

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«КРЫМСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ имени В.И.
ВЕРНАДСКОГО»

ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

Кафедра компьютерной инженерии и моделирования

Сосновский Ю.В.

**Учебно-методическое пособие по проведению практических
занятий**

по курсу «Схемотехника»

для обучающихся направления подготовки 09.03.01 «Информатика и
вычислительная техника», 09.03.04 «Программная инженерия»
образовательно-квалификационного уровня «бакалавр»
очной и заочной формы обучения

Симферополь, 2020

Рекомендовано к печати заседанием кафедры
от 15.01.2020 г. № 5

Рекомендовано к печати:
Учебно-методическим советом Физико-технического института
(структурное подразделение) ФГАОУ ВО «КФУ им.
В.И.Вернадского»
протокол № 5 от 24.01.2020

Составитель (автор): Сосновский Юрий Вячеславович, к.т.н., доцент
кафедры компьютерной инженерии и моделирования

Введение

Настоящее учебно-методическое пособие по проведению практических занятий по курсу «Схемотехника» включает в себя описания основных тематических направлений практических работ по схемотехнике для студентов направления подготовки 09.03.01 «Информатика и вычислительная техника», 09.03.04 «Программная инженерия» образовательно-квалификационного уровня «бакалавр» очной и заочной формы обучения. В пособие включены материалы, в которых рассматриваются наиболее важные особенности современной схемотехники аналоговых и цифровых цепей, позволяющие студентам глубже усвоить основные разделы данного блока.

Целью учебно-методического пособия является предоставление студенту базовых материалов, требуемых для изучения курса «Схемотехника», а также обеспечение методической помощи преподавателю соответствующего курса.

Требования к студентам по подготовке, выполнению и отчету практическим занятиям:

1. Студент приходит на практическое занятие, ознакомившись с теоретическим материалом по данной теме, подтвержденным конспектом в тетради, для выполнения практических работ.

2. В качестве инструментальной базы рекомендуется использование персонального компьютера – ноутбука.

Для самоконтроля и подготовки студентов к практическим работам описание каждого блока содержит перечень типовых вопросов. Задачи, решаемые в ходе практических занятий описаны в пособии и выделены серым цветом схем, представленных в пособии. Некоторые вопросы требуют более глубокой проработки теоретического материала и умения применять его в нестандартных условиях. Для подготовки к практическим работам, как правило, достаточно воспользоваться рекомендованными учебниками, пособиями и материалами, представленными в данном пособии.

Оглавление

| | |
|-------------------------------------------------------|----|
| Введение | 3 |
| Практическое занятие №1 | 6 |
| Практическое занятие №2 | 6 |
| Практическое занятие №3 | 7 |
| Практическое занятие №4 | 8 |
| Практическое занятие №5 | 9 |
| Практическое занятие №6 | 9 |
| Практическое занятие №7 | 10 |
| Практическое занятие №8 | 11 |
| Пассивные элементы | 12 |
| Резистор. Обозначение. Единица измерения. Виды | 12 |
| Конденсатор | 13 |
| Катушки индуктивности | 14 |
| Трансформаторы | 15 |
| Делители напряжения | 18 |
| Регуляторы напряжения | 19 |
| Диоды. Выпрямители | 21 |
| Двухполупериодное выпрямление | 23 |
| Амплитудные ограничители | 26 |
| Параметрические стабилизаторы напряжения | 27 |
| Индуктивная нагрузка и диодная защита контактов | 29 |
| Активные элементы | 30 |

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Биполярные транзисторы | 30 |
| Полевые транзисторы | 31 |
| Типы и схемы включения полевых транзисторов..... | 31 |
| Задание | 35 |
| Операционные усилители | 38 |
| Реальное применение ОУ на примере инвертирующего и неинвертирующего усилителей | 40 |
| Неинвертирующий усилитель | 40 |
| Интеграторы и дифференциаторы..... | 41 |
| Практическая задача | 42 |
| Дифференциатор | 43 |
| Компаратор | 44 |
| Активный фильтр..... | 44 |
| Практическая задача | 46 |
| Цифровая схемотехника..... | 52 |
| Защита входов цифровой схемотехники | 53 |
| Управление мощной нагрузкой..... | 60 |
| Управление мощной нагрузкой по цепи переменного тока . | 63 |
| Специализированные элементы управления – Н-мосты | 65 |
| Список рекомендуемой литературы | 68 |

Практическое занятие №1

Тема: Техника безопасности. Моделирование схемы, основные инструменты. Базовые пассивные элементы. Индуктивности, простейшие ФНЧ, ФВЧ. Анализ и моделирование RC-цепочки Трансформатор, выпрямитель.

Цель: овладение компетенциями, выработка навыков, актуализация знаний, умений и навыков в области моделирования схем, базовых пассивных элементов.

Вопросы для подготовки к практическому занятию:

Ход занятия:

1. Постановка проблемы, задачи, актуализация теории, по данному вопросу.
2. Разбор теоретического материала.
3. Перечень заданий для решения обучающимися в ходе занятия:
 - выработка навыков, актуализация знаний, умений и навыков в области моделирования схем:
 - простейшие ФНЧ, ФВЧ;
 - моделирование базовых пассивных элементов;
 - моделирование понижающего трансформатора;
 - моделирование выпрямительного диода с различными источниками.
4. Вопросы для самоконтроля:
 - формула для расчета проводимости;
 - формула расчета значения электрического тока в цепи, содержащей конденсатор;
 - трансформатор (повышающий, понижающий, разделительный). Гальваническое разделение;
 - параметры и функционирование диода. Варианты осциллограммы на выходе в зависимости от параметров источника переменного напряжения на входе.

Практическое занятие №2

Тема: Моделирование разных типов выпрямителей. Фильтры. Оценка влияния емкости конденсаторов на пульсации

выходного напряжения. Параметрические стабилизаторы напряжения. Моделирование схемы.

1. Постановка проблемы, задачи, актуализация теории, по данному вопросу.

2. Разбор теоретического материала.

3. Перечень заданий для решения обучающимися в ходе занятия:

- моделирование мостового (двухполупериодного) выпрямителя, сглаживающего конденсатора и нагрузки;

- оценка влияния емкости конденсаторов на пульсации выходного напряжения;

- параметрические стабилизаторы напряжения. Моделирование схемы параметрического стабилизатора, анализ её работы.

4. Вопросы для самоконтроля:

- влияние ёмкости конденсатора на размах пульсаций напряжения после выпрямителя и фильтра;

- влияние сопротивления нагрузки на размах пульсаций напряжения после выпрямителя и фильтра;

- общий вид графика напряжения на выходе параметрического стабилизатора при повышении входного напряжения от 0 и до $U_{вх.} \gg U_{стаб.}$

Практическое занятие №3

Тема: Основы использования транзисторов, базовые схемы. Моделирование схем: идеальная модель биполярного транзистора, модель реального 2n2222, модель полевого транзистора типа MOSFET IRL520. Простейшая схема усиления на транзисторе. Установка рабочих точек.

1. Постановка проблемы, задачи, актуализация теории, по данному вопросу.

2. Разбор теоретического материала.

3. Перечень заданий для решения обучающимися в ходе занятия:

- моделирование схем: идеальная модель биполярного транзистора, модель реального 2n2222, модель полевого транзистора типа MOSFET IRL520;

- построение зависимости тока коллектора от тока базы для идеальной модели биполярного транзистора, для модели реального транзистора 2n2222;
- построение зависимости тока стока от напряжения затвора для модели реального полевого транзистора типа MOSFET IRL520;
- разбор принципов установки рабочих точек транзисторов и простейшей схемы усилителя.

4. Вопросы для самоконтроля:

- для каких транзисторов целесообразно измерение входного тока (по управляющему элементу), а для каких – измерение управляющего напряжения;
- три режима работы полевого транзистора, их описание и графическая иллюстрация по графику выходных характеристик;
- что представляют собой современные мощные полевые транзисторы, предназначенные для работы в ключевых режимах?
- в чём заключаются ключевые различия между собой транзисторов MOSFET, j-FET, IGBT?
- для чего требуется установка рабочих точек, отличных от нуля, в аналоговых схемах усиления (на примере усилителя на биполярном транзисторе).

Практическое занятие №4

Тема: Моделирование частотозависимых входных и выходных цепей. Получение заданных параметров. Операционные усилители.

1. Постановка проблемы, задачи, актуализация теории, по данному вопросу.
2. Разбор теоретического материала.
3. Перечень заданий для решения обучающимися в ходе занятия:
 - моделирование схемы неинвертирующего усилителя. Обеспечить коэффициент усиления схемы $K=10$;
 - моделирование схемы компаратора на основе операционного усилителя. Получение выходных характеристик компаратора;

- моделирование схемы фильтр низких частот (ФНЧ) второго порядка с частотой среза 150 Гц по характеристике Баттерворда.

4. Вопросы для самоконтроля:

- операционный усилитель, его идеальные и реальные параметры;
- компаратор на основе ОУ;
- виды фильтров: полосовые, режекторные, ФНЧ, ФВЧ. Частота среза;

Практическое занятие №5

Тема: Моделирование аналоговой схемы на основе операционного усилителя.

1. Постановка проблемы, задачи, актуализация теории, по данному вопросу.

2. Разбор теоретического материала.

3. Перечень заданий для решения обучающимися в ходе занятия:

- моделирование схемы реального устройства управления освещением в зависимости от уровня освещенности на основе операционного усилителя.

4. Вопросы для самоконтроля:

- режим работы ОУ в данной схеме;
- на что влияет потенциометр RV1;
- какую функцию выполняет транзистор Q1;
- какую функцию выполняет диод D1.

Практическое занятие №6

Тема: Цифровая схемотехника. Базовая схема включения микроконтроллера. Организация цепей питания, сброса.

1. Постановка проблемы, задачи, актуализация теории, по данному вопросу.

2. Разбор теоретического материала.

3. Перечень заданий для решения обучающимися в ходе занятия:

- моделирование схемы включения микроконтроллера. Организация цепей питания, сброса. Загрузка готовой

прошивки, подключение осциллографа к требуемым выходам и наблюдение сигнала;

- настройка фьюз-битами на работу от внешнего кварцевого резонатора, оценка изменения частоты генерируемого сигнала.

4. Вопросы для самоконтроля:

- для чего требуется разделение цифровой и аналоговой части МК;

- какую функцию выполняют электролитические конденсаторы по цепи цифрового питания, какие к ним требования;

- какую функцию выполняют блокировочные конденсаторы по цепям цифрового питания, какие к ним требования;

- какую функцию выполняют элементы R1 и C6, каждый по отдельности.

Практическое занятие №7

Тема: Защита входов цифровой схемотехники.

1. Постановка проблемы, задачи, актуализация теории, по данному вопросу.

2. Разбор теоретического материала.

3. Перечень заданий для решения обучающимися в ходе занятия:

- моделирование схемы фильтрации входного сигнала с использованием ФНЧ (максимальная частота 1 кГц). Входной сигнал генерировать в виде единичных прямоугольных импульсов соответствующей длительности;

- моделирование схемы снятия сигнала с источника высокого напряжения. Регистрируемое напряжение 100В, схема регистрации на МК с питанием 5В.

4. Вопросы для самоконтроля:

- виды помех, наводок, иных воздействий на входы цифровой электроники;

- основные принципы защиты входов цифровой электроники;

- оптическая развязка с помощью оптопары – в каком случае она целесообразна к применению и в каком – ограничена.

Практическое занятие №8

Тема: Управление мощной нагрузкой постоянного, переменного тока. Специализированные элементы – Н-мосты.

1. Постановка проблемы, задачи, актуализация теории, по данному вопросу.

2. Разбор теоретического материала.

3. Перечень заданий для решения обучающимися в ходе занятия:

- моделирование схемы электронных ключей с доработками;
- моделирование схемы управления нагрузкой с использованием Н-моста L293D.

4. Вопросы для самоконтроля:

- классификация задач управления нагрузкой по типу тока и скорости переключения;
- преимущества и недостатки классических электромагнитных реле. Доработки электронных ключей для управления электромагнитными реле;
- управление нагрузкой по цепи постоянного тока;
- управление нагрузкой по цепи переменного тока. Особенности управления, схемотехнические решения;
- управление нагрузкой в цепи постоянного тока, включая полярность, с помощью Н-мостов;
- специализированные микросхемы Н-мостов. Обозначение и использование входов для эффективного управления полярностью и мощностью нагрузки.

Пассивные элементы

Резистор. Обозначение. Единица измерения. Виды

Рези́стор (англ. resistor, от лат. resisto — сопротивляюсь) — пассивный элемент электрических цепей, обладающий определённым или переменным сопротивлением протеканию электрического тока.

Размерностью и единицей сопротивления является [Ом]:

$$[R] = \frac{1\text{В}}{1\text{А}} = 1\text{ Ом}$$

т.е., если к резистору приложено напряжение $U_R = 1\text{ В}$ и при этом через него протекает ток $I_R = 1\text{ А}$, то сопротивление резистора равно 1 Ом. Сопротивление 1 Ом относительно мало и поэтому наряду с единицей «Ом» используются наиболее распространённые единицы «кОм» (килоом) «Мом» (мегоом).

Резистор также характеризуется *проводимостью*, которая является обратной величиной сопротивлению:

$$[G] = \frac{1}{[R]}$$

Размерностью и единицей *проводимости* является *сименс* [См]:

$$[G] = \frac{1}{[R]} = \frac{1\text{А}}{1\text{В}} = 1\text{См}$$

Основными параметрами резисторов являются **номинальное сопротивление R** , **допуск номинального сопротивления (точность изготовления)** и **номинальная мощность P** , которую они могут рассеивать при сохранении других параметров.

Конденсатор

Основным свойством конденсатора является накопление энергии электрического поля.

Конденсаторы характеризуются ёмкостью

$$C = \frac{Q}{U_c},$$

Где Q – заряд, который накопил конденсатор под приложенным к нему напряжением U_c (рис. 1.1.7).

Размерностью и единицей ёмкости является *фарад* (Ф).

$$[C] = \frac{1 \text{ Кл}}{1 \text{ В}} = 1 \text{ Ф}.$$

Если конденсатор находится под постоянным напряжением $U_c = 1 \text{ В}$ и при этом накопил заряд в $Q = 1 \text{ кулон}$, то его ёмкость равна 1 фараду.

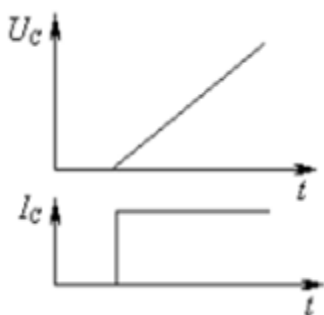
Ток I_c в цепи конденсатора связан с напряжением соотношением

$$I_c = C \frac{dU_N}{dt},$$

т.е. ток конденсатора пропорционален скорости изменения напряжения на нём.

Поэтому есть ещё одно определения фарада: если напряжение на конденсаторе U_c изменяется на 1 В за 1 с и вызывает при этом $I_c = 1 \text{ А}$, то ёмкость конденсатора составляет 1 Ф.

Из формулы I_c видно, что в цепи конденсатора может протекать *постоянный ток*, если изменять напряжение U_c на конденсаторе по *линейному закону*. И напротив, если конденсатор заряжать *постоянным* током, то напряжение U_c на нём неограниченно растёт тоже по *линейному закону*



Напряжение и
постоянный ток на
конденсаторе



Получение линейно
меняющегося напряжения

Это свойство конденсатора широко используется для получения напряжений, меняющихся линейно во времени.

Основными параметрами конденсатора являются **номинальная ёмкость** и **допустимое напряжение**. Номинальная ёмкость стандартизована и регламентируется теми же числовыми номиналами, что и резисторы. Материал диэлектрика определяет и тип конденсатора и его свойства. В зависимости от типа диэлектрика конденсаторы бывают бумажные, слюдяные, керамические и электролитические.

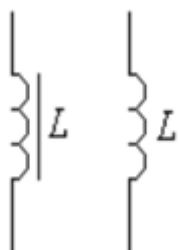
Катушки индуктивности

Основным свойством катушки является накопление энергии магнитного поля.

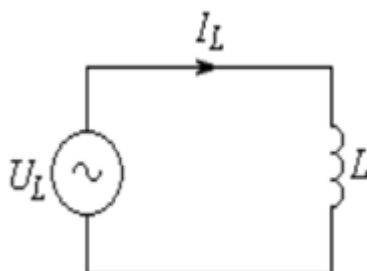
Основным параметром катушки является *индуктивность* L .

$$L = \frac{\psi}{I_L},$$

где ψ – потокосцепление самоиндукции, т.е. суммарный магнитный поток, который вызывается током катушки I_L .



Условное обозначение катушки с сердечником и без



Катушка под напряжением

Размерностью и единицей индуктивности является *генри* (Гн). Если через катушку протекает ток $I_L = 1$ А и при этом он создаёт магнитный поток $\Phi = \psi$ в один вебер (Вб), то такая катушка имеет индуктивность 1 Гн.

$$[L] = \frac{[\Psi]}{[I_L]} = \frac{1\text{Вб}}{1\text{А}} = 1\text{ Гн}$$

Напряжение U_L на катушке и её ток I_L связаны соотношением

$$U_L = L \frac{dI_L}{dt}.$$

Трансформаторы

Трансформаторы предназначены для преобразования, так называемого, первичного напряжения в другое – вторичное напряжение.

Трансформатор состоит в простейшем случае из двух магнитно связанных катушек W_1 и W_2 , которые называют *обмотками*.

Магнитные потоки этих катушек связаны, из-за чего трансформатор преобразует первичное (входное) напряжение U_1 во вторичное (выходное) напряжение U_2 следующим образом.

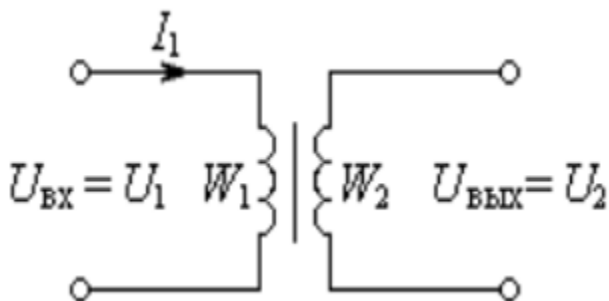


Схема трансформатора

Под входным переменным напряжением U_1 через первичную обмотку W_1 течёт переменный ток I_1 , который создаёт переменный магнитный поток. Этот поток пересекает витки вторичной обмотки W_2 и наводит в них ЭДС. Так создаётся вторичное выходное напряжение U_2 . Оно тем выше, чем больше витков вторичной обмотки W_2 .

Основным *параметром* трансформатора является *коэффициент трансформации*

$$N = \frac{W_2}{W_1},$$

где W_1 и W_2 – числа витков первичной и вторичной обмоток соответственно.

Через напряжение коэффициент трансформации определяется как

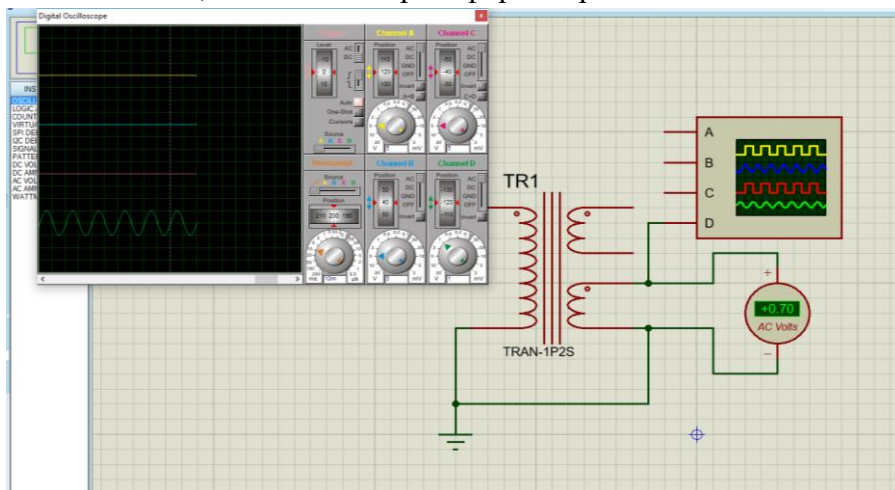
$$N = \frac{U_2}{U_1}$$

Если $N < 1$, т.е. $U_2 < U_1$, то трансформатор понижающий (он понижает входное напряжение).

При $N > 1$ ($U_2 > U_1$), трансформатор повышающий (повышает входное напряжение).

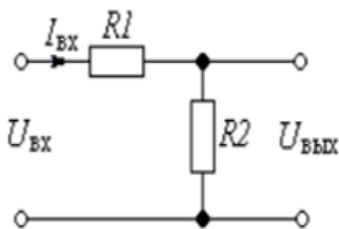
При $N = 1$ ($U_2 = U_1$), трансформатор разделительный. Он гальванически разделяет первичную и вторичную цепи, не изменяя значение напряжения.

Основными параметрами трансформатора являются коэффициент трансформации и мощность. Коэффициент трансформации определяется соотношением витков вторичной и первичной обмоток, а мощность – объёмом сердечника. Чем больше объём, тем мощнее трансформатор.



Делители напряжения

Схема простейшего резистивного делителя напряжения без нагрузки приведена на рисунке.



Делитель напряжения

Резисторы R1 и R2 называются плечами. R1 – верхнее плечо, R2 – нижнее. Делитель работает следующим образом. Последовательное соединение резисторов R1, R2 преобразует входное напряжение $U_{ВХ}$ в ток, который создаёт падения напряжения на резисторах R1 и R2.

$$I_{ВХ} = \frac{U_{ВХ}}{R1 + R2}$$

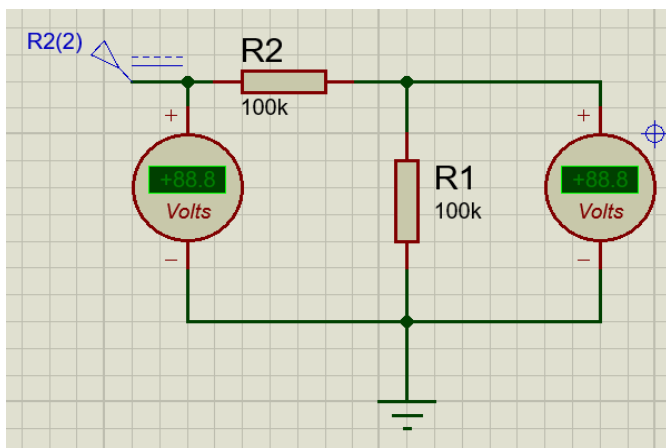
Выходное напряжение, снимаемое с резистора R2, составляет

$$U_{ВЫХ} = I_{ВХ} R_2 = U_{ВХ} \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

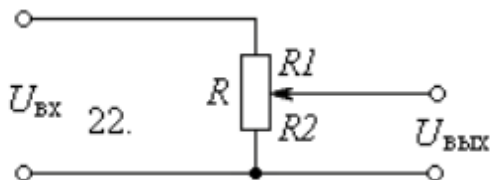
Делением обеих частей на $U_{ВХ}$ получается *коэффициент передачи*

$$K = \frac{U_{ВЫХ}}{U_{ВХ}} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} < 1,$$

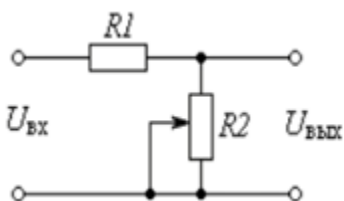
который всегда меньше единицы.



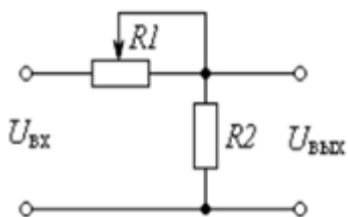
Регуляторы напряжения



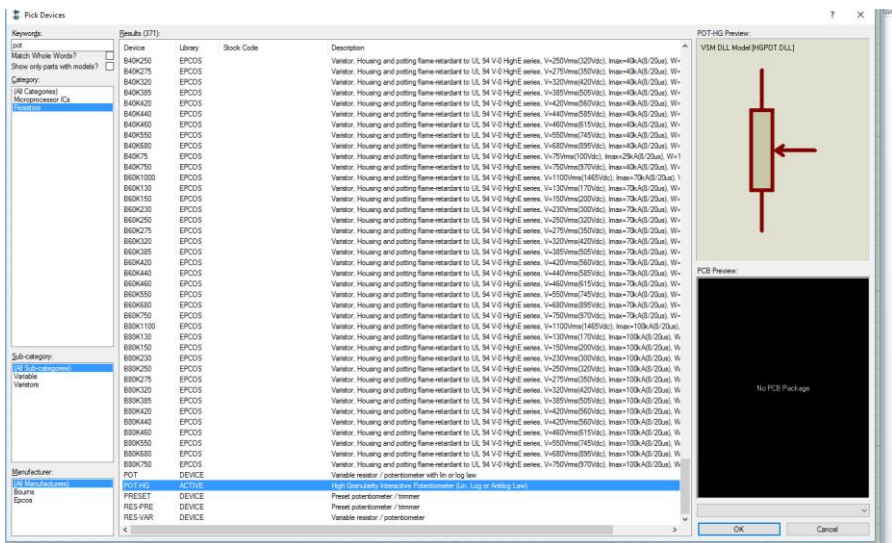
Потенциометрический регулятор напряжения



Регулятор с нижним регулируемым плечом



Регулятор с верхним регулируемым плечом



Выбор элемента – потенциометра

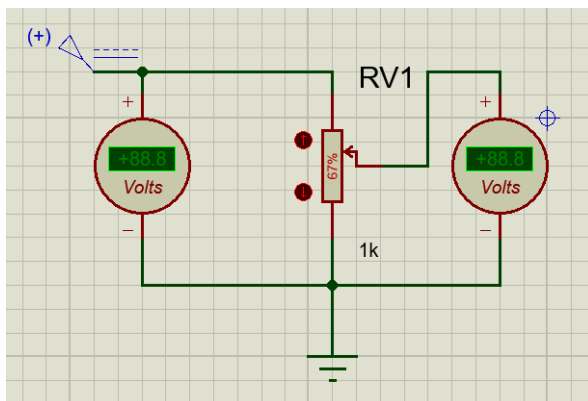
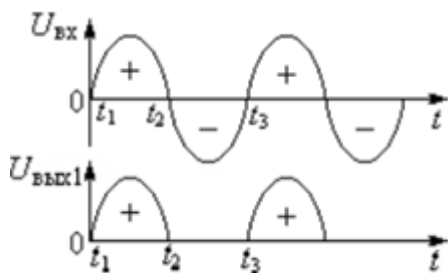
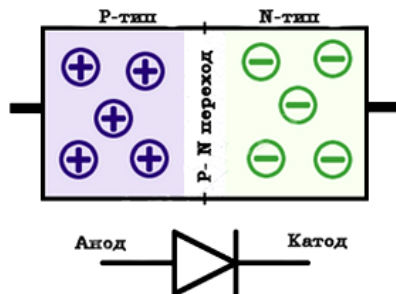


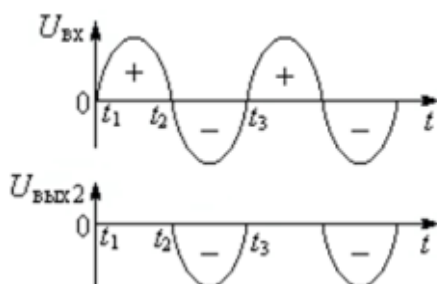
Схема для моделирования и проверки работы потенциометра

Диоды. Выпрямители

Диод (*Diode -eng.*) – электронный прибор, имеющий 2 электрода, основным функциональным свойством которого является **низкое сопротивление** при передаче тока в **одну сторону** и **высокое** при передаче **в обратную**.



Временная диаграмма работы
однополупериодного
выпрямителя (диода) при
положительном входном
напряжении



Временная диаграмма работы
однополупериодного
выпрямителя (диода) при
отрицательном входном
напряжении

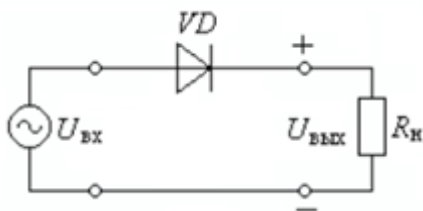


Схема выпрямителя
положительного напряжения

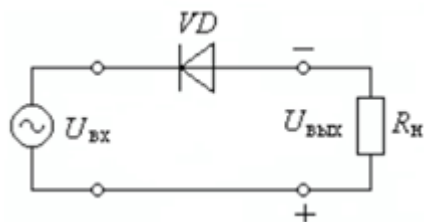
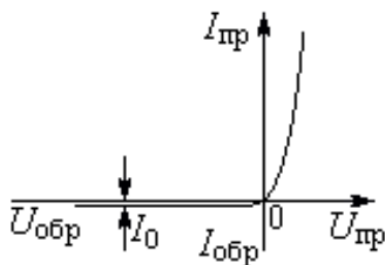


Схема выпрямителя
отрицательного напряжения



Вольт-амперная характеристика (ВАХ) диода

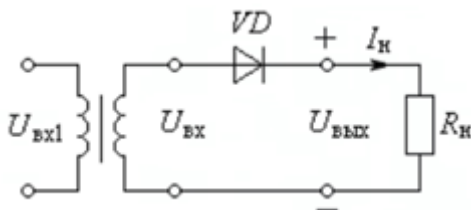


Схема выпрямителя с трансформаторным входом

Амплитуда входного напряжения U_{BX} не должна превышать допустимого обратного напряжения $U_{обр\ макс}$, которое является паспортным значением для каждого диода. Кроме того, целесообразно учитывать как минимум, 20% запас.

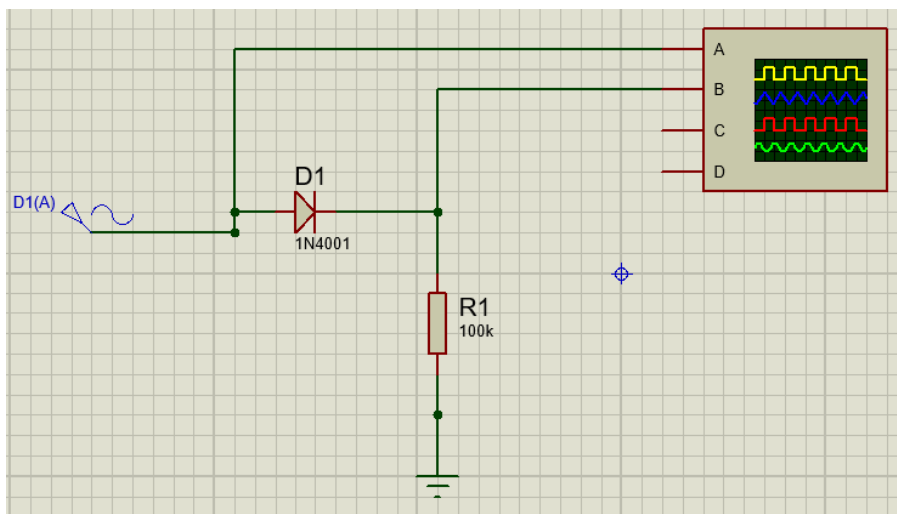
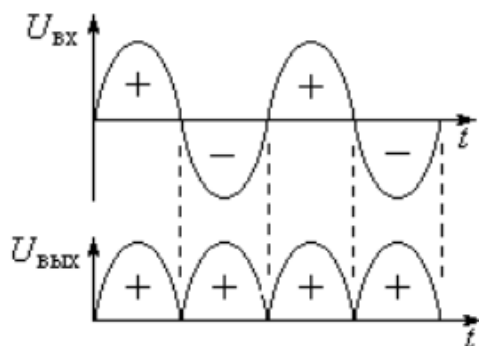
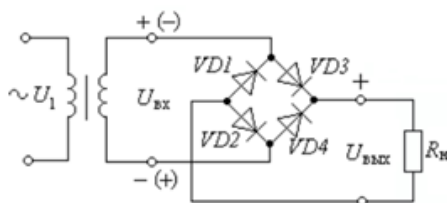


Схема для моделирования и проверки работы диода

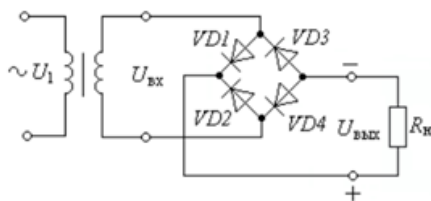
Двухполупериодное выпрямление



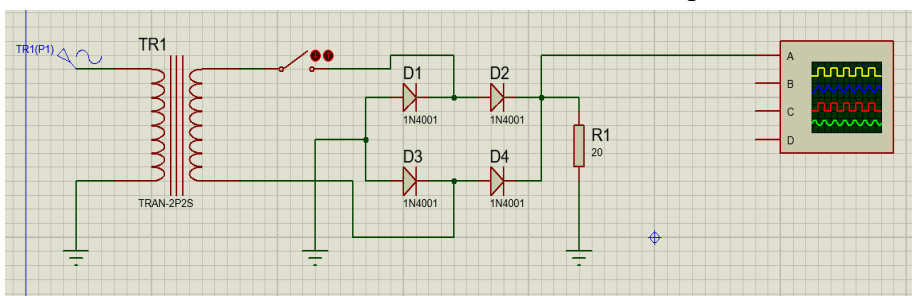
Временная диаграмма работы двухполупериодного выпрямителя



Двухполупериодный
выпрямитель положительного
напряжения



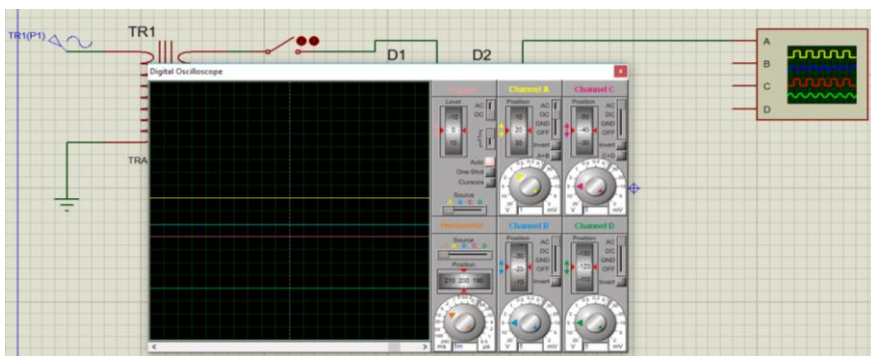
Двухполупериодный
выпрямитель отрицательного
напряжения



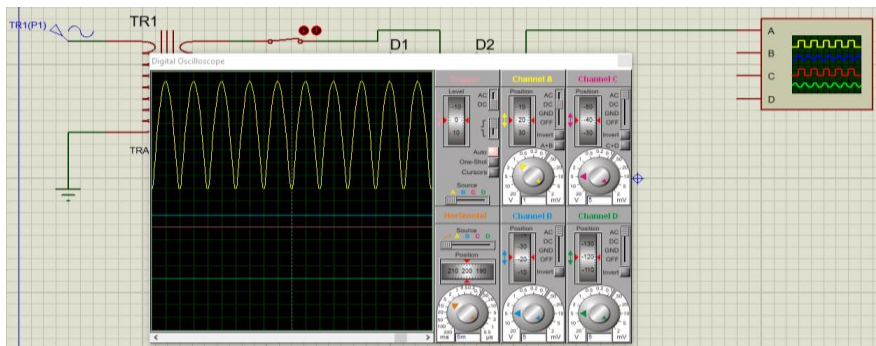
Собрать схему, проанализировать сигналы, добиться показанных на рисунках результатов.

Результат:

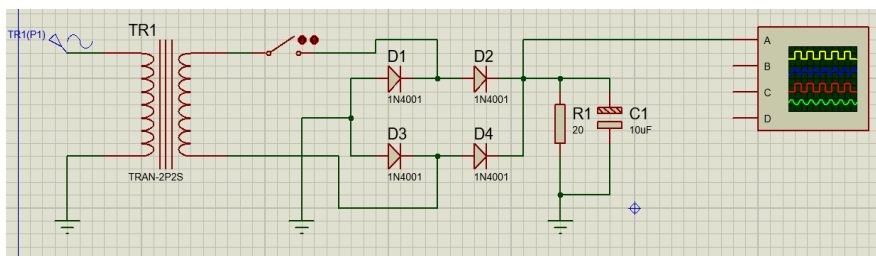
1.



2.



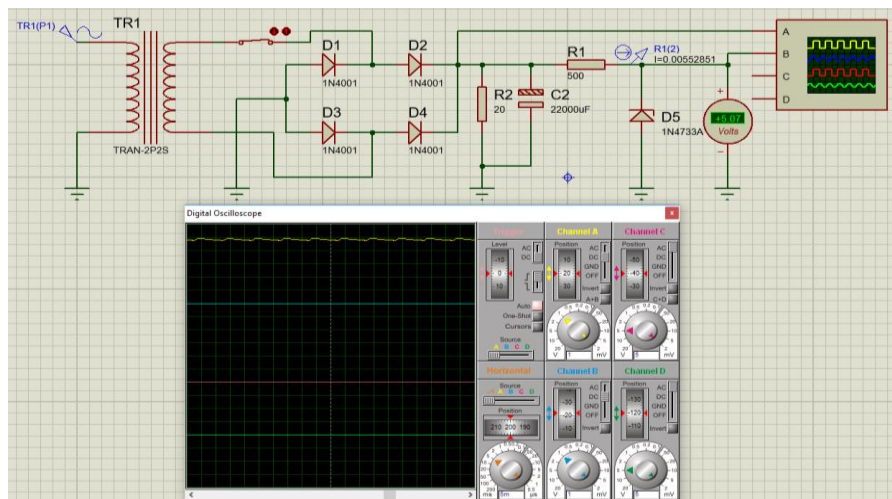
3.



Оценить влияние емкости (и записать в виде вывода) сглаживающего конденсатора $C1$ на пульсации выходного напряжения при следующих параметрах: Амплитуда переменного напряжения на входе трансформатора 10В, коэффициент передачи по напряжению трансформатора = 1, $R1=20\text{Ом}$, $C1$ в диапазоне от 10мкФ до 22000мкФ. Измерить значения величины пульсаций выходного напряжения при, минимум, трех значениях емкости $C1$.

4. Добавить в схему простейший стабилизатор на основе стабилитрона (zener diode) 1N4733A ($U_{\text{стаб.}} 5,1 \text{ В}$, Ток статический = 50мА Макс. ток стабилизации = 178 мА. Макс. рассеиваемая мощность = 1 Вт). Добавить измеритель тока

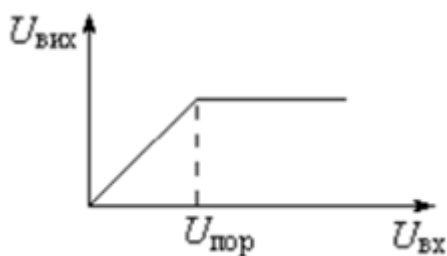
(пробник) и индикатор напряжения (вольтметр). Объяснить поведение осциллограмм желтого и синего каналов (на рисунке).



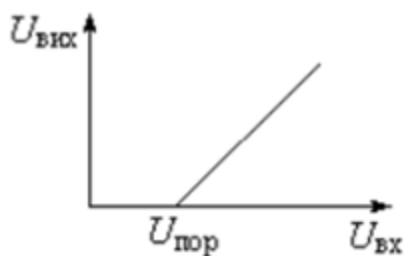
Амплитудные ограничители

Амплитудные ограничители бывают двух типов: ограничитель сверху и ограничитель снизу.

Амплитудная характеристика идеальных амплитудных ограничителей сверху и снизу приведена ниже на рисунках.



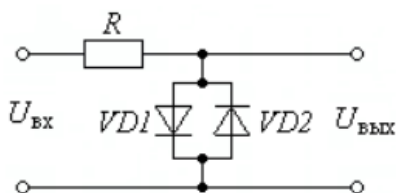
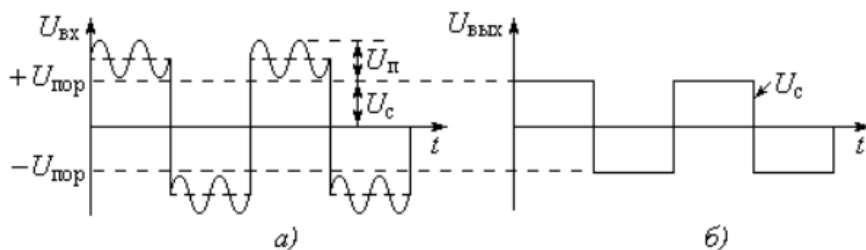
Амплитудная характеристика ограничителя сверху



Амплитудная характеристика ограничителя снизу

Отсюда вытекает важный для практики вывод: в любом устройстве, содержащем ограничение сверху, всегда слабый сигнал подавляется сильным.

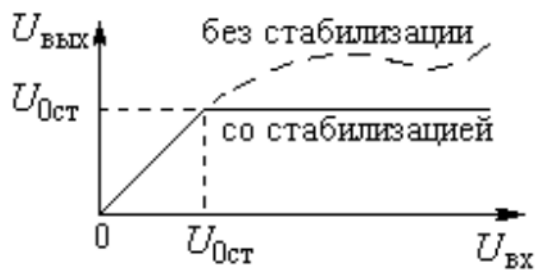
Пример осциллограммы симметричного подавления помех показан на рисунке ниже (а – на входе, б – на выходе).



Простейшая схема симметричного ограничителя

Параметрические стабилизаторы напряжения

Стабилизаторы напряжения предназначены для обеспечения неизменности выходного напряжения при изменении входного, изменении сопротивления нагрузки и наличии прочих дестабилизирующих факторов.



Амплитудная характеристика идеального параметрического стабилизатора

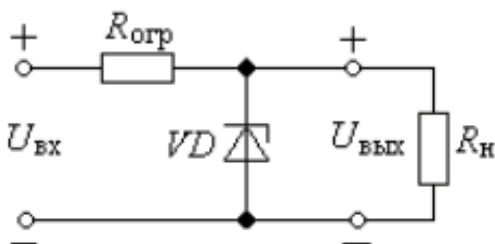
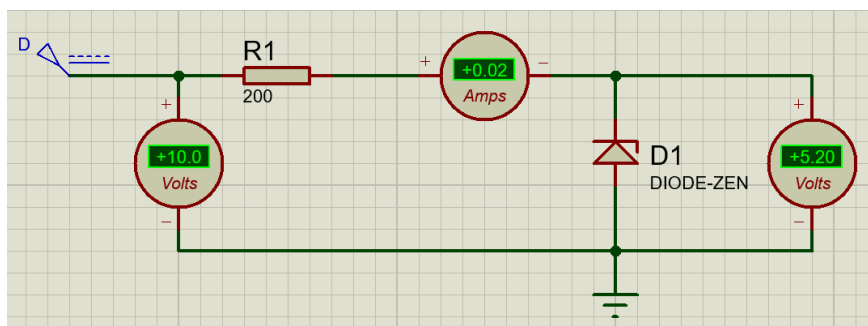
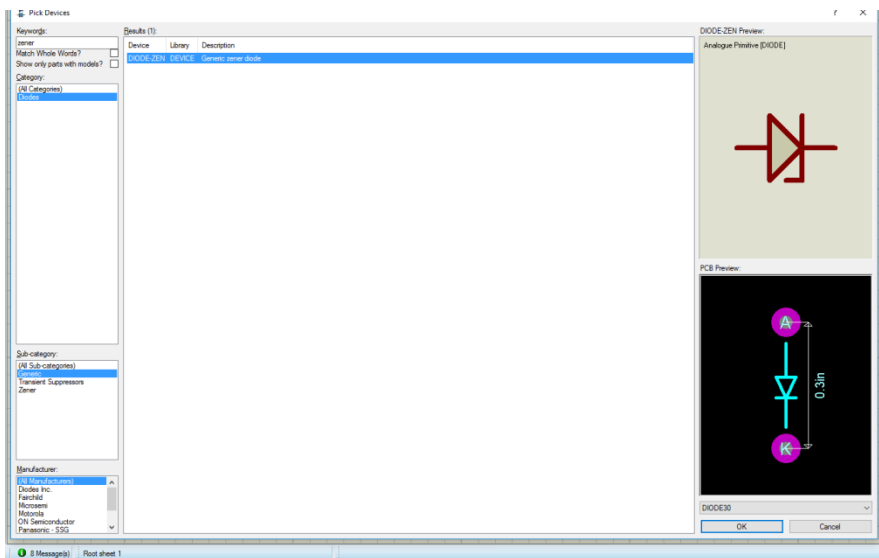
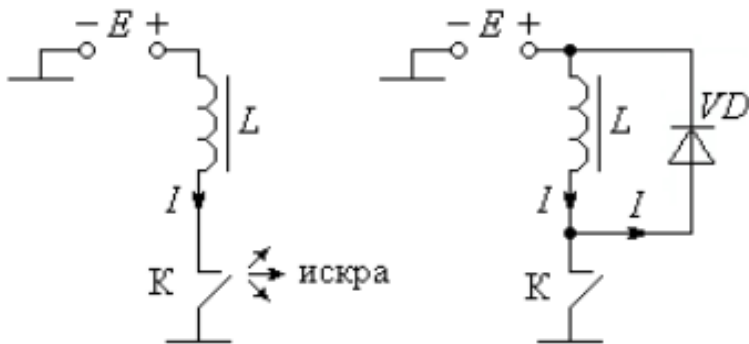


Схема параметрического стабилизатора напряжения





Индуктивная нагрузка и диодная защита контактов



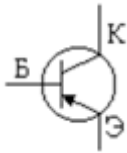
Диодная защита контактов

Активные элементы

Биполярные транзисторы

Дословным переводом названия «транзистор» является «управляемое сопротивление». Основным свойством транзистора является возможность усиления мощности. Термин «биполярный» означает, что в биполярных транзисторах (БТ) используются два типа носителей заряда: электроны и «дырки».

Условные обозначения биполярных транзисторов.



p-n-p



n-p-n

Транзистор имеет три электрода: эмиттер, коллектор, база. Функциональное назначение электродов следующее: *Эмиттер* поставляет подвижные носители заряда, *база* является управляющим электродом, а *коллектор* собирает подвижные носители заряда.

Существуют три основные схемы включения транзистора:

- с общей базой (ОБ);
- с общим эмиттером (ОЭ);
- с общим коллектором (ОК).

Пример схемы с общим эмиттером показан на рисунке ниже.

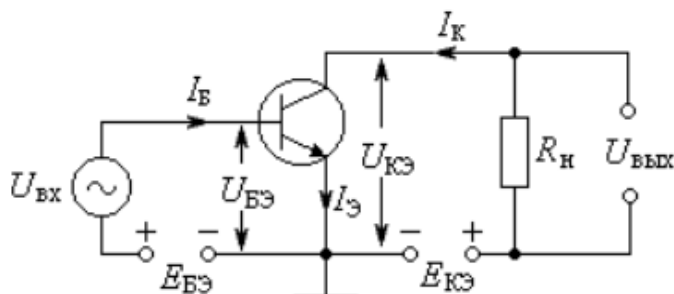
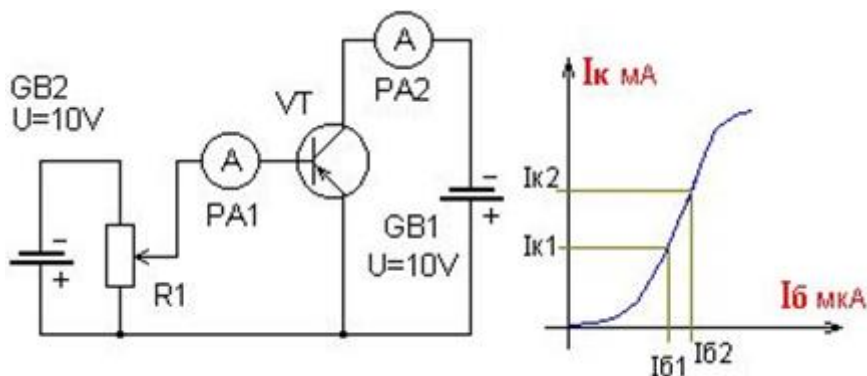


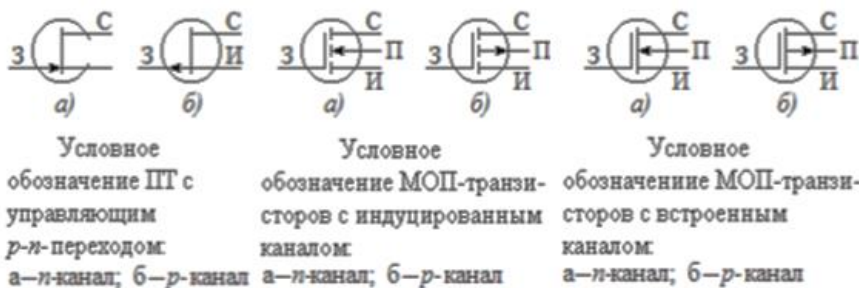
Схема тестового включения, а также соотношение тока коллектора к току базы показаны на рисунке ниже.



Полевые транзисторы

Типы и схемы включения полевых транзисторов

Полевые транзисторы (ПТ) бывают двух типов: с управляющим *p-n-переходом*, условное обозначение которого приведено на рис. 1.6.1, и *изолированным затвором*, условное обозначение которого приведено на рис. 1.6.2 и 1.6.3.



Оба типа выгодно отличаются от биполярных транзисторов высоким входным сопротивлением, а ПТ с изолированным затвором ещё и полной гальванической развязкой выходной и входной цепей.

Полевые транзисторы являются аналогами биполярных транзисторов, т.е. они также предназначены для усиления и также имеют три электрода: *исток И*, *затвор З* и *сток С*.

По функциональному назначению исток так же, как и эмиттер, поставляет подвижные носители зарядов. Затвор, подобно базе, является управляющим электродом, а сток, как и коллектор, собирает подвижные носители зарядов. Что касается четвёртого электрода – подложки П, то его действие будет рассмотрено при изучении работы транзистора.

Основным свойством ПТ как и БТ, является усиление мощности.

В зависимости от напряжения на выводах транзистор может находиться в следующих основных режимах:

Режим отсечки;

Активный режим;

Режим насыщения.

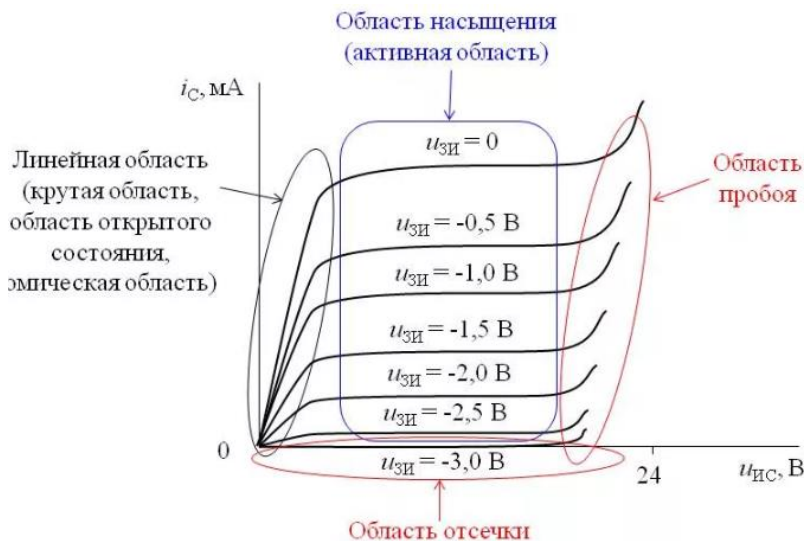
Кроме этих режимов существует ещё инверсный режим, который используется очень редко.

Режим отсечки. Когда напряжение между базой и эмиттером ниже, чем $0.6V - 0.7V$, то р-п переход между базой и эмиттером закрыт. В таком состоянии у транзистора практически отсутствует ток базы. В результате тока коллектора тоже не будет, поскольку в базе нет свободных электронов, готовых двигаться в сторону напряжения на коллекторе. Получается, что транзистор заперт, и говорят, что он находится в режиме отсечки.

Активный режим. В активном режиме на базу подано напряжение, достаточное для того чтобы р-п переход между базой и эмиттером открылся. Возникают токи базы и коллектора. Ток коллектора равняется току базы, умноженном на коэффициент усиления. Т.е активным режимом называют нормальный рабочий режим транзистора, который используют для усиления.

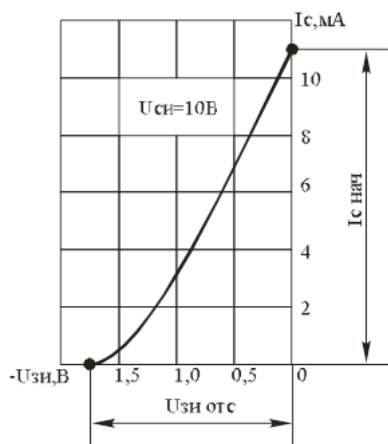
Режим насыщения. Если увеличивать ток базы, то может наступить такой момент, когда ток коллектора перестанет увеличиваться, т.к. транзистор полностью откроется, и ток будет определяться только напряжением источника питания и сопротивлением нагрузки в цепи коллектора. Транзистор достигает режима насыщения. В режиме насыщения ток коллектора будет максимальным, который может обеспечиваться источником питания при данном сопротивлении нагрузки, и не будет зависеть от тока базы. В таком состоянии транзистор не способен усиливать сигнал, поскольку ток коллектора не реагирует на изменения тока базы. В режиме насыщения проводимость транзистора максимальна, и он больше подходит для функции переключателя (ключа) в состоянии «включен». Аналогично, в режиме отсечки проводимость транзистора минимальна, и это соответствует переключателю в состоянии «выключен».

Графически области работы полевого транзистора с n-каналом показаны на рисунке [3]



Выходной (стоковой) называется зависимость тока стока от напряжения исток-сток при константном напряжении затвор-исток. Линейная область, выделенная на рисунке является той омической областью, когда полевой транзистор, по сути, является управляемым сопротивлением по цепи сток-исток, при этом сопротивление канала зависит от уровня управляющего напряжения в цепи затвора.

Область отсечки – фактически, область, когда транзистор закрыт и ток не проводит. Область насыщения (активная область) – имеет почти линейный вид. Здесь происходит перекрытие канала в области стока, которое увеличивается при дальнейшем росте напряжения исток-сток. Соответственно, растет и сопротивление канала, а стоковый ток меняется очень слабо. Именно этот участок характеристики используют в усилительной технике, поскольку здесь наименьшие нелинейные искажения сигналов и оптимальные значения малосигнальных параметров, существенных для усиления. К таким параметрам относятся крутизна характеристики, внутреннее сопротивление и коэффициент усиления.

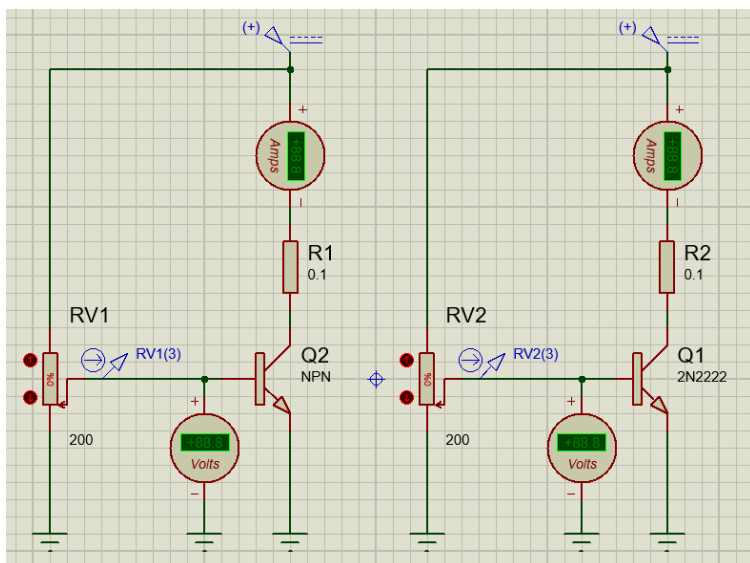


На рисунке показан график еще одной важной зависимости — **стоко-затворной характеристики**. Она показывает то, как зависит ток стока от напряжения затвористок при постоянном напряжении между истоком и стоком. И именно ее крутизна является одним из основных параметров полевого транзистора.

К тому же, если увеличить управляющее напряжение на затворе, транзистор перейдет в полностью открытое состояние и эта область будет являться областью ключевой работы полевого транзистора в цифровых схемах. Однако, если повышать напряжение выше критического порога для данного элемента — будет происходить пробой прибора (область пробоя).

Задание

1. Собрать схему для измерения статического коэффициента передачи тока согласно рисунка



Параметры: источник постоянного напряжения $U=10\text{V}$.
 Левая часть – модель идеального NPN транзистора (NPN Generic Bipolar transistor). Правая часть – реальный транзистор 2n2222.
 Построить для каждого график зависимости тока коллектора от тока базы. Определить статический коэффициент передачи тока (как отношение тока коллектора к току базы).

2. Добавить третий вариант аналогичной схемы с полевым транзистором (мощный MOSFET с управлением логическими уровнями до 5 В, IRL520). Выполнить анализ поведения схемы, описать отличия от двух предыдущих. Построить график зависимости тока стока от напряжения на затворе. Записать вывод о принципиальном отличии полевого транзистора (на примере данного) от биполярного в статическом режиме работы.

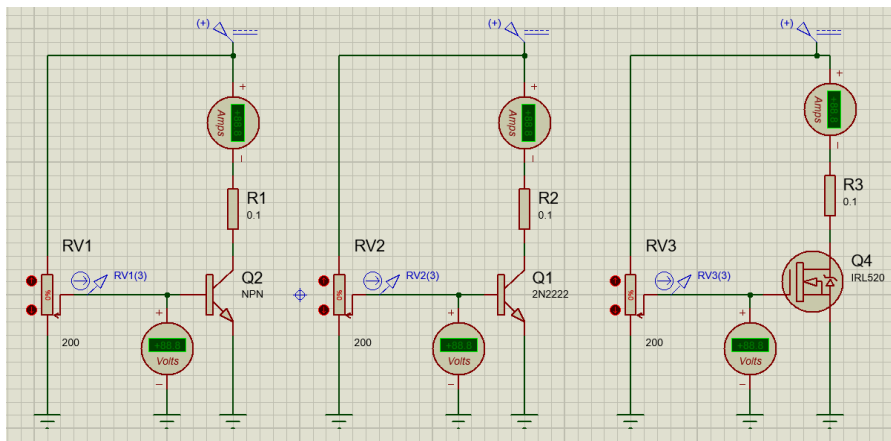


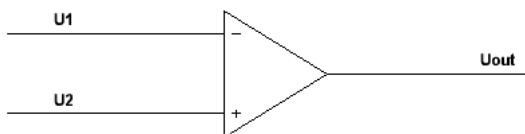
Схема моделирования параметров трех типов транзисторов

Операционные усилители

Операционный усилитель как элементарный аналоговый компонент имеет два входа, очень большой коэффициент усиления сигнала и один выход. Т.о. $U_{\text{вых}} = K * U_{\text{вх}}$ а K в идеальной модели ОУ равно бесконечности. На практике, значения коэффициента усиления лежат в пределах от 1000 до 100000. Входы у ОУ разных типов – один т.н. прямой (обозначается знаком «+»), другой инверсный («-»).

Более того, входы высокоомные. Т.е. их входное сопротивление равно бесконечности в идеальном случае и очень велико в реальном. Порядок величины – сотни МегаОм и более. Соответственно, можно считать, что ток в ОУ не течет.

Напряжение на выходе в таком случае рассчитывается как: $U_{\text{out}} = (U_2 - U_1) * K$



Очевидно, что если на прямом входе напряжение больше чем на инверсном, то на выходе плюс бесконечность. А в обратном случае будет минус бесконечность.

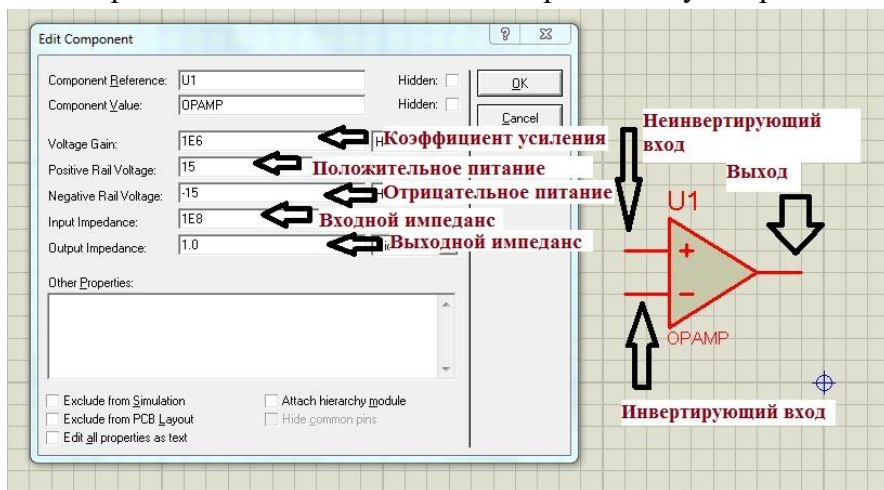
Разумеется в реальной схеме плюс и минус бесконечности не будет, а их замещать будет максимально высокое и максимально низкое напряжение питания усилителя. Таким образом работает схема – компаратор.

Операционный усилитель на схемах очень часто обозначается равнобедренным треугольником. Слева расположены входы, которые обозначены "-" и "+", справа — выход. Напряжение можно подавать на любой из входов, один из которых меняет полярность напряжения (поэтому его назвали

инвертирующим), другой — не меняет (логично предположить, что он называется неинвертирующий). Питание ОУ, чаще всего, двуполярное. Обычно, положительное и отрицательное напряжение питания имеет одинаковое значение (но разный знак!).

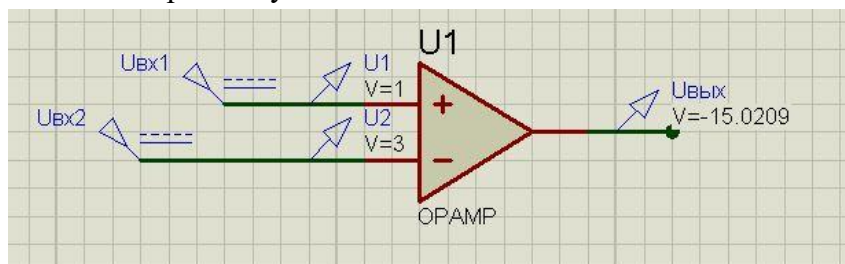
В простейшем случае можно подключить источники напряжения прямо ко входам ОУ. И тогда напряжение на выходе будет рассчитываться по формуле:

$$U_{out} = (U_{in1} - U_{in2}) \cdot G$$
, где U_{in1} — напряжение на неинвертирующем входе, U_{in2} — напряжение на инвертирующем входе, U_{out} — напряжение на выходе и G — коэффициент усиления без обратной связи. Посмотрим на идеальный ОУ с точки зрения симулятора.



Пример моделирования схемы: на неинвертирующий вход подали напряжение в 1В. На инвертирующий 3В. Используем «идеальный» ОУ. Итак, получаем: $(1V - 3V) \cdot 10^6 = -2 \cdot 10^6 V$. Но сигнал будет ограничиваться, т.к. не возможно усилить

сигнал выше нашего напряжения питания. Таким образом, на выходе все равно будет -15В.



Реальное применение ОУ на примере инвертирующего и неинвертирующего усилителей

Есть два таких **основных** правила:

I. Выход операционного усилителя стремится к тому, чтобы дифференциальное напряжение (разность между напряжением на инвертирующем и неинвертирующем входах) было равно нулю.

II. Входы ОУ не потребляют тока.

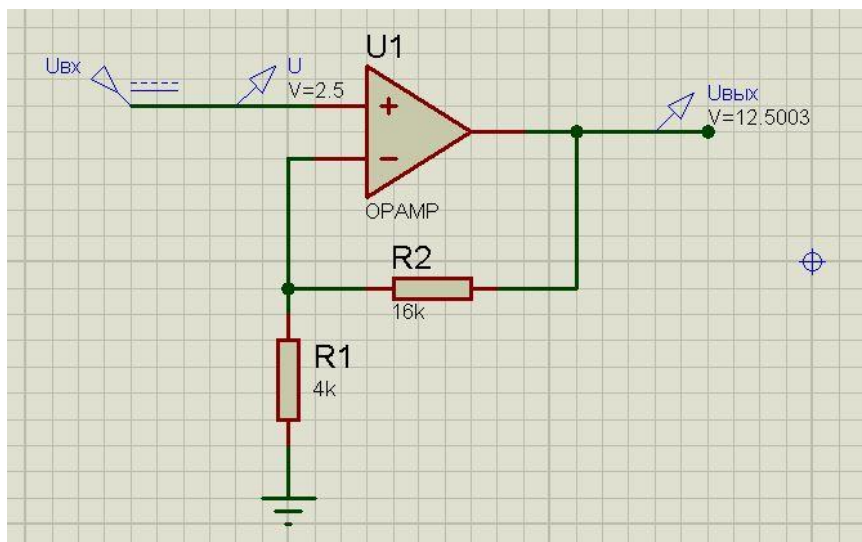
Первое правило реализуется за счет обратной связи. Т.е. напряжение передается с выхода на вход таким образом, что разность потенциалов становится равной нулю.

Неинвертирующий усилитель

Напряжение подается непосредственно на неинвертирующий вход. На инвертирующий вход подводится обратная связь. Напряжение на инвертирующем входе будет:

$U = \frac{U_{out} \cdot R_1}{R_1 + R_2}$, но применяя первое правило, можно утверждать, что

$$U = U_{in} \quad \text{Соответственно:} \quad K = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$



Интеграторы и дифференциаторы

Пример задачи: требуется считать интеграл от входного напряжения.

Решение (математическое): формула заряда конденсатора $Q = CU$. Учитывая, что заряд будет изменяться по времени,

можно предположить: $I_c = \frac{dQ}{dt} = \frac{CdU}{dt}$. Неинвертирующий вход подключен на «землю». Напряжение на конденсаторе равняется противоположному напряжению на выходе, другими словами $U_c = -U_{out}$.

Это значит, что $I_c = -\frac{CdU_{out}}{dt} = \frac{U_i}{R}$. Далее, решая и интегрируя, получаем финальную формулу в общем виде:

$$U_{out} = -\frac{1}{RC} \int U_{in} dt$$

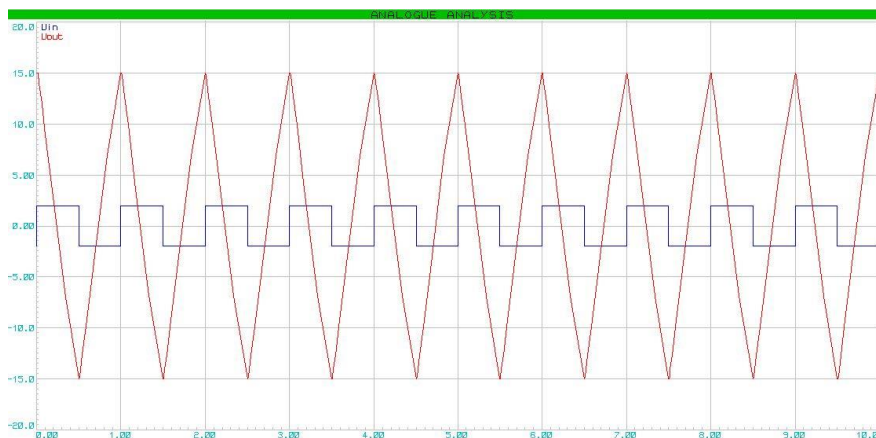
. В итоге, стоит обратить внимание на то, что напряжение на выходе играет существенную роль для каждого момента времени t . Его возьмем как свободный элемент:

$$U_{out} = U_{out\ t0} - \frac{1}{RC} \int_{t0}^{t1} U_{in} dt$$

Логично предположить, что интеграция идет по времени от $t0$ до $t1$.

Практическая задача: Конденсатор разряжен. Выходное напряжение равно нулю. Схема выключена. Конденсатор имеет емкость 1мкФ. Резистор 30кОм. Входное напряжение сначала равно -2В, затем 2В. Полярность меняется каждую секунду. Иными словами, на вход подключен генератор прямоугольных импульсов.

Решение:



На выходе был получен «пилообразный» сигнал. Конденсатор влияет на скорость (резкость) спада. Он должен изменяться в разумных пределах, чтоб успевать *заряжаться/разряжаться, и чтоб не разряжаться/разряжаться** слишком быстро. Кстати, логично будет предположить, что сигнал усиливается в пределах питания ОУ.

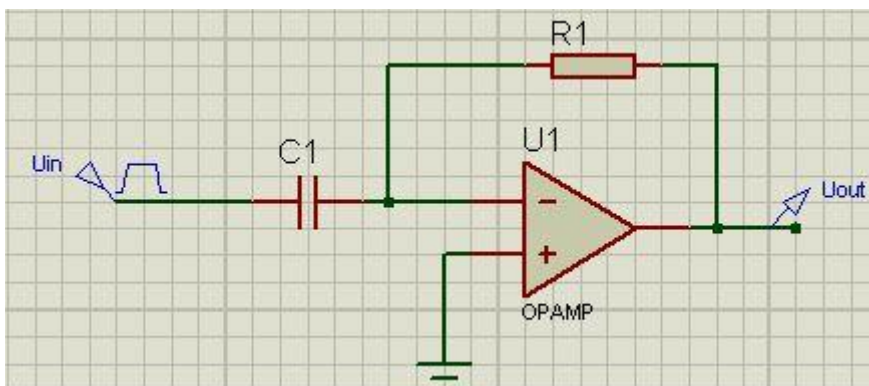
* Время заряда/разряда конденсатора определяется как: $T = 5\tau$, где τ — это время переходного процесса. Для RC-цепи справедлива формула $\tau = RC$. За время T конденсатор будет полностью заряжен/разряжен на 99%. Иногда для расчетов используют время 3τ

Дифференциатор

Формула аналогового вычисления: $U_{out} = -RC \frac{dU_{in}}{dt}$. Ток через

конденсатор равен $I_c = C \frac{dU_c}{dt}$. Раз операционный усилитель близок к идеальному, то можно предположить, что ток через конденсатор равен току через резистор. $U_{out} = RI_R = -RI_c$, а значит, если подставить значение тока:

$$U_{out} = -RC \frac{dU_{in}}{dt}$$



Компаратор

Компаратор — это такое устройство, которое сравнивает два входных напряжения. Состояние на выходе меняется скачкообразно в зависимости от того, какое напряжение больше.

Пример: на первый вход подается постоянное напряжение, равное 3В. На второй вход — синусоидальный сигнал с амплитудой 4В. Снимается напряжение с выхода

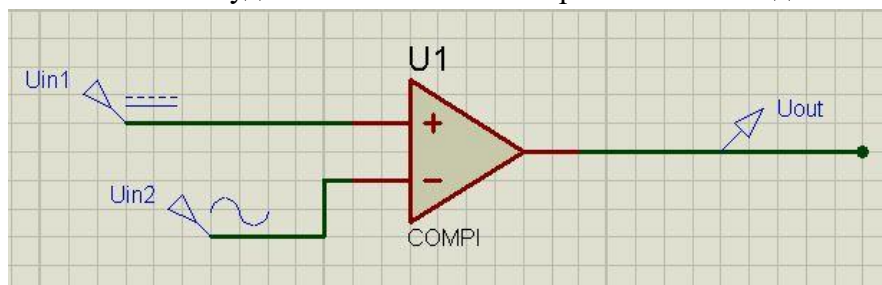
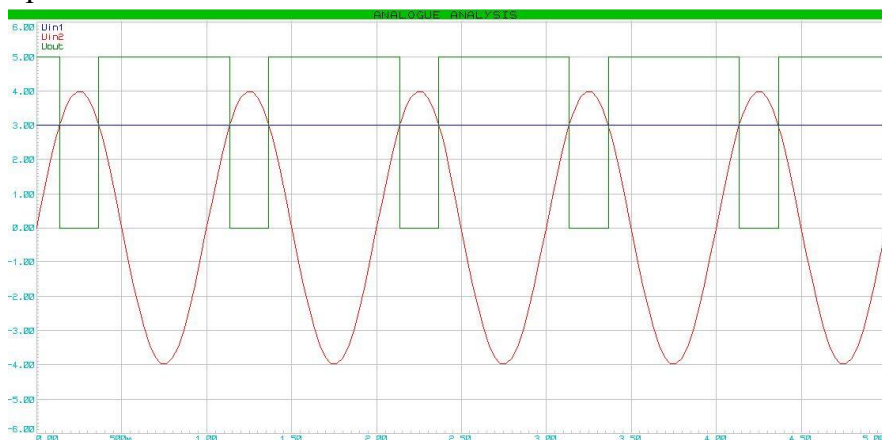


График зависимости выходного напряжения от входного приведен ниже



Активный фильтр

Существуют пассивные RC-, LC- и RLC-фильтры, названия которых отражают составляющие их детали — пассивные элементы (резисторы, конденсаторы, катушки

индуктивности). Они вполне подходят для большинства задач. Но для некоторых целей очень важно иметь фильтры с более плоскими характеристиками в полосе пропускания и более крутыми склонами. Такие задачи решаются с применением активных фильтров, выполненных на операционных усилителях.

Типы фильтров:

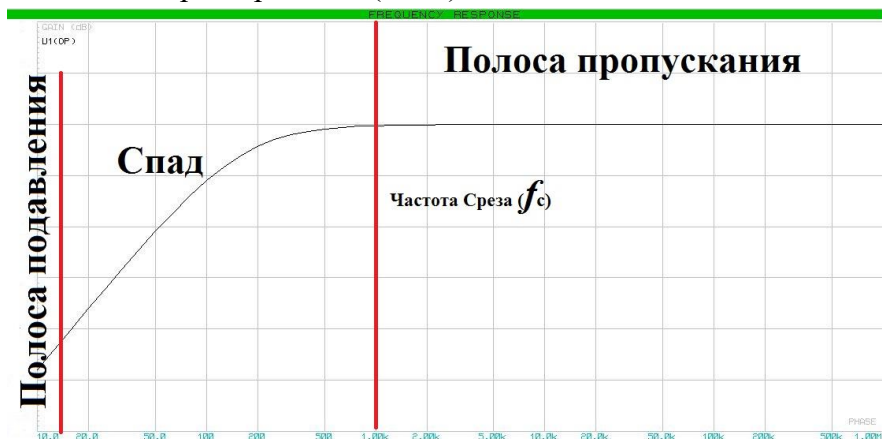
Фильтр Нижних Частот (ФНЧ) — пропускает сигнал, который ниже определенной частоты (ее еще именуют частотой среза).

Фильтр Высоких Частот (ФВЧ) — пропускает сигнал выше частоты среза.

Полосовой Фильтр — пропускает только определенный диапазон частот.

Режекторный Фильтр — задерживает только определенный диапазон частот.

В качестве примера, на рисунке приведена амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) ФВЧ.



Базовые схемы фильтров имеют свои названия по авторам, предложившим их конструкцию.

Фильтр Баттерворда — обладает самой плоской характеристикой в полосе пропускания, но имеет плавный спад.

Фильтр Чебышева — обладает самым крутым спадом, но у него самые неравномерные характеристики в полосе пропускания.

Фильтр Бесселя — имеет хорошую фазочастотную характеристику (ФЧХ) и вполне «приличный» спад. Считается лучшим выбором, если нет специфического задания.

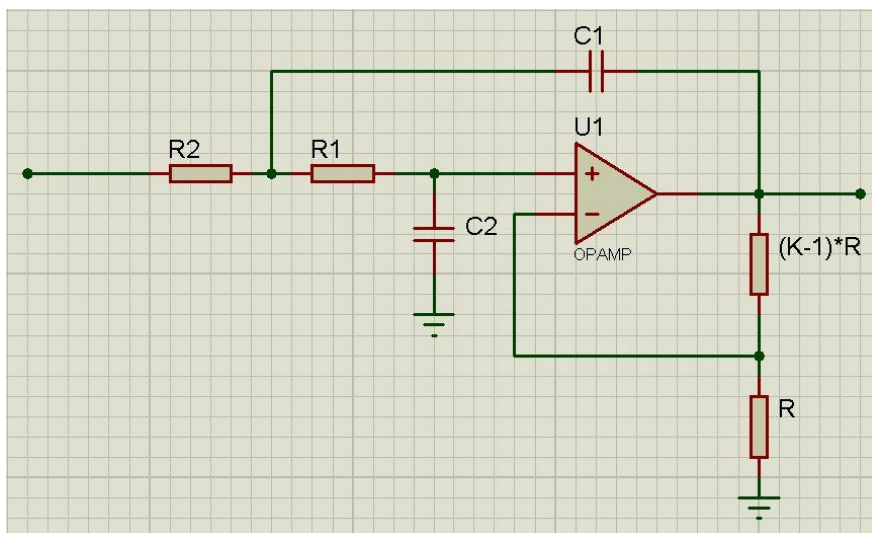
Есть несколько методов расчета. Самый простой — это «табличный» метод, таблицы можно найти в соответствующей литературе. Одной из лучших, по праву, считается Хоровиц, Хилл «Искусство Схемотехники». Таблица для ФНЧ приведена ниже.

| n | Баттерворд | Бессель | | Чебышев | |
|---|------------|---------|-------|---------|-------|
| | К | f_H | К | f_H | К |
| 2 | 1.586 | 1.274 | 1.268 | 1.231 | 1.842 |
| 4 | 1.152 | 1.432 | 1.084 | 0.597 | 1.582 |
| | 2.235 | 1.606 | 1.759 | 1.031 | 2.660 |
| 6 | 1.068 | 1.607 | 1.040 | 0.396 | 1.537 |
| | 1.586 | 1.692 | 1.364 | 0.768 | 2.448 |
| | 2.483 | 1.908 | 2.023 | 1.011 | 2.846 |
| 8 | 1.038 | 1.781 | 1.024 | 0.297 | 1.522 |
| | 1.337 | 1.835 | 1.213 | 0.599 | 2.379 |
| | 1.889 | 1.956 | 1.593 | 0.861 | 2.711 |
| | 2.610 | 2.192 | 2.184 | 1.006 | 2.913 |

Практическая задача. Построить фильтр низких частот второго порядка с частотой среза 150 Гц по характеристике Баттерворда.

Решение. Если требуется фильтр n -ного четного порядка, это означает, что в нем будет $n/2$ операционников. В данном задании — один.

Схема ФНЧ:

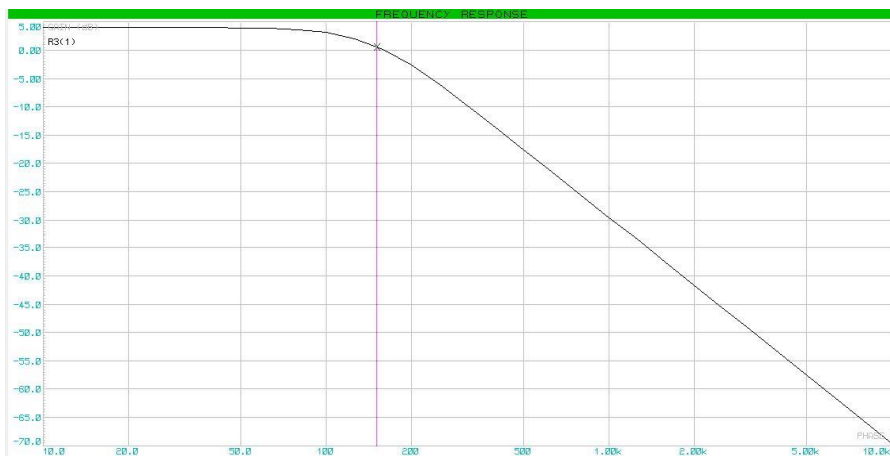


Для данного типа расчета берется во внимание, что $R1 = R2$, $C1 = C2$. Из таблицы видно, что $K = 1.586$. Для фильтра низких частот справедливо:

$$RC = \frac{1}{2\pi f_c}, \text{ где, разумеется, } f_c \text{ — это частота среза.}$$

Сделав подсчет, получаем $RC = 0.0011$.

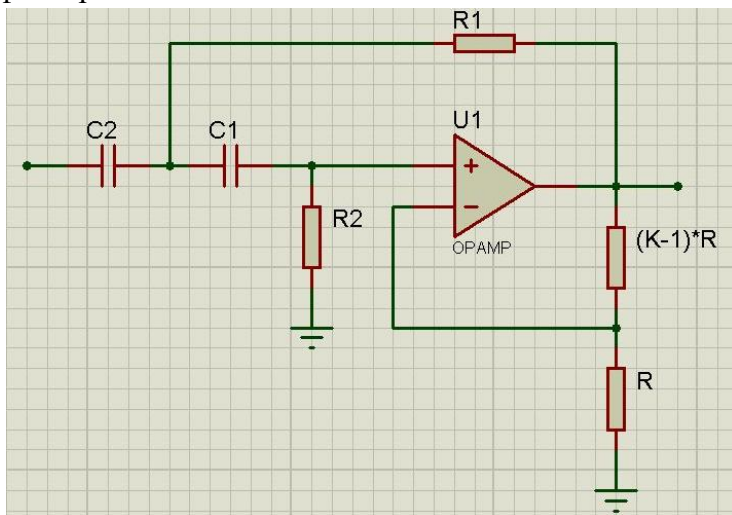
Подбор элементов. ОУ — «идеальный». Резистор — значение сопротивления в пределах от 2кОм до 500кОм. Оптимум может быть 11 кОм. Соответственно, емкость конденсатора станет равной 0.1 мкФ. Для резисторов обратной связи значение R берется 10 кОм. Тогда, для верхнего значение K берется из таблицы. Следовательно, нижний будет иметь значение сопротивления $R = 10$ кОм, а верхний 5.8 кОм. Результат моделирования АЧХ показан на рисунке ниже.



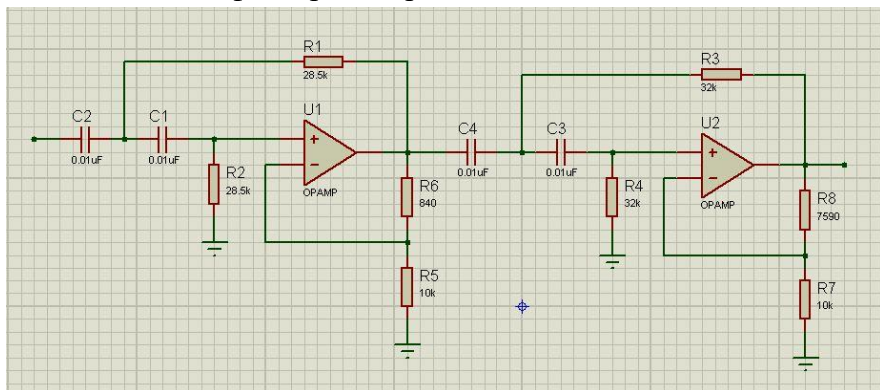
Практическая задача. Построить фильтр высоких частот четвертого порядка с частотой среза 800 Гц по характеристике Бесселя.

Решение. Раз фильтр четвертого порядка, то в схеме будет два операционных усилителя, включенных каскадно, каждый по схеме ФВЧ.

Сам фильтр выглядит так



Итоговая схема фильтра 4 порядка



Теперь расчет. Для фильтра четвертого порядка в таблице указаны 2 значения K . Логично, что первое предназначается для первого каскада, второе — для второго. Значения K равны 1.432 и 1.606 соответственно. Таблица была для фильтров низких частот (!). Для расчета ФВЧ надо кое-что изменить. Коэффициенты K остаются такими же в любом случае. Для характеристик Бесселя и Чебышева изменяется параметр f_H — нормирующая частота. Она будет равна теперь:

$\frac{1}{f_H}$ Для фильтров Чебышева и Бесселя как для нижних частот, так и для высоких справедлива одна и та же формула:

$RC = \frac{1}{2\pi f_c f_H}$. Учтите, что для каждого отдельного каскада придется считать отдельно. Для первого каскада:

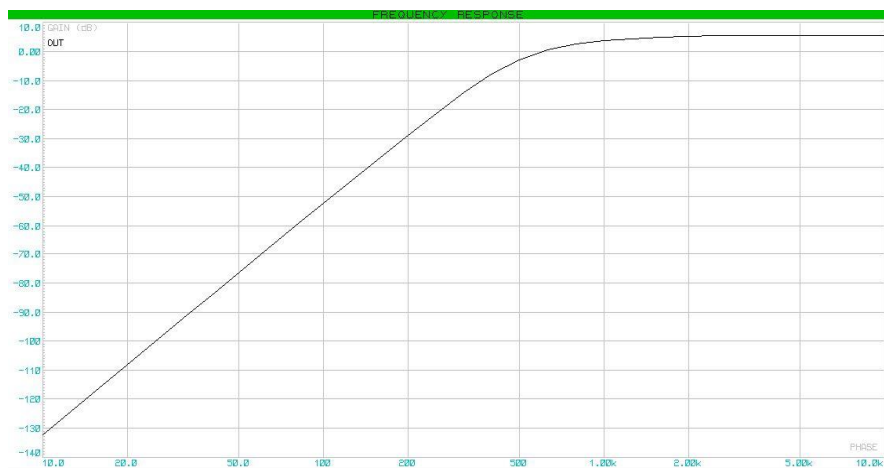
$$RC = \frac{1}{2 \cdot 3.14 \cdot 800 \cdot \frac{1}{1.432}} = 2.85 \cdot 10^{-4}$$

Пусть $C = 0.01$ мкФ, тогда $R = 28.5$ кОм. Резисторы обратной связи: нижний, как обычно, 10 кОм; верхний — 840 Ом.

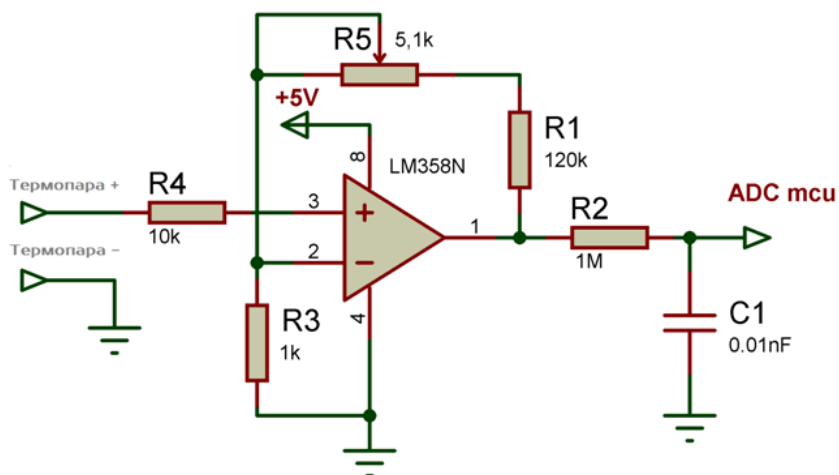
$$RC = \frac{1}{2 \cdot 3.14 \cdot 800 \cdot \frac{1}{1.606}} = 3.20 \cdot 10^{-4}$$

Для второго каскада:

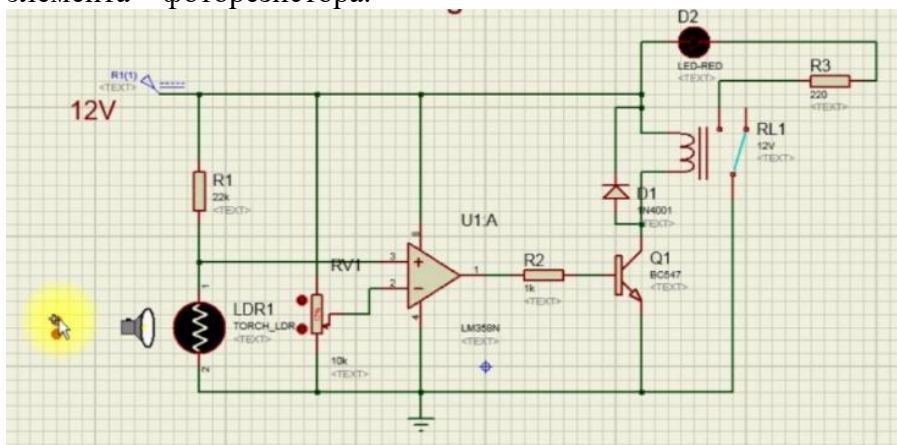
Емкость конденсатора оставим неизменной. Раз $C = 0.01$ мкФ, то $R = 32$ кОм. АЧХ полученного фильтра показана на рисунке.



Пример схемы с ОУ для усиления сигнала с термопары.



Пример схемы устройства, осуществляющего включение наружного освещения при затемнении чувствительного элемента – фоторезистора.

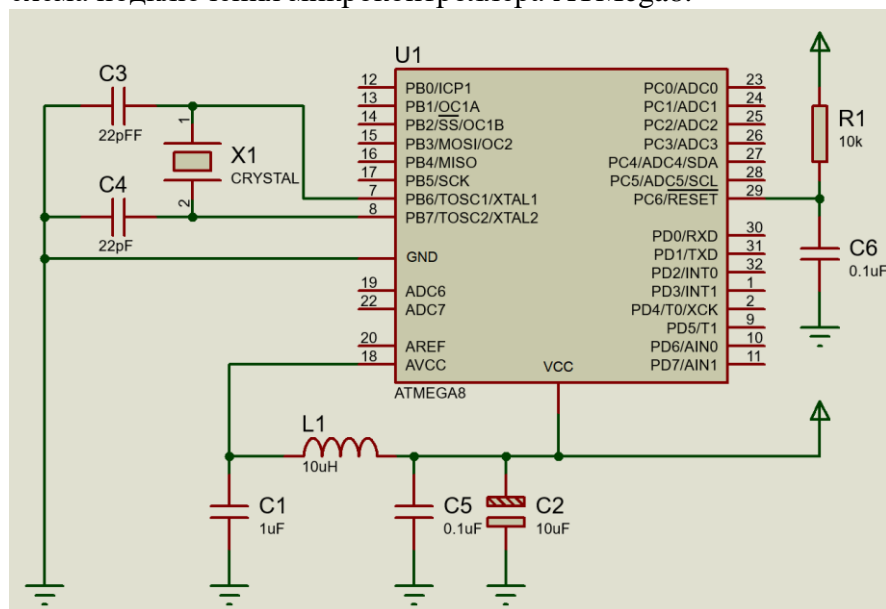


Цифровая схемотехника

Цифровая схемотехника отличается от аналоговой тем, что уровни сигналов являются фиксированными и должны находиться в пределах значений, соответствующих логическому нулю и логической единице. К примеру, для микроконтроллеров серии ATMega уровень гарантированного логического нуля соответствует $\leq 20\%$ уровня питающего напряжения, а уровень гарантированной логической единицы $\geq 60\%$ питающего напряжения. За счёт этого удастся существенным образом снизить число ошибок при передаче и обработке информации, а также значительно упростить электрические схемы.

Таким образом, импульсная и цифровая техника базируется на работе транзистора в качестве ключа, который замыкает и размыкает цепи нагрузки.

В тоже время элементарная база цифровой схемотехники, за исключением цифровых элементов, полностью совпадает с аналоговой. В качестве примера на рисунке показана базовая схема подключения микроконтроллера ATMega8.



Компонент X1 является кварцевым резонатором, он определяет частоту колебаний встроенного задающего тактового генератора, а конденсаторы C3 и C4 облегчают запуск колебаний. Дроссель L1 и конденсатор C1 являются фильтром по цепи питания аналоговой части МК (вход AVCC), они снижают уровень цифровых помех (обусловленных синхронным переключением элементов в цифровой части МК) и, соответственно, пиками энергопотребления. При этом вывод AREF не подключен, т.к. его обвязка зависит от режима работы аналоговой части МК. Конденсаторы C2 и C5 снижают уровень пульсаций по цепи питания МК. При этом C5 обычно используют керамический, а C2 – электролитический, желательно низкоимпедансный (т.н. LowESR). Цепь сброса (вывод Reset) подключена к положительному полюсу питания через подтягивающий резистор R1, а для исключения влияния помех на цепь сброса вывод Reset подключен к общей линии через керамический конденсатор C6.

Данная схема является базовой, на ней не обозначены дополнительные компоненты, подключаемые к портам ввода-вывода или же линии данных для цифровых интерфейсов.

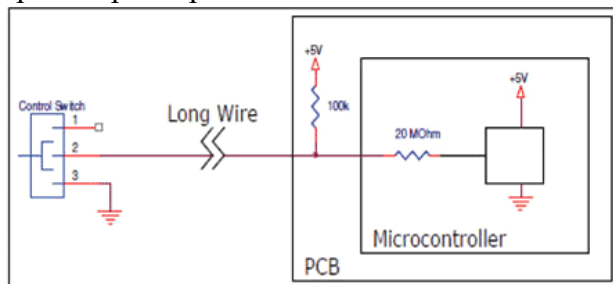
Защита входов цифровой схемотехники

Важным этапом при проектировании цифровых схем является защита входов от внешних воздействий в виде различных помех, дребезга контактов и статического электричества.

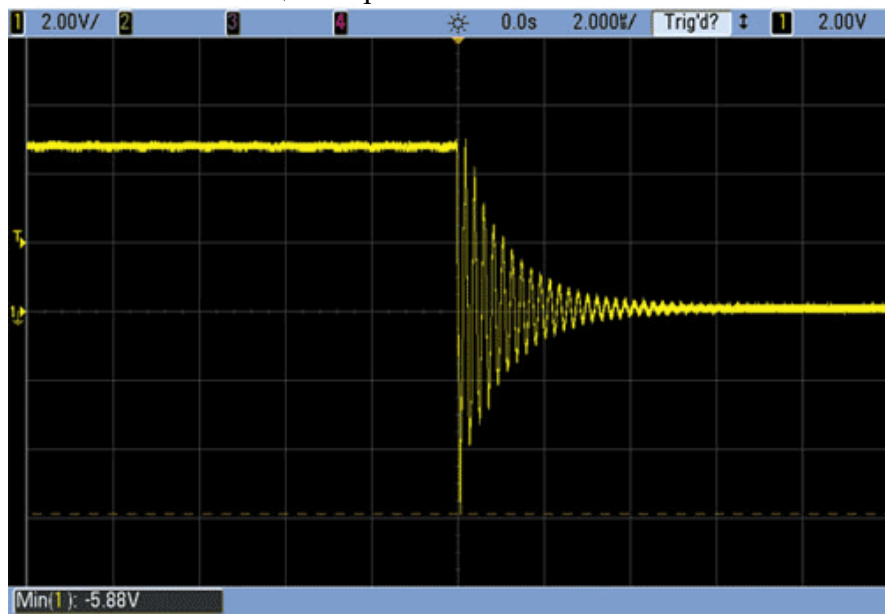
Обычно сами по себе входы цифровых устройств имеют высокий входной импеданс. Это показано на рисунке. Также, показан резистор, подтягивающий вход к положительному полюсу питания.

На этом рисунке видна проблема незащищённости входа. Любое большое напряжение, появившееся в результате индукции, нажатия кнопки, ошибки пользователя или по другой причине и попавшее на вход микроконтроллера может вывести

его и всю систему из строя. В связи с этим, необходимо защитить входы микроконтроллера.



При изменении положения переключателя напряжение идет по длинным проводам, что вызывает индукцию. Вследствие этого, на микроконтроллер попадает повышенное напряжение. Это показано на осциллограмме.

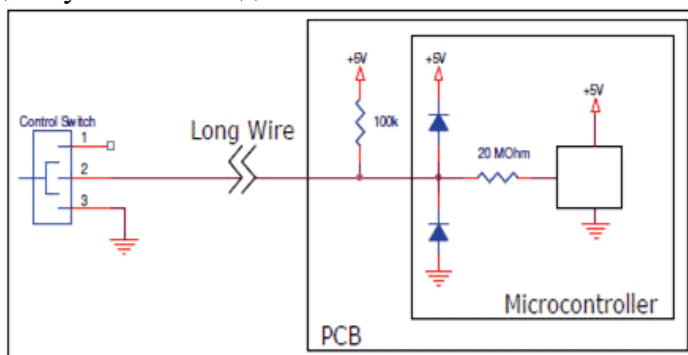


Обратите внимание на минимальное напряжение вызванное индукцией -5.88В. Это более чем достаточно, чтобы вызвать проблемы в электронной системе.

Защита входов. Важным аспектом входов микроконтроллера и большинства логики

являются диоды используемые для защиты входа, которые были исключены из упрощенной модели на предыдущем рисунке. Обычно падение напряжения на них около 0.7В.

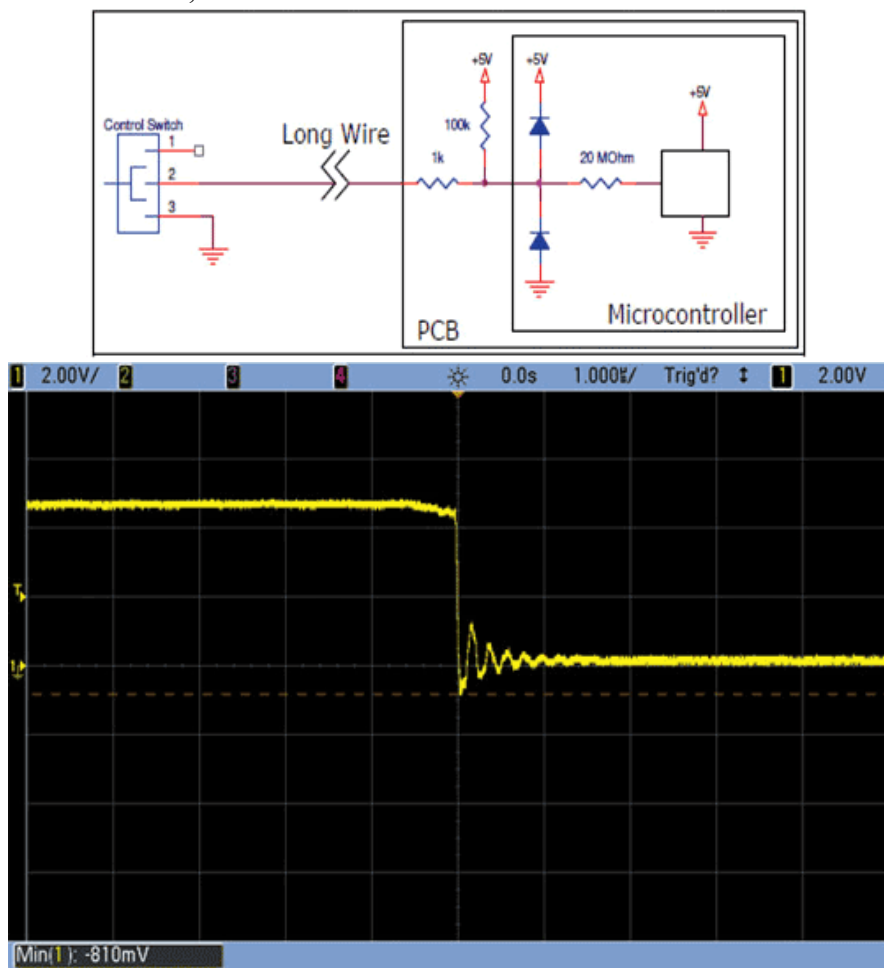
В идеальных условиях, это может защитить микроконтроллер. Но если напряжение достаточно велико, и подается на вход достаточно долго, оно может разрушить внутренние диоды, возможно замкнув их. Это приведёт к прямой связи входа и шины питания, и при следующем скачке напряжения может привести к поломке всех элементов подключенных к этой линии питания, что может привести к непредсказуемым последствиям.



Даже если диоды не были пробиты, протекание большого тока и напряжения может привести к повреждению микроконтроллера, что также приведёт к непредсказуемым последствиям. Первый шаг для защиты входа - это ограничение тока

Ограничение тока. Самый простой способ защиты - это токоограничивающий резистор. Сопротивление этого резистора таково, что падение напряжения на нем не влияет на напряжение на входе контроллера. Этот резистор и входной резистор микроконтроллера образуют делитель напряжения, следовательно, его значение может быть довольно большим. Для большинства входов достаточно использовать значения от 100 Ом и до 10 кОм. Эта защита хорошо работает для коротких проводов. Осциллограмма показывает эффективность

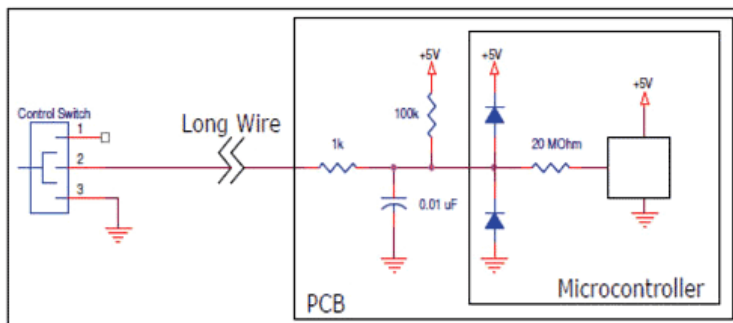
этой защиты. Минимальное напряжение с такой защитой составило $-0,810\text{ В}$.



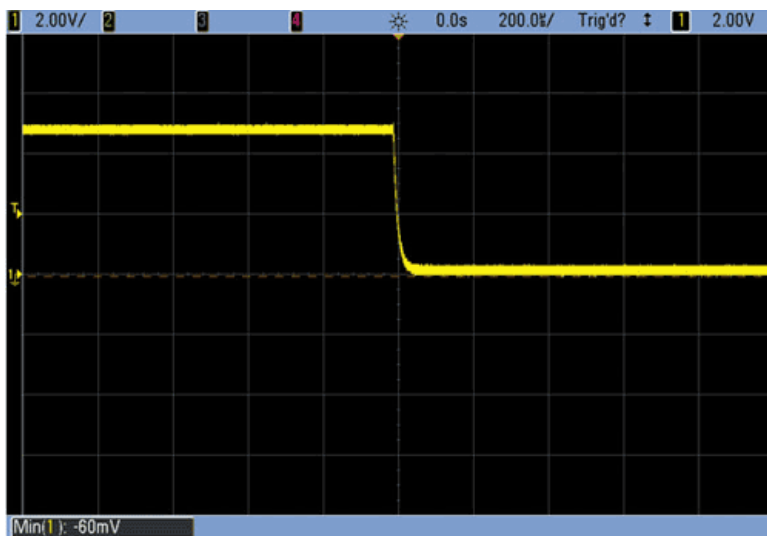
Фильтрация. На рисунке выше показан простой ограничитель тока. При добавлении к данной схеме конденсатора получится ФНЧ (Фильтр Низких Частот), который обеспечит ещё более высокий уровень защиты.

При использовании этой схемы следует внимательно относиться к номиналам компонентов. Из-за предельных

частотных характеристик схемы, значения резисторов и конденсаторов должно быть рассчитаны таким образом, чтобы микроконтроллер не пропустил ни одного сигнала. Для их расчета используйте следующую формулу: **Время нарастания сигнала = $2.2RC$** .



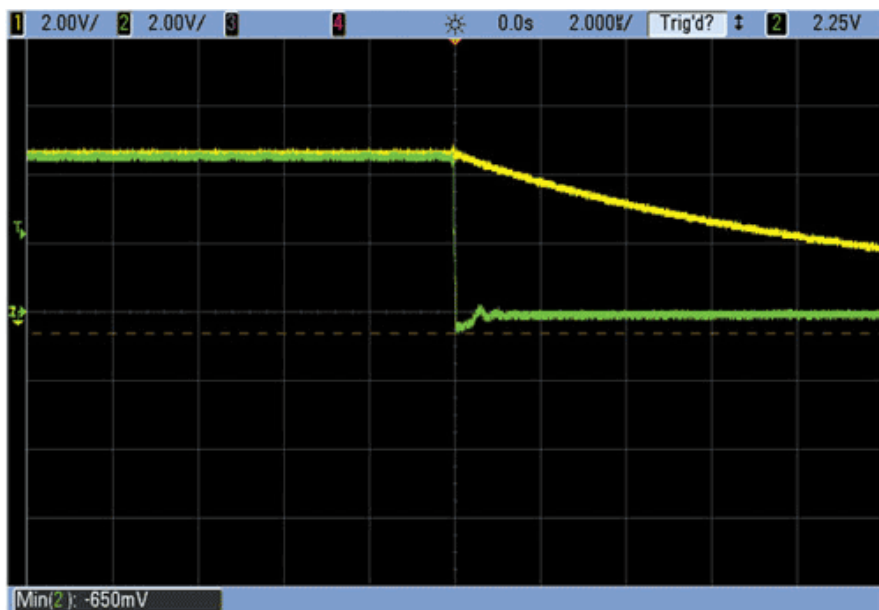
Расчет значений R и C: определите максимальную входную частоту. Выберите значение R. Используйте стандартное значение, например 1 кОм. С помощью вышеприведенной формулы определите значение C. Возможно значение C придётся немного изменить в ходе использования устройства. На рисунке значения R и C 1 кОм и 0,01 мкФ, т.е. эта схема рассчитана на максимальную частоту 1 кГц. На осциллограмме показана эффективность этой схемы. Обратите внимание на более гладкие края. Это заслуга конденсатора.



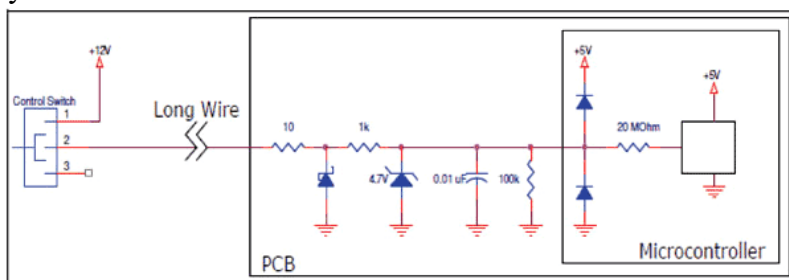
Также, RC фильтр обрезает ложные сигналы, которые могут давать неверные показания микроконтроллеру. К сожалению, при длинных проводах с этой схемой всё ещё могут быть скачки напряжения, что опасно для внутренних диодов

Внешние диоды. Чтобы обезопасить внутренние диоды микроконтроллера, можно использовать внешние диоды Шоттки. Диоды Шоттки используются из-за того, что падение напряжения на них 0.2В, в отличие от падения 0.7В у внутренних диодов. Обратите внимание, что для защиты диодов Шоттки от перегрузки по току используется резистор. Поскольку эти диоды работают очень короткое время, резистора около 10 Ом хватит. Если ваши диоды Шоттки выдерживают кратковременные импульсы высокого тока, резистор можно упустить.

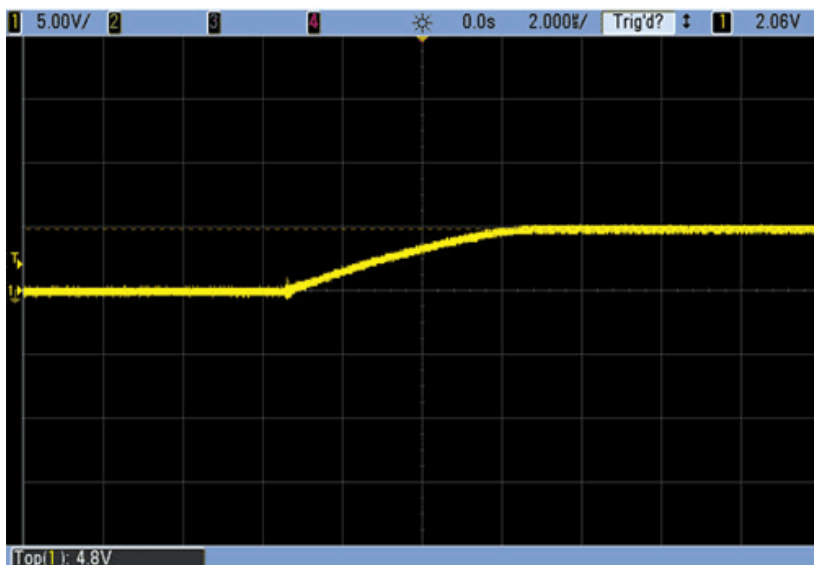
На осциллограмме показана эффективность этой схемы. Желтая линия – замеры на плюсе конденсатора, зелёная линия – замер между резистором 10 Ом и диодом Шоттки. Обратите внимание на отрицательный всплеск -0,650 В, что ниже напряжения падения встроенных диодов микроконтроллера.



Снятие сигнала с источника высокого напряжения. Схема для снятия показаний с повышенным напряжением показана на рисунке.



Диод служит для защиты от импульсов со значением меньше нуля. После него использован стабилитрон для стабилизации напряжения на входе, он также убирает необходимость использования подтягивающего резистора. Обратите внимание, что в данном случае, ограничительный резистор достаточно мал, чтобы обеспечить достаточный ток для стабилитрона.

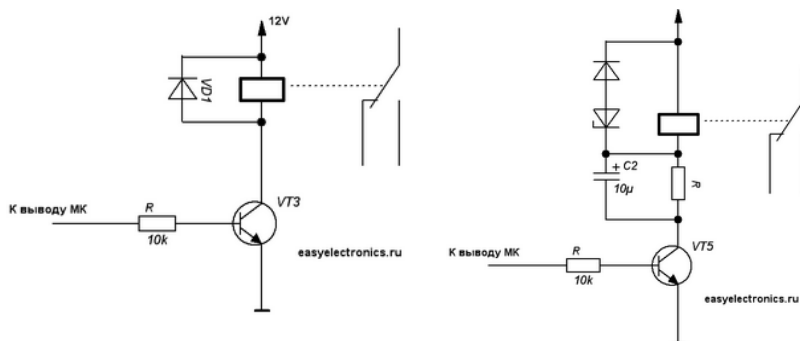


На осциллограмме показана эффективность этой схемы при подачи на вход 12В. Для данного раздела использованы материалы [4]

Управление мощной нагрузкой

Кроме работы со входами, цифровая электроника включает в себя управление разнообразной нагрузкой. В общем виде эти задачи можно разделить на управление нагрузкой по цепи постоянного и переменного тока. Кроме того, каждый раздел может быть разделен на задачи включения-выключения и задачи высокоскоростного управления.

Управление нагрузкой с помощью электромагнитного реле. Универсальный способ, достигается изоляция цепей управления от коммутируемых цепей, а также не имеет значения тип коммутируемой нагрузки. В тоже время, контакты реле имеют ограниченный срок службы, особенно в случае индуктивной нагрузки. Кроме того, за счет длительного времени переключения (десятки миллисекунд) невозможно плавное управление переходными процессами.



Самый простой вариант электронного ключа показан на рисунке слева. Диод требуется для защиты транзистора от напряжения катушки реле, возникающего за счёт явления самоиндукции. Правый вариант – обеспечивает снижение тока через катушку реле после замыкания (т.е. для удержания требуется значительно меньший ток, чем для переключения). Кроме того, значительно снижается задержка на выключение. При размыкании реле энергия магнитного поля стравливается через диод, только вот при этом в катушке продолжает течь ток, а значит она продолжает держать якорь. Увеличивается время между снятием сигнала управления и отключением контактной группы. Нужно сделать препятствие протеканию тока, но такое, чтобы не вывело из строя транзистор. Добавим стабилитрон с напряжением открывания ниже предельного напряжения пробоя транзистора. Из даташита видно, что предельное напряжение Коллектор-База (Collector-Base voltage) для BC549 (использован в качестве примера) составляет 30 вольт. Значит используется стабилитрон на 27 вольт! В итоге, мы обеспечиваем бросок напряжения на катушке, но он контролируемый и ниже критической точки пробоя. Тем самым значительно (в разы!) снижается задержка на выключение.

Использование специальных микросборок. Когда на раскачку нагрузки мощности одного транзистора не хватает, то применяют **составной транзистор (транзистор Дарлингтона)**. Тут суть в том, что один транзистор открывает

другой. А вместе они работают как единый транзистор с коэффициентом усиления по току равным произведению коэффициентов первого и второго транзисторов. Мало того, существуют **сборки дарлингтонов**. Когда в один корпус упаковывают сразу несколько. Отличный пример такой сборки — очень популярная и легко доступная **ULN2003**, способная выдать до **500мА** на каждый из своих семи сборок. Выходы можно **включать в параллель**, чтобы повысить предельный ток.

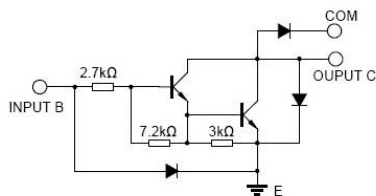
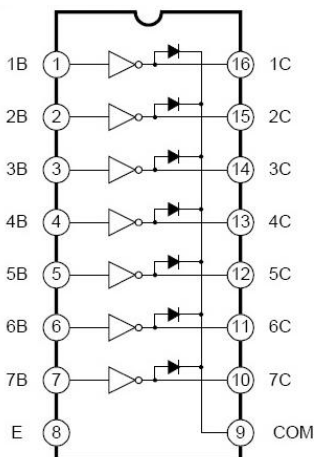
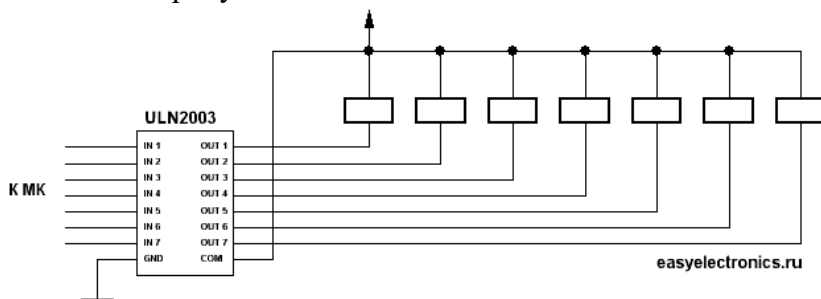
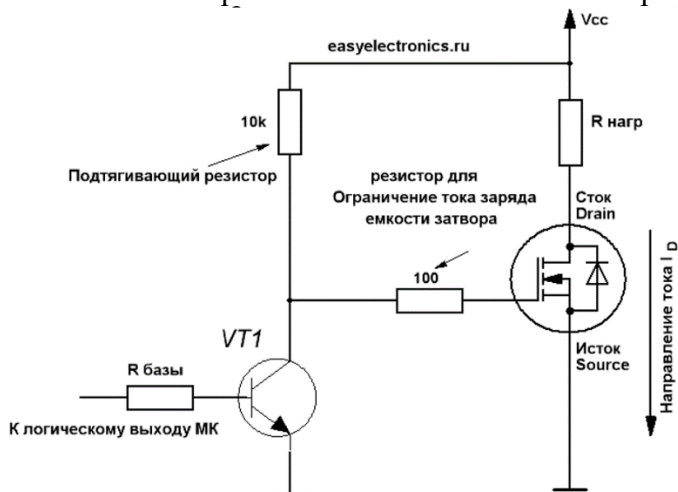


Схема управления нагрузкой с помощью такой сборки показана на рисунке ниже.



В случае, когда нагрузка требует большего напряжения или тока, чем могут обеспечить готовые сборки – применяются электронные ключи. Вариант такой схемы показан на рисунке.



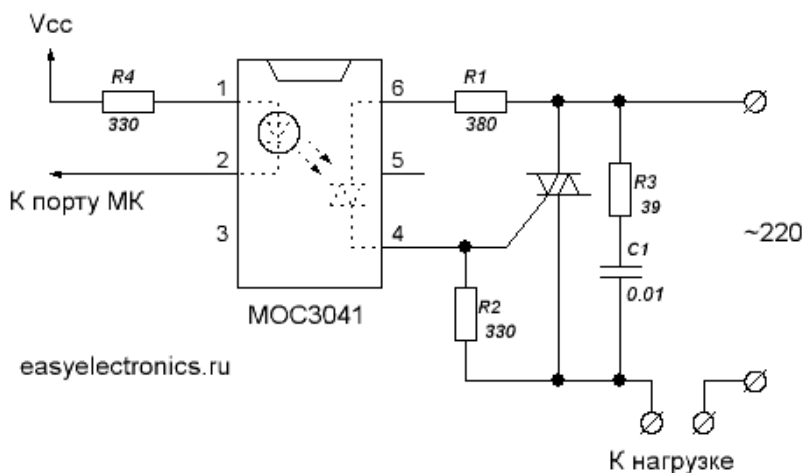
Стоит отметить, что существуют специальные микросхемы, т.н. драйверы верхнего и нижнего плеча. Они сами формируют выходной сигнал для мощного выходного транзистора с учетом требований к уровню, полярности. Примером такой микросхемы является IR2117 [5].

Управление мощной нагрузкой по цепи переменного тока

Для управления в цепи переменного тока целесообразно использование тиристоров и симисторов. **Тиристор**, аналогично диоду пропускает ток только в одну сторону. Но есть у него одна особенность, отличающая его от диода кардинально — **управляющий вход**. Если на управляющий вход не подать **ток открытия**, то **тиристор** не пропустит ток даже в прямом направлении. Но стоит подать хоть краткий импульс, как он открывается и остается открытым до тех пор, пока есть прямое напряжение. Если **напряжение снять или поменять полярность, то тиристор закроется**. Полярность управляющего напряжения предпочтительно должна совпадать с полярностью напряжения на аноде.

Если **соединить** встречно параллельно два **тиристора**, то получится **симистор** — удобный элемент для коммутации нагрузки на переменном токе.

На положительной полуволне синусоиды пропускает один, на отрицательной другой. Причем пропускают только при наличии управляющего сигнала. Если сигнал управления снять, то на следующем же периоде оба тиристора закроются и цепь оборвется.

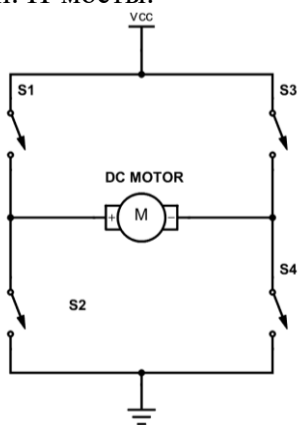


Но тут есть одна особенность — коммутируется силовая высоковольтная цепь, 220 вольт. Поэтому требуется использовать **потенциальную развязку**. То есть сделать так, чтобы между высоковольтной и низковольтной частью не было прямого электрического соединения. Например, сделать **оптическое разделение**. Для этого существует специальная сборка — симисторный оптодрайвер **МОС3041**. В самом оптодрайвере сигнал подается светодиодом, а значит можно управлять им от ножки микроконтроллера без всяких дополнительных средств усиления сигнала. [6] Важно, чтобы напряжение, на которое рассчитан конденсатор было как минимум раза в полтора два выше коммутируемого напряжения (относительно его действующего значения).

Твердотельные реле. На сегодняшний день часто рекомендуется к применению схемы т.н. «твердотельные реле». Однако, нужно понимать, что по сути такое реле – это тот же тиристор или полевой транзистор со схемой управления логическим сигналом и опторазвязкой в одном корпусе.

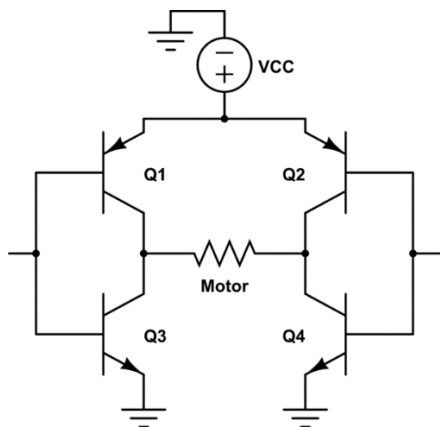
Специализированные элементы управления – Н-мосты

При управлении нагрузкой, для которой требуется не только наличие электрического тока, а еще и изменение направления его протекания, применяются специальные схемы, т.н. Н-мосты.



Примером такой нагрузки является коллекторный электродвигатель, при изменении полярности напряжения будет изменяться и направление вращения якоря двигателя. Общая концепция Н-моста показана на рисунке.

Простейшая схема (упрощенный вариант) показан на рисунке ниже.



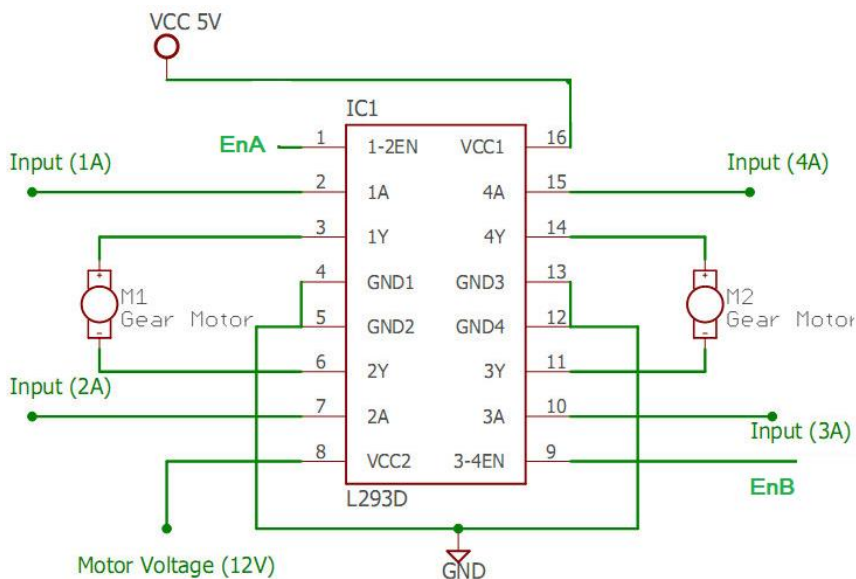
Для того чтобы исключить возможное короткое замыкание Н-мост на транзисторах дополняется входной логикой, которая исключает появление короткого замыкания. В современных электронных устройствах мостовые схемы изменения полярности дополняются устройствами,

обеспечивающими плавное и медленное торможение перед включением реверсного режима.

Существуют уже готовые микросборки, в которых реализованы полноценные схемы Н-мостов и логическая часть управления ими. Примером таких схем являются L293, L298. Микросхема L293D представляет собой два Н-моста, а значит можно управлять сразу двумя двигателями. Каждый мост снабжен четырьмя защитными диодами и защитой от перегрева. Максимальный ток, который может передать L293D на двигатель — 1.2А. Рабочий ток — 600мА. Максимальное напряжение — 36 В.

Схема включения L293D показана на рисунке ниже. VCC5V требуется для питания встроенной логики микросхемы. Таблица истинности для одного канала выглядит следующим образом.

| EnableA | Input 1A | Input2A | Режим |
|---------|----------|---------|---------------------------|
| 1 | 0 | 1 | Вращение влево (условно) |
| 1 | 1 | 0 | Вращение вправо (условно) |
| 1 | 0 | 0 | Торможение (КЗ выходов) |
| 1 | 1 | 1 | |
| 0 | X | X | Свободное вращение |



Входы каждого канала толерантны к логическому напряжению 5В. Напряжение питания моторов может быть от 5 и до 36В.

Часто, схему проектируют так, что комбинация «1» и «0» на входах 1А, 2А, 3А, 4А определяет направление вращения двигателей в каждом канале (см. таблицу), а подавая ШИМ-сигнал на разрешающие входы (EnА, EnВ) происходит управление интегральным током, проходящим через обмотку, т.е. – управление моментом вращения (и, соответственно, скоростью) двигателя.

Схема включения более мощного Н-моста L298D, в целом, аналогична приведенной.

Список рекомендуемой литературы

1. Муромцев Д.Ю., Тюрин И.В., Белоусов О.А., Курносов Р.Ю. Информационные технологии проектирования радиоэлектронных средств: Учебное пособие. – СПб.: Издательство «Лань», 2018. – 412с.
2. Трухин М.П. Моделирование сигналов и систем. Дифференциальные, дискретные и цифровые модели динамических систем: учебное пособие / М.П. Трухин; под научной редакцией С.В. Поршнева. – Санкт-Петербург: Лань, 2019. – 228 с.
3. Останин Б.П. Полевые транзисторы. Презентация. Слайд 7. Всего 27. <http://900igr.net/prezentacija/fizika/polevye-tranzistory-95505/staticheskie-vakh-polevykh-tranzistorov-7.html>
4. Защита входов цифровой электроники <https://cxem.net/beginner/beginner102.php>
5. Управление мощной нагрузкой постоянного тока. Часть 1- 3. <http://easyelectronics.ru/upravlenie-moshhnoj-nagruzkoy-postoyannogo-toka-chast-3.html>
6. Управление мощной нагрузкой переменного тока <http://easyelectronics.ru/upravlenie-moshhnoj-nagruzkoy-peremennogo-toka.html>