



Министерство образования и науки Украины
Севастопольский национальный технический университет

РАСЧЕТ БЛОКА ОПТРОННОЙ РАЗВЯЗКИ

Методические указания к выполнению
расчетно-графического задания № 1
по дисциплине

«Основы компьютерно-интегрированного управления»
для студентов специальностей:

7.092501- «Автоматизированное управление технологическими
процессами»

7.092502- «Компьютерно-интегрированные технологические
процессы и производство»
дневной и заочной форм обучения

Севастополь
2005



УДК 621.396.6.038.6

Расчет блока оптронной развязки: Методические указания к выполнению расчетно-графического задания / Сост.: А.И. Левченко, Ю. К. Сопин. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2005 – 32 с.

Целью методических указаний является оказание помощи студентам в изучение инженерных методов расчета систем гальванической развязки информационных сигналов, построенных на основе оптоэлектронных преобразователей, а также принципов их моделирования в среде «CIRCUITMAKER».

Методические указания рассмотрены и утверждены на заседании кафедры «Автоматизация технологических процессов и производств» 16 мая 2005 г., протокол № 8

Допущено учебно-методическим центром СевНТУ в качестве методических указаний

Рецензент:

Копп В.Я., доктор техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Автоматизированные приборные системы»

СОДЕРЖАНИЕ

1. Краткие теоретические сведения.....	4
2. Схемотехника блока оптронной развязки.....	5
2.1 Схемотехника буферных устройств.....	5
2.2 Схемотехника блока управления.....	8
2.3 Блоки оптронной развязки для сопряжения цифровых устройств.....	9
2.3.1 Блок оптронной развязки с ТТЛ-входом и ТТЛ-выходом.....	9
2.3.2 Блок оптронной развязки с токовым управлением.....	10
2.4 Блоки оптронной развязки для сопряжения исполнительных устройств постоянного и переменного тока.....	11
3. Расчет блока оптронной развязки.....	13
3.1 Расчет буферного устройства на основе диодной оптопары в генераторном режиме.....	13
3.2 Расчет буферного устройства на основе диодной оптопары в параметрическом режиме.....	14
3.3 Расчет буферного устройства на биполярных транзисторах.....	16
3.4 Расчет буферного устройства на основе транзисторной оптопары.....	18
3.4.1 Расчет двухкаскадного буферного устройства.....	18
3.4.2 Расчет однокаскадного буферного устройства.....	21
3.5 Расчет блока оптронной развязки для сопряжения цифровых устройств.....	22
3.6 Расчет блока оптронной развязки типа «токовая петля».....	24
4. Варианты индивидуальных заданий.....	26
5. Содержание отчета.....	29
6. Перечень сокращений.....	29
Библиографический список.....	30
Приложение А. Варианты сопряжения исполнительных устройств с системой управления.....	31

1. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Гальваническая развязка информационных сигналов применяется в компьютерно-интегрированных системах управления (КИСУ) для исключения электрической (гальванической) связи между источниками управляющего и исполнительного сигналов. Данная задача сводится к разделению общего провода источника и приемника информации за счет введения дополнительного информационного канала между ними. В качестве информационного канала используются различные физические поля и эффекты: электростатическое поле на границе раздела двух сред (полевые транзисторы); электромагнитное поле (трансформаторы тока и напряжения, электромагнитные реле, сфокусированный световой поток и т.п.).

Наибольшее распространение в КИСУ получили блоки оптронной развязки, построенные на основе оптоэлектронных преобразователей.

Основу блока оптронной развязки (БОР) составляет оптопара (оптрон), который включает излучатель и приемник светового потока, заключенные в корпус, и разделенные оптически прозрачной средой. В качестве фотоизлучателя обычно используют инфракрасные излучающие диоды, а в качестве фотоприемника - фотодиоды, фототранзисторы, фототиристоры и фоторезисторы. В зависимости от типа фотоприемника различают диодные, транзисторные, тиристорные и резисторные оптроны.

Фотоприемник диодной оптопары может работать в генераторном и параметрическом режимах. [2].

Генераторный режим реализуется при холостом ходе выходной цепи фотодиода. При номинальном входном токе фотоизлучателя на выводах фотодиода генерируется фото-ЭДС $E_{\Phi} = (0,7 \div 0,8) \text{ В}$ – потенциал открытого рп-перехода на основе кремния [7].

В параметрическом режиме фотодиод включается через ограничивающий резистор в цепь источника постоянного напряжения в обратном направлении. Резистор ограничивает обратный ток фотодиода и предотвращает его лавинообразный пробой. Световой поток, возбужденный входным током фотоизлучателя, обуславливает увеличение обратного тока фотодиода, величина которого возрастает с увеличением светового потока [2].

Фотоприемник транзисторной оптопары обладает внутренним усилением фототока базы и функционирует аналогично биполярному транзистору в ключевом режиме. В тиристорных оптопарах в качестве фотоприемника используются управляемые световым потоком полупроводниковые структуры: фотодинисторы, фототиристоры. Эти структуры имеют релейную характеристику и позволяют коммутировать токи большой величины [2].

На основе резисторной оптопары реализуются преобразователи и модуляторы электрических сигналов [2].

2. СХЕМОТЕХНИКА БЛОКА ОПТРОННОЙ РАЗВЯЗКИ

Схемотехника и методики расчета БОР определяются типом используемой оптопары, режимом ее работы, мощностью нагрузки, а также характером управляющего сигнала.

Обобщенная структурная схема БОР представлена на рисунке 2.1.

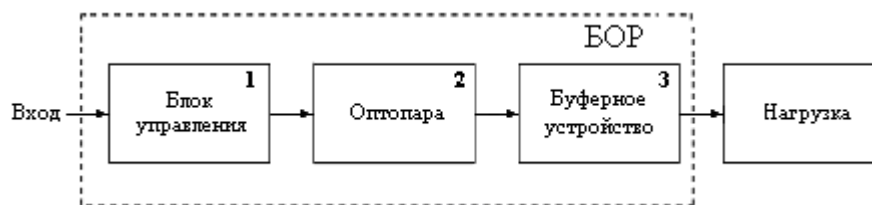


Рисунок 2.1 – Структурная схема БОР

Блок управления фотоизлучателем (блок 1) вырабатывает цифровой электрический сигнал, обеспечивающий импульсное излучение светового потока. Данный поток воспринимается фотоприемником оптопары (блок 2). На выходе фотоприемника возникает исполнительный электрический сигнал в виде тока или напряжения. Буферное устройство (блок 3) обеспечивает энергетическое согласование выходной цепи фотоприемника с нагрузкой. В качестве нагрузки используются исполнительные устройства: двигатели, электромагнитные реле, пускатели, распределители гидравлической или пневматической энергии и т.п.

2.1. Схемотехника буферных устройств

При выборе схемы буферного устройства БОР необходимо учитывать электрические параметры нагрузки (номинальное напряжение, ток, мощность или сопротивление нагрузки). В случае мощной нагрузки (например, обмотка управления электромагнитного пускателя, электрогидроклапана и т.п.) буферное устройство представляет собой усилитель мощности с низким выходным сопротивлением; при работе БОР на входное сопротивление ТТЛ-микросхем буферное устройство - усилитель тока или напряжения с ТТЛ-выходом; в случае использования КМОП-микросхем-буферное устройство содержит преобразователь уровня или согласующий усилитель мощности.

Пример электрической схемы буферного устройства на основе диодной оптопары в генераторном режиме представлен на рисунке 2.2.

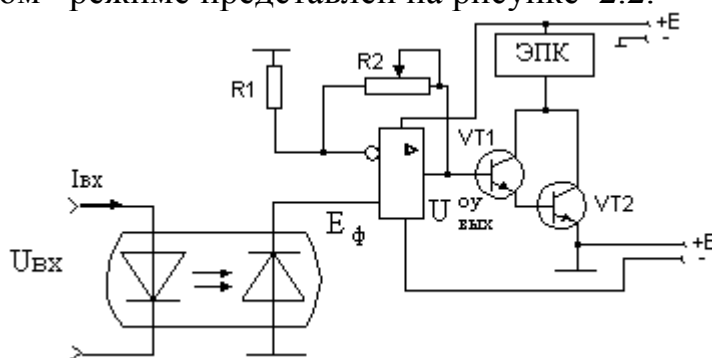


Рисунок 2.2 – Принципиальная схема буферного устройства БОР на основе диодной оптопары в генераторном режиме

Нагрузкой БОР является обмотка управления электропневмоклапана (ЭПК). Усилитель мощности реализован на базе неинвертирующего операционного усилителя (ОУ), имеющего высокое входное сопротивление $R_{вх} = (10^9 \dots 10^{12} \text{ Ом})$. Обмотка управления ЭПК включена в коллекторную цепь составного транзистора VT1, VT2 (схема Дарлингтона). Выводы фотодиода оптопары подключены к неинвертирующему входу ОУ относительно заземленного общего провода. Коэффициент усиления $K_{оу}$ изменяется с помощью переменного резистора R2. При наличии светового потока излучателя ($I_{вх} \neq 0$) на выходе ОУ образуется напряжение $U_{вых} = E_{\phi}(1 + R2/R1)$, приложенное между базой и эмиттером составного транзистора на элементах VT1 и VT2. Этим напряжением транзисторы VT1 и VT2 открываются, входя в режим насыщения. Потенциал объединенного коллектора становится близким потенциалу земли (в режиме насыщения напряжение между коллектором и эмиттером транзистора соответствует остаточному напряжению $U_{ост}$, – логический ноль). При прохождении по обмотке управления коллекторного тока I_k составного транзистора VT1, VT2 на ней образуется напряжение питания E. В результате электромагнит ЭПК «включается», обеспечивая направленную подачу сжатого воздуха в пневмомагистраль. При отсутствии светового потока излучателя (ток управления $I_{вх} = 0$) транзисторы VT1, VT2 закрываются, обмотка управления обесточивается, а электромагнит ЭПК переходит в исходное «выключенное» (например, за счет действия силы упругости возвратной пружины), что изменяет направление сжатого воздуха в пневмомагистралах.

Пример электрической схемы буферного устройства на основе диодной оптопары в параметрическом режиме показан на рисунке 2.3.

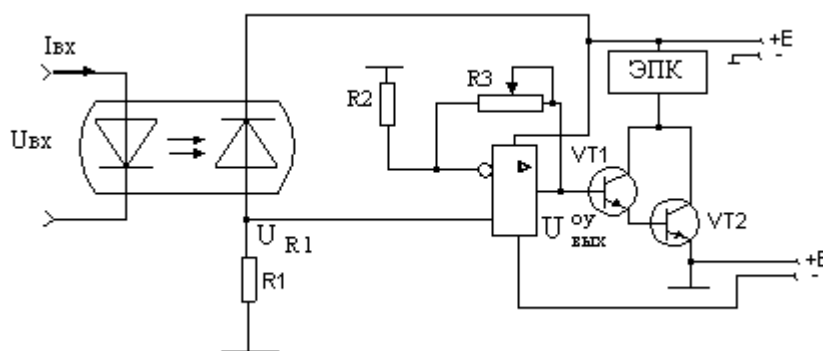


Рисунок 2.3 – Принципиальная схема буферного устройства БОР на основе диодной оптопары в параметрическом режиме

В этом режиме при наличии светового потока излучателя внутреннее сопротивление фотодиода уменьшается, поскольку обратный световой фототок превышает обратный темновой ток. Таким образом, при наличии тока управления в цепи излучателя обратный световой фототок фотодиода I_{ϕ}^{cb} создает на резисторе R1 падение напряжения $U_{R1} = I_{\phi}^{cb} \cdot R1$. Это напряжение усиливается неинвертирующим ОУ до уровня насыщения составного транзистора VT1, VT2. В результате к обмотке управления подключается напряжение питания +E - электромагнит ЭПК «включен». При отсутствии тока управления в цепи излучателя обратный темновой ток фотодиода I_{ϕ}^T практически равен нулю, транзисторы VT1, VT2 выходят из насыщения, а

напряжение питания $+E$ отключается от обмотки управления - электромагнит ЭПК «выключен».

На рисунке 2.4 представлена электрическая схема буферного устройства на биполярных транзисторах в ключевом режиме.

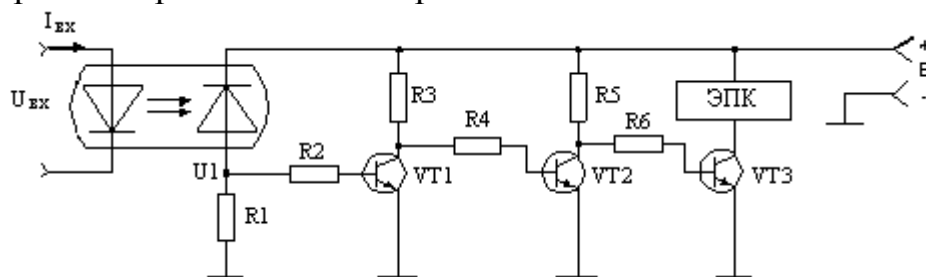


Рисунок 2.4 – Принципиальная схема буферного устройства БОР на биполярных транзисторах

При наличии тока управления световой поток излучателя генерирует обратный световой фототок $I_{обp}^{cb}$ фотодиода, который усиливается транзистором VT1. Под действием падения напряжения $U_{R1} = I_{обp}^{cb} \cdot R1$, приложенного через резистор R2 между базой и эмиттером, транзистора VT1, последний насыщается, (потенциал коллектора близок к потенциалу земли). Транзистор VT2 закрывается (на коллекторе формируется потенциал $+E$), а транзистор VT3 открывается, пропуская ток через обмотку управления ЭПК. При отсутствии тока управления обратный темновой фототок фотодиода $I_{обp}^T$ практически отсутствует (составляет доли наноампер), транзистор VT1 закрыт (потенциал коллектора равен $+E$), транзистор VT2 насыщается, а транзистор VT3 выходит из насыщения – электромагнит ЭПК «выключается».

На рисунке 2.5, а, б представлены электрические схемы буферного устройства БОР на основе транзисторной оптопары.

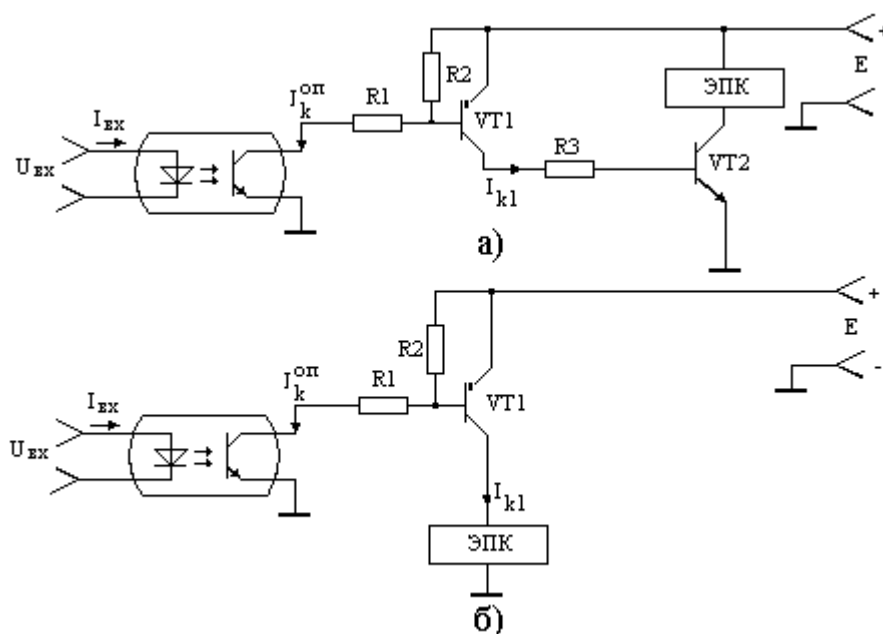


Рисунок 2.5 – Электрические схемы буферного устройства БОР на основе транзисторной оптопары

Фототранзистор оптопары и входной транзистор VT1 усилителя мощности образуют «комплементарную пару» транзисторов (комплект pnp/pnp). Выходной транзистор VT2 коммутирует обмотку управления ЭПК (Рисунок 2.5, а). При работе БОР на заземленную нагрузку транзисторный ключ VT2 из схемы исключается, а нагрузка включается в цепь заземленного коллектора транзисторного ключа VT1 (Рисунок 2.5, б). При недостаточном значении коэффициента усиления тока базы β в качестве выходного ключа VT1 можно использовать составной транзистор (схема Дарлингтона) [7].

2.2. Схемотехника блока управления

На рисунках 2.6, 2.7, а, б представлены схемы блока управления излучателем оптопары. В схеме управления на основе транзисторного ключа ограничивающий резистор R1 предотвращает токовый пробой светодиода, обеспечивая номинальный ток питания излучателя $I_{вх}$; резистор R2 увеличивает входное сопротивление транзисторного ключа (Рисунок 2.6). В схеме управления на основе RS-триггера включение светодиода осуществляется сигналом «логического нуля» с инверсного выхода $\bar{Q}$ триггера DD1 (Рисунок 2.7, а). При необходимости двухканального управления излучатели подключаются к прямому Q и инверсному $\bar{Q}$ выходам RS-триггера через резисторы R1 и R2 соответственно (Рисунок 2.7, б).

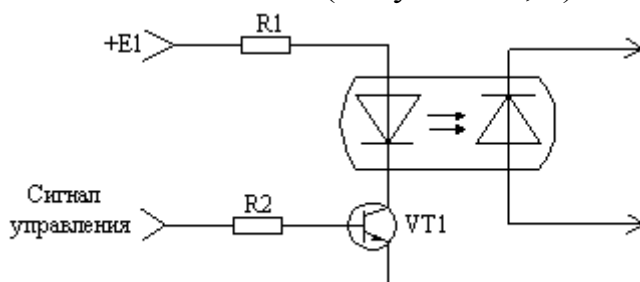


Рисунок 2.6 – Электрическая схема блока управления излучателем диодной оптопары базе транзисторного ключа

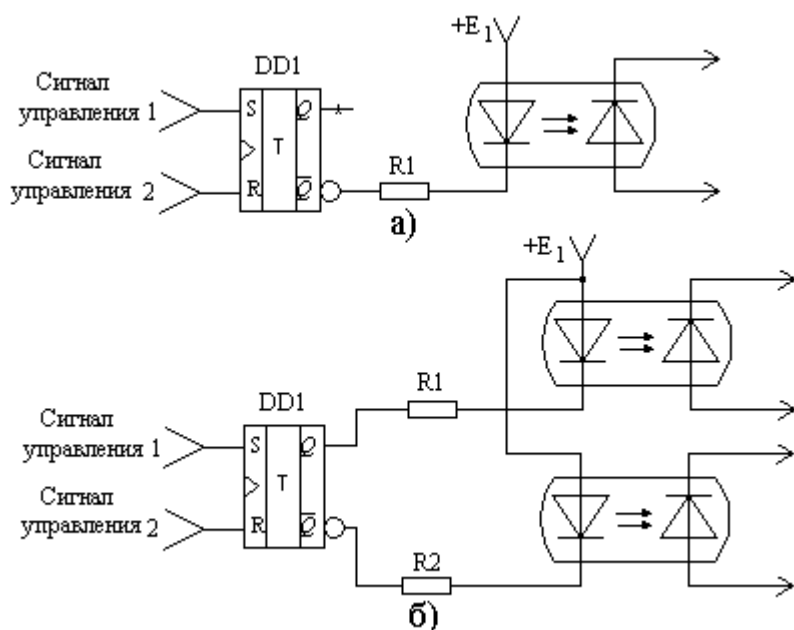


Рисунок 2.7 – Электрические схемы блока управления излучателем на основе RS-триггера

2.3. Блоки оптронной развязки для сопряжения цифровых устройств

При проектировании КИСУ возникает необходимость сопряжения внешних устройств с микропроцессорной системой управления (микроконтроллер, персональный компьютер и т.п.). Для сопряжения цифровых устройств с различными уровнями логических сигналов в структуру БОР (Рисунок 2.1) вводятся преобразователи уровня и усилители тока, построенные на базе ТТЛ - и КМОП-микросхем [2]. В случае значительного удаления внешнего устройства от микропроцессорной системы в блоке управления фотоизлучателем оптопары применяется генератор тока типа «токовая петля» [4].

2.3.1 Блок оптронной развязки с ТТЛ-входом и ТТЛ-выходом

На рисунке 2.8 представлены электрические схемы БОР с ТТЛ-входом и ТТЛ-выходом [2, 9].

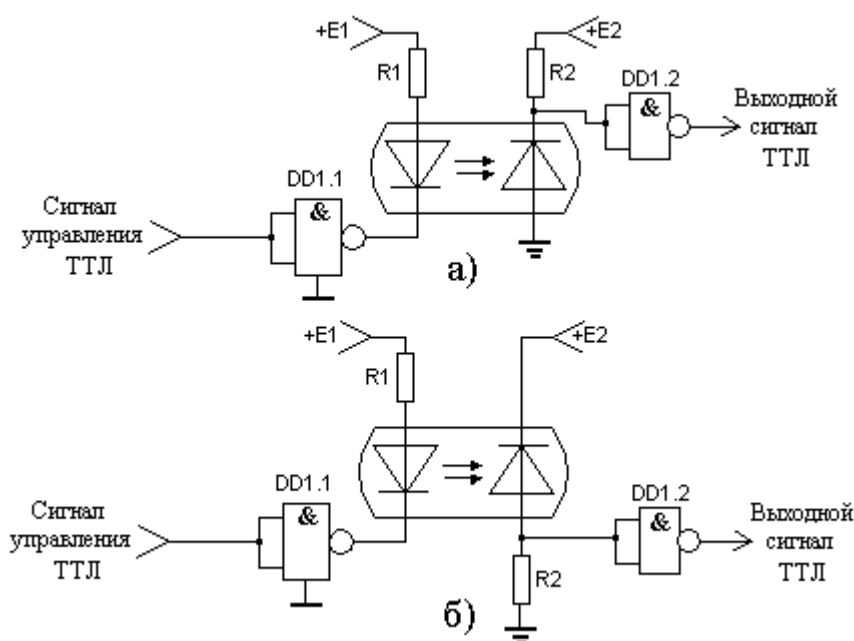


Рисунок 2.8 – Электрические схемы БОР с ТТЛ-входом и выходом:

Блок управления излучателем оптопары реализован на логическом элементе DD1.1 (структура ТТЛ), выполняющем функцию инвертора. При наличии сигнала «логической единицы» на входе элемента DD1.1 катод фотоизлучателя имеет потенциал земли. Поскольку по отношению к напряжению +E1 излучатель находится в прямом включении, через pn-переход протекает ток управления $I_{\text{вх}}$, величина которого определяется ограничивающим резистором R1 и напряжением питания +E1. Если на входе элемента DD1.1 присутствует сигнал «логического нуля», на его выходе образуется сигнал «логической единицы» (уровень напряжения, близкий к напряжению питания +E1). В этом случае разность потенциалов между анодом и катодом излучателя равна нулю, что обуславливает прекращение тока управления ($I_{\text{вх}}=0$). В качестве буферного устройства БОР используется логический элемент DD1.2 (структура ТТЛ), формирующий выходной сигнал необходимой мощности. Резистор R2 ограничивает обратное напряжение на фотодиоде при отсутствии тока управления (Рисунок 2.8, а), либо является нагрузкой фотоприемника, работающего

в параметрическом режиме (Рисунок 2.8, б).

На рисунке 2.9 представлена схема БОР для сопряжения информационных сигналов ТТЛ и КМОП [2, 9].

Транзистор VT1 обеспечивает усиление мощности сигнала на выходе логического элемента DD1.1 (структура КМОП). Характер выходного сигнала БОР определяется внутренней структурой буферного элемента DD1.2 (структура КМОП или ТТЛ).

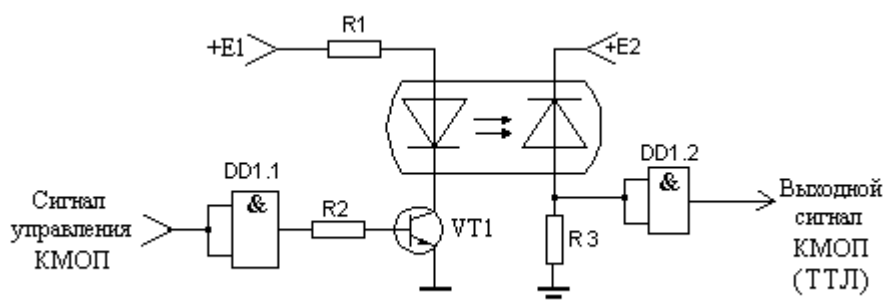


Рисунок 2.9 – Электрическая схема БОР для сопряжения информационных сигналов ТТЛ и КМОП

2.3.2 Блок оптронной развязки с токовым управлением

На рисунке 2.10 представлена электрическая схема БОР типа «токовая петля». Данная схема обеспечивает согласование уровней сигналов последовательного интерфейса RS-232C ($\pm 12\text{В}$) с уровнями ТТЛ - сигналов ($+5\text{В}$) внешних устройств [4].

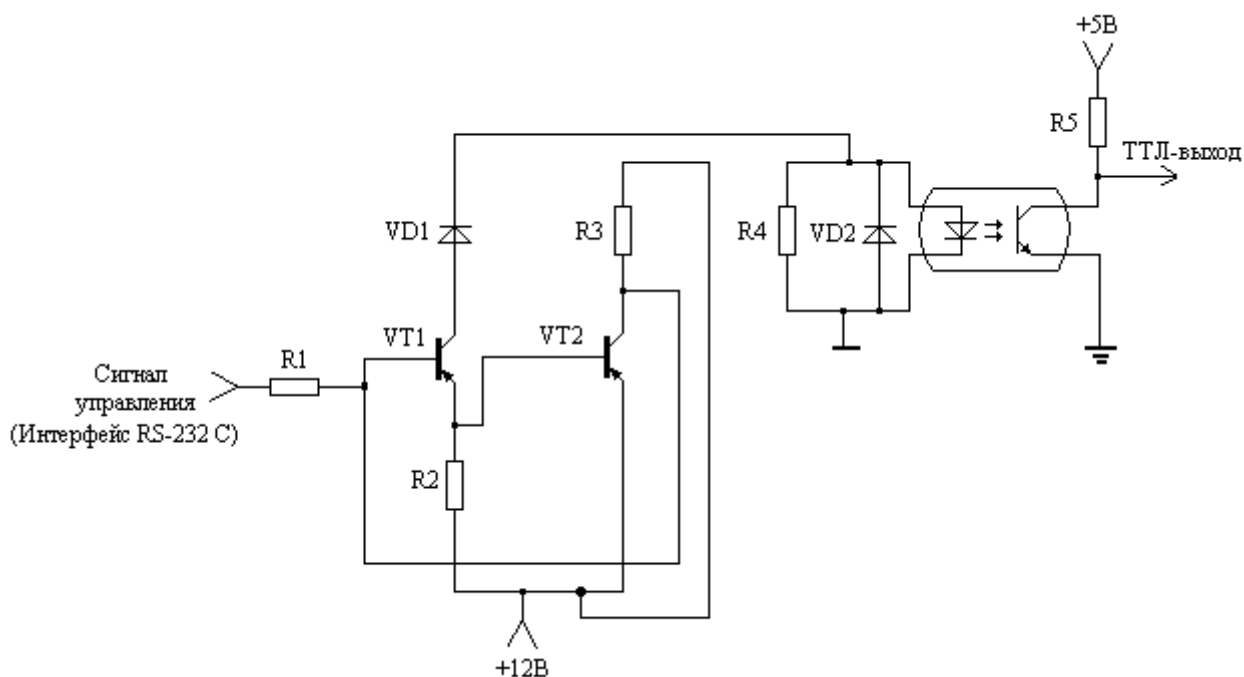


Рисунок 2.10 – Электрическая схема БОР типа «токовая петля»

Излучатель оптопары управляется от генератора тока (ГТ) на транзисторах VT1, VT2. Величина выходного тока ГТ определяется напряжением между базой и эмиттером транзистора VT2 (потенциалом ϕ_d открытого рп-перехода) и резистором R2. Диоды VD1, VD2 пропускают в цепь управления излучателем оптопары только положительные импульсы тока; резистор R4 имитирует нагрузку ГТ при отключен-

ном оптроне, резистор R3 формирует смещение на базе транзистора VT1, а резистор R1 ограничивает его базовый ток. При поступлении на базу транзистора VT1 отрицательного потенциала -12В («логическая единица» для интерфейса RS-232C) в цепи коллектора транзистора VT1 формируется ток управления излучателем. В результате фотоэффекта в коллекторной цепи фототранзистора возникает ток, а на резисторе R5 формируется ТТЛ-сигнал («логический нуль»). При наличии на базе транзистора VT1 уровня напряжения $+12\text{В}$ («логический нуль для интерфейса RS-232C») ток в цепи излучателя прекращается, а на коллекторе фототранзистора формируется ТТЛ-сигнал («логическая единица»). При необходимости ТТЛ-сигнал на выходе оптопары может быть проинвертирован.

2.4. Блоки оптронной развязки для сопряжения исполнительных устройств постоянного и переменного тока

В качестве исполнительных устройств систем автоматизации применяются распределители гидравлической и пневматической энергии, коммутаторы электрической энергии, двигатели и т.п. Питание указанных устройств осуществляется как постоянным, так и переменным током. Для управления двигателем постоянного тока (ДПТ) можно использовать БОР с буферным устройством на комплементарных транзисторах (Рисунок 2.11). Для управления асинхронным двигателем (АД) на выходе буферного устройства включается электромагнитное реле постоянного тока, контакты K1 которого подключают АД к сети переменного тока (Рисунок 2.12). Для управления мощными исполнительными устройствами, работающими на переменном токе, в схеме БОР применяют управляемые вентили: динисторы, тиристоры, семисторы (Рисунок 2.13, а, б) [2, 9].

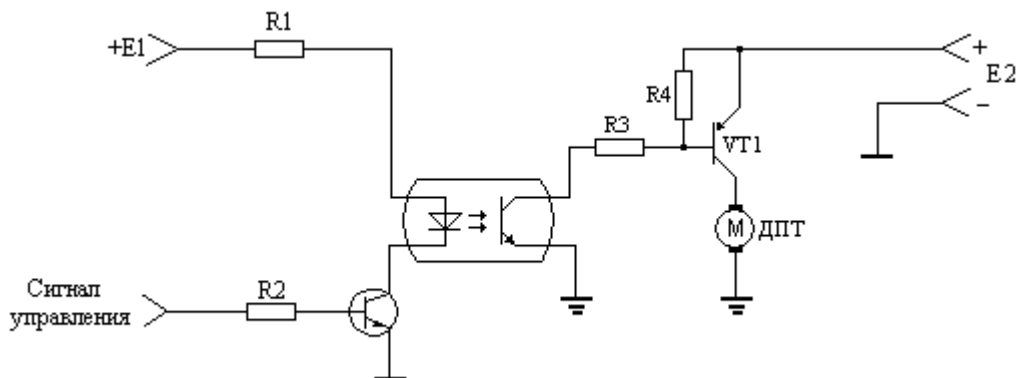


Рисунок 2.11 - Электрическая схема БОР для управления ДПТ

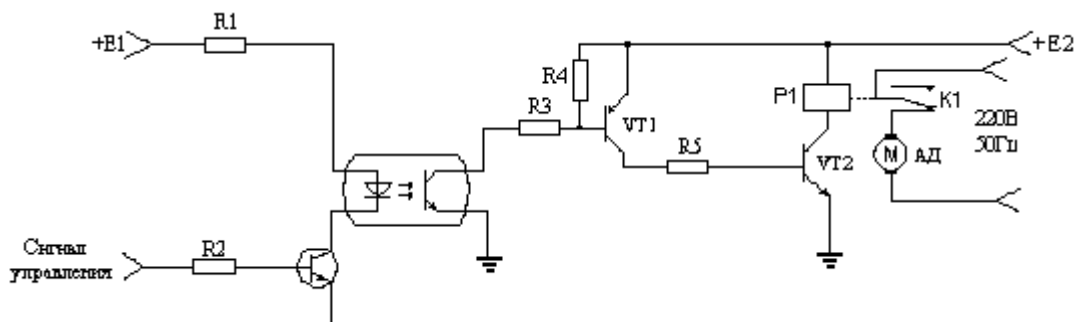


Рисунок 2.12 - Электрическая схема БОР на базе электромагнитного реле

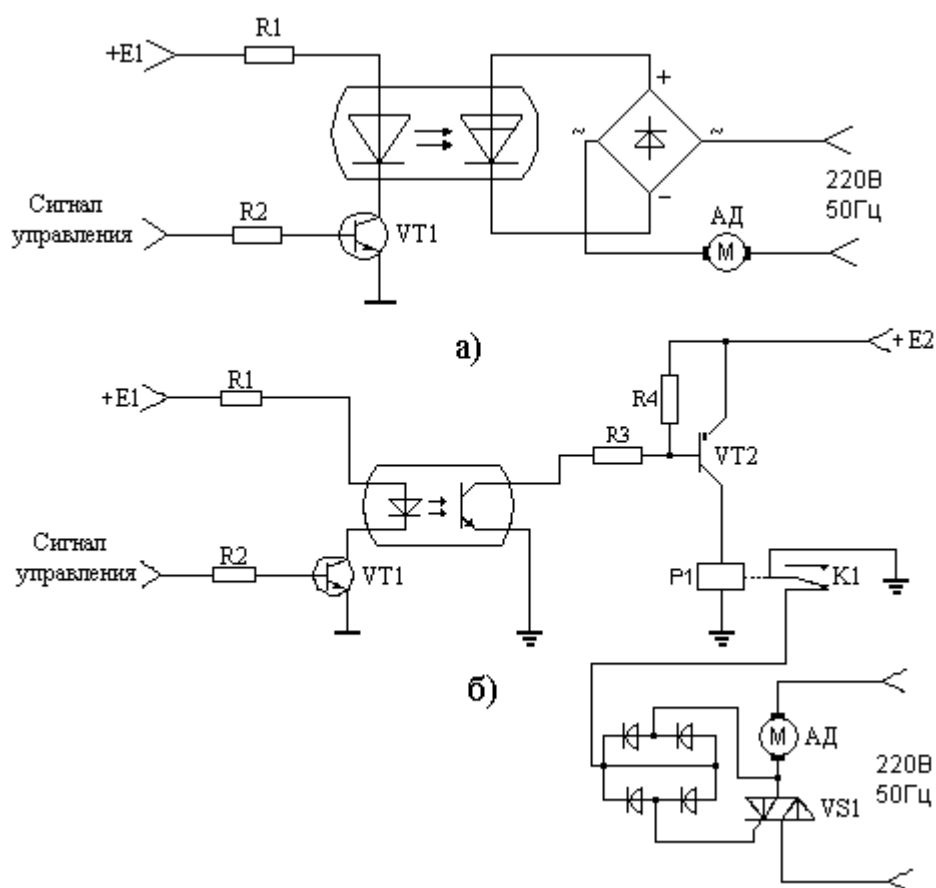


Рисунок 2.13 – Электрическая схема БОР на основе управляемых вентилях

Управляемый световым потоком фотодиодистор замыкает диагональ постоянного тока диодного моста, что обеспечивает подключение асинхронного двигателя к однофазной сети переменного тока 220В 50 Гц (Рисунок 2.13, а). Аналогичным образом коммутация асинхронного двигателя осуществляется с помощью семистора (Рисунок 2.13, б). Управление семистором реализуется посредством БОР на основе транзисторного оптрона и электромагнитного реле P1. По сигналу управления, соответствующему уровню «логической единицы», контакты K1 реле P1 подключают короткозамкнутую диагональ постоянного тока диодного моста к общему проводу фототранзистора, что обеспечивает «включение» семистора VS1 и коммутацию асинхронного двигателя в сеть переменного тока 220В 50 Гц. По сигналу «логического нуля» семистор VS1 выключает асинхронный двигатель.

В приложении «А» представлены варианты сопряжения исполнительных устройств с системой управления [9].

3. РАСЧЕТ БЛОКА ОПТРОННОЙ РАЗВЯЗКИ

Расчет электрической схемы БОР проводится в направлении «с выхода на вход» – от нагрузки БОР к системе управления фотоизлучателем (Рисунок 2.1).

Исходными данными для расчета буферного устройства БОР являются электрические параметры нагрузки: номинальное напряжение, ток, мощность или сопротивление. Исходными данными для расчета блока управления фотоизлучателем оптопары являются параметры управляющего сигнала.

3.1. Расчет буферного устройства на основе диодной оптопары в генераторном режиме

Исходные данные: номинальная мощность нагрузки: $P_n = 12 \text{ Вт}$;
номинальное напряжение на нагрузке: $U_n = 24 \text{ В}$.

Необходимо рассчитать элементы электрической схемы буферного устройства БОР (Рисунок 2.2).

Расчет проводится в следующей последовательности.

1. Определяется номинальный ток I_n обмотки управления ЭПК

$$I_n = P_n / U_n = 12 / 24 = 0.5 \text{ А}.$$

2. Принимается напряжение $E = U_n = 24 \text{ В}$.

3. Выбирается тип ОУ. В качестве ОУ применяем микросхемы например, типа К 140 УД14 А,Б,В).

Принимается выходной ток ОУ К 140 УД 14 $I_{\text{вых}}^{\text{оу}} = 3 \text{ мА}$ [1, 5].

4. Определяется необходимый коэффициент усиления тока β_0 составного транзистора на элементах VT1 и VT2.

$$\beta_0 = \frac{I_n}{I_{\text{вых}}^{\text{оу}}} = \frac{0.5}{3 \cdot 10^{-3}} = 166.6.$$

5. Выбираются выходные транзисторы VT1 и VT2, исходя из следующих соображений.

Максимально допустимые мощность, рассеиваемая на коллекторе составного транзистора $P_{k \text{ max}}$ должна быть больше мощности нагрузки – $P_{k \text{ max}} \geq (1.5 \dots 3.0) P_n$.

Максимально допустимое напряжение коллектор – эмиттер $U_{k \text{ э. max}}$ должно быть больше напряжения питания E – $U_{k \text{ э. max}} \geq (2 \dots 3) E$.

Маломощные транзисторы, используемые в первых каскадах, имеют малое допустимое значение коллекторного тока, но высокий коэффициент передачи тока базы ($\beta \geq 20 \div 100$). С другой стороны, мощные транзисторы, используемые в выходных каскадах, имеют коэффициент $\beta_{\text{min}} = 10 \dots 20$, а коллекторный ток может достигать нескольких ампер. Реальный коэффициент усиления составного транзистора $\beta_p \approx \beta_1 \cdot \beta_2$, где β_1 , β_2 - соответствующие коэффициенты усиления тока базы транзисторов схемы Дарлингтона. При выборе транзисторов VT1, VT2 необходимо чтобы расчетное значение коэффициента передачи тока базы β_p было не меньше заданного значения ($\beta_p \geq \beta_0$).

Таким образом, первый (входной) транзистор VT1 целесообразно выбирать меньшей мощности, а окончательный (выходной) VT2 - большой мощности.

Выбираются транзисторы VT1, VT2 [5]:

VT1- КТ315Г: $\beta_1 = 20 \dots 150$; $I_{k \max} = 100 \text{ мА}$; $U_{кэ. \max} = 30 \text{ В}$;

VT2- КТ819Г: $\beta_2 = 10 \dots 20$; $I_{k \max} = 7 \text{ мА}$; $U_{кэ. \max} = 40 \text{ В}$.

Для расчета принимаются минимальные значения параметров: $\beta_1 = 20$; $\beta_2 = 10$.

6. Определяется реальное значение коэффициента усиления по току β_p и проводится сравнение с расчетным значением.

$$\beta_p = \beta_1 \cdot \beta_2 = 20 \cdot 10 = 200; \beta_0 = 166,6.$$

Поскольку параметр β_p больше параметра β_0 транзисторы VT1 и VT2 выбраны правильно.

Примечание - Параметры β_1 и β_2 могут выбираться не только по минимальным значениям. Данный параметр можно выбрать по справочнику в заданном для транзистора диапазоне.

7. Для обеспечения насыщения составного транзистора (VT1, VT2) напряжение на выходе ОУ $U_{\text{ВЫХ}}^{\text{ОУ}}$ принимается в диапазоне $U_{\text{ВЫХ}}^{\text{ОУ}} = (1.5 \dots 3.0) \text{ В}$.

8. Выбирается тип оптопары и принимается уровень фото-ЭДС $E_{\phi} = 0,75 \text{ В}$ [2]. Определяется необходимый коэффициент усиления $K_{\text{ОУ}}$ операционного усилителя [3].

$$K_{\text{ОУ}} = 1 + \frac{R_2}{R_1} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}^{\text{ОУ}}}{E_{\phi}} = 3,0 / 0,75 = 4,0.$$

9. Определяется отношение резисторов R_1, R_2

$$\frac{R_2}{R_1} = K_{\text{ОУ}} - 1 = 4 - 1 = 3.$$

10. Определяется величина резистора R_2 в цепи отрицательной обратной связи ОУ. Для расчета принимается $R_1 = 10 \text{ кОм}$ [3].

$$R_2 = 3 \cdot R_1 = 3 \cdot 10 = 30 \text{ кОм}$$

11. Определяется ток обратной связи $I_{\text{ОС}}$ через резисторы R_1 и R_2

$$I_{\text{ОС}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}^{\text{ОУ}}}{R_1 + R_2} = \frac{3 \cdot 10^{-3}}{10 + 30} = 75 \cdot 10^{-6} \text{ А}.$$

12. Определяется мощность резисторов R_1 и R_2

$$P_1 = I_{\text{ОС}}^2 \cdot R_1 = 5,6 \cdot 10^{-5} \text{ Вт};$$

$$P_2 = I_{\text{ОС}}^2 \cdot R_2 = 1,69 \cdot 10^{-4} \text{ Вт}.$$

13. Выбираются резисторы по ГОСТ [6]

$$R_1 - \text{ОМЛТ} - 0,125 - 10 \text{ к} \pm 5\%;$$

$$R_2 - \text{ОМЛТ} - 0,125 - 30 \text{ к} \pm 5\%.$$

3.2. Расчет буферного устройства на основе диодной оптопары в параметрическом режиме

Исходные данные: номинальная мощность нагрузки: $P_{\text{н}} = 12 \text{ Вт}$;

номинальное напряжение на нагрузке $U_{\text{н}} = 24 \text{ В}$.

Необходимо рассчитать элементы электрической схемы буферного устройства БОР на основе диодной оптопары в параметрическом режиме (Рисунок 2.3).

Предварительный расчет буферного устройства проводится по пунктам 1-7 методики, изложенной в разделе 3.1.

Дальнейший расчет проводится в следующей последовательности.

1. Выбор оптопары.

Технические характеристики диодной оптопары типа АОД 101Б представлены в таблице 3.1 [2]

Таблица 3.1 – Технические характеристики оптопары АОД 101Б

Напряжение на входе фотоизлучателя	Входной ток фотоизлучателя	Коэффициент передачи по току	Допустимое обратное напряжение на фотодиоде	Обратный темновой ток фотодиода
$U_{вх}, В$	$I_{вх}, мА$	$K_I, \%$	$U_{обр доп}, В$	$I_{обр т}, мА$
1,8	10	1,5	100	8,0

2. Определяется обратный ток оптопары $I_{обр}^{оп}$

$$I_{обр}^{оп} = K_I \cdot I_{вх} / 100 = 0,015 \cdot 10 = 0,15 мА.$$

3. Принимается напряжение U^1 на выходе оптопары, соответствующее уровню логической единицы, $U^1 = U_{R1} = 1В$ и определяется величина резистора $R1$

$$R1 = U_{R1} / I_{обр}^{оп} = \frac{3}{0,15} \cdot 10^3 = 20 кОм.$$

4. Определяется необходимый коэффициент усиления K_{oy} операционного усилителя.

Напряжение на выходе ОУ $U_{вых}^{oy}$ выбирается в диапазоне $U_{вых}^{oy} = (1.5...3.0)В$.

$$K_{oy} = 1 + \frac{R3}{R2} = \frac{U_{вых}^{oy}}{U_{R1}} = \frac{3}{1} = 3$$

5. Определяется отношение резисторов $R3, R2$

$$\frac{R3}{R2} = K_{oy} - 1 = 3 - 1 = 2.$$

6. Определяется величина резистора $R3$ в цепи отрицательной обратной связи ОУ. Принимается $R2 = 10 кОм$ [3]

$$R3 = 3 \cdot R2 = 3 \cdot 10 = 30 кОм.$$

7. Определяется ток обратной связи I_{oc} через резисторы $R2$ и $R3$

$$I_{oc} = \frac{U_{вых}^{oy}}{R1 + R2} = \frac{3 \cdot 10^{-3}}{10 + 30} = 75 \cdot 10^{-6} А$$

8. Определяется мощность резисторов $R1, R2, R3$

$$P1 = (I_{обр}^{оп})^2 \cdot R1 = (0,15)^2 \cdot 10^{-6} \cdot 20 \cdot 10^3 = 0,45 мВт;$$

$$P2 = I_{oc}^2 \cdot R2 = (75)^2 \cdot 10^{-12} \cdot 10^4 = 56,25 мкВт;$$

$$P3 = I_{oc}^2 \cdot R3 = (75)^2 \cdot 10^{-12} \cdot 3 \cdot 10^3 = 168,75 мкВт;$$

9. Выбор резисторов по ГОСТ [6]

$R1$ – ОМЛТ – 0,125 – 20 к ± 5%; $R2$ – ОМЛТ – 0,125 – 10 к ± 5%;

$R3$ – ОМЛТ – 0,125 – 30 к ± 5%.

3.3. Расчет буферного устройства на биполярных транзисторах

Исходные данные: номинальная мощность нагрузки $P_n=12\text{Вт}$;

номинальное напряжение на нагрузке $U_n = 24 \text{ В}$.

Необходимо рассчитать элементы электрической схемы усилителя мощности на биполярных транзисторах (Рисунок 2.4).

Расчет ведется в следующей последовательности.

1. Определяется номинальный ток I_n управления ЭПК

$$I_n = P_n / U_n = 12 / 24 = 0,5 \text{ А}.$$

2. Выбирается тип диодной оптопары (Таблица 3.1). Определяется обратный ток $I_{обр}^{оп}$ фотодиода

$$I_{обр}^{оп} = \frac{K_1 \cdot I_{вх}}{100} = \frac{1,5 \cdot 10}{100} = 0,15 \text{ мА}.$$

3. Определяется требуемый коэффициент усиления тока β_0

$$\beta_0 = \frac{I_n}{I_{обр}^{оп}} = \frac{0,5}{0,15} \cdot 10^3 = 3333.$$

4. Определяется минимальное число транзисторов в усилителе мощности, обеспечивающее заданное значение параметра β_0 . В каскадах усилителя мощности коэффициент усиления тока β_i распределяется равномерно

$$\beta_i = \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_0^3, \beta_i = \sqrt[3]{\beta_0} = \sqrt[3]{3333} = 14,94.$$

Следовательно, транзисторы VT1, VT2, VT3 усилителя мощности должны иметь минимальный коэффициент усиления тока $\beta_{\min} \geq 14,94$.

$$\text{При } \beta_i = \beta_{\min} = 15 \beta_0 = 15^3 = 3375.$$

Таким образом, в буферном устройстве (Рисунок 2.4) выбираются три транзистора [5]

$$\text{VT1} - \text{КТ 315Г: } \beta_1=20; U_{\text{ост.1}} = (0,1...0,5)\text{В};$$

$$\text{VT2} - \text{КТ 315Г: } \beta_2=20; U_{\text{ост.2}} = (0,1...0,3)\text{В};$$

$$\text{VT3} - \text{КТ 819Г: } \beta_3= 10; U_{\text{ост.3}} = (0,1...0,3)\text{В}.$$

Определяется реальный коэффициент усиления тока β_p

$$\beta_p = \beta_1 \cdot \beta_2 \cdot \beta_3 = 20 \cdot 20 \cdot 10 = 4000$$

$$\beta_0 = 3333; \beta_p > \beta_0$$

Таким образом, транзисторы VT1, VT2, VT3 выбраны правильно.

Насыщение транзистора VT3 обеспечивается при закрытом транзисторе VT2, а насыщение транзистора VT2 - при закрытом транзисторе VT1. Величины резисторов R1...R5 определяются из законов Ома и Кирхгоффа с учетом остаточного напряжения $U_{\text{ост}}$ транзисторов в режиме насыщения и статического потенциала ϕ_d участка эмиттер-база (для германиевых транзисторов $\phi_d = 0,3...0,4\text{В}$; для кремниевых транзисторов $\phi_d = 0,6...0,8\text{В}$). Для выбранных транзисторов (см. п. 4) принимается $\phi_d = 0,7\text{В}$; $U_{\text{ост}} = 0,1\text{В}$.

5. Определяется ток базы $I_{б,нас.3}$ транзистора VT3 в режиме насыщения

$$I_{\text{б.нас.3}} = I_{\text{н}}/\beta_3 = 0,5/10 = 50\text{мА}.$$

6. Определяется величина резистора R5 в коллекторной цепи транзистора VT2.

Задается величина тока коллектора $I_{\text{к.нас.2}}$ транзистора VT2 в режиме насыщения: $I_{\text{к.нас.2}} > I_{\text{б.нас.3}}$. Принимается для расчета $I_{\text{к.нас.2}} = 60\text{мА}$.

Определяется величина резистора R5 и его мощность P5

$$R5 = (E - U_{\text{ост.2}})/I_{\text{к.нас.2}} = (24 - 0,1)/0,06 = 398 \text{ Ом}.$$

Выбор величины резистора R5 по ГОСТ: $R5 = 390 \text{ Ом}$.

Определяется мощность P5 резистора R5

$$P5 = (I_{\text{к.нас.2}})^2 \cdot R5 = (0,06)^2 \cdot 390 = 1,4 \text{ Вт}.$$

7. Определяется величина резистора R6 в базовой цепи транзистора VT3

Ток $I_{\text{б.нас.3}}$ формируется источником питания +E и резисторами R5, R6 при закрытом транзисторе VT2.

$$(R5 + R6) = (E - \varphi_d)/I_{\text{б.нас.3}} = (24 - 0,7)/0,05 = 466 \text{ Ом}.$$

$$R6 = 466 - 390 = 76 \text{ Ом}.$$

Выбор величины резистора R6 по ГОСТ: $R6 = 75 \text{ Ом}$.

Проверочный расчет: $(R5 + R6) = 390 + 75 = 465 \text{ Ом}$.

Определяется ток базы насыщения $I_{\text{б.нас.3}}$

$$I_{\text{б.нас.3}} = (E - \varphi_d)/(R5 + R6) = 24 - 0,7/465 = 50,1 \text{ мА}.$$

Определяется мощность P6 резистора R6

$$P6 = (I_{\text{б.нас.3}})^2 \cdot R6 = (0,0501)^2 \cdot 75 = 0,188 \text{ Вт}.$$

8. Определяется ток базы $I_{\text{б.нас.2}}$ транзистора VT2 в режиме насыщения

$$I_{\text{б.нас.2}} = I_{\text{к.нас.2}}/\beta_2 = 60/20 = 3\text{мА}.$$

9. Определяется величина резистора R3 в коллекторной цепи транзистора VT1.

Задается величина тока коллектора $I_{\text{к.нас.1}}$ транзистора VT1 в режиме насыщения: $I_{\text{к.нас.1}} > I_{\text{б.нас.2}}$. Принимается для расчета $I_{\text{к.нас.1}} = 3,5\text{мА}$.

Определяется величина резистора R3 и его мощность P3

$$R3 = (E - U_{\text{ост.1}})/I_{\text{к.нас.1}} = (24 - 0,1)/(3,5) \cdot 10^{-3} = 6,8 \text{ кОм}.$$

Определяется мощность P3 резистора R3

$$P3 = (I_{\text{к.нас.1}})^2 \cdot R3 = (3,5 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 6,8 \cdot 10^3 = 83,3 \text{ мВт}.$$

10. Определяется величина резистора R4 в базовой цепи транзистора VT2.

Ток $I_{\text{б.нас.2}}$ формируется источником питания +E и резисторами R3, R4 при закрытом транзисторе VT1.

$$(R3 + R4) = (E - \varphi_d)/I_{\text{б.нас.2}} = (24 - 0,7)/(3 \cdot 10^{-3}) \approx 7,8 \text{ кОм}.$$

$$R4 = 7,8 - 6,8 = 1,0 \text{ кОм}.$$

Определяется ток базы насыщения $I_{\text{б.нас.2}}$

$$I_{\text{б.нас.2}} = (E - \varphi_d)/(R3 + R4) = 24 - 0,7/(7,8 \cdot 10^3) = 2,987 \text{ мА}.$$

Полученное значение тока $I_{\text{б.нас.2}} < 3\text{мА}$ (см. п. 8).

Для обеспечения запаса по току $I_{\text{б.нас.2}}$ принимается:

$$R3 = 6,2 \text{ кОм}; R4 = 1 \text{ кОм};$$

$$(R3 + R4) = 6,2 + 1,0 = 7,2 \text{ кОм}.$$

$$P4 = (I_{\text{б.нас.2}})^2 \cdot R4 = (0,0501)^2 \cdot 75 = 0,188 \text{ Вт}.$$

Уточняется ток базы насыщения $I_{\text{б.нас.2}}$

$$I_{\text{б.нас.2}} = (E - \varphi_d) / (R3 + R4) = 24 - 0,7 / (7,2 \cdot 10^3) \approx 3,24 \text{ мА}.$$

Полученное значение тока $I_{\text{б.нас.2}} > 3 \text{ мА}$. Следовательно, насыщение транзистора VT2 обеспечивается (см. п. 8).

Определяется мощность P4 резистора R4

$$P4 = (I_{\text{б.нас.2}})^2 \cdot R4 = (3,24 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 1000 \approx 10,5 \text{ мВт}.$$

11. Определяется ток базы $I_{\text{б.нас.1}}$ транзистора VT1 в режиме насыщения

$$I_{\text{б.нас.1}} = I_{k1} / \beta_1 = 3,5 / 20 = 0,175 \text{ мА}.$$

12. Определяется величина резистора R1 и его мощность P1.

Задается уровень напряжения $U_1 = I_{\text{обр}}^{\text{оп}} \cdot R1$, сформированного на резисторе R1 обратным током фотодиода $I_{\text{обр}}^{\text{оп}} = 0,15 \text{ мА}$. Для насыщения транзисторов необходимо обеспечить уровень напряжения $U_1 = 1,5 - 3,0 \text{ В}$. Принимается $U_1 = 1,5 \text{ В}$.

$$R1 = U_1 / I_{\text{обр}}^{\text{оп}} = \frac{1,5}{0,15} \cdot 10^3 = 10 \text{ кОм}$$

Определяется мощность P1 резистора R1

$$P1 = (I_{\text{обр}}^{\text{оп}})^2 \cdot R1 = (0,15 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 10^4 = 225 \cdot 10^{-3} \text{ мВт}.$$

13. Определяется величина резистора R2 и его мощность P2.

$$R2 = (U_1 - \varphi_d) / I_{\text{б.нас.1}} = (1,5 - 0,7) / (0,175 \cdot 10^{-3}) \approx 4,57 \text{ кОм}.$$

Выбирается $R2 = 4,7 \text{ кОм}$.

Определяется мощность P2 резистора R2

$$P2 = (I_{\text{б.нас.1}})^2 \cdot R2 = (0,175 \cdot 10^{-3})^2 \cdot (4,7 \cdot 10^3) = 144 \text{ мкВт}.$$

Выбирается по ГОСТ [6]:

$R1 - \text{ОМЛТ} - 0,125 - 10 \text{ к} \pm 5\%$; $R2 - \text{ОМЛТ} - 0,125 - 4,7 \text{ к} \pm 5\%$;

$R3 - \text{ОМЛТ} - 0,125 - 6,8 \text{ к} \pm 5\%$; $R4 - \text{ОМЛТ} - 0,125 - 1 \text{ к} \pm 5\%$.

$R5 - \text{ОМЛТ} - 2 - 390 \pm 5\%$; $R6 - \text{ОМЛТ} - 0,5 - 75 \pm 5\%$.

3.4. Расчет буферного устройства на основе транзисторной оптопары

В зависимости от мощности нагрузки, буферное устройство может быть двухкаскадным и однокаскадным (Рисунок 3.5, а, б).

3.4.1 Расчет двухкаскадного буферного устройства

Исходные данные: напряжение на нагрузке $U_H = 24 \text{ В}$;

ток нагрузки $I_H = 0,5 \text{ А}$.

Необходимо рассчитать элементы электрической схемы двухкаскадного буферного устройства БОР на основе транзисторной оптопары (Рисунок 3.5, а).

Последовательность расчета

1. Выбор типа оптопары.

Выбирается транзисторная оптопара АОТ 123 А, Б, В. Электрические параметры оптопары приведены в таблице 3.2 [2].

Таблица 3.2 - Технические характеристики оптопары АОТ 123

Входное напряжение фотоизлучателя	Входной номинальный ток фотоизлучателя	Максимальный выходной ток фотоизлучателя	Выходное напряжение фототранзистора	Остаточное напряжение фототранзистора
$U_{вх}, В$	$I_{вх}, мА$	$I_{вых\ max}, мА$	$U_{вых}, В$	$U_{ост}, В$
2,0	20	10-20	30-50	0,3

Для определения коэффициента передачи тока выбранной оптопары используется график зависимости коэффициента передачи от напряжения $U_{кз}$ между коллектором и эмиттером фототранзистора при фиксированном остаточном напряжении $U_{ост} = const$ (Рисунок 3.1) [2].

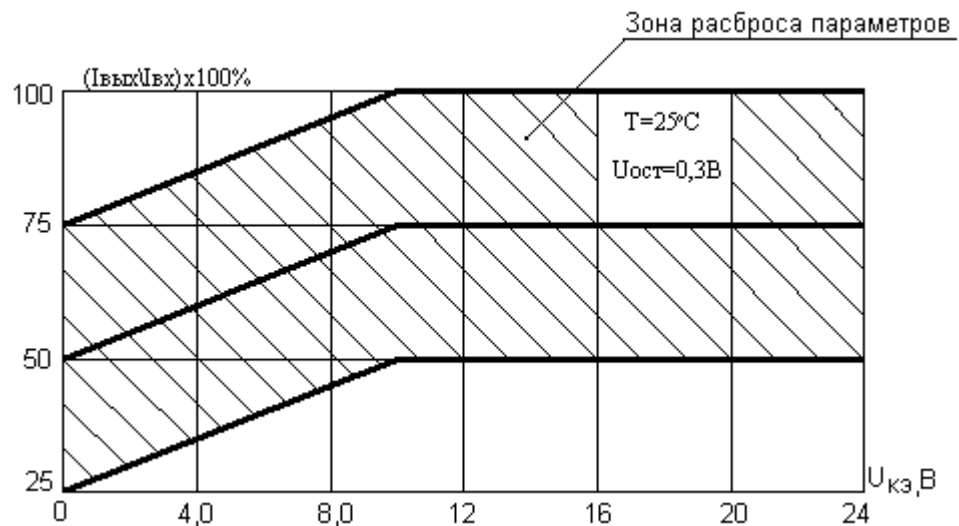


Рисунок 3.1 - Зависимость коэффициента передачи транзисторной оптопары от напряжения между коллектором и эмиттером фототранзистора

2. По данным таблицы 3.2 из графика (Рисунок 3.1) определяется выходной ток фототранзистора $I_{вых} = I_{к}^{оп}$ при токе управления $I_{вх} = 20 мА$ и при напряжении коллектор-эмиттер $U_{кз} = E = 24 В$.

$$I_{вых} = I_{к}^{оп} = 0,75 \cdot I_{вх} = 0,75 \cdot 20 \cdot 10^{-3} = 15 мА.$$

3. Определяется необходимый коэффициент усиления тока β_0

$$\beta_0 = \frac{I_n}{I_{к}^{оп}} = \frac{0,5}{15} \cdot 10^3 = 33,3.$$

4. Определяется минимальное значение коэффициента усиления тока транзисторов VT1, VT2.

Для двухкаскадного усилителя мощности (Рисунок 3.5, а) $\beta_0 = \beta_1 \cdot \beta_2$.

Полагается, что коэффициенты усиления транзисторов β_1 равны между собой

$$\beta_1 = \sqrt{\beta_0} = \sqrt{33,3} = 5,8 \approx 6.$$

Минимальное значение коэффициента усиления биполярных транзисторов $\beta = 10$ [5, 7].

Для расчета принимается: $\beta_i = \beta_1 = \beta_2 = 10$.

Определяется реальное значение коэффициента усиления тока β_p

$$\beta_p = \beta_i^2 = 10^2 = 100.$$

Выбираются транзисторы в усилителе мощности [5]:

VT1- КТ 814Г; $\beta_1 = 10$; $U_{кэ} = 30В$; $I_k = 0,5 А$; $U_{ост.1} = 0,3В$;

VT2- КТ 819Г; $\beta_2 = 10$; $U_{кэ} = 30В$; $I_k = 7,0 А$; $U_{ост.2} = 0,5В$.

Поскольку $\beta_p \gg \beta_0$, транзисторы VT1, VT2 выбраны правильно.

5. Определяется ток коллектора I_{k1} транзистора VT1

$$I_{k1} = \beta_1 \cdot I_k^{оп} = 10 \cdot 15 \cdot 10^{-3} = 150мА.$$

6. Определяется величина и мощность разделительного резистора R3 в цепи базы выходного транзистора VT2

Транзистор VT2 насыщается коллекторным током I_{k1} насыщенного транзистора VT1. В соответствии со вторым законом Кирхгофа:

$$(E - U_{ост.1}) = I_{k1} \cdot R3 + \varphi_d$$

$$R3 = (E - U_{ост.1} - \varphi_d) / I_{k1} = 24 - 0,3 - 0,7 / 0,15 = 153 \text{ Ом}.$$

Выбирается по ГОСТ [6]: $R3 = 150 \text{ Ом}$.

Определяется мощность P3 резистора R3

$$P3 = R3 \cdot (I_{k1})^2 = 150 \cdot 0,15^2 = 3,37Вт.$$

Следовательно, мощность резистора R3 должна быть не менее 4 Вт.

В качестве резистора R3 выбирается два резистора мощностью 2 Вт, соединенные параллельно [6]: $R3 - \text{ОМЛТ} - 2 - 300 \pm 5\%$.

7. Определяется ток I_{k2} в коллекторной цепи транзистора VT2 в режиме насыщения

$$I_{k2} = I_n = \beta_2 \cdot I_{k1} = 10 \cdot 0,15 = 1,5А$$

8. Определяется величина резистора R1 и его мощность P1.

В соответствии со вторым законом Кирхгофа: $E = \varphi_d + U_{ост}^{оп} + I_k^{оп} \cdot R1$.

$$R1 = E - \varphi_d - U_{ост}^{оп} / I_k^{оп} = 24 - 0,7 - 0,3 / (15 \cdot 10^{-3}) = 1,5кОм.$$

Определяется мощность P1 резистора R1

$$P1 = R1 \cdot (I_k^{оп})^2 = 1500 \cdot 15^2 \cdot 10^{-6} = 337,5мВт.$$

Выбирается по ГОСТ [6]: $R1 - \text{ОМЛТ} - 0,125 - 1,5к \pm 5\%$.

9. Определяется величина резистора R2 и его мощность P2.

При насыщении фототранзистора ток $I_k^{оп}$ протекает по резистивному делителю $R_d = R1 + R2$.

В соответствии со вторым законом Кирхгофа:

$$E = (R_1 + R_2) \cdot I_K^{\text{оп}} + U_{\text{ост}}^{\text{оп}},$$

где $U_{\text{ост}}^{\text{оп}} = 0,3\text{В}$ – остаточное напряжение фототранзистора (см. Таблица 2.2)

$$R_d = (E - U_{\text{ост}}^{\text{оп}}) / I_K^{\text{оп}} = (24 - 0,3) / (15 \cdot 10^{-3}) \approx 1,6 \text{ кОм}.$$

$$R_2 = R_d - R_1 = 1,6 - 1,5 = 0,1 \text{ кОм}.$$

Определяется мощность P_2 резистора R_2

$$P_2 = R_2 \cdot (I_K^{\text{оп}})^2 = 100 \cdot 15^2 \cdot 10^{-6} = 22,5 \text{ мВт}.$$

Выбирается по ГОСТ [6]: R_2 – ОМЛТ – 0,125 – 100 $\pm 5\%$.

В результате расчета в схеме буферного усилителя мощности (Рисунок 1.5, а) в соответствии с ГОСТ выбраны следующие элементы [5, 6]:

Транзисторы: VT1 – КТ 814Г; VT2 – КТ 819Г;

Резисторы: R_1 – ОМЛТ – 2 – 1,5 к $\pm 5\%$;

R_2 – ОМЛТ – 0,125 – 100 $\pm 15\%$;

R_3 – ОМЛТ – 2 – 300 $\pm 5\%$.

Примечание - Проведенный расчет показывает, что при использовании двухкаскадного усилителя мощности (Рисунок 2.5, а) реальное значение коэффициента усиления β_p значительно превышает необходимое значение β_0 , что позволяет в принципе коммутировать ток нагрузки в 3 раза превышающий заданное значение $I_n = 0,5\text{А}$.

3.4.2 Расчет однокаскадного буферного устройства

Исходные данные: напряжение на нагрузке $U_n = 24\text{ В}$;

ток нагрузки $I_n = 0,5\text{ А}$.

Необходимо рассчитать элементы электрической схемы двухкаскадного буферного устройства БОР на основе транзисторной оптопары (Рисунок 3.5, б).

Последовательность расчета

1. Выбор типа транзисторной оптопары и расчет ее выходного тока $I_{\text{вых}} = I_K^{\text{оп}}$ (см. п. 3.4.1; п.п. 1, 2).

В дальнейшем расчете принимается $I_{\text{вых}} = I_K^{\text{оп}} = 15\text{ мА}$.

2. Определяется необходимый коэффициент усиления тока β_1 транзистора VT1.

Принимается $I_n = I_{K1} = 0,5\text{ А}$; $\beta_1 = I_n / I_K^{\text{оп}} = 0,5 / (15 \cdot 10^{-3}) = 33,3$

Выбирается транзистор VT1 [5]:

VT1-КТ 819А; $\beta_1 = 40$; $U_{KЭ} = 100\text{ В}$; $I_K = 7,0\text{ А}$; $U_{\text{ост.1}} = 0,4\text{ В}$.

3. Определяется суммарное сопротивление R_d резистивного делителя R_1, R_2 в коллекторной цепи фототранзистора

$$R_d \approx R_1 + R_2 = (E - U_{\text{ост}}^{\text{оп}}) / I_K^{\text{оп}} = (24 - 0,3) / (15 \cdot 10^{-3}) \approx 1,6 \text{ кОм}.$$

4. Определяется величина резистора R_1 и его мощность P_1 .

$$R_1 = E - \varphi_d - U_{\text{ост}}^{\text{оп}} / I_K^{\text{оп}} = 24 - 0,7 - 0,4 / (15 \cdot 10^{-3}) \approx 1,5 \text{ кОм}.$$

Определяется мощность P_1 резистора R_1

$$P1 = R1 \cdot (I_{\kappa}^{\text{оп}})^2 = 1500 \cdot 15^2 \cdot 10^{-6} = 337,5 \text{ мВт}.$$

5. Определяется величина резистора R2 и его мощность P2.

$$R_2 = R_{\text{д}} - R1 = 1,6 - 1,5 = 0,1 \text{ кОм}.$$

Определяется мощность P2 резистора R2

$$P2 = R2 \cdot (I_{\kappa}^{\text{оп}})^2 = 100 \cdot 15^2 \cdot 10^{-6} = 22,5 \text{ мВт}.$$

Выбирается по ГОСТ [6]:

R1 – ОМЛТ – 0,125 – 1,5к ± 5%. R2 – ОМЛТ-0,125 – 100 ± 5%.

6. Определяется коммутируемый ток нагрузки $I_{\text{н}}$

$$I_{\text{н}} = \beta_1 \cdot I_{\kappa}^{\text{оп}} = 40 \cdot 15 \cdot 10^{-3} = 0,6 \text{ А}.$$

Таким образом, однокаскадный усилитель мощности (Рисунок 2.5, б) обеспечивает коммутацию заданного тока $I_{\text{н}} = 0,5 \text{ А}$.

В результате расчета в схеме буферного усилителя мощности выбраны следующие элементы [5, 6]:

Транзистор: VT1-КТ 819А.

Резисторы: R1 – ОМЛТ – 0,125 – 1,5к ± 5%. R2 – ОМЛТ – 0,125 – 100 ± 5%.

3.5. Расчет блока оптронной развязки для сопряжения цифровых устройств

Расчет блока оптронной развязки для сопряжения цифровых устройств, реализованных на интегральных микросхемах (ИМС) структуры ТТЛ или КМОП сводится к следующему (Рисунок 2.6...2.9):

- выбор типа транзисторов в усилителе тока фотоизлучателя;
- выбор структуры ИМС управляющего логического устройства;
- выбор структуры буферных цифровых устройств, обеспечивающих управление выходным ключевым каскадом, коммутирующим нагрузку;
- расчет ограничивающих резисторов R1, R2, R3 управляющего и буферного устройств.

Транзистор VT1 в схеме управления оптроном должен обладать коэффициентом β_1 передачи тока базы, достаточным для получения номинального тока $I_{\text{вх}}$ фотоизлучателя. Цифровые управляющие элементы выбираются по параметрам сигнала управления, а буферные элементы – по параметрам нагрузки.

В схеме управления (Рисунок 2.6) коэффициент β_1 транзистора VT1 и величины ограничивающих резисторов R1 и R2 определяются из соотношений

$$\beta_1 = \frac{I_{\text{вх}}}{I_{\text{б}}}; R1 = \frac{E1 - (\varphi_{\text{д}} + U_{\text{ост}})}{I_{\text{вх}}}; R2 = \beta_1 \cdot \frac{(U_{\text{вх}} - \varphi_{\text{д}})}{I_{\text{вх}}},$$

где $U_{\text{вх}}$ - уровень управляющего сигнала; $\varphi_{\text{д}}$ - потенциал открытого рп – перехода (фотоизлучателя и эмиттерного перехода транзистора); $I_{\text{б}}$, $U_{\text{ост}}$, - соответственно базовый ток и остаточное напряжение на коллекторе транзистора в режиме насыщения (у транзисторов малой и средней мощности напряжение $U_{\text{ост}} \approx 0,1 \dots 0,3 \text{ В}$; у мощных транзисторов $U_{\text{ост}} \approx 0,5 \dots 1,5 \text{ В}$).

В схемах управления излучателем на основе цифровых элементов резисторы,

ограничивающие ток $I_{\text{вх}}$, определяются по формулам (Рисунок 2.7...2.9)

$$R1 = \frac{E1 - (\varphi_d + U^0)}{I^0}; R1 = \frac{E1 - (\varphi_d + U^1)}{I^1}; R2 = \frac{(U^1 - \varphi_d)}{I^1},$$

где U^1, U^0, I^1, I^0 – соответственно уровни напряжений и токов, эквивалентных сигналам логической единицы и логического нуля на выходе цифрового элемента (эти параметры определяются по справочнику для конкретной микросхемы).

Ограничивающие резисторы $R2$ и $R3$ в цепи фотоприемника диодного оптрона, работающего в параметрическом режиме (Рисунок 2.8, 2.9), определяются с учетом допустимого обратного падения напряжения на фотодиоде $U_{\text{обр.д}}^\Phi$, его обратного светового $I_{\text{обр.св}}^\Phi$ и темного $I_{\text{обр.т}}^\Phi$ фототока

$$R2 = R3 = \frac{(E_2 - U_{\text{обр.д}}^\Phi)}{I_{\text{обр.св}}^\Phi}.$$

Для формирования цифрового сигнала на входе схемы управления фотоизлучателем, либо на выходе фотоприемника (например, фотодиода) необходимо обеспечить необходимые уровни логических сигналов U^1, U^0 соответствующих ИМС (Рисунок 2.8, 2.9).

При напряжении питания $E_2 = 5\text{В}$ уровни цифровых сигналов U^1, U^0 составляют [2, 7]:

для микросхем ТТЛ-структуры:

$$U^1 = (2.5...4.5)\text{В}, U^0 = (0.3...0.4)\text{В};$$

для микросхем КМОП-структуры:

$$U^1 = (4,1...4,8)\text{В}, U^0 = (U^1 - U_{\text{п.з}}) = (0,4...1,1)\text{В},$$

где $U_{\text{п.з}} \cong 3,7\text{В}$ – уровень помехозащищенности КМОП-структуры.

Выбрав по справочнику уровни цифровых сигналов U^1, U^0, I^1, I^0 для соответствующих ИМС, можно определить величины ограничивающих резисторов $R1, R2, R3$ из следующих уравнений

$$\left. \begin{aligned} E_1 &= I^0 \cdot R1 + \varphi_d; \\ U^1 &= E_2 - I_{\text{обр.св}}^\Phi \cdot R2; \\ U^0 &= E_2 - I_{\text{обр.т}}^\Phi \cdot R2 \end{aligned} \right\} \text{ (Рисунок 2.8, а);}$$

$$\left. \begin{aligned} E_1 &= I^0 \cdot R1 + \varphi_d; \\ E_2 &\leq U^1 + U_{\text{обр.д}}^\Phi \\ U^1 &= I_{\text{обр.св}}^\Phi \cdot R2; \\ U^0 &= I_{\text{обр.т}}^\Phi \cdot R2 \end{aligned} \right\} \text{ (Рисунок 2.8, б);}$$

$$\left. \begin{aligned} E_1 &= \beta_1 \cdot I^1 \cdot R1 + \varphi_d + U_{\text{ост}}; \\ U^1 &= I^1 \cdot R2 + \varphi_d = I_{\text{обр.св}}^\Phi \cdot R3; \\ U^0 &= I_{\text{обр.т}}^\Phi \cdot R3 \end{aligned} \right\} \text{ (Рисунок 2.9)}$$

3.6. Расчет блока оптронной развязки типа «токовая петля»

Расчет элементов схемы БОР типа «токовая петля» на основе транзисторной оптопары проводится в следующей последовательности (Рисунок 2.10)

1. Выбирается тип транзисторного оптрона. Генератор тока на транзисторах VT1, VT2 должен сформировать в цепи фотоизлучателя ток управления $I_{\text{вх}}$ необходимой величины. Дальнейший расчет проводится для транзисторного оптрона АОТ 123 $I_{\text{вх}} = 20\text{мА}$ (Таблица 3.2).

2. Расчет генератора тока. Выбираются транзисторы VT1, VT2 типа КТ 814А (структура ррр) [5]. Принимаются для расчета значения коэффициентов передачи тока базы транзисторов: $\beta_1 = \beta_2 = 10$.

3. Определяется ток эмиттера $I_{\text{э1}}$ транзистора VT1

$$I_{\text{э1}} = \frac{(\beta_1 + 1)}{\beta_1} I_{\text{вх}} = \frac{11}{10} \cdot 20 \cdot 10^{-3} = 22\text{мА}.$$

4. Определяется величина резистора R2 в эмиттерной цепи транзистора VT1

$$R2 = \frac{\varphi_{\text{д2}}}{I_{\text{э1}}} = \frac{(0,6 - 0,8)}{22 \cdot 10^{-3}} = \frac{0,65}{22} \cdot 10^3 \approx 30 \text{ Ом}.$$

5. Определяется мощность P2 резистора R2

$$P_2 = (I_{\text{э1}})^2 \cdot R2 = (22 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 30 = 14,52\text{мВт}.$$

Выбирается по ГОСТ [6]: R2 – ОМЛТ – 0,125 – 30 ± 5%.

6. Определяется базовый ток $I_{\text{б1}}$ транзистора VT1

$$I_{\text{б1}} = \frac{I_{\text{к1}}}{\beta_1} = \frac{20 \cdot 10^{-3}}{10} = 2\text{мА}.$$

7. Определяется ограничивающий резистор R1 в базовой цепи транзистора VT1 и его мощность P1

$$R1 = \left| \frac{U^1}{I_{\text{б1}}} \right| = \frac{12}{2} \cdot 10^3 = 6\text{кОм};$$

$$P_1 = (I_{\text{б1}})^2 \cdot R1 = (2 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 6 \cdot 10^3 = 24\text{мВт}.$$

Выбирается по ГОСТ: R1 – ОМЛТ – 0,125 – 6,2к ± 5 %.

8. Определяется ограничивающий резистор R3 в коллекторной цепи транзистора VT2 и его мощность P3.

Транзистор VT2 создает смещение на базе транзистора VT1. Потенциал коллектора VT2 относительно земли (общего провода ГТ) $U_{\text{к2}} = E_{\text{пл}} - 2\varphi_{\text{д}}$, а ток базы $I_{\text{б1}}$ транзистора VT1 равен току коллектора транзистора VT2: ($I_{\text{к2}} = I_{\text{б1}}$). Поскольку резистор R3 одним концом подключен к источнику питания $E_{\text{пл}} = 12\text{В}$, падение напряжения U_3 на резисторе R3 определяется из соотношения (Рисунок 2.10)

$$U_3 = E_{\text{пл}} - U_{\text{к2}} = I_{\text{к2}} \cdot R3.$$

В результате преобразований определяется величина резистора R3

$$R3 = \frac{2\varphi_{\text{д}}}{I_{\text{к2}}} = \frac{2(0,6 \div 0,8)}{2 \cdot 10^{-3}} = \frac{2 \cdot 0,65}{2} \cdot 10^3 = 650 \text{ Ом}.$$

Выбирается $R3=680 \text{ Ом}$.

Определяется мощность резистора $R3$

$$P_3 = (I_{k2})^2 \cdot R3 = (2 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 680 = 2.72 \text{ мВт}.$$

Выбирается по ГОСТ: $R3 - \text{ОМЛТ} - 0,125 - 680 \pm 5\%$.

9. Определяется статическое сопротивление $r_{\text{ст}}$ излучателя оптопары АОТ 123 (Таблица 3.2)

$$r_{\text{ст}} = \frac{U_{\text{вх}}}{I_{\text{вх}}} = \frac{2}{20 \cdot 10^{-3}} = 100 \text{ Ом}.$$

10. Определяется сопротивление $R4$, имитирующее нагрузку ГТ при «отключенной» оптопаре, из условия

$$R4 \geq 3 \cdot r_{\text{ст}} = 3 \cdot 100 = 300 \text{ Ом}.$$

Определяется мощность P_4 резистора $R4$

$$P4 = (I_{\text{вх1}})^2 \cdot R4 = (20 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 300 = 120 \text{ мВт}.$$

Выбирается по ГОСТ: $R4 - \text{ОМЛТ} - 0,25 - 300 \pm 5\%$.

11. Определяется выходной ток фототранзистора $I_{\text{вых}} = I_{\text{к}}^{\text{оп}}$ при токе управления $I_{\text{вх}} = 20 \text{ мА}$ и напряжении коллектор-эмиттер $U_{\text{кэ}} = E_2 = 5 \text{ В}$ (Таблица 3.2).

Из графика (Рисунок 3.1) определяется: $(I_{\text{вых}}/I_{\text{вх}}) \cdot 100\% = 60\%$

$$I_{\text{вых}} = I_{\text{к}}^{\text{оп}} = 0,6 \cdot I_{\text{вх}} = 0,6 \cdot 20 \cdot 10^{-3} = 12 \text{ мА}.$$

12. Определяется величина резистора $R5$ при напряжении питания фототранзистора $E_2 = 5 \text{ В}$ и его мощность $P5$

$$R5 = \frac{E_2}{I_{\text{к}}^{\text{оп}}} = \frac{5}{12} \cdot 10^3 \approx 417 \text{ Ом}.$$

Выбирается $R5=390 \text{ Ом}$.

$$P5 = (I_{\text{к}}^{\text{оп}})^2 \cdot R5 = (12 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 390 \approx 56,2 \text{ мВт}.$$

Выбирается по ГОСТ: $R5 - \text{ОМЛТ} - 0,125 - 390 \pm 5\%$.

13. В качестве развязывающих диодов $VD1$, $VD2$ выбираются диоды КД512.

В результате расчета выбраны следующие элементы схемы БОР:

Диоды: $VD1$, $VD2 - \text{КД512}$. Оптопара АОТ 123.

Транзисторы: $VT1$, $VT2 - \text{КТ 814А}$.

Резисторы: $R1 - \text{ОМЛТ} - 0,125 - 6,2 \text{ к} \pm 5\%$. $R2 - \text{ОМЛТ} - 0,125 - 30 \pm 5\%$.

$R3 - \text{ОМЛТ} - 0,125 - 680 \pm 5\%$. $R4 - \text{ОМЛТ} - 0,25 - 300 \pm 5\%$.

$R5 - \text{ОМЛТ} - 0,125 - 390 \pm 5\%$.

Примечание - Расчет БОР для сопряжения с исполнительными устройствами постоянного и переменного тока проводится с учетом их номинальной мощности: при сопряжении с ДПТ мощность нагрузки соответствует мощности двигателя; при сопряжении исполнительных устройств посредством реле постоянного тока мощность нагрузки соответствует мощности управляющей обмотки реле; при сопряжении АД с помощью динисторной оптопары, либо системы реле – семистор расчет буферного устройства сводится к выбору силовых диодов выпрямителя по величине обратного напряжения и выпрямленного тока.

4. ВАРИАНТЫ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ЗАДАНИЙ

ЗАДАНИЕ

Рассчитать и промоделировать в среде «CIRCUITMAKER» блок оптронной развязки (БОР) информационных сигналов в соответствии с индивидуальным заданием. Код варианта индивидуального задания выбирается по двум последним цифрам (ВА) зачетной книжки студента (Таблица 4.1).

Таблица 4.1 - Код индивидуального задания

Номер варианта	Код индивидуального задания		Примечание
	В	А	
1	нечетный	нечетный	<u>Пример:</u> ВА = 70: В=7; А=0. <u>Вариант 2 (нечет/чет)</u>
	четный	нечетный	
2	четный	четный	
	нечетный	четный	

Варианты индивидуального задания

1. Диодная оптопара – «А»

Генераторный режим фотоприемника – «ВА»

Усилитель мощности на базе операционного усилителя

Устройство управления фотоизлучателем – транзисторный ключ

Исполнительное устройство - двигатель постоянного тока (ДПТ) – электрические параметры см. Таблица 4.2.

Параметрический режим фотоприемника – «ВА»

Усилитель мощности на базе транзисторных ключей

Устройство управления фотоизлучателем – RS- триггер

Исполнительное устройство – асинхронный двигатель (АД) – электрические параметры см. Таблица 2.

2. Транзисторная оптопара – «А»

2.1 Режим фотоприемника – инвертор с общим эмиттером – «ВА»

Усилитель мощности на комплементарных транзисторах

Устройство управления фотоизлучателем – D – триггер

Исполнительное устройство – электромагнитное реле постоянного тока (РПТ) – электрические параметры см. Таблица 2.

2.2 Режим фотоприемника – повторитель с общим коллектором – «ВА»

Усилитель мощности на биполярных транзисторах

Устройство управления фотоизлучателем – «Токовая петля»

Исполнительное устройство – электромагнитный коммутатор переменного тока (КПТ) – электрические параметры см. Таблица 2.

Таблица 4.2 – Электрические параметры нагрузки БОР

Исполнительные устройства	Двигатели постоянного и переменного тока		Электромагнитные коммутаторы постоянного и переменного тока	
№ варианта	Напряжение якоря U, В	Мощность P, ВА	Напряжение включения U, В	Ток включения I, А
1	= 220	500	= 24	= 0.2
2	= 110	250	= 24	= 0.5
3	= 36	750	= 24	= 0.75
4	= 27	250	= 12	= 0.25
5	~ 220 (1 фазн.)	1200	= 12	= 0.1
6	~ 110 (1 фазн.)	1300	= 12	= 1.0
7	~ 36 (1 фазн.)	1500	= 9	= 1.5
8	~ 380 (3 фазн.)	1400	= 9	= 2.5
9	~ 380 (3 фазн.)	700	= 9	~ 3.0
10	~ 380 (3 фазн.)	800	= 6	0.25
11	~ 380 (3 фазн.)	1100	= 6	~ 0.5
12	~ 380 (3 фазн.)	1500	= 6	0.45
13	~ 380 (3 фазн.)	2500	= 5	= 0.3
14	~ 380 (3 фазн.)	3000	= 5	0.25
15	~ 380 (3 фазн.)	1000	= 5	0.15
16	= 27	250	= 12	0.30
17	= 110	700	= 6	0.50
18	= 36	250	= 5	0.75
19	= 220	750	= 9	0.3
20	= 36	500	~ 24	1.5
21	= 110	200	~ 12	~ 3.0
22	= 220	450	= 6	~ 2.5
23	~ 220 (1 фазн.)	1200	= 5	~ 2.0
24	~ 36 (1 фазн.)	1500	= 5	= 1.5
25	~ 380 (3 фазн.)	2500	= 9	= 1.0
26	= 36	250	~ 24	= 0.45
27	= 110	750	= 12	= 0.3
28	= 220	250	= 6	= 0.4
29	= 27	250	= 9	= 0.5
30	= 110	750	~ 36	= 1.5
31	= 36	250	= 5	~ 3.0
32	= 220	150	= 9	~ 2.5
33	~ 220 (1 фазн.)	2500	~ 24	= 0.25
34	~ 36 (1 фазн.)	1500	~ 12	= 0.15
35	~ 380 (3 фазн.)	250	= 12	= 0.10
36	= 27	300	= 12	= 0.20
37	= 110	150	= 6	= 0.25
38	= 220	450	= 5	= 0.5
39	~ 220 (1 фазн.)	1200	= 9	= 1.0
40	= 36	300	= 5	= 1.5

Продолжение таблицы 4.2

Исполнительные устройства	Двигатели постоянного и переменного тока		Электромагнитные коммутаторы постоянного и переменного тока	
	Напряжение якоря U, В	Ток якоря I, А	Напряжение включения U, В	Ток включения I, А
41	= 220	250	= 9	= 0.5
42	= 110	750	~ 24	= 0.45
43	= 36	500	~ 12	= 0.3
44	= 27	300	~ 36	= 0.25
45	~ 220 (1 фазн.)	1200	~ 24	= 0.15
46	~ 380 (3 фазн.)	2500	~ 12	= 0.30
47	= 27	250	= 12	= 0.2
48	= 110	700	= 6	= 0.5
49	= 220	250	= 5	= 0.75
50	~ 220 (1 фазн.)	850	= 9	= 0.25
51	= 110	500	= 5	= 1.5
52	= 36	750	= 24	~3.0
53	= 220	250	= 12	~2.5
54	~ 220 (1 фазн.)	1200	~ 36	= 0.25
55	~ 36 (1 фазн.)	1500	= 24	= 0.15
56	~ 380 (3 фазн.)	2500	= 12	= 0.50
57	= 27	400	= 9	V 0.75
58	= 110	500	= 6	= 0.3
59	= 220	300	= 6	= 1.5
60	~ 220 (1 фазн.)	1500	= 5	~3.0

5. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Расчетно-графическое задание выполняется на листах белой бумаги формата А4.

Отчет должен содержать следующие разделы.

1. Титульный лист.
2. Содержание.
3. Структурная и электрическая принципиальная схемы БОР (в соответствии с индивидуальным заданием).
4. Расчет параметров принципиальной электрической схемы БОР.
5. Имитационная модель БОР в среде «CIRCUITMAKER» с осциллограммами электрических сигналов в контрольных точках модели.
6. Сравнение результатов теоретического расчета и имитационного моделирования БОР. Расчет относительной погрешности δ результатов моделирования M по сравнению с теорией T осуществляется по формуле:

$$\delta = [(M - T) / T] \cdot 100\%$$
7. Библиографический список.
8. Приложение – Перечень элементов спроектированной принципиальной электрической схемы БОР (в соответствии с требованиями ЕСКД) [10].

6. ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ

АД – асинхронный двигатель.
 БОР – блок оптронной развязки.
 ДПТ – двигатель постоянного тока.
 ИМС – интегральная микросхема
 КИСУ – компьютерно-интегрированная система управления.
 ЭПК – электропневмоклапан.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1 Горошков Б.И. Радиоэлектронные устройства/Б.И. Горошков.- М.: Радио и связь, 1984.- 400 с.
- 2 Полупроводниковые оптоэлектронные приборы: Справочник/В.И. Иванов, А. И. Аксенов, А. М. Юшин - М.: Энергоатомиздат, 1988.- 448 с.
- 3 Кофлин Р. Операционные усилители и линейные интегральные схемы/Р. Кофлин, Ф. Дрискол.- М.: Мир, 1979.- 360 с.
- 4 Новиков Ю. В. Разработка устройств сопряжения для персонального компьютера типа IBM PC/Ю.В. Новиков, О. А. Калашников, С.Э. Гуляев.- М.: «ЭКОМ», 2000.- 222 с.
- 5 Справочник по полупроводниковым диодам, транзисторам и интегральным схемам/Под ред. Н.Н. Горюнова.-М.: Энергия, 1972.- 568 с.
- 6 Справочник: Резисторы/Под ред. И. И. Четверткова и В. М. Терехова- М.: Радио и связь, 1987.- 352 с.
- 7 Степаненко И.И. Основы теории транзисторов и транзисторных схем/ И.И. Степаненко - М.: Энергия, 1973.- 608 с.
- 8 Малогабаритная радиоаппаратура: Справочник радиолюбителя/Р.М. Терещук и др.- К.: Наукова думка, 1976.- 561 с.
- 9 Чернов Е.А. Проектирование станочной электроавтоматики /Е.А. Чернов.- М.: Машиностроение, 1989.-304 с.
- 10 Усатенко С.Т. Выполнение электрических схем по ЕСКД: Справочник/С.Т. Усатенко, Т.К. Каченюк, М.В. Терехова. - М.: Издательство стандартов, 1989.- 325 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А.

(обязательное)

Таблица А. 1 – Варианты сопряжения исполнительных устройств с системой управления

Назначение	Схема
Связь с контактными элементами с прямым выходным сигналом X	
Связь с контактными элементами с инверсным выходным сигналом X	
Связь с выходными цепями УЧПУ	
Связь с бесконтактным путевым датчиком с релейной развязкой	
Развязка с цепью переменного тока при помощи элемента серии ЛОГИКА – «И»	
Развязка при помощи оптронного элемента	
Включение промежуточного реле	

Продолжение таблицы А. 1

Назначение	Схема
Включение индикаторной лампы	
Включение промежуточного реле с мощной обмоткой управления	
Управление силовым ключом	
Включение силового аппарата переменного тока	
Включение силового аппарата постоянного тока	
Включение силового аппарата переменного тока	
Включение силового аппарата постоянного тока	