Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ИВАНОВ Д.А., СЕМЕННИКОВ А.В., СИНИЦИН А.М.

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

Курсовая работа

Казань
2023

ВВЕДЕНИЕ

Для современного этапа научно-технического прогресса свойственно непрерывное совершенствование элементной базы электроники в устройствах измерения, обработки информации и управления. Широкое применение микросхемотехники привело к развитию нового этапа комплексной автоматизации – гибким автоматизированным производствам, управление которыми основано на широком применении микропроцессоров и микроЭВМ. Электроника и микросхемотехника обеспечивают автоматизированное управление технологическими процессами, научными исследованиями, отдельными объектами.

Курсовая работа посвящена разработке отдельных полупроводниковых устройств, нашедших широкое применение в системах управления и электроприводах промышленных роботов и станков с ЧПУ.

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Выполнение курсовой работы является заключительным этапом обучения студентов по дисциплине «Электротехника и электроника» и имеет своей целью систематизацию, закрепление и расширение теоретических знаний и практических навыков при решении конкретных технических задач; развитие навыков самостоятельной работы с технической литературой в ходе анализа и расчетов, приобретение навыков самостоятельного решения технических задач и освоения основ патентного поиска, подготовку к изучению последующих курсов электротехнического цикла и дипломному проектированию. В ходе выполнения курсовой работы должны быть развиты навыки разработки и выполнения конструкторской документации, в том числе чертежей, углублено знание ЕСКД. Важным элементом курсового проектирования является развитие навыков работы с вычислительной техникой. В результате работы над проектом должно быть разработано конструктивно законченное устройство.

2. ПРЕДМЕТ И ТЕМАТИКА РАБОТЫ

Предмет курсовой работы – полупроводниковые устройства систем управления и электроприводов промышленных роботов и станков с ЧПУ.

При выполнении курсовой работы должна быть разработана конструкция устройств, входящих в состав электропривода (усилителя мощности, генератора, формирователя импульсных сигналов, преобразователя частоты, инвертора и т. д.). Кроме типовых тем студентам могут быть предложены темы исследовательского характера, а также разработки для смежных курсов электротехнического цикла дисциплин или выполняемые по заказам предприятий и совпадающие по своей тематике с содержанием дисциплины «Электроника».

3. ЗАДАНИЕ НА КУРСОВУЮ РАБОТУ

Для каждого студента составляется индивидуальное задание, содержащее необходимые для выполнения проекта данные. В исходных данных указывают требуемые технические характеристики разрабатываемого изделия, условия эксплуатации, объем производства, а также специальные требования.

В технических характеристиках указывают номинальные значения параметров и допустимые отклонения от них, приводят данные, необходимые для расчета теплового режима, оговаривают требования к размерам и массе изделия, а при необходимости – требования к экономичности производства и эксплуатации.

В условиях эксплуатации приводят предельную температуру окружающей среды, влажность, давление, отмечают необходимость обеспечения виброустойчивости, пылезащищенности и т. п. или указывают нормативные документы, требованиям которых должно отвечать изделие.

В перечне подлежащих разработке вопросов указывают основные задачи и расчеты. В задании по графической части проекта указывают общий объем работы в листах формата А1 и приводят перечень обязательных чертежей. В перечень рекомендуемой литературы вносят основные источники, необходимые для выполнения проекта.

Задание составляется под руководством преподавателя на типовом бланке, все разделы которого должны быть заполнены. Оформленное задание

подписывается студентом, руководителем проектирования и утверждается заведующим кафедрой. Примерная тематика заданий приведена в прил. 1.

4. ПЕРЕЧЕНЬ И ОБЪЕМ РАЗРАБАТЫВАЕМЫХ ДОКУМЕНТОВ

Разработка конструкторской документации курсовой работы включает в себя оформление расчетно-пояснительной записки и выполнение чертежей.

Курсовая работа является учебной работой, в которой совмещены стадии технического задания, эскизного и технического проектов, поэтому содержание и комплектность разрабатываемых документов отличаются от содержания и комплектности документов, разрабатываемых на каждой стадии в отдельности и оговоренных в ЕСКД.

В графической части должны быть разработаны схема электрическая принципиальная (не более 0,5 листа формата А1); чертежи сборочные и чертежи деталей (печатная плата, корпус, радиатор и т. д.) (не более 1 листа формата А1); результаты цифрового моделирования (не более 0,5 листа формата А1).

В текстовой части оформляются пояснительная записка, спецификация и перечни элементов.

Общий объем графической части – 2 листа формата А1, текстовых документов – 30 – 35 листов текста (включая иллюстрации и приложения). Все разработанные документы должны быть оформлены в соответствии с ГОСТами и ЕСКД с учетом специфики учебного процесса.

5. СОДЕРЖАНИЕ ПОЯСНИТЕЛЬНОЙ ЗАПИСКИ

Все решаемые при проектировании вопросы должны быть отражены в пояснительной записке, которая содержит следующие разделы:

1. Введение.
2. Задание.
3. Анализ схемной реализации устройства.
4. Выбор схемной реализации устройства.
5. Конструкторские расчеты отдельных узлов и устройства в целом.
6. Заключение.
7. Приложения.

Во введении должны быть проанализированы методы управления, функциональная и структурная схемы электропривода в соответствии с заданием на проектирование, перечислены наиболее характерные области применения, дан краткий обзор развития электроприводов данного вида, указаны перспективные направления их совершенствования, отмечена актуальность разработки и сформулирована цель проектирования.

Общий объем введения не более трех страниц. При анализе технического задания (ТЗ) необходимо, руководствуясь исходными данными, определить требования к конструкции, подобрать аналоги и прототип.

При выборе схемной реализации устройства должны быть всесторонне проанализированы выбранные варианты реализации задания, отработаны схемные решения, выбран и детально проработан вариант, наиболее полно удовлетворяющий требованиям ТЗ, по которому затем выполняются все необходимые расчеты отдельных узлов и устройства в целом. Общий объем этих частей проекта – 15 – 20 страниц. Для разработанной конструкции подбирается или проектируется вновь источник питания.

При выполнении расчетов и моделировании процессов в электронных устройствах может быть рекомендовано использование ЭВМ. Результаты цифрового моделирования приводятся в приложениях.

В заключении следует отметить полноту выполнения требований ТЗ, дать общую оценку конструкции в сравнении с аналогами.

После окончания работы над проектом и оформления пояснительной записки составляется аннотация, в которой в сжатой форме (10 – 15 строк, 3 – 5 предложений) излагаются содержание и результаты работы, в последней строке аннотации указывают количество таблиц, иллюстраций, названий используемой литературы.

6. ОФОРМЛЕНИЕ ПОЯСНИТЕЛЬНОЙ ЗАПИСКИ

Пояснительная записка выполняется в соответствии с требованиями ГОСТ 2.105-99 с учетом специфики учебного процесса. Ей присваивается обозначение разработанного изделия и шифр ПЗ. В основной надписи, кроме наименования изделия, записывается наименование документа «Пояснительная записка».

Пояснительная записка начинается с титульного листа, затем помещают бланк задания на курсовой проект, аннотацию, оглавление, содержательную часть и приложения.

Первым листом пояснительной записки считается оглавление, основную надпись на этом листе выполняют по форме 2 ГОСТ 2.104-68. В оглавление включают наименования всех разделов и подразделов пояснительной записки и приложений.

Изложение содержания пояснительной записки должно быть кратким, четким, ясным. Сокращения слов в тексте, кроме общепринятых, не допускаются, применяемые условные обозначения различных величин должны соответствовать установленным стандартам.

Формулы, на которые даются ссылки, должны быть пронумерованы арабскими цифрами, заключенными в круглые скобки, с правой стороны листа. В ссылках номер формулы указывают также в круглых скобках.

При выполнении расчетов на ЭВМ должны быть указаны наименования указанных программ, приведены исходные данные и результаты расчетов.

Приводимые в пояснительной записке иллюстрации могут быть расположены между текстом или в приложениях. Ссылки на иллюстрации даются по типу «схема устройства показана на рис.1» или «модулятор (рис.1) состоит из…»

Ссылки на литературу даются в косых или квадратных скобках. Перечень литературы озаглавливают «Список использованной литературы», источники в нем перечисляют в порядке появления ссылок в тексте или в алфавитном порядке.

В приложение к проекту включается перечень разработанных конструкторских документов (спецификаций, чертежей и т. д.), описания разработанных программ расчетов на ЭВМ и другие необходимые материалы. Каждое приложение должно иметь заголовок и начинаться с нового листа с указанием в правом верхнем углу слова «Приложение», их нумеруют арабскими цифрами.

К пояснительной записке прилагают спецификации на изделие и входящие в его состав сборочные единицы, на которые выполнены чертежи, перечни элементов и другие текстовые конструкторские документы.

7. ОФОРМЛЕНИЕ ГРАФИЧЕСКОЙ ЧАСТИ

Графическая часть включает в себя чертежи схем устройства (структурную, функциональную, электрическую, принципиальную, соединений, подключений) по ГОСТ 2.701-84, сборочных чертежей и чертежей отдельных деталей.

Общие требования к выполнению схем

Схемы выполняются на форматах, установленных ГОСТ 2.301-68. При выполнении схем применяются условные графические обозначения, установленные стандартами ЕСКД на соответствующие схемы. ГОСТ 2.702-75 содержит правила выполнения электрических схем.

Электрическая структурная схема определяет основные функциональные части изделия (элементы, устройства, функциональные чертежи), их назначение и связи. Все функциональные части на схеме изображают в виде прямоугольников или условных графических обозначений с указанием типа элемента (устройства) и (или) документа (основной конструкторской документации, ГОСТ, ТУ), на основании которого этот элемент (устройство) применен. На схеме помещают поясняющие надписи, диаграммы, таблицы, указания параметров в характерных точках и т. п.

На функциональной схеме изображают функциональные части изделия и связи между ними с разъяснением последовательности процессов, протекающих в изделии в целом или в отдельных его функциональных частях.

Принципиальная схема определяет полный состав элементов и связи между ними и детальное представление о принципах работы изделия.

На ней изображают все электрические элементы или устройства, все электрические связи между ними, а также элементы (соединители, зажимы и т. п.), которыми заканчиваются входные и выходные цепи. Элементы схем показывают условными графическими обозначениями, установленными стандартами ЕСКД.

На схеме соединений наносят все устройства и элементы, входящие в состав изделия, их соединения – провода, жгуты, кабели, входные и выходные элементы. Схема должна содержать сведения о проводах, кабелях (марку, сечение провода и др.).

Чертежи печатных плат. Печатная плата (деталь). Печатный узел

Термины по печатным платам (ПП) и узлам, содержащим печатную плату с навесными элементами, приведены в ГОСТ 20406-75. Методы конструирования и расчета содержит ОСТ 4.010.022-85, общие технические условия представлены в ГОСТ 23752-79. Печатные платы делятся на односторонние, двухсторонние, многослойные на жестком и гибком диэлектрическом основании. Конструирование ПП осуществляют ручным, полуавтоматизированным и автоматизированным методами.

При ручном методе размещение изделий электронной техники на ПП и трассировку печатных проводников осуществляет непосредственно конструктор. Автоматизированный метод предусматривает копирование исходных данных, размещение навесных элементов, трассировку печатных проводников с помощью ЭВМ. Метод проектирования указывается преподавателем в задании.

В прил. 2 показано оформление чертежа печатной платы с помощью прямоугольной координатной сетки, которую наносят тонкими линиями. Основной шаг координатной сетки 2,5 мм, допускается шаг 1,25 и 0,625 мм. Печатным узлом называют печатную плату с навесными элементами.

Сборочный чертеж печатного узла «Плата печатная. Сборочный чертеж» должен давать полное представление о навесных радиоэлементах и других деталях, их расположении и установке на плате, а также сведения о маркировке позиционных обозначений электро- и радиоэлементов, об условных обозначениях выводов приборов (трансформаторов, реле и др.), о нумерации выходных контактов, полярности элементов согласно электрической принципиальной схеме на печатный узел.

Чертежи жгутов, кабелей и проводов

Правила выполнения чертежей жгутов, кабелей и проводов устанавливает ГОСТ 2.414-75. На этих чертежах отдельные проводники изображают упрощенно или условно, наносят все размеры, необходимые для изготовления, жгут изображают развернутым в плоскости чертежа, обозначения всех проводников проставляют около обоих концов согласно чертежу для электромонтажа или электрической схеме соединений.

Указания о присоединении проводников к соединительным устройствам могут быть приведены на чертеже в таблице присоединений либо в схематическом изображении на чертеже. На чертеже кабеля (жгута) долж-

ны быть нанесены: соединители, размеры длин всех участков кабеля, маркировочные надписи соединителей, маркировочные бирки, запасные провода кабеля, номера позиций составных частей кабеля.

8. ОРГАНИЗАЦИЯ РАБОТЫ СТУДЕНТА

Курсовая работа продолжается 17 недель и включает аудиторную и самостоятельную работы.

Ориентировочные затраты времени и контрольные сроки выполнения отдельных частей проекта приведены в таблице.

Выполняемая работа	Ориентировочные затраты времени, %	Контрольные сроки выполнения, недели семестра
1. Получение задания	–	1 – 2-я
2. Информационный поиск, подбор и изучение литературы	8 – 10	2 – 3-я
3. Анализ технического задания и разработка требований к изделию, выбор окончательного схемного решения	15 – 25	3 – 5-я
4. Выполнение необходимых расчетов (в том числе на ЭВМ)	15 – 25	6 – 9-я
5. Выполнение чертежей и спецификаций	15 – 25	10 – 13-я
6. Оформление пояснительной записки и сдача работы на проверку	10 – 15	14 – 16-я
7. Подготовка к защите и защита работы	2 – 5	16 – 17-я

Работа над проектом начинается с подбора литературы по теме, ее изучения, поиска информации о возможных аналогах, для чего могут быть использованы различные справочники, каталоги, научно-технические журналы, патентные источники, интернет-ресурсы.

Изучив основную и дополнительную литературу, проанализировав техническое задание, студент подбирает аналоги. Вместе с преподавателем выбирается окончательный вариант схемного решения. После этого выполняются необходимые расчеты, чертежи и конструкторская документация. Работа завершается оформлением пояснительной записки.

Ход работы еженедельно контролируется преподавателем на консультациях. Консультации в зависимости от этапа работы могут быть групповыми, на которых рассматриваются общие для всех студентов вопросы, решаемые на данном этапе, или индивидуальными. Присутствие каждого студента на всех консультациях обязательно.

На консультации студент должен представить преподавателю все подготовленные материалы (черновики соответствующих разделов пояснительной записки, схемы, расчеты и т. д.), отчитаться о выполненной работе, выяснить все возникшие вопросы, уточнить задачи очередного этапа.

На каждой консультации преподаватель отмечает ход выполнения работы в соответствующей графе бланка задания. Не позднее 15-й недели все материалы должны быть оформлены, подписаны студентом и сданы преподавателю на проверку. После проверки работа допускается к защите или возвращается на доработку с указанием основных замечаний.

9. ПОДГОТОВКА ДОКЛАДА И ЗАЩИТА РАБОТЫ

Защиты курсовых работ проводятся в свободное от занятий время в соответствии с графиком, объявленным заранее, на открытых заседаниях комиссии, состоящей из преподавателей кафедры (не менее двух), ведущих занятия по дисциплине (лектор, руководитель проектирования, преподаватель, проводивший занятия лабораторного практикума).

В процессе защиты студент выступает с сообщением и отвечает на вопросы членов комиссии. В сообщении должна быть названа тема, сформулированы основные требования технического задания, указаны аналоги и возможные варианты решения, кратко обоснован выбор основного, детально разработанного варианта, описан принцип работы, показаны осо-

бенности и отличия принятых решений от известных, отмечены достоинства устройства, возможные недостатки, пути их устранения, дальнейшего улучшения технических и других характеристик изделия.

При изложении доклада используется разработанный графический материал, расчеты, результаты моделирования.

Работа оценивается на закрытом заседании комиссии после окончания защит. Комиссия учитывает общий уровень работы, соответствие оформления разработки требованиям стандартов, качество доклада и защиты, самостоятельность выполнения задания, сроки. Результаты защит объявляются после окончания заседания комиссии.

Материалы курсовой работы сдаются заведующему лабораториями для хранения на кафедре.

В прил. 1 дана примерная тематика заданий на курсовую работу, в прил. 2 приведены примеры выполнения чертежей, в прил. 3 – пример расчета инвертора тока.

Перечень ГОСТов, обязательных при оформлении пояснительной записки и графической части:

1. ГОСТ 10317-79. Платы печатные. Основные размеры.

2. ГОСТ 2.413-72. Единая система конструкторской документации. Правила выполнения конструкторской документации изделий, изготовляемых применением электрического монтажа.

3. ГОСТ 2.417-78. Правила выполнения чертежей печатных плат.

4. ГОСТ 2.702-84. Правила выполнения электрических схем.

5. ГОСТ 2. 708-81. Правила выполнения электрических схем цифровой вычислительной техники.

6. ГОСТ 2.709-84. Система обозначений цепей в электрических схемах.

7. ГОСТ 2.710-81. Обозначение буквенно-цифровые в электрических схемах.

8. ГОСТ 2.743-82. Обозначение условные графические в схемах. Элементы цифровой техники.

9. ГОСТ 2.755-87. Устройства коммутационные и контактные соединения.

Приложение 1

ПРИМЕРНАЯ ТЕМАТИКА ЗАДАНИЙ

Разработать преобразователь и схему управления по следующему заданию.

№ вар.	Шифр задания	№ вар.	Шифр задания	№ вар.	Шифр задания
1	А1Б1В1	9	А3Б2В1	17	А3Б1В3
2	А1Б1В2	10	А3Б2В2	18	А2Б1В3
3	А1Б1В3	11	А3Б2В3	19	А3Б1В5
4	А1Б2В4	12	А2Б2В3	20	А3Б1В6
5	А1Б1В5	13	А3Б2В5	21	А4Б1В1
6	А1Б1В6	14	А3Б2В6	22	А4Б1В2
7	А2Б1В1	15	А3Б1В1	23	А4Б1В3
8	А2Б2В1	16	А3Б1В2	24	А4Б1В5
				25	А4Б1В6

А. Тип двигателя: А1 – постоянного тока; А2 – трёхфазный асинхронный; А3 – двухфазный асинхронный; А4 – шаговый.

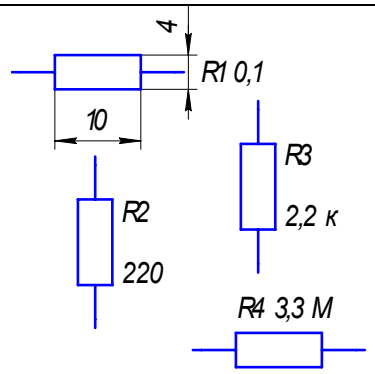
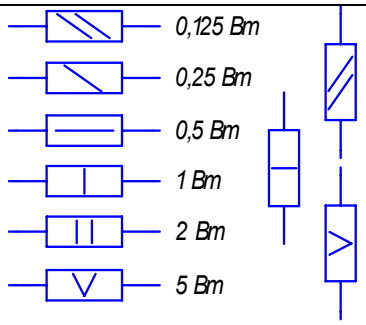
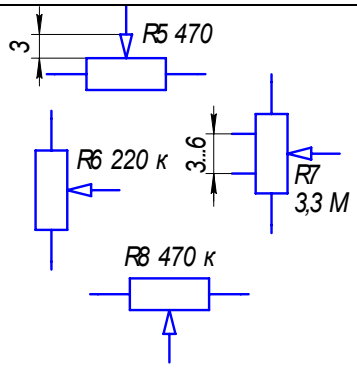
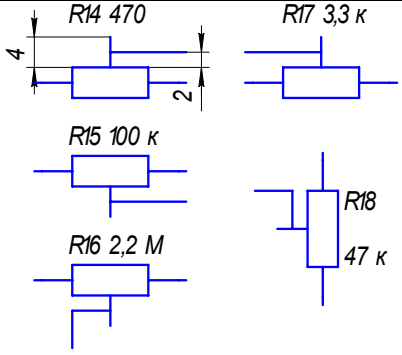
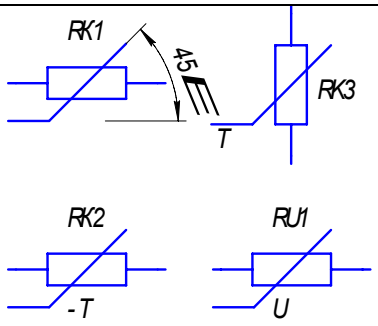
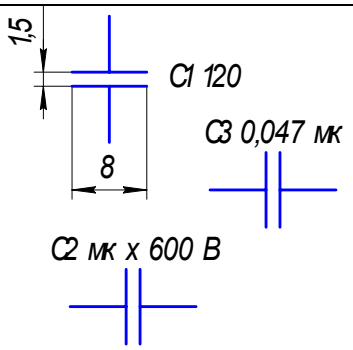
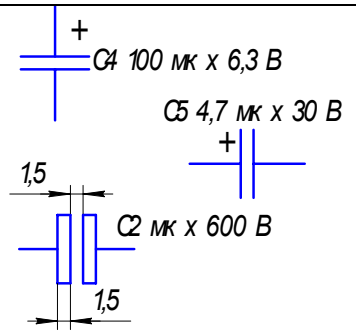
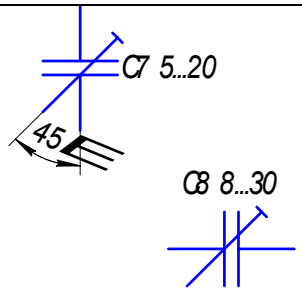
Б. Тип ключевых элементов: Б1 – транзисторы; Б2 – тиристоры.

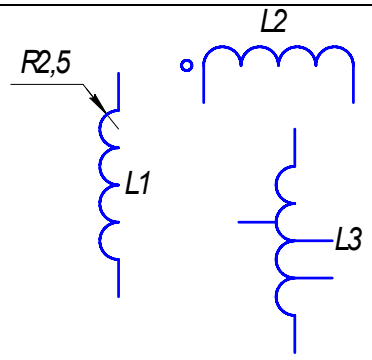
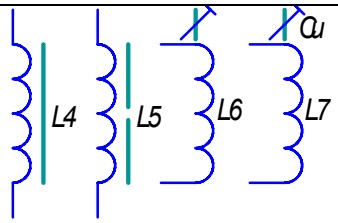
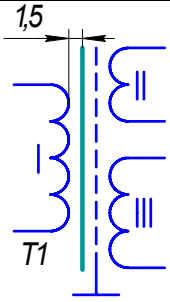
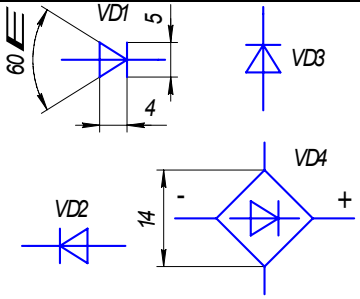
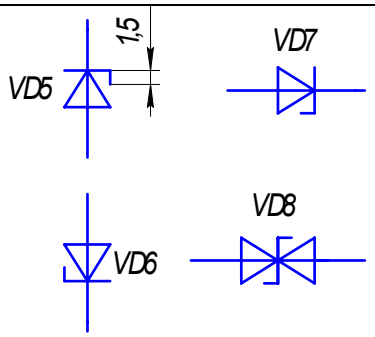
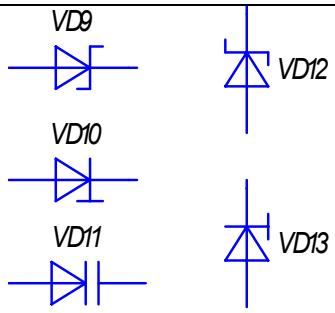
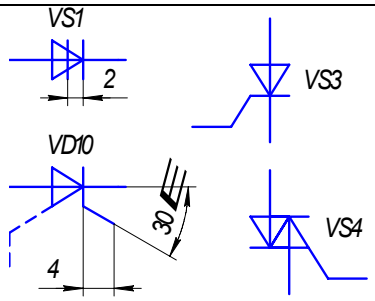
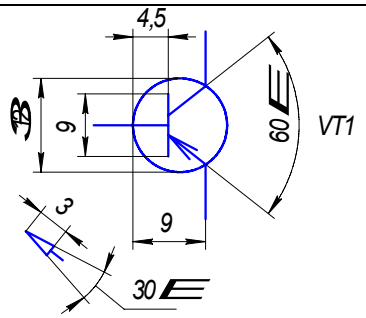
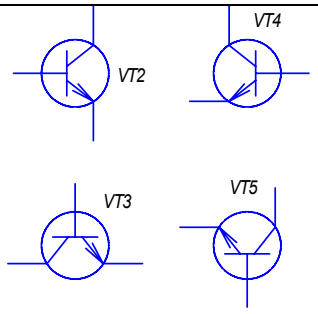
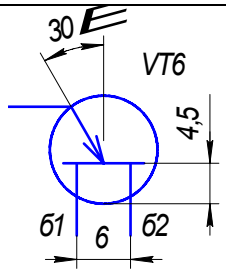
В. Напряжение питания силовой части: В1 – трёхфазное 380 В В2 – однофазное 220 В; В3 – трёхфазное 220 В; В4 – однофазное 220 В; В6 – однофазное 127 В; В6 – однофазное 36 В.

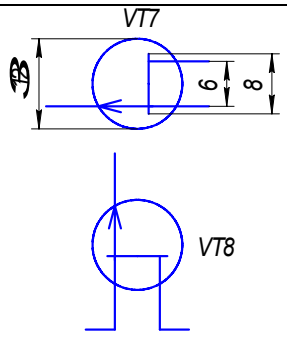
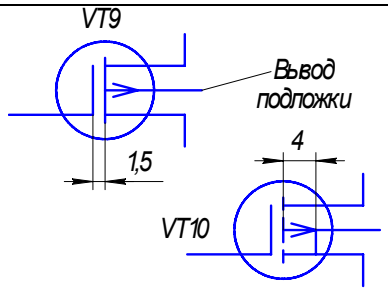
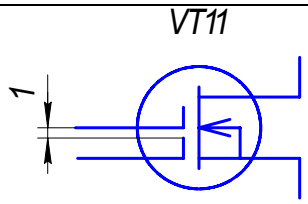
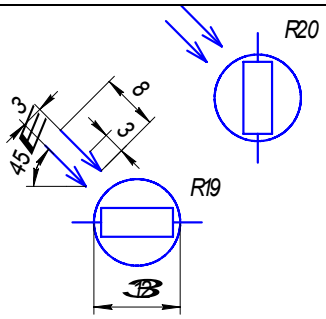
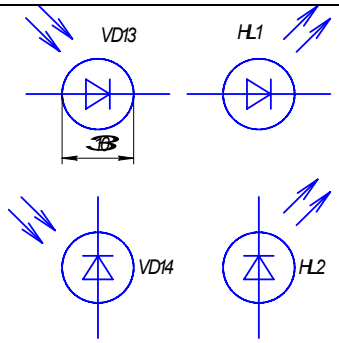
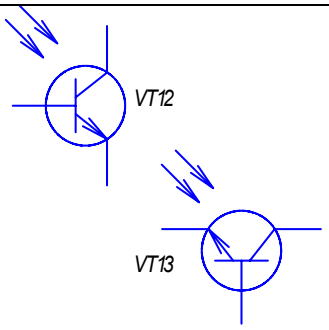
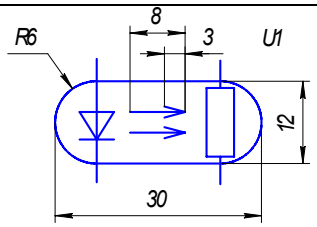
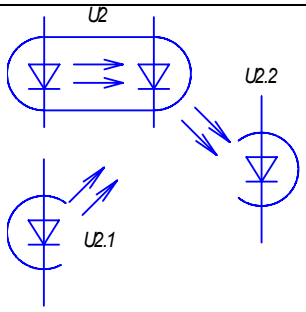
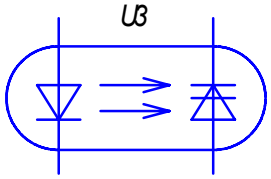
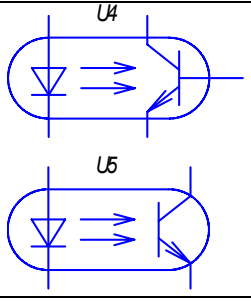
Двигатель выбирается по каталогам для 1-й группы в диапазоне мощностей до 250 Вт, для 2-й группы – от 250 до 500 Вт, для 3-й группы – от 500 Вт до 1кВт.

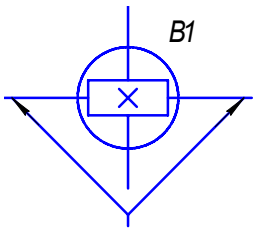
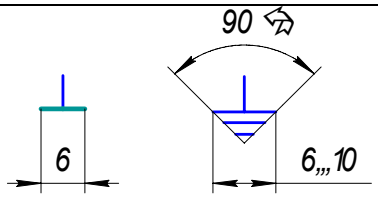
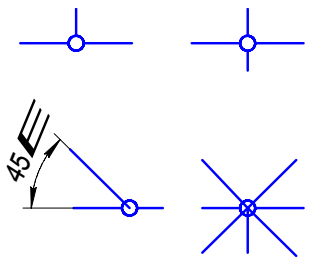
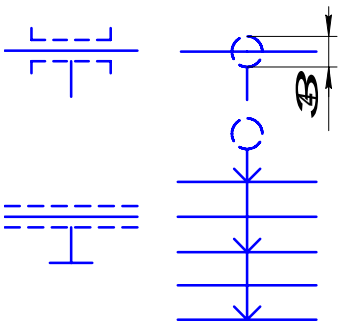
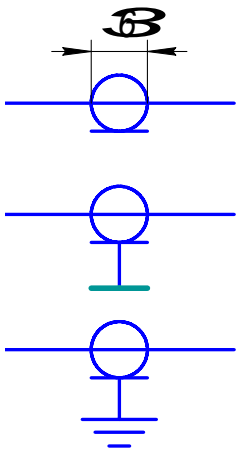
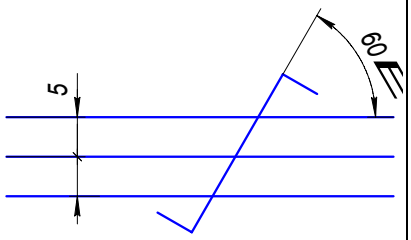
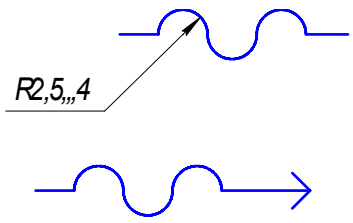
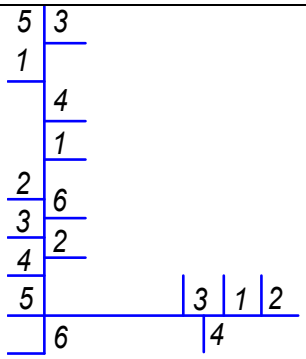
Приложение 2

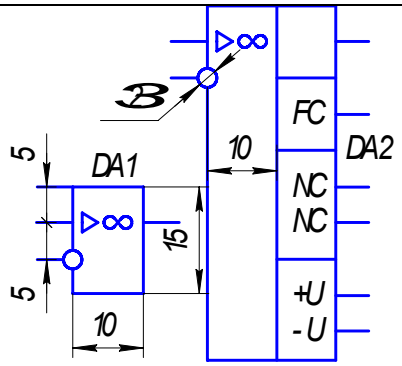
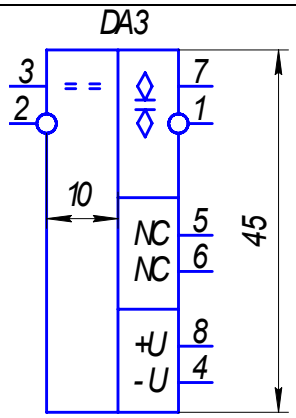
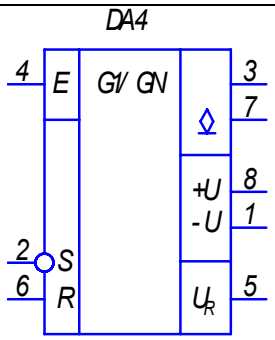
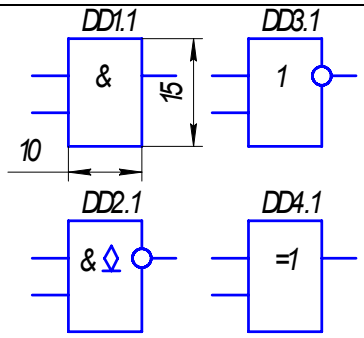
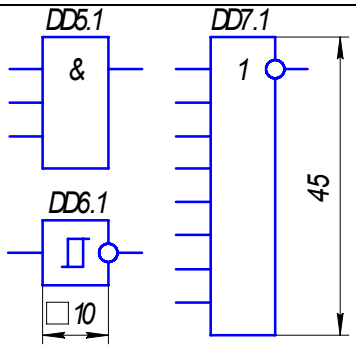
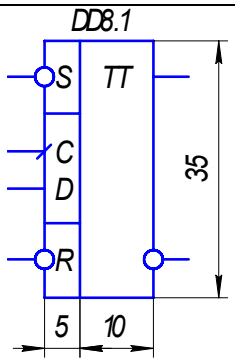
УСЛОВНЫЕ ГРАФИЧЕСКИЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ НЕКОТОРЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Наименование	Обозначение	Наименование	Обозначение
Резистор постоянный		Резистор постоянный	
Резистор переменный		Резистор подстроечный	
Резисторы нелинейные: терморезистор и вариатор		Конденсатор постоянной емкости	
Конденсаторы оксидные полярный и неполярный		Конденсатор подстроечный	

Наименование	Обозначение	Наименование	Обозначение
Катушка индуктивности, дроссель (L3 – с отводами)		Катушка дроссель с магнито-проводом (L7 — с медным)	
Трансформатор с тремя обмотками и электростатическим экраном		Диод, диодный мост	
Стабилитрон (VD8 – двуханодный)		Диод Шоттки (VD9) ограничительный (VD10), варикап (VD11)	
Динистор (VS1), тринистор (VS2, VS3), симистор (VS4)		Транзистор p-n-p	
Транзистор p-n-p		Транзистор однопереходный	

Наименование	Обозначение	Наименование	Обозначение
Транзистор полевой с *p*-каналом		Транзистор полевой с изолированным затвором и *p*-каналом	
Транзистор полевой с изолированным затвором и *n*-каналом		Фоторезистор	
Фото- и светодиод		Фототранзистор	
Оптрон резисторный		Оптрон диодный	
Оптрон тиристорный		Оптрон транзисторный	

Наименование	Обозначение	Наименование	Обозначение
Датчик Холла		Соединение с общим проводом (корпусом), заземление	
Ответвления линий электрической связи		Экранированные линии связи	
Кабель коаксиальный		Линии электрической связи, выполненной скрученными проводами	
Линия электрической связи, выполненная гибким проводом		Линия групповой связи	

Наименование	Обозначение	Наименование	Обозначение
Усилитель операционный		Компаратор	
Таймер		Элементы логические	
Элементы логические		D – триггер	

ПРИМЕР РАСЧЕТА ИНВЕРТОРА ТОКА

Задание. Спроектировать инвертор тока для универсального электропривода на базе линейного индукторного шагового двухфазного электродвигателя ДШЛ-10, имеющего следующие параметры:
максимальное усилие при единичной коммутации F_{max}= 642 Н;
шаг $\Delta x = 1{,}25 \cdot 10^{-3}$м;
максимальный ход подвижной части $L_{ход}$ =0,1м;
полюсное деление $\tau = 5 \cdot 10^{-3}$м;
масса индуктора m = 2 кг;
номинальный ток фазы $I_{ф\ ном}$= 5 А;
номинальный ток возбуждения $I_в$ =0,45 А;
сопротивление фазы $R_ф$ = 3,5 Ом.

Схема адаптивного инвертора, обеспечивающего инвариантность тока к возмущающим воздействиям, представлена на рис. 1.

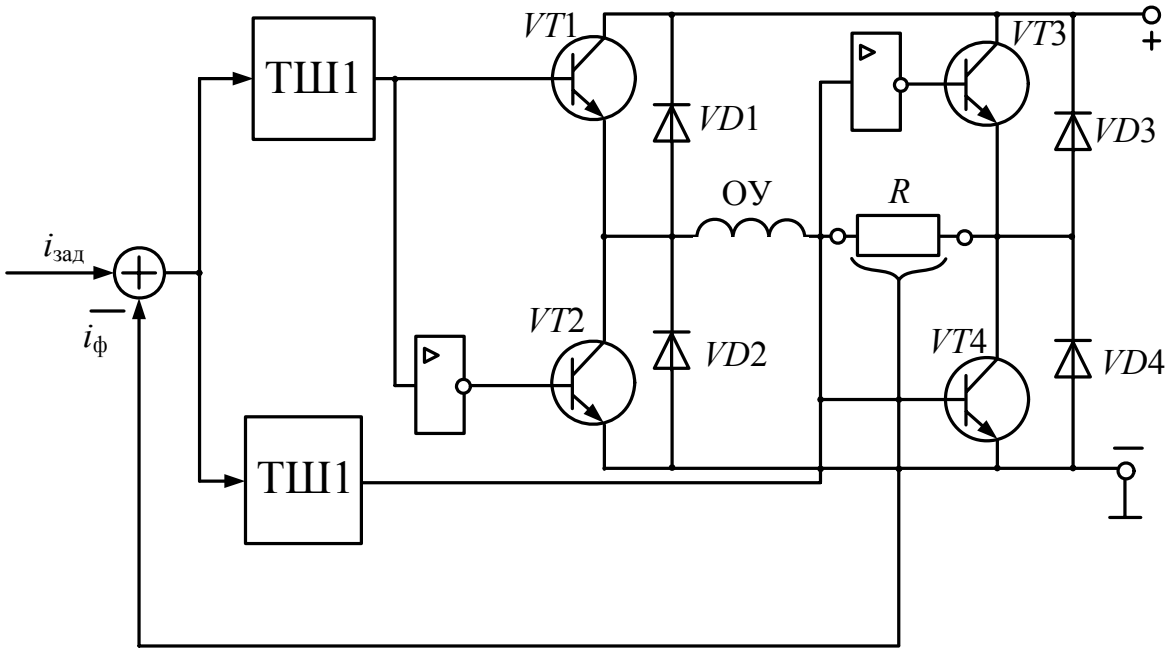


Рис. 1. Схема адаптивного инвертора

Это мостовой инвертор, работающий по принципу двойного токового коридора. Каждая фаза шагового двигателя получает питание от своего автономного инвертора тока и вместе с датчиком тока $R_{ос}$ включена в диа-

гональ моста, выполненного на транзисторных ключах, условно изображенных на рис.1 в виде транзисторов *VT*1÷*VT*4. Транзисторные ключи одной стойки моста, например *VT*1 и *VT*2, управляются в противофазе с помощью одного из триггеров Шмитта (ТШ). ТШ управляется сигналами ошибки по току ($i_{зад}$-$i_{ос}$) и имеют характеристики с одинаковой зоной нечувствительности ΔI, но смещённые относительно оси ординат на δI в разные стороны.

Рассмотрим работу инвертора при поступлении на вход задания тока ступенчатого сигнала. В начальный момент времени $i_{ос}$=0 входной сигнал $i_{зад}$ переключает оба триггера в состояние логического нуля. При этом запираются ключи *VT*1 и *VT*4 и открываются *VT*2 и *VT*3. К обмотке управления прикладывается напряжение питания инвертора $U_п$, и ток фазы форсированно нарастает. При достижении током $i_ф$ значения $i_{зад} + \Delta I - \delta I$ ТШ1 переключается в состояние логической единицы и ключ *VT*2 запирается. При этом ток фазы, замыкаясь через обратный диод *VD*1 и открытый ключ *VT*3, спадает под действием нулевого напряжения. Когда ток уменьшается до $i_{зад} - \Delta I - \delta I$, ТШ1 вновь переходит в состояние логического нуля и включает ключ *VT*2. Ток фазы вновь начнёт нарастать под действием напряжения питания и т.д. Инвертор работает при этом в импульсном режиме, поддерживая ток внутри токового коридора, задаваемого ТШ1.

Пусть в момент времени *t* в фазе появляется ЭДС (рис. 2), знак которой совпадает со знаком тока (двигатель работает в генераторном режиме). Ток $i_ф$, замыкаясь по цепи *VД*1÷*VT*3, начинает возрастать и достигает верхнего порога переключения ТШ2 $i_{зад} + \Delta I + \delta I$, триггер ТШ2 переходит в состояние логической единицы, и ключ *VT*3 запирается. При этом ток протекает по цепи *VD*4÷ ОУ ÷*VD*1 в источник питания (который должен иметь двухстороннюю проводимость) и уменьшается под воздействием напряжения $-U_п + E$.

Когда ток $i_ф$ уменьшится до $i_{зад} - \Delta I + \delta I$, соответствующей нижнему порогу переключения ТШ2, последний перейдёт в состояние логического нуля и ключ *VT*3 включится, обеспечивая нарастание тока по цепи *VD*1 – *VT*3 под действием ЭДС вращения. На следующем шаге электромагнитная энергия, накопленная в индуктивности фазы, вновь частично рекуперируется в источник питания. Имеем режим так называемого рекуперативно-динамического торможения шагового двигателя (ШД). В двигательном режиме работы ШД (ЭДС вращения направлена

встречно току $i_ф$) в режиме адаптивной широтно-импульсной модуляции работает ключ *VT*2, а в генераторном режиме работы ШД – ключ *VT*3. При этом ток поддерживается в первом либо во втором токовых коридорах. На рис. 3 приведена принципиальная схема одного из четырёх транзисторных ключей инвертора.

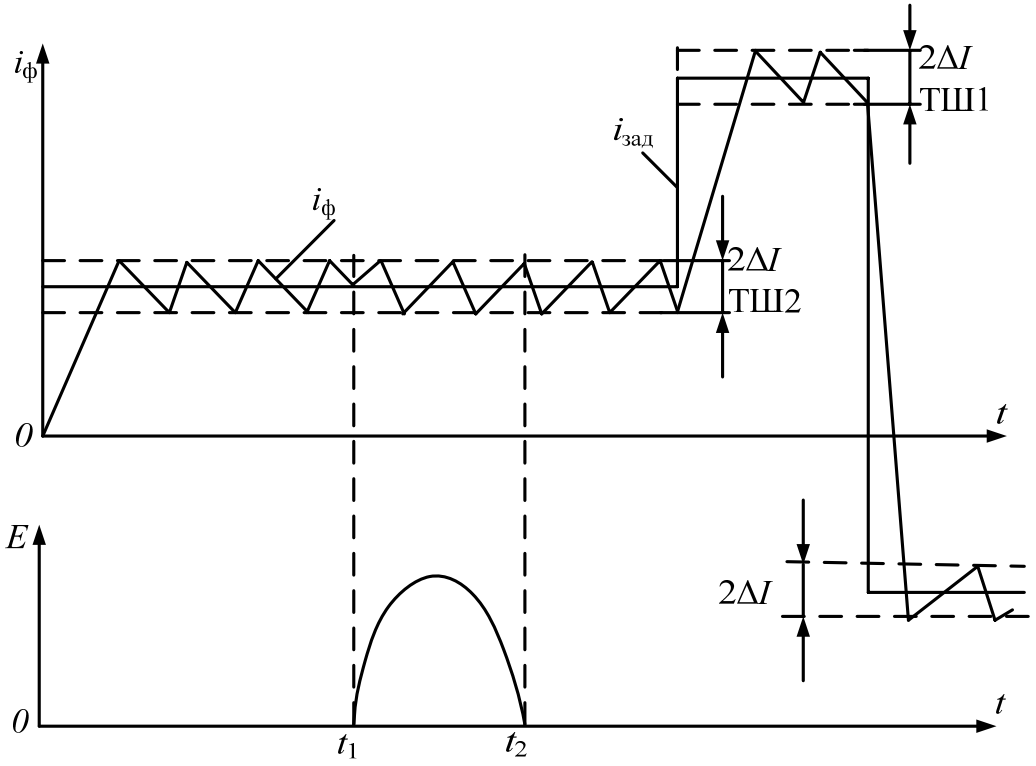


Рис. 2. Временные диаграммы работы инвертора

С целью гальванической развязки силовых цепей управления, повышения надёжности инвертора для управления ключами используются быстродействующие диодные оптроны. При подаче на вход оптрона *U*1 напряжения логического нуля появляется ток в светодиоде, фотодиод начинает генерировать фототок, протекающий в направлении от катода к аноду, и фотоусилитель на *VT*5 и *VT*6 из зоны отсечки переходит в активную область работы. На базе транзистора *VT*3 появляется положительный потенциал относительно эмиттера, и *VT*3 открывается. К ключу, выполненному на составном транзисторе *VT*2, *VT*1, прикладывается импульс отпирающего напряжения. При поступлении на вход оптрона сигнала логической единицы транзисторы *VT*6, *VT*5 запираются и к базе *VT4* прикладывается напряжение,

отрицательное относительно эмиттера. Транзистор *VT*4 открывается и импульсом отрицательного базового тока составной транзистор *VT*2, *VT*1 форсированно запирается. Элементы *L, R*8, *VД*3, *C*2 используются для формирования линии переключения выходного транзистора ключа.

Рассчитаем транзисторный ключ, представленный на рис. 3.

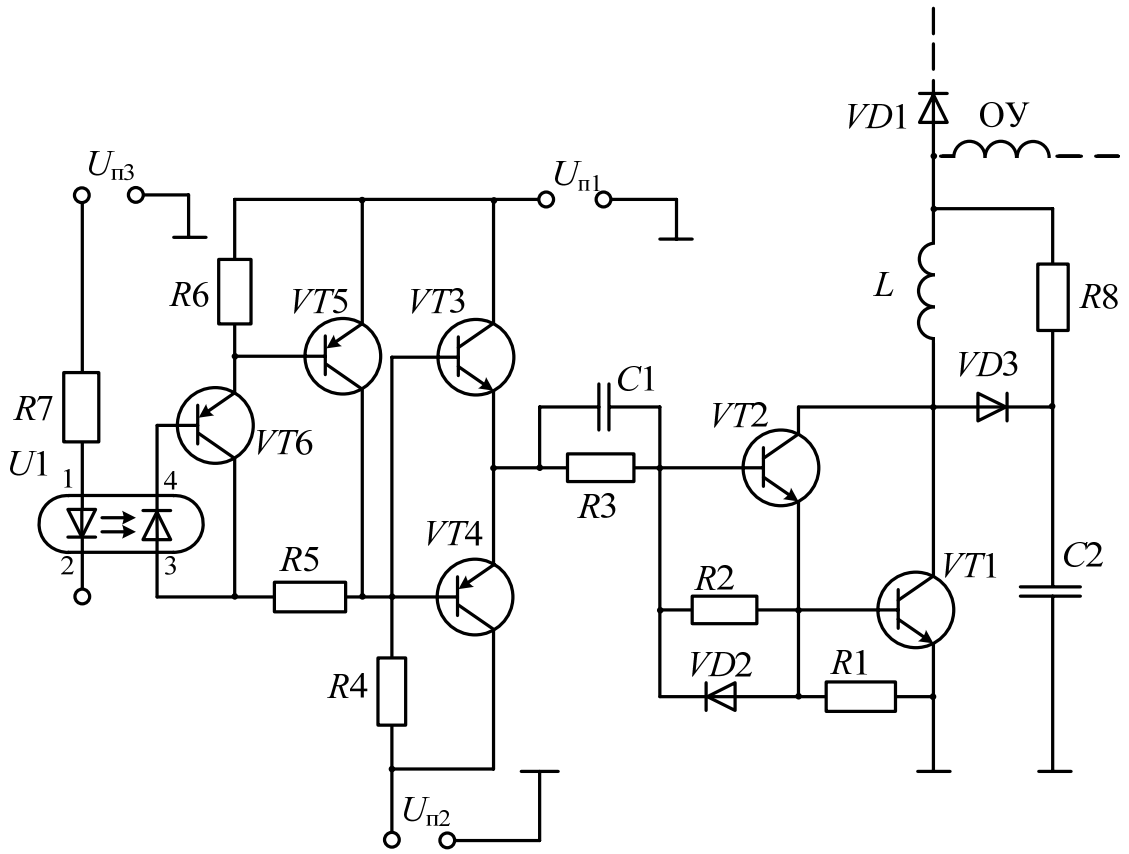


Рис. 3. Схема электрическая принципиальная транзисторного ключа

Статический расчет транзисторного ключа

Максимальный ток коллектора выходного транзистора VT1 определяется максимальным током фазы шагового двигателя

$$I_{К1max}=I_{ф\ max}=5\ А.$$

Максимальное напряжение на запертом транзисторе для инвертора мостового типа равно напряжению питания инвертора

$$U_{эк1\ max}=U_{п}=300\ В.$$

Выберем транзистор типа КТ812А (*n-p-n*), имеющий статический коэффициент передачи тока в схеме с общим эмиттером $h_{21Э\ max} = 4$ и следующие предельно допустимые параметры: $I_{К\ max} = 10$ А, $U_{ЭК\ max} = 400$ В.

С целью повышения надежности ключа и обеспечения пассивного запирания выходного транзистора даже при исчезновении напряжения питания запирающего источника включают резистор R_1=10 Ом параллельно переходу база-эмиттер.

При больших коэффициентах форсировки скважность отпирающих импульсов, поступающих на ключ, мала, и максимальное значение среднего тока, протекающего через обратный диод *VD*1, равно току фазы $I_{ср.max} = I_{ф\ max} = 5$ А. Максимальное обратное напряжение диода равно напряжению питания инвертора $U_{обр.\ max} = U_n = 300$ В.

В качестве обратного диода выбираем высокочастотный диод типа КД213А со следующими предельно допустимыми параметрами $U_{обр.max} = 300$ В, $I_{ср.\ max} = 10$ А.

С учетом максимального напряжения насыщения база-эмиттер транзистора *VT*1 $U_{бэ.нас}$=2,5 В определим максимальный ток коллектора транзистора *VT*2 в режиме насыщения

$$I_{К2\ max} = I_{Б1} + I_{R1} = \frac{I_{К1max}}{h_{21Эmax}} + \frac{U_{бэ.нас}}{R_1} = \frac{5}{4} + \frac{2,5}{10} = 1,5\ А.$$

Максимальное напряжение на запертом транзисторе *VT*2 равно напряжению питания инвертора $U_{КЭ2\ max} = 300$ В. В целях унификации типов силовых транзисторов в качестве *VT*2 выбираем транзистор КТ812А.

Сопротивление резистора *R*2 примем равным 10 Ом.

Определим ток, протекающий в резисторе *R*3, необходимый для отпирания составного транзистора:

$$I_{R3\ отп} = I_{Б2} + I_{R2} = = K_{НАС}\frac{I_{К2max}}{h_{21Э2max}} + \frac{U_{бэ2.нас}}{R2} = 1,5\frac{1,5}{4} + \frac{2,5}{10} = 0,812\ А,$$

где $K_{нас}$=1,5.

Напряжение отпирающего источника U_{n1} определим следующим образом. При включении оптрона транзисторы *VT*6 и *VT*5 из состояния отсечки переходят в активный режим работы, а напряжение $U_{эк5}$ составляет несколько вольт (насыщение *VT*6 и *VT*5 недопустимо по условиям получения максимального быстродействия фотоусилителя).

При этом напряжение на выходе эмиттерного повторителя на транзисторах *VT*3 и *VT*4: $U_{эп} = U_{n1} - U_{эк5} - U_{бэ3}$ должно превышать $U_{бэ1.нас} + U_{бэ2.нас}$ на

величину, достаточную для создания в сопротивлении *R3* требуемого тока. Таким образом, $U_{п1}$ должно быть больше $U_{бэ1.нас}+U_{бэ2.нас}+U_{эк5}+U_{бэ3}$ = = 2,5+2,5+3+0,9=8,9 В.

Примем для унификации источников питания $U_{п1}$=12 В, $U_{п2}$= –12 В – напряжение питающего источника. Транзистор *VT*3 выбираем по максимальному току коллектора $I_{К3max} = I_{R3отп}$ = 0,812 А и максимальному напряжению $U_{К3max} = 2U_{п1}$ = 24 В.

Транзистор КТ815А имеет следующие предельные параметры:

$$I_{Кmax} = 1{,}5 \text{ А}, \; U_{кэ\,max}=25 \text{ В}, \; h_{21Э}=40.$$

Зная ток эмиттера *VT*3 при отпирании составного транзистора, определим ток базы

$$I_{бэ3}=\frac{I_{R3отп}}{h_{21э3min}+1}=\frac{0{,}812}{41}=19{,}8 \text{ А}.$$

Задавая $U_{экз}$=3 В, определим сопротивление резистора *R*3, необходимое для отпирания составного транзистора

$$R3=\frac{U_{п1}-U_{эк5}-U_{бэ3}-U_{бэ1.нас}-U_{бэ2.нас}}{I_{R3\,отп}}=\frac{12-3-0{,}9-2{,}5-2{,}5}{0{,}812}=3{,}82 \text{ Ом}.$$

Принимаем *R*3 = 3,9 Ом.

Определим ток базы транзистора *VT*1, необходимый для его запирания, задавая коэффициент запирания равным 1:

$$I_{Б1ЗАП}=K_{ЗАП}\frac{I_{К1max}}{h_{21э1min}}=1\cdot\frac{5}{4}=1{,}25 \text{ А}.$$

Этот ток складывается из тока активного и пассивного запирания

$$I_{Б1.зап}=I_{Б1.пас}+I_{Б1.акт}=\frac{U_{бэ1.насmin}}{R1}+\frac{-U_{эп.зап}+U_{бэнасmin}-U_{д2}}{R3}.$$

Выбирая в качестве диода *VД*2 высокочастотный диод КД212А, имеющий следующие предельно допустимые параметры: $I_{прmax}$=1 А, $I_{импmax}$ = 50 А, $U_{обрmax}$=200 В, и прямое падение напряжения $U_{д2}$, не превышающее 1 В, найдем:

$$U_{эп.зап}=-\frac{I_{б1.зап}\cdot R1\cdot R3-U_{бэ1.насmin}\cdot R3+(U_{бэ1.нас\,min}-U_{д2})}{R1}=$$

$$=\frac{1{,}25\cdot 10\cdot 3{,}9-1{,}75\cdot 3{,}9-(1{,}75-1)\cdot 10}{10}=-3{,}44 \text{ В}.$$

Транзистор *VT4* выбираем по максимальному току коллектора и максимальному обратному напряжению

$$I_{К4max}=I_{Б1.акт}=\frac{-U_{эп.зап}+U_{бэ1.насmin}-U_{д2}}{R3}=\frac{3{,}44+1{,}75-1}{3{,}9}=1{,}07 \text{ А}, \; U_{эк4.max}=24 \text{ В}.$$

Транзистор КТ816А имеет следующие предельные параметры: I_{Kmax}=3 А, $U_{экmax}$=25 В, $h_{21Эmin}$=25. При запирании ключа *VT*4 переходит в активный режим и его ток базы равен $I_{б4}= \frac{I_{б2.акт}}{h_{21Э4min}+1}=\frac{1,07}{25+1}=41$ мА.

При этом $U_{эб4}$ = 0,9 В, а падение напряжения на сопротивлении *R*4 равно $U_{R4}=U_{эп.зап}-U_{эб4}-U_{п2}=-3,44-0,9+12=7,66$ В.

Считая *VT*1, *VT*2 и *VT*3 запертыми и пренебрегая обратными токами коллекторов этих транзисторов, определим $R4=\frac{U_{R4}}{I_{Б4}}=\frac{7,66}{0,041}=187$ Ом.

Примем *R*4=180 Ом.

Сопротивление *R7* рассчитывается из условия получения заданного прямого тока светодиода $I_{пр.сд}$ =20 мА

$$R7=\frac{U_{пз}-U_{о}-U_{пр.сд}}{I_{пр.сд}}=\frac{5-0,3-1,25}{0,02}=172,5 \text{ Ом},$$

где $U_{пр.сд}$ – прямое падение напряжения на светодиоде, $U_{о}$ – напряжение логического нуля микросхемы, управляющей ключом; примем *R*7=180 Ом. С учетом коэффициента передачи тока для оптрона АОД101А, равного K_I = = 1%, получим ток фотодиода:

$$I_{фд}=I_{бб}=K_I I_{пр.сд}=0,01\cdot 20=0,2 \text{ мА}.$$

В качестве транзисторов *VT*5 и *VT6* фотоусилителя выберем высокочастотные транзисторы типа КТ502А со следующими параметрами:
I_{Kmax}= 300 мА, $U_{3кmax}$= 25 В, $h_{21эmin}$= 40.

Определим токи коллектора и эмиттера *VT*6 при включении ключа

$$I_{кб}=h_{21эбmin}\cdot I_{бб}=40\cdot 0,2=8 \text{ мА},$$

$$I_{эб}=(h_{21эбmin}+1)\cdot I_{бб}=(40+1)0,2=8,2 \text{ мА}.$$

Ток базы транзистора *VT*3

$$I_{б3}=\frac{I_{R3\,отп}}{h_{21Э3\,min}+1}=\frac{0,812}{40+1}=19,8 \text{ мА}.$$

Ток, протекающий через сопротивление *R*4:

$$I_{R4}=\frac{U_{п1}-U_{эк5}-U_{п2}}{R4}=\frac{12-3+12}{187}=112 \text{ мА}.$$

Ток коллектора транзистора *VT*5

$$I_{к5}=I_{б3}+I_{R4}-I_{эб}=19,8+112-8,2=123,6 \text{ мА}$$

Ток базы транзистора *VT*5 и соответствующее ему падение напряжения на переходе база – эмиттер

$$I_{Б5} = \frac{I_{к5}}{h_{21э1min}} = \frac{123,6}{40} = 3,1 \text{ mA};\ U_{эб5} = 0,8 \text{ В};$$

$$R6 = \frac{U_{эб5}}{I_{э6} - I_{Б5}} = \frac{0,8}{(8,2-3,1)0,001} = 156,8 \text{ Ом}.$$

Принимаем R_6 = 160 Ом.

Напряжение, приложенное к переходу эмиттер – коллектор *VT*6 и резистору *R*5:

$$U_{эк6} + U_{R5} = U_{эк5} - U_{эб5} = 3 - 0,8 = 2,2 \text{ В}.$$

Для нормальной работы *VT*6 в режиме усиления $U_{эк6}$ должно быть не меньше 1,5 В, следовательно, $U_{R5} = 2,2 - 1,5 = 0,7$ В. Зная ток I_{R5}, определяем сопротивление резистора $R5 = \frac{U_{R5}}{I_{к6}} = \frac{0,7}{0,008} = 87,5$ Ом. Примем R_5=100 Ом.

Динамический расчет транзисторного ключа

Определим по каталогу граничные частоты коэффициентов передачи в схеме с общим эмиттером для транзисторов, входящих в состав ключа:

$$f_{гр3} = f_{гр4} = 3 \text{ МГц};\quad f_{гр5} = f_{гр6} = 10 \text{ МГц}.$$

Собственные постоянные времени транзисторов при работе в активной зоне

$$\tau = \frac{1}{2\pi f_{гр}};$$

$$\tau_3 = \tau_4 = \frac{1}{2\pi \cdot 3 \cdot 10^{-6}} \approx 0,05 \text{ мкс};\quad \tau_5 = \tau_6 = \frac{1}{2\pi \cdot 10 \cdot 10^{-6}} \approx 0,016 \text{ мкс}.$$

Так, для силовых транзисторов *VT*1 и *VT*2 в справочной литературе не указаны динамические параметры, примем их постоянные времени наибольшими из возможных для класса диффузионных транзисторов (0,01÷0,3 мкс): $\tau_1 = \tau_2 = 0,3$ мкс;

Время включения и выключения оптрона соизмеримо с постоянными времени транзисторов и также должно учитываться: $t_{воп} = t_{зоп} = 0,1$ мкс.

Расчет времени включения ключа будем проводить, приняв следующие допущения: ток базы *VT*6 меняется по линейному закону за время $t_{воп}$, ток базы каждого из последующих транзисторов нарастает также линейно за время, равное времени включения предыдущего транзистора. Так как относительная крутизна фронта базового тока $\chi = t_{в(i+1)}/\tau_i$ где *i*- номер транзистора в ключе,

для всех транзисторов принимаются такие значения, что $K_{\text{нас}}[1-\frac{1}{\chi}(e^{-\chi}-1)]>1$, то время включения можно найти из трансцендентного уравнения

$$K_{\text{нас}i}=\frac{\chi}{[t_{\text{в}i}/\tau_i+(e^{-t_{\text{в}i}/\tau_i-1)}]}.$$

Результаты расчетов сведены в таблицу.

Параметр	Транзистор				
	*VT*6	*VT*5	*VT*3	*VT*2	*VT*1
$k_{\text{нас}}$	1	1	1	1,5	1
τ_i, мкс	0,016	0,016	0,05	0,3	0,3
χ	$\frac{0,1}{0,016}=6,25$	$\frac{0,116}{0,016}=7,25$	$\frac{0,132}{0,05}=2,64$	$\frac{0,182}{0,3}=0,607$	$\frac{0,318}{0,3}=1,06$
$t_{\text{в}}$, мкс	0,116	0,132	0,182	0,318	0,574

Таким образом, включение ключа происходит за время, не превышающее $t_{\text{вкл}}=0,574$ мкс. При определении времени отключения учтем, что оно складывается из времени включения транзистора *VT*4, которое можно считать равным времени включения транзистора *VT*3 ($t_{\text{в}}=0,182$ мкс), времени запирания *VT*2 ($t_{\text{з}2}$), времени рассасывания избыточного заряда *VT1* ($t_{\text{р}1}$), времени рассасывания *VT*2 ($t_{\text{р}2}$).

Определим вначале запирающий базовый ток *VT*2

$$I_{\text{б2зап}}=I_{\text{б2пас}}+I_{\text{б2акт}}=\frac{U_{\text{бэ1насmin}}}{R2}+\frac{-U_{\text{эпзап}}+U_{\text{бэ1насmin}}+U_{\text{бэ2насmin}}}{R3}=\frac{1,75}{10}+$$
$$+\frac{3,44+1,75+1,75}{3,9}=1,9\ \text{А}.$$

Коэффициент запирания транзистора VT2

$$K_{\text{зап}}=\frac{I_{\text{б2зап}}\cdot h_{21\text{э}}}{I_{k2}}=\frac{1,9\cdot 4}{1,5}=5,2.$$

Постоянная времени транзистора в режиме насыщения на порядок превосходит постоянную времени в активной зоне. Примем $\tau_{\text{н}}=10\tau$. Если предположить, что *VT*2 запирается идеальным импульсом базового тока, то

$$t'_{\text{р}2}=\tau_{\text{н}2}\ell n\frac{K_{\text{нас}2}+K_{\text{зап}2}}{1+K_{\text{зап}2}}=10\cdot 0,3\ln\frac{1,5+5,2}{1+5,2}=0,233\ \text{мкс}.$$

С учетом времени нарастания тока, равного $t_{в4}$, получим

$$t_{р2} = 0{,}5t'_{р2} + t_{в4} = 0{,}5 \cdot 0{,}233 + 0{,}182 = 0{,}298 \text{ мкс.}$$

За время рассасывания $VT2$ базовый ток успевает достичь максимального значения, переходный процесс запирания $VT2$ соответствует реакции на идеальный импульс тока базы

$$t_{з2} = \tau \ell n \frac{1 + K_{зап2}}{0{,}05 + K_{зап2}} = 0{,}3 \ln \frac{1 + 5{,}2}{0{,}05 + 5{,}2} = 0{,}05 \text{ мкс.}$$

Примем $K_{нас1} = 1{,}1$ и, предполагая, что после запирания $VT2$ базовый ток $i_{Б1}$ имеет форму, близкую к идеальному импульсу, получим:

$$t_{р1} = \tau_{н1} \ell n \frac{K_{нас1} + K_{зап1}}{1 + K_{зап1}} = 3 \ln \frac{1{,}1 + 1}{1 + 1} = 0{,}146 \text{ мкс.}$$

Время запирания выходного транзистора ключа

$$t_{з1} = \tau \ell n \frac{1 + K_{зап1}}{0{,}05 + K_{зап1}} = 0{,}3 \ln \frac{1 + 1}{0{,}05 + 1} = 0{,}193 \text{ мкс.}$$

Полное время отключения ключа

$$t_{вык} = t_{р2} + t_{р1} + t_{з1} + t_{з2} = 0{,}298 + 0{,}146 + 0{,}193 + 0{,}05 = 0{,}687 \text{ мкс.}$$

Оценим динамические потери в выходном транзисторе ключа, считая предварительно, что частота ШИМ не превышает 20 кГц. Потери на этих перезарядах коллекторной емкости и дополнительно потери в течение времени рассасывания блокирующего диода учтем коэффициентом запаса, равным $\alpha = 1{,}5$.

$$P_{к\,дин} = 0{,}5 \cdot \alpha \cdot U_{п} \cdot I_{фmax}(t_{в} + t_{з}) \cdot f_{ШИМ} = 0{,}5 \cdot 1{,}5 \cdot 300 \cdot 5 \cdot (0{,}574 + 0{,}193) \cdot 10^{-6} \cdot 20 \cdot 10^{3} =$$
$$= 17{,}3 \text{ Вт.}$$

Максимальное значение ЭДС вращения в относительных единицах

$$E^{0} = \frac{E_{max}}{U_{п}} = \frac{2\pi}{\tau} L_{1} I_{н} U_{max} \frac{1}{U_{п}} = \frac{2\pi}{5 \cdot 10^{-3}} 0{,}227 \cdot 0{,}45 \cdot 0{,}74 \frac{1}{300} = 0{,}317.$$

Максимальный ток фазы в относительных единицах

$$I^{0}_{фmax} = \frac{I_{фmax}}{I_{ов}} = \frac{I_{фmax} R_{ф}}{U_{п}} = \frac{5 \cdot 3{,}5}{300} = 0{,}058.$$

Скважность импульсов ШИМ при поддержании максимального тока при максимальной скорости

$$\nu = I^{0}_{фmax} + E^{0}_{фmax} = 0{,}058 + 0{,}317 = 0{,}375.$$

Падение напряжения на переходе коллектор-эмиттер открытого ключа

$$U_{кэ1} = U_{бэнас1} + U_{бэнас2} = 2 + 2 = 4 \text{ В.}$$

Потери в открытом транзисторе без учета пульсаций тока

$$P_0 = U_{\text{кэ1}} \cdot I_{\text{фmax}} \cdot \nu = 4 \cdot 5 \cdot 0,375 = 7,5 \text{ Вт.}$$

Суммарные потери мощности в выходном транзисторе в самом неблагоприятном режиме работы инвертора $P_{\text{к}\Sigma} = P_0 + P_{\text{дин}} = 24,8$ Вт не превышают допустимых $P_{\text{к.доп}}$=50 Вт, что свидетельствует о работоспособности спроектированного ключа. Формирование линии переключения следует применять лишь с целью повышения надежности инвертора.

Расчет элементов, формирующих линию переключения транзисторов

При включении ключа с элементами, формирующими траектории переключения транзистора, время переключения определяется скоростью нарастания коллекторного тока, протекающего через дроссель L, обратный диод $VD1$ и транзистор $VT1$ в режиме насыщения,

$$t_{\text{в}} = \frac{L \cdot I_{\text{доп}}}{U_{\text{n}}},$$

где $I_{\text{доп}}$ – допустимое значение броска тока фазы.

Считая это время таким же, как в ключе без формирующих элементов, найдем требуемую индуктивность дросселя, приняв

$$L = t_{\text{в}} \frac{U_{\text{n}}}{I_{\text{доп}}} = 0,574 \cdot 10^{-6} \frac{300}{7} = 0,025 \text{ мГн.}$$

Емкость $C2$ определили из условия, чтобы время отключения ключа не превышало времени отключения без цепей формирования траектории переключения

$$C2 = \frac{2}{9} \frac{I_{\text{фmax}} \cdot t_3}{U_{\text{n}}} = \frac{2 \cdot 5 \cdot 0,193 \cdot 10^{-6}}{9 \cdot 300} = 0,00071 \text{ мкФ.}$$

Примем $C2$=0,001 мкФ, сопротивление разрядного резистора

$$R8 = \frac{U_{\text{n}}}{I_{\text{доп}} - I_{\text{фmax}}} = \frac{300}{7-5} = 150 \text{ Ом.}$$

В качестве разрядного диода $VD3$ выбираем высокочастотный диод КД212А. Оценим времена разряда дросселя и емкости $C2$ после включения или отключения ключа. При выполнении условий $0,83(R8)^2 \le \frac{L}{C2} \le 1,55(\text{R8})^2$, справедливых в нашем случае, эти времена можно определить так:

$$t^{+}_{\text{раз}} \approx 6 \frac{L}{R8} = 6 \frac{0,025 \cdot 10^{-3}}{150} = 1 \text{ мкс;}$$

$$t^{-}_{\text{раз}} = 6R8C2 = 6 \cdot 150 \cdot 0,01 \cdot 10^{-6} = 0,9 \text{ мкс.}$$

Как видно, отвод энергии, накопленной в реактивных элементах ключа, требует достаточно большого времени. Если к очередному переключению эта энергия не израсходуется полностью, то цель введения формирующих элементов не будет достигнута. Поэтому полное время включения и отключения ключа следует считать равным

$$t_{\text{вклΣ}} = t_{\text{вкл}} + t^{+}_{\text{раз}} = 0,574 + 1 = 1,574 \text{ мкс};$$

$$t_{\text{выклΣ}} = t_{\text{выкл}} + t^{-}_{\text{раз}} = 0,687 + 0,9 = 1,587 \text{ мкс}.$$

Для расчета схемы управления примем $t_{\text{выклΣ}} = t_{\text{вклΣ}} = 2$ мкс.

Расчет схемы управления инвертором. Усилитель обратной связи

Схема включения датчика тока показана на рис. 4.

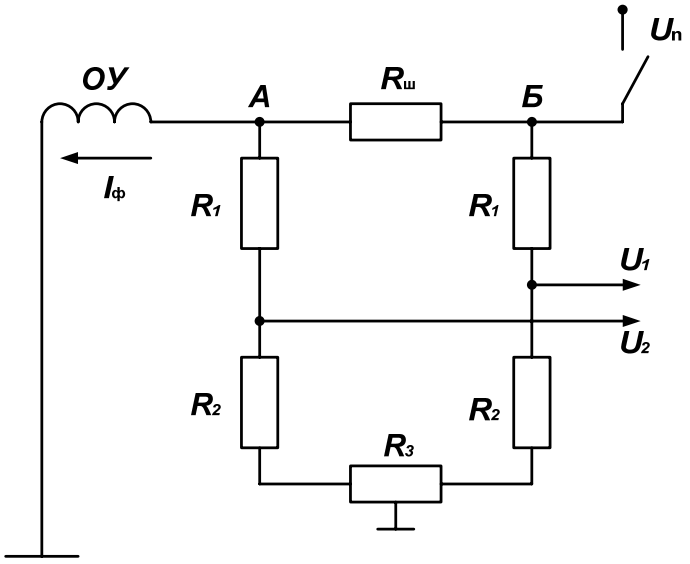


Рис. 4. Схема включения датчика тока

Выходной разностный сигнал, поступающий на вход дифференциального усилителя (ДУ), упрощенная расчетная схема которого приведена на рис. 5, определяется выражением

$$U_1 - U_2 = I_{\text{ф}} \frac{R_{\text{ш}} - R_2}{R_{\text{ш}} + R_1 + R_2} + U_{\text{п}} \frac{R_{\text{ш}} - R_2}{(R_{\text{ш}} + R_1 + R_2)(R_1 + R_2)}.$$

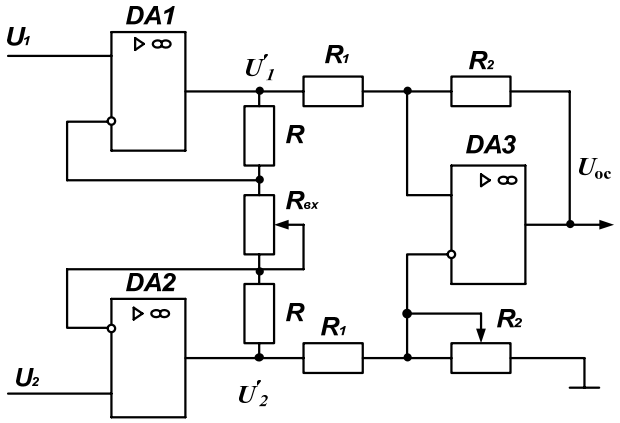


Рис. 5. Дифференциальный усилитель

Первая составляющая напряжения $U_1 - U_2$ представляет собой полезный сигнал, а вторая - систематическую ошибку. Определим суммарное сопротивление делителя напряжения из условия, чтобы систематическая ошибка при поддержании минимального тока не превышала 1%

$$R_1 + R_2 \geq 100\frac{U_п}{I_{\text{фmin}}} = 100\frac{300}{0,05} = 600 \text{ кОм.}$$

Здесь $I_{\text{фmin}}$ найдено из условия создания инвертором минимального требуемого тока при максимальном коэффициенте дробления шага

$$I_{\text{фmin}} = I_{\text{фmax}} \cdot \text{tg}\alpha_{\text{др}} = I_{\text{фmax}} \cdot \text{tg}\left(\frac{\pi}{2K_{\text{др}}}\right) = 5\text{tg}\left(\frac{\pi}{2 \cdot 156}\right) = 0,05 \text{ А.}$$

В качестве усилителей *DA*1, *DA2* выбираем быстродействующие операционные усилители (ОУ) 574УД1. Задаваясь максимальным значением синфазного сигнала $U_{\text{сф}}$ =10В, определим сопротивление резисторов R_1 и R_2

$$R_1 = (R_1 + R_2)\frac{U_{\text{сфmax}}}{U_{\text{п}}} = 600\frac{10}{300} = 20 \text{ кОм.}$$

Примем R_1=620 кОм, R_2=24 кОм. Сопротивление шунта выбираем из условия получения при минимальном токе фазы полезного сигнала на входе дифференциального усилителя, на порядок превышающего температурный дрейф напряжения смещения $\frac{\Delta U_{\text{см}}}{\Delta T} = 100$ мкВ/°С;

$$R_{\text{ш}} \geq 10\Delta U_{\text{см}}\frac{R_1 + R_2}{I_{\text{фmin}}} = 10 \cdot 100 \cdot 10^{-6}\frac{644}{5 \cdot 0,004 \cdot 24} = 0,53 \text{ Ом.}$$

Примем $R_{\text{ш}}$=0,5 Ом, тогда максимальное значение сигнала на входе дифференциального усилителя, соответствующее максимальному току:

$$(U_1 - U_2)_{max} = I_{фmax}\frac{R_ш \cdot R_2}{R_1 + R_2} = 5\frac{0,5 \cdot 24}{644} = 93,2 \text{ мВ}.$$

Дифференциальный усилитель (см. рис. 5) в статике описывается следующей системой уравнений:

$$U_1^г - U_2^г = \left(1 + 2\frac{R}{R_{вых}}\right)U_1 - U_2;$$

$$U_1^г - U_2^г = U_1 + U_2;$$

$$U_{вых} = U_{ос} = -\left[\frac{R_2}{R_1}(U_1^{'} - U_2^{'}) + \frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{1}{K_{ос.сф}}(U_1^{'} + U_2^{'})\right],$$

где $K_{ос.сф}$ – коэффициент ослабления синфазного сигнала операционным усилителем. Для 574УД1 20 *lg* $K_{ос.сф}$ =80 дБ, откуда $K_{ос.сф}$ =10000. Как следует из этих соотношений, первый каскад усилителя без изменения пропускает синфазный сигнал на выход, усиливая дифференциальный полезный сигнал, а второй сигнал обеспечивает подавление синфазного сигнала в большей степени, чем его коэффициент усиления по дифференциальной составляющей $\frac{R_1}{R_2}$. Так как сопротивление нагрузки для ОУ должно быть не меньше 2 кОм, примем R_1=R_2=10 кОм. Тогда из условия получения на выходе усилителя с обратной связью напряжения 5 В определим коэффициент усиления ДУ

$$K_{ус} = 1 + 2\frac{R}{R_{вх}} = \frac{U_{остах}}{(U_1 - U_2)} = \frac{5}{93,2 \cdot 10^{-3}} = 53,6,$$

откуда $\frac{R}{R_{вх}}$=26,3.

Примем $R_{вх}$ =2,2 кОм, R=5,6 кОм.

Триггеры Шмитта

На рис. 6 показана схема триггера Шмитта (ТШ).

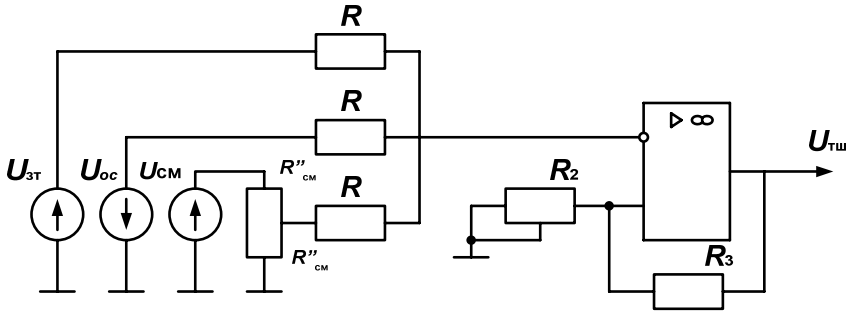


Рис. 6. Триггер Шмитта

Сравнение сигналов задания тока $U_{зт}$ и обратной связи по току $U_{ос}$ производится на инвертирующем входе операционного усилителя, в качестве последнего выбираем быстродействующий интегральный компаратор 521СА2, выходные напряжения которого соответствуют уровням логического нуля и логической единицы микросхем транзисторно-транзисторной логики

$$U_{т\,max} = U^1 = 3,2 \text{ В}, \qquad U_{т\,min} = U^0 = -0,5 \text{ В}.$$

Определим минимальное допустимое значение относительного сдвига двух токовых коридоров между собой $2\delta I$. Длительность временной задержки управляющих импульсов, поступающих на ключи одной стойки, должна быть не меньше времени отключения ключа $t_{здвкл} = t_{выклΣ}$.

Эта задержка формируется *RC*-цепочками в блоке защиты инвертора от сквозного тока. Время с момента фактического достижения током фазы верхнего порогового уровня ТШ1 (см. рис. 2) до момента начала спадания тока назовем временем задержки спадания тока

$$t_{зад.сп} = t_{зад.Ду} + t_{зад.DD2.1} + t_{зад.DD4.2} + t_{зад.ТШ} = 110\,нс + 130\,нс + 40\,нс + 40\,нс + 2\,мкс = 2,32 \text{ мкс}$$

$$t_{зад.Ду} = 2t_{зад.ОУ} = 2\frac{U_{вых\,max}}{\left(\frac{dU_{вкл}}{dt}\right)_{max}} = 2\frac{5}{90\cdot 10^6} = 110 \text{ нс}.$$

Остальные параметры определены из паспортных данных на интегральные компараторы и микросхемы. Время с момента фактического достижения током нижнего порогового уровня ТШ2 (рис. 1) до момента нарастания тока назовем временем задержки нарастания тока

$$t_{зад.нар} = t_{зад.Ду} + t_{зад.ТШ} + t_{зад.DD1.3} + t_{зад.DD1.1} + t_{зад.RC} + t_{вклΣ} + t_{зад.DD3.1} = 110 \text{ нс}+130 \text{ нс}+$$

+40 нс+40 нс+2 мкс+40 нс+2 мкс=4,36 мкс.

Максимальное значение темпов нарастания и спадания тока при поддержании инвертором минимального тока при малой ЭДС вращения

$$\left(\frac{di_ф}{dt}\right)_{нар.max} = \left(\frac{di_ф}{dt}\right)_{сп.max} = \frac{U_п}{L_0} = \frac{300}{0,185} = 1622 \text{ А/с}.$$

Для того чтобы из-за инерционности схемы управления не происходило пересечения сразу двух границ токовых коридоров и инвертор не переходил при этом во второй импульсный режим работы с повышенной частотой переключений, необходимо выполнение следующих условий:

$$\left(\frac{di_ф}{dt}\right)_{max} t_{зад.нар.} < 2\delta I, \quad \left(\frac{di_ф}{dt}\right)_{min} t_{зад.сп} < 2\delta I,$$

откуда $\delta I > 0,5\left(\frac{di_ф}{dt}\right)_{max} \cdot t_{зад.нар.} = 0,5 \cdot 1622 \cdot 4,36 \cdot 10^{-6} = 3,54 \text{ мА}$.

Зададим δI =4 мА. При этом максимальная систематическая ошибка в воспроизведении среднего тока не превосходит 0,08 % для максимального значения тока и 8 % для минимального, что допустимо.

Ширину токового коридора ΔI выбираем из условия получения при минимальном заданном токе пульсацию, которые не превышают 25 % от среднего значения тока $\Delta I \le 2 \cdot 0{,}25 I_{\text{фmin}} = 2 \cdot 0{,}25 \cdot 0{,}05 = 25$ мА .

Примем ΔI =24 мА. Оценим максимальную частоту ШИМ при выбранном токовом коридоре

$$f^*_{\max} = \frac{0{,}125}{\Delta I^*} = \frac{0{,}125}{\Delta I} \cdot \frac{U_{\text{п}}}{R_{\text{ф}}} = \frac{0{,}125}{24 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{300}{3{,}5} = 446{,}4 \ \text{кГц},$$

$$f_{\max} = f^*_{\max} \cdot f_{\delta} = \frac{f^*_{\max}}{T_{\text{ф}}} = f^*_{\max} \frac{R_{\text{ф}}}{L_0} = 446{,}4 \frac{3{,}5}{0{,}185} = 8{,}45 \ \text{кГц}.$$

Как следует из расчета динамики транзисторного ключа, эта частота допустима. С учетом выбранного ранее коэффициента усиления усилителя обратной связи по току 1 В/А и обозначений, приведенных выше, триггеры Шмитта должны иметь следующие параметры:

$$\Delta U = 24 \text{ мВ}; \delta U = 4 \text{ мВ}; U_{\text{сраб.1}} = 16 \text{ мВ}; U_{\text{отп.1}} = -8 \text{ мВ}; U_{\text{сраб.2}} = 8 \text{ мВ}; U_{\text{отп.2}} = -16 \text{ мВ}.$$

Если сопротивление смещения $R_{\text{см}}$ на порядок меньше сопротивления резистора R (см. рис. 4), то с погрешностью до 1% справедливо соотношение

$$\Delta U = 3 \frac{R_2}{R_2 + R_3} \left(U^1 - U^0 \right).$$

Примем для обоих триггеров R=47 кОм, $R'_{\text{см}}$=4,7 кОм, R_3=10 кОм. Требуемое значение

$$R_2 = \frac{R_3}{3\left(\dfrac{U^1 - U^0}{\Delta U} \right) - 1} = \frac{10 \cdot 10^3}{\dfrac{3(3{,}2 + 0{,}5)}{24 \cdot 10^{-3}} - 1} = 21{,}7 \text{ Ом}.$$

Выбираем переменный резистор R_2=100 Ом для обеспечения регулировки ширины «токового коридора» при наладке инвертора.

Примем $U_{\text{см}}$ =12 В. Требуемые коэффициенты деления напряжения смещения $K_{\text{дел}} = \dfrac{\left(R'_{\text{см}} + R''_{\text{см}} \right)}{\mathbf{R''_{см}}}$ найдем исходя из условия получения заданных напряжений срабатывания триггеров

$$K_{\text{дел}} = \frac{\text{U}_{\text{см}}}{\text{U}^1 \dfrac{3R_2}{R_2 + R_3} - U_{\text{сраб}}}; \ K_{\text{дел1}} = \frac{12}{3{,}2 \dfrac{3 \cdot 21{,}7}{21{,}7 + 10000} - 16 \cdot 10^{-3}} = 2523;$$

$$K_{\text{дел2}} = \frac{12}{3{,}2\dfrac{3\cdot 21{,}7}{21{,}7+10000} - 8\cdot 10^{-3}} = 940{,}7.$$

Для обеспечения требуемой точности в качестве $R''_{\text{см}}$ целесообразно применять отдельные резисторы

$$R''_{\text{см}} = \frac{R_{\text{см}}}{\text{К}_{\text{дел}}};\ R''_{\text{см1}} = \frac{4{,}7\cdot 10^3}{2523} = 1{,}863 \text{ Ом};\ R''_{\text{см2}} = \frac{4{,}7\cdot 10^3}{940{,}7} = 5 \text{ Ом}.$$

Примем $R''_{\text{см1}}$=1,8 Ом, $R''_{\text{см2}}$=5,1 Ом.

Блок защиты инвертора от сквозных токов

Определим параметры *RC*-цепей, задающих требуемый временной сдвиг между управляющими импульсами $t_{зад.RC} = 2$ мкс. Из условия ограничения выходного тока микросхем DD1.1, DD2.1, DD1.3, DD2.3 (рис. 7) предельно допустимым током $I^1_{\text{вых.max}}$ и из условия $U_{\text{с}}(0) < U_{\text{пор}}$, которое означает, что при разряде емкости С напряжение на ней меньше порогового уровня, достаточного для переключения микросхем DD3.1, DD3.2, DD4.1, DD4.2, определим сопротивление резисторов $R_{31} \div R_{34}$.

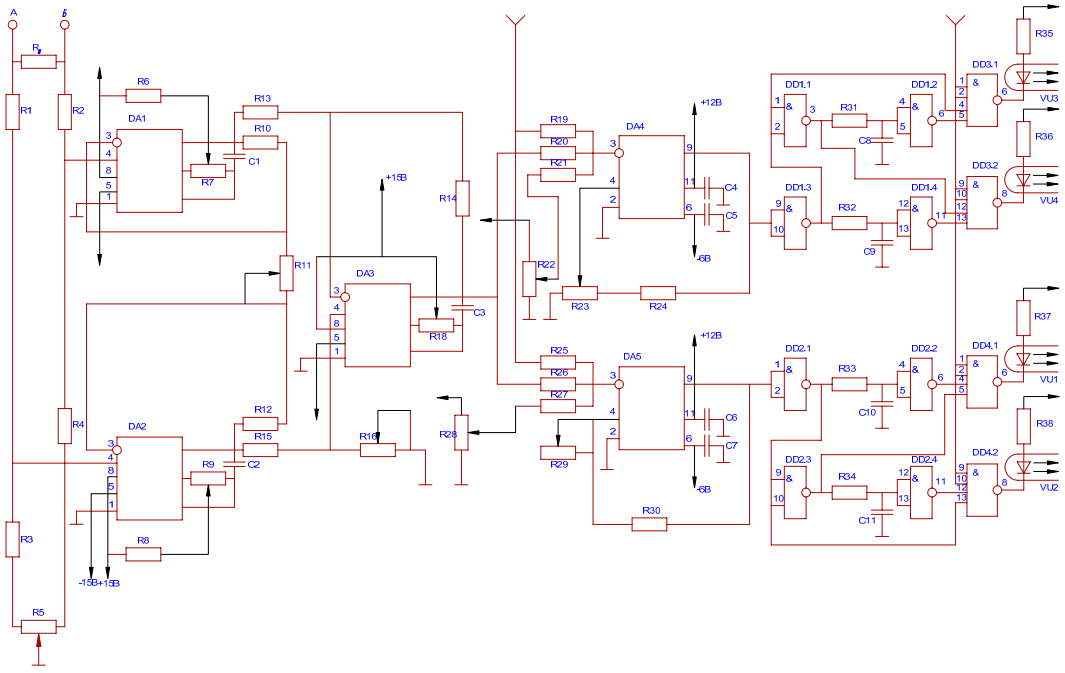


Рис. 7. Схема управления инвертором

$$\frac{U^1}{I^1_{\text{вых}.max}} < R < \frac{\left(E_n - U_{\text{бэмт}} - U^0\right)\left(U_{пор} - U^0\right)}{I^*_{вх}\left(E_n - U_{\text{пор}} - U_{бэмт}\right)},$$

где $E_{\text{п}}$=5В - напряжение питания микросхем; $U_{\text{бэмт}}$=0,8 В - падение напряжения на переходе база-эмиттер многоэмиттерного входного транзистора, $I^*_{\text{вх}}$ = 1,6 мА- входной ток микросхем, при входном напряжении U^0,

$$I_{\text{вых max}} = K_{\text{раз}} \cdot I^1_{\text{вх}} = 10 \cdot 40 = 400\,\text{мкА},$$

$K_{\text{раз}}$- коэффициент разветвления микросхем по выходу.

Подставляя численные значения, получим:

$$\frac{3}{0,4 \cdot 10^{-3}} < R < \frac{(5 - 0,8 - 0,3)\,(1,3 - 0,3)}{1,6 \cdot 10^{-3}\,(5 - 1,3 - 0,8)};\quad 7,5\ \text{кОм} < R < 0,84\ \text{кОм}.$$

Примем R=4,3 кОм.

Время задержки, определяемое разрядом конденсатора, равно

$$t_{\text{зад}.RC} = RC\,ln\left(\frac{U^1 - U^0}{U_{\text{пор}} - U^0 + I^1_{\text{вх}} R}\right), \text{ откуда}$$

$$C = \frac{t_{\text{зад}.RC}}{R\,ln\left(\frac{U^1 - U^0}{U_{\text{пор}} - U^0 + I^1_{\text{вх}} R}\right)} = \frac{2 \cdot 10^{-6}}{4,3 \cdot 10^3 \left(\frac{3 - 0,3}{1,3 - 0,3 + 40 \cdot 10^{-6} \cdot 4,3 \cdot 10^3}\right)} = 517\ \text{пФ}.$$

Примем $C_8 \div C_{11}$=560 пФ.

В заключение отметим, что точностные и динамические параметры инвертора удовлетворяют всем требованиям технического задания.

РЕКОМЕНДАТЕЛЬНЫЙ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кауфман, М. Практическое руководство по расчетам схем в электронике: справ.: В 2 т. Т. 1 / М. Кауфман, А.Г. Сидмаи; под ред. Ф.Н. Покровского: пер. с англ. – М.: Энергатомиздат, 1991. – 368 с. – ISBN 5-283-02511-X.

2. Романычева, Э. Т. Разработка и оформление конструкторской документации радиоэлектронной аппаратуры: справ. / Э.Т. Романычева, [и др.]; под ред. Э.Т. Романычевой. — М.: Радио и связь, 1989. – 448 с. – ISBN 5-256-00289-9.

3. Усатенко, С. Т. Выполнение электрических схем по ЕСКД: справ. / С.Т. Усатенко, Т.К. Каченюк, М.В. Терехова. – М.: Изд-во стандартов, 1989. – 325 с. – ISBN 5-7050-0031-6.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение…… 3
1. Цель работы……..… 3
2. Предмет и тематика работы…… 4
3. Задание на курсовую работу……..……. 4
4. Перечень и объем разрабатываемых документов……. 5
5. Содержание пояснительной записки……. 5
6. Оформление пояснительной записки……..…... 6
7. Оформление графической части……...…….. 8
8. Организация работы студента……..…….. 10
9. Подготовка доклада и защита работы…… 11
Приложение 1. Примерная тематика заданий...…… 13
Приложение 2. Условные графические обозначения некоторых элементов …… 14
Приложение 3. Примеры расчета инвертора тока……..… 19
Рекомендательный библиографический список……...…… 37