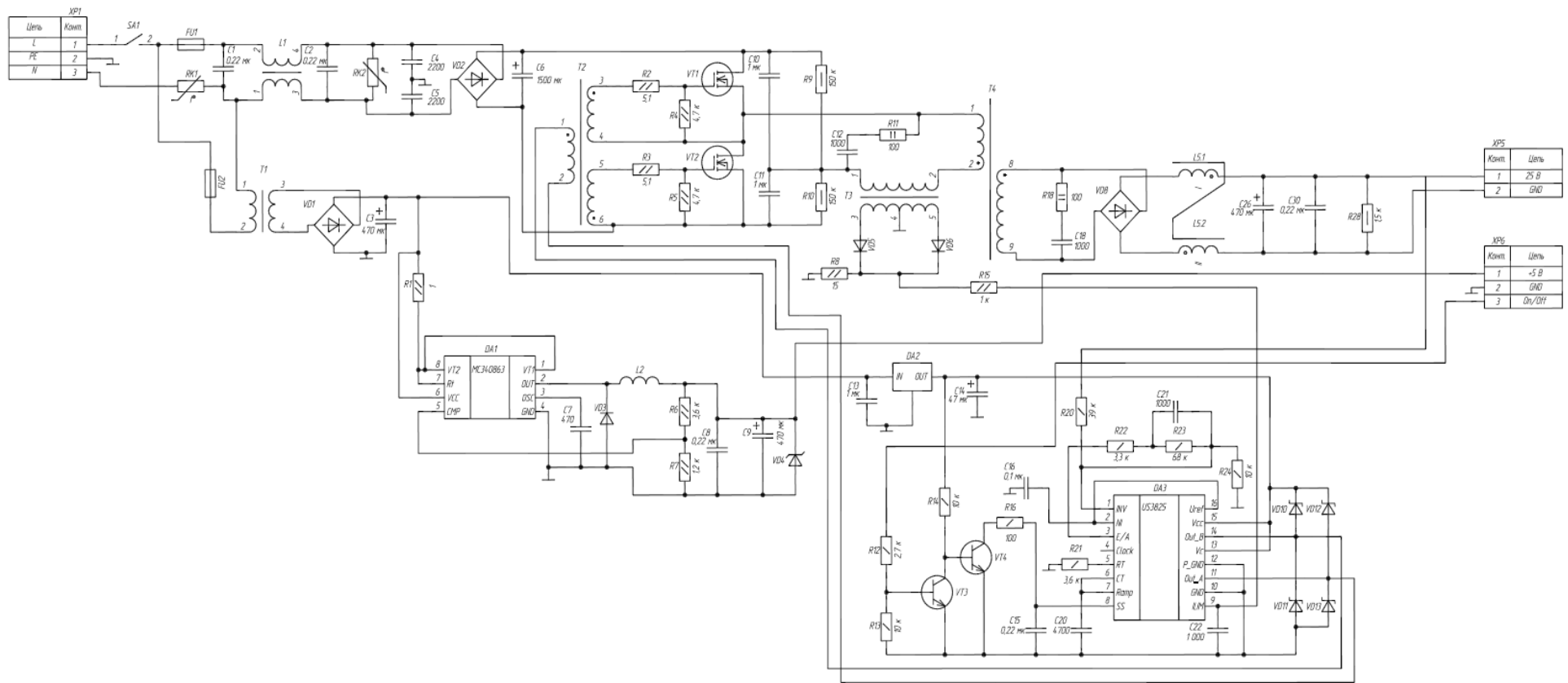


Рисунок 11 – Принципиальная схема силовой части устройства



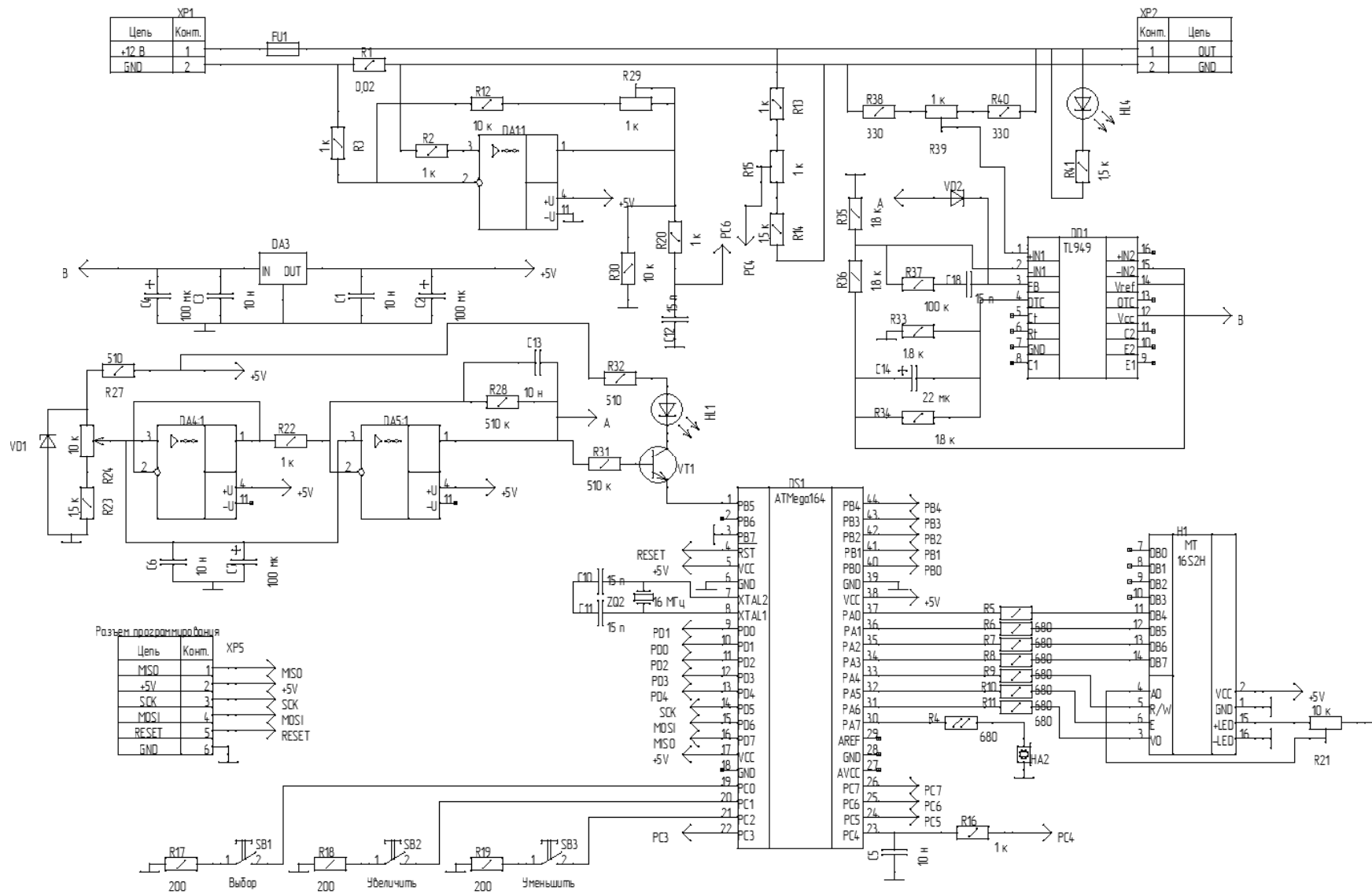


Рисунок 12 – Принципиальная схема измерительной части устройства

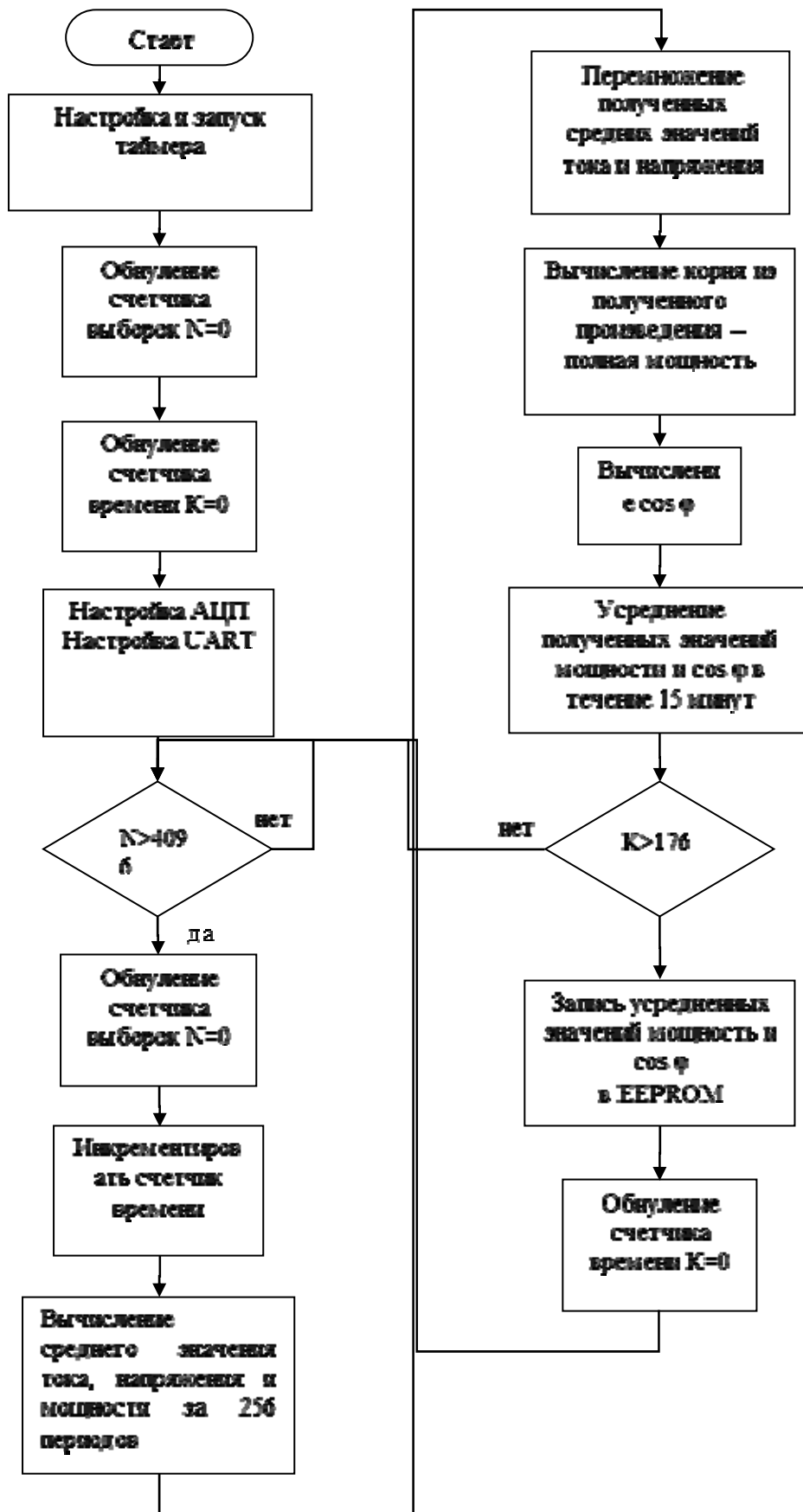


Рисунок 13 – Блок схема работы датчика мощности

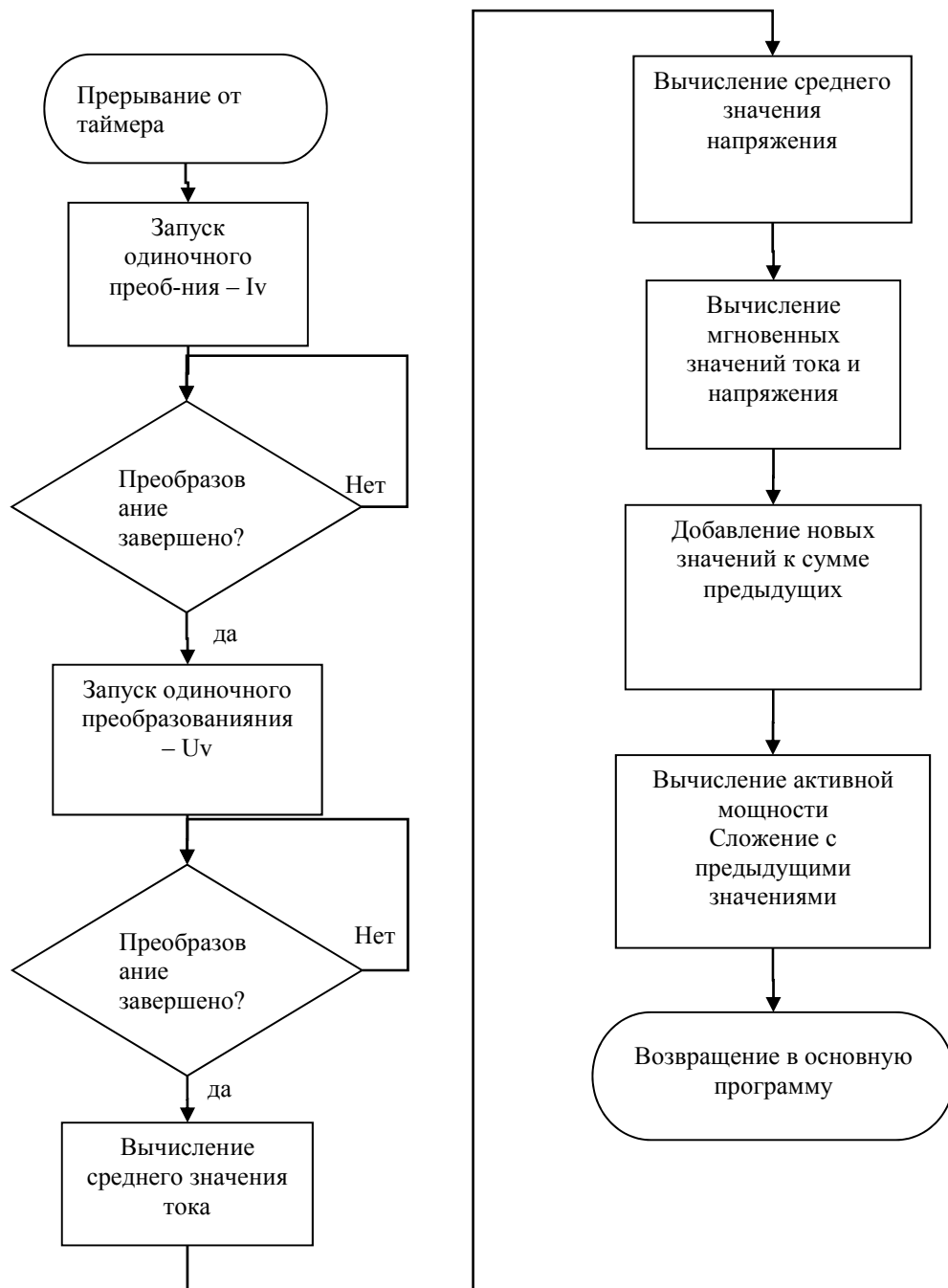


Рисунок 14 – Блок схема подпрограммы таймера

На рисунке 15 представлена блок-схема подпрограммы обработки прерываний от UART(прием)

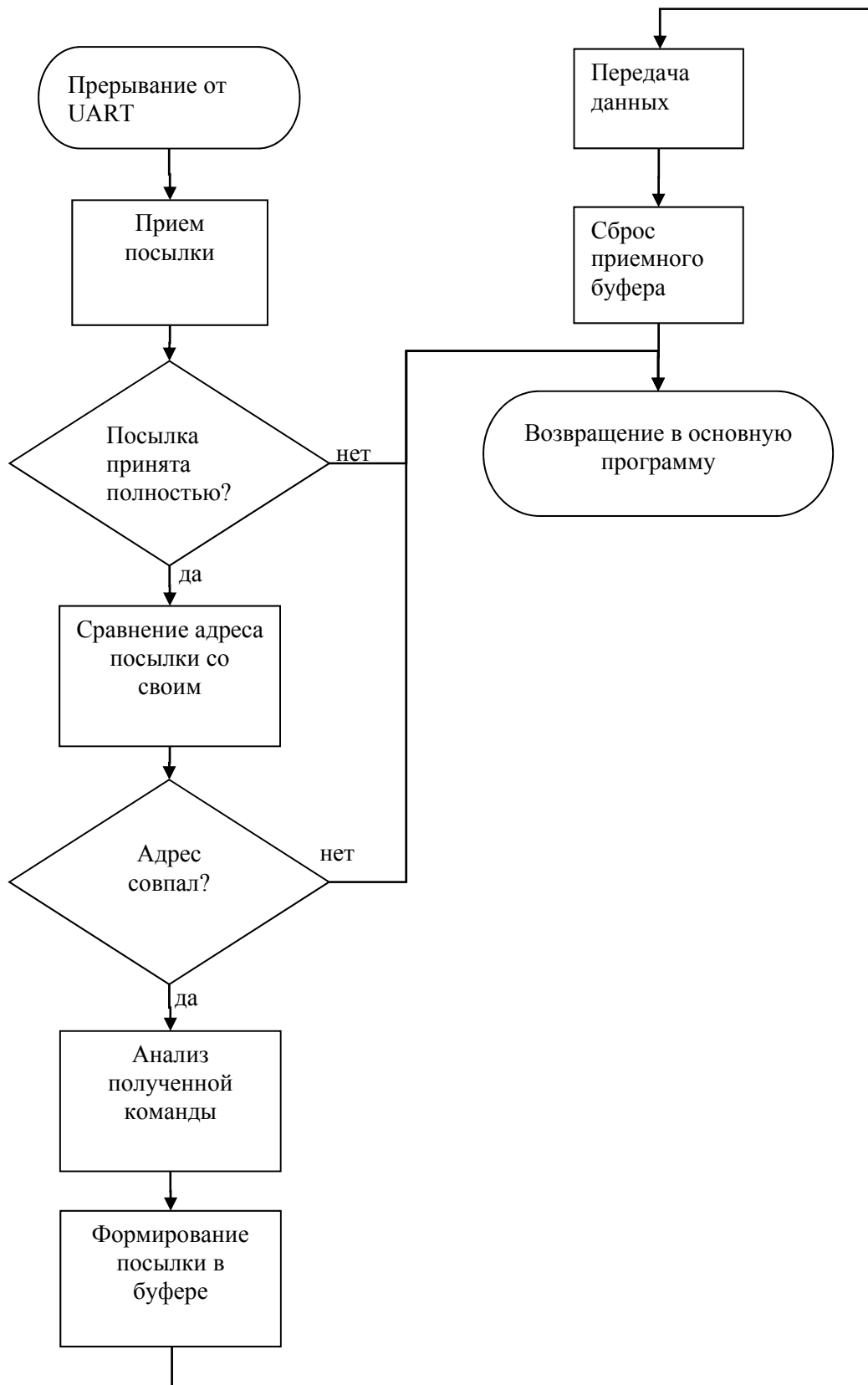


Рисунок 15 – Блок схема подпрограммы приема данных

## 5 Разработка конструкции источника питания

### 5.1 Анализ технических требований к конструкции устройства

Для источников питания на основе импульсного преобразователя, в связи с высокой частотой работы схемы, корректная разводка печатной платы является залогом стабильной работы блока питания, а также минимизации излучаемых блоком помех.

Данное изделие выполняется полностью на печатной плате и предназначено для работы в нормальных климатических условиях, сведенных в таблице 9.

Таблица 9 – Условия эксплуатации устройства

1	Диапазон рабочих температур	$-5 \div +40$ °С
2	Диапазон предельно допустимых температур	$-40 \div +60$ °С
3	Воздействие повышенной влажности	(при темп. 25 °С) 80 %
4	Воздействие пониженного давления	$6,1 \times 10^4$ Па
5	Механические условия:	
6	Диапазон частот	$10 \div 30$ Гц
7	Длительность удара	$5 \div 10$ мс
8	Ударное ускорение	$9,8$ м/с <sup>2</sup>
9	Виброускорение	$10,7$ м/с <sup>2</sup>

Разрабатываемая конструкция устройства должна соответствовать данным требованиям. Необходимо обеспечить технологичность конструкции, возможность замены на аналогичное устройство.

МИНИ

Рисунок 4.5 – Блок схема подпрограммы приема

смотреть

Основная задача при разработке конструкции – снизить влияние на качество коммутации сигналов. Для достижения этого предприняты следующие меры:

- Уменьшена длина дорожек аналогового сигнала.
- «Вывод "земли" АЦП соединен с общим проводом только в одной точке.
- Аналоговые и цифровые дорожки разнесены на максимальное расстояние.
- Источники питания также удалены друг относительно друга.

## **5.2 Разработка конструкции печатной платы. Требования к формовке выводов, лужению и пайке**

Поскольку элементная база представлена корпусными ИМС (второй тип корпуса – DIP) с выводами, устанавливаемыми в отверстия, то в качестве конструкторско-технологического направления следует выбирать монтаж корпусных ИМС и ЭРЭ.

Тип сборки - 1А: монтаж БИС/СБИС, МСБ в корпусном исполнении на МПП.

Форма контактных площадок круглая, поскольку в данном ФУ применяются корпусные ИМС и ЭРЭ. Данная конструкция ячейки будет являться унифицированной, так как к ней отсутствуют требования не предусмотренные ГОСТ 16962-71. Шаг координатной сетки будет стандартным по ГОСТ Р 51040-97: 2,54 мм, так как шаг расположения выводов ИМС равен 2,5 мм[14].

ИМС рассеивают незначительную мощность, поэтому нет необходимости вводить в конструкцию ПП или ФУ теплоотводы.

Выбор типоразмера ПП

В зависимости от типа ПП выбирают ширину технологического поля – К, приведенную в таблице 10.

Таблица 10

Технологическое поле (мм)	ОПП	ДПП	МПП
К	2-5	5-10	20-30

Раскрой стандартного листа проводят сначала на полосы, а затем каждой полосы – на отдельные заготовки.

#### Определение группы жёсткости

По условиям эксплуатации устройство источника питания по ГОСТ 23752-79 соответствует второй группе жёсткости. Данный ГОСТ определяет устойчивость ПП к климатическим и механическим воздействиям.

Таблица 11 – Требования по устойчивости ПП к климатическим и механическим воздействиям по ГОСТ 23752-79

Воздействующий фактор	Группа жесткости Вторая
Температура, К/°С	Верхнее значение 358/85
	Нижнее значение 233/-40
Относительная влажность, %	При температуре до 308К/35°С 98
Перепад температуры	От 248/-25 до 328/+55
Атмосферное давление, Па (МПРТ)	53600 (400)

#### Выбор класса точности ПП

ГОСТ 23751-86 устанавливает 5 классов точности ПП, каждый из которых характеризуется минимальным допустимым значением номинальной ширины проводника ( $t$ ), расстоянием между проводниками  $S$  и др. параметрами. Поскольку на печатную плату устанавливается 4 ИМС (малая конструкторская сложность или малая насыщенность ПП ИЭТ) с выводами, устанавливаемыми в отверстия, то по ГОСТ 23751-86 данная ПП соответствует второму классу точности.

Таблица 12 – Класс точности ПП по ГОСТ 23751-86

Условные обозначения элементов печатного монтажа	Класс точности ПП
	Второй
$t$ , мм	0,45
$S$ , мм	0,45
$b$ , мм	0,20
$\gamma=d/H$	0,40
$t$ , мм (без покрытия)	$\pm 0,10$
$t$ , мм (с покрытием)	+0,15; -0,10
$T_i$ , мм ОПП, ДПП, МПП (наружный слой)	0,10
$T_i$ МПП (внутренний слой)	0,15



$t$  – Наименьшая номинальная ширина проводника.

$S$  – Наименьшее номинальное расстояние между проводниками.

$b$  – Минимально допустимая ширина контактной площадки.

$d$  – Номинальное значение диаметра наименьшего металлизированного отверстия.

$H$  – Толщина ПП.

$t$  – предельное отклонение ширины печатного проводника, контактной площадки и др.

$T_i$  - позиционный допуск расположения печатного проводника относительно соседнего элемента проводящего рисунка.

### Выбор метода изготовления ПП

По ГОСТ 23751-86 для данного вида печатной платы можно применять два метода изготовления:

- химически негативный,
- химически позитивный.

Таблица 13 – Последовательность операций в химически негативном и химически позитивном методах изготовления печатных плат

Химически негативный	Химически позитивный
Резка и рихтовка заготовок	Резка и рихтовка заготовок
Зачистка поверхности	Зачистка поверхности
Получение защитного рельефа на проводниках	Получение защитного рельефа на пробельных участках
Травление меди	Нанесение гальванического покрытия на проводники
Удаление защитного рельефа	Удаление защитного рельефа
Сверление и штамповка отверстий	Травление меди
Обработка контура	Сверление и штамповка отверстий
Маркировка	Обработка контура
Нанесение защитной маски	Маркировка
Консервация	Консервация

Учитывая данные аспекты для изготовления печатной платы источника питания будет применяться именно химически негативный метод.

Химически негативный метод изготовления печатных плат:

- минимально трудоёмкий;
- максимально автоматизированный;
- исключает из технологии операции нанесения маски из эпоксидной смолы, представляющей большую профессиональную вредность.

Выбор материала основания ПП

Для химически негативного метода изготовления по ГОСТ 10316-78 применяются материалы основания ГФ1-35Г, СФ1-35Г, СТФ, СОНФМ, СТНФ.

Для изготовления ОПП предпочтение отдается СТФ, так как использование этого материала значительно уменьшает толщину ПП.

Подготовку поверхностей к проведению технологических операций осуществляют на многих этапах процесса производства ПП.

Таблица 14 – Материалы основания ПП

Материал	Марка	Толщина, мм
Стеклотекстолит теплостойкий фольгированный с гальваностойкой фольгой	СТФ	0,08; 0,1; 0,13; 0,15; 0,2; 0,25; 0,3; 0,35; 0,5; 0,8; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0
Гетинакс фольгированный с гальваностойкой фольгой	ГФ1-35Г	1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0
Стеклотекстолит фольгированный с гальваностойкой фольгой	СФ1-35Г	0,5 ;1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0
Стеклотекстолит фольгированный общего назначения нормированной горючести модифицированный	СОНФМ	0,5 ;1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0
Стеклотекстолит теплостойкий негорючий фольгированный с гальванической фольгой	СТНФ	0,5 ;1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0

### 5.3 Расчёт надёжности

Интенсивности отказов элементов зависят от электрической нагрузки, температуры окружающей среды и других факторов, учитываемых с помощью поправочных коэффициентов.[1, 16]

Интенсивность отказов элементов  $i$ -го типа определяется по формуле:

$$\lambda_i = \lambda_{0i} \cdot \alpha_i \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3, \quad (1)$$

где  $\lambda_{0i}$  – интенсивность отказов данного типа элементов при номинальной электрической нагрузке и нормальных условиях эксплуатации, 1/ч;

Принимая во внимание значения для поправочных коэффициентов  $k_1, k_2, k_3$ , приводим формулу (1) к виду:

$$\lambda_i = \lambda_{0i} \cdot \alpha_i \cdot 1,07. \quad (2)$$

Интенсивность отказов устройства в целом  $\Lambda$ , (1/ч) определяется по формуле:

$$\Lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot m_i, \quad (3)$$

где  $m_i$  – количество элементов  $i$ -го типа;

$\lambda_i$  – интенсивность отказов.

Подставляя известные данные получаем:

$$\Lambda = 2,32092 \cdot 10^{-6} \text{ (1/ч)}$$

Вероятность безотказной работы устройства  $P$  определяется по формуле:

$$P(t) = e^{-\Lambda t}, \quad (4)$$

где  $t$  – время, определяющее безотказность работы устройства, ч.

Значение  $t$  выбирается из стандартного ряда: 1000 ч, 2000 ч, 4000 ч, 8000 ч, 16000 ч. Пусть время безотказности работы  $t$  равно 8000 ч, тогда:

$$P(t) = e^{-2,3209 \cdot 10^{-6} \cdot 8000} = 0,967.$$

Условие безотказной работы выполняется т.к.  $P(t)$  не менее 0,8 [19].

Таблица 15 – Характеристики надёжности элементов

Тип элемента	Число элементов n, шт.	Коэффициент нагрузки	Интенсивность отказов, $\lambda_0 \cdot 10^{-6}$ , 1/ч	$\alpha_i$	$\lambda_0 \cdot 10^{-6} \cdot \alpha_i$ , 1/ч	$\lambda_i \cdot 10^{-6}$ 1/ч
Микросхемы	3	0,2	0,5	0,35	0,03745	0,11235
Диоды	4	0,2	0,2	0,77	0,03295	0,1318
Конденсаторы керамические	19	0,2	0,07	0,28	0,0041	0,0796
Конденсаторы электролитические	9	0,2	0,5	0,28	0,02996	0,26964
Резисторы	28	0,2	0,02	0,2	0,00085	0,0237
Кварцевый резонатор	1	0,2	0,5	1	0,107	0,107
Диодный мост	5	0,2	0,6	0,77	0,0988	0,49434
Стабилизатор	2	0,2	0,5	1	0,107	0,214
Разъемы	6	0,2	0,25	1	0,0535	0,321
Пайка	265	0,2	0,01	1	0,00214	0,5671
Итого					0,4734	2,3209

#### 5.4 Разработка конструкции модуля

Плата устройства расположена в корпусе. Корпус состоит из двух деталей: основания и крышки. На верхней стороне крышки сделано несколько вырез для отвода тепла. На внутренней стороне крышки имеется четыре стойки высотой 5 мм. Так как устройство должно обладать виброустойчивостью и удароустойчивостью, то ячейка будет для блока разъемного типа и по ГОСТ 52003-2003 будет моделироваться пластиной с жестким закреплением всех сторон. Ячейка будет представлена в рамочном исполнении.

## Заключение

В процессе разработки источника питания был выполнен анализ и сравнение существующих технических решений в области проектирования вторичных источников питания, на основании которого разработаны структурная и функциональная схемы устройства.

В ходе выполнения данной работы были решены все поставленные изначально задачи по проектированию ИП:

- выполнен анализ современного состояния технических разработок в области источников питания;
- произведена оценка возможных вариантов структурных и функциональных схем ИП;
- выполнен выбор и обоснование структурной и функциональной схемы ИП;
- произведена разработка электрической принципиальной схемы ИП;
- сделан выбор и обоснование элементной базы;
- произведен расчет конструкции и надежности устройства;
- выполнено проектирование печатной платы и сборочного чертежа ИП с использованием средств САПР P-CAD 2006.

При проектировании использовалась современная элементная база, а также применялись последние технические разработки, используемые при проектировании ИП.

Также в работе рассмотрена экономическая эффективность данного проекта и приведены необходимые технико-экономические расчёты. В последней главе ВКР рассмотрены вопросы охраны труда и техники безопасности при проектировании, а также производстве устройства.

Таким образом, подводя итоги данной работы, можно считать, что проекта достигнута. Разработанное устройство полностью удовлетворяет всем требованиям технического задания.

## Список используемых источников

1. Баскаков С. И. Радиотехнические цепи и сигналы. –М.: Высшая школа, 1988. – 448 с.
2. Битюков В.К., Симачков Д.С., Бабенко В.П. Источники вторичного электропитания Учебник. — 4-е изд. — Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2020. — 376 с. — ISBN 978-5-9729-0471-6
3. Высокоскоростной ШИМ-контроллер UC 3825. [Электронный ресурс] datasheet. – Texas Instruments, october 2015– Режим доступа: <http://www.ti.com/lit/ds/slus235a/slus235a.pdf> (дата обращения 12.05.2023)
4. Гаврилов Е.Н. Силовая электроника Учебно-методическое пособие к лабораторным работам. — Казань: Школа, 2020. — 90 с. — ISBN: 978-5-00162--152-2.
5. Зеленский В.А., Сухачёв К.И. Основы конструирования, технологии и надёжности радиоэлектронных средств. Учебное пособие. — Самара: Самарский национальный исследовательский университет им. академика С. П. Королева, 2020. — 146 с. — ISBN: 978-5-7883-1525-6.
6. Коростелин А.В. Импульсные источники питания. Элементная база, архитектура и ремонт. –М.: Солон-Пресс, 2020. — 392 с. — ISBN: 978-5-91359-412-9
7. Мартынов, А.А. Силовая электроника. Ч. II: Инверторы и преобразователи частоты: учеб. пособие / А. А. Мартынов. – СПб.: ГУАП, 2012. –144 с.: ил.
8. Меркутов А.С. Автоматизация проектирования электронных устройств Учебно-практическое пособие. — Владимир: Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых (ВлГУ), 2021. — 107 с. — ISBN 978-5-9984-1427-5.

9. Муромцев Д.Ю., Тюрин И.В., Белоусов О.А., Курносков Р.Ю. Проектирование функциональных узлов и модулей радиоэлектронных средств. Учебное пособие. — СПб.: Лань, 2018. — 252 с.: ил.
10. Патентный поиск В РФ. [Электронный ресурс]. Режим доступа <http://www.freepatent.ru/> (дата обращения: 01.05.2023)
11. Петрович В.П. Силовая электроника: учеб. пособие / В.П. Петрович, А.В. Глазачев. – Томск: Изд-во ТПУ, 2013. – 207 с.
12. Розанов Ю.К., Лепанов М.Г. Силовая электроника. Учебник и практикум для СПО. — М.: Юрайт, 2019. — 206 с. — (Профессиональное образование). — ISBN: 978-5-534-05204-6.
13. Самойлов А.Г., Самойлов С.А. Устройства электропитания. Учебное пособие. — Владимир: Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых (ВлГУ), 2021. — 160 с. — ISBN 978-5-9984-1183-0.
14. Сергеев Б.С. Силовая полупроводниковая элементная база. Учебное пособие. — Екатеринбург: Уральский государственный университет путей сообщения (УрГУПС), 2018. — 97 с. — ISBN: 978-5-94614-450-6
15. Томашевский Д.Н. Автономные инверторы Учебное пособие. — Екатеринбург: Уральский федеральный университет им. Первого президента России Б.Н. Ельцина (УрФУ), 2019. — 120 с. — ISBN: 978-5-7996-2681-5.
16. Трегубов С.И., Левицкий А.А. Основы конструирования электронных средств: техническое задание Учебное пособие. — Красноярск: СФУ, 2020. — 181 с. — ISBN 978-5-7638-4257-9.
17. Уваров А.С. P-CAD 2000, ACCEL EDA. Конструирование печатных плат 2-е изд. — Саратов: Профобразование, 2019. — 314 с. — ISBN: 978-5-4488-0067-2.
18. Фролов В.Я., Смородинов В.В. Устройства силовой электроники и преобразовательной техники с разомкнутыми и замкнутыми системами управления в среде MatLAB-Simulink Учебное пособие. — СПб.: Лань, 2018. — 332 с

19. Хоровиц, П.А. Искусство схемотехники-1/ П.А. Хоровиц, У.Н. Хилл. – М.: Мир, 1999.
20. Хоровиц, П.А. Искусство схемотехники-2/ П.А. Хоровиц, У.Н. Хилл. – М.: Мир, 2000.
21. Шакирова Р.Х., Гатиатуллина Т.Ю., Данилин О.Е. Проектирование электронных устройств. Учебное пособие. — Уфа: УГАТУ, 2007. — 76 стр.
22. Arzhannikov A.V., Astrelin V.T., Burdakov A.V., Ivanenko V.G., Koidan V.S., Konyukhov V.V., Mekler K.I., Melnikov P.I., Nikolaev V.S., Polosatkin S.V., Postupaev V.V.
23. Babaeva N.Y., Naidis G.V. Modelling of streamer propagation // Electrical Discharges for Environmental Purposes, E.M. van Veldhuizen, Ed. Commack. New York: Nova, 2000. P. 21-48.
24. Mechanisms of direct dielectric barrier discharge plasma inactivation of E. coli / D. Dobrynin [et al.] // Plasma Science-Abstracts. ICOPS 2009: IEEE International Conference, 2009. P. 1.
25. Rovenskikh A.F., Sinitsky S.L. / Dense plasma heating by 200 kJ electron beam at the GOL-3-I1 facility. // Proc. 12th Intern. Conf. on High Power Particle Beams. Haifa, Israel, Vol.2, p.35-38 (1998).
26. Tsyganov D., Pancheshnyi S. Simulation of N-atom production in dielectric-barrier discharge in nitrogen at atmospheric pressure // Plasma Sources Science and Technology. 2012. V. 21(6). P. 65010-65017.