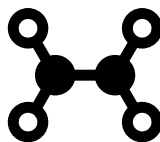


ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ

ПЯТОЕ занятие



Управление нагрузками	3
Виды управления	3
Ключ на биполярном транзисторе	4
Индуктивная нагрузка.....	5
Составной транзистор.....	6
Ключ на полевом транзисторе	7
Ускоренное включение	9
Драйвер полевого транзистора.....	10
Управление IGBT транзистором.....	12
Управление нагрузкой переменного тока.....	13
Тиристор.....	13
Симистор	14
Симисторный ключ	15
Индуктивная нагрузка в цепи переменного напряжения	17
Реле.....	18



Управление нагрузками

Для реализации практических задач по подключению мощных электрических нагрузок, таких как лампы, моторы и другие устройства, которые работают от электрической сети, существует несколько основных типовых решений.

ВИДЫ УПРАВЛЕНИЯ

Рассматривается подключение нагрузок, для которых не требуется высокочастотное питание (высокие частоты обычно обеспечиваются с помощью ШИМ-сигналов). В этом контексте используются различные ключевые элементы для управления. Для лучшего понимания, можно условно классифицировать методы подключения на три основные группы:

1. Управление нагрузкой постоянного тока:

- Транзисторный ключ на биполярном транзисторе.
- Транзисторный ключ на МОП-транзисторе (MOSFET).
- Транзисторный ключ на IGBT.

2. Управление нагрузкой переменного тока:

- Тиристорный ключ.
- Симисторный ключ.

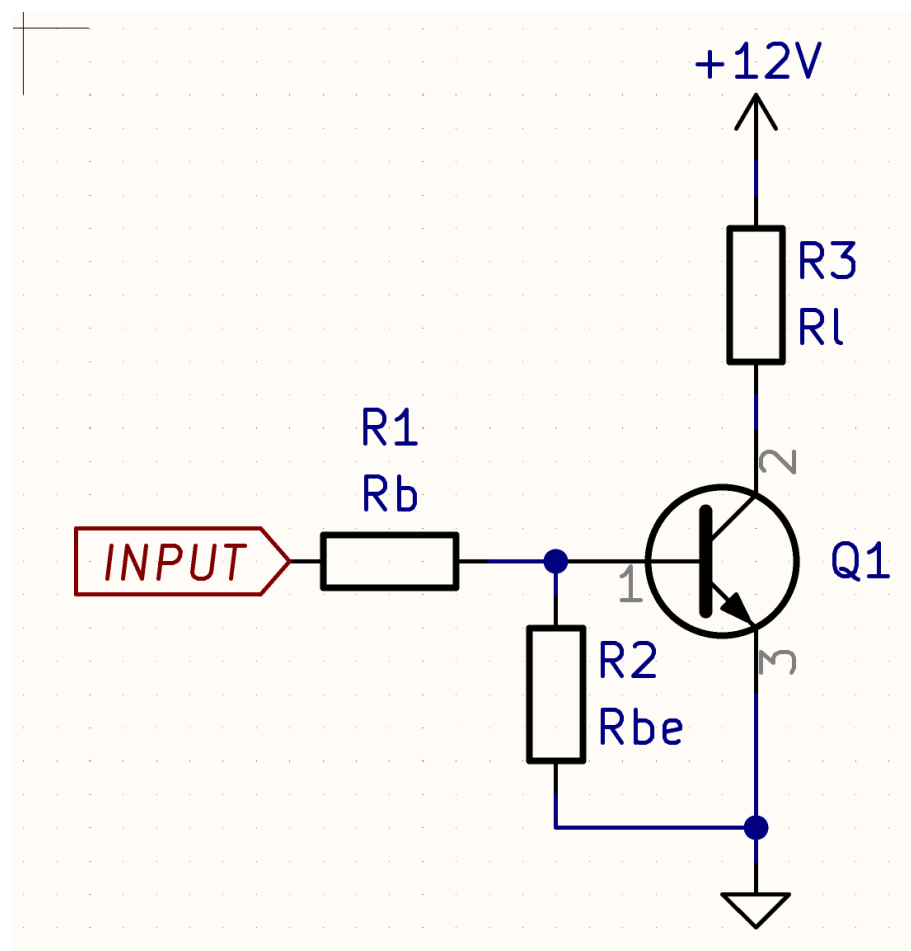
3. Универсальный метод:

- Реле.

Важно правильно выбрать метод управления в зависимости от конкретных условий, так как в практике могут использоваться различные управляющие сигналы. Например, цифровые логические сигналы могут значительно различаться между КМОП-микросхемами и ТТЛ-микросхемами. Это связано с тем, что управление в первом случае осуществляется с помощью напряжения, а во втором - с помощью тока. При разработке следует учитывать все эти тонкости.

КЛЮЧ НА БИПОЛЯРНОМ ТРАНЗИСТОРЕ

Простой ключ на биполярном транзисторе рассматривался на предыдущем занятии. Выглядит он следующим образом:

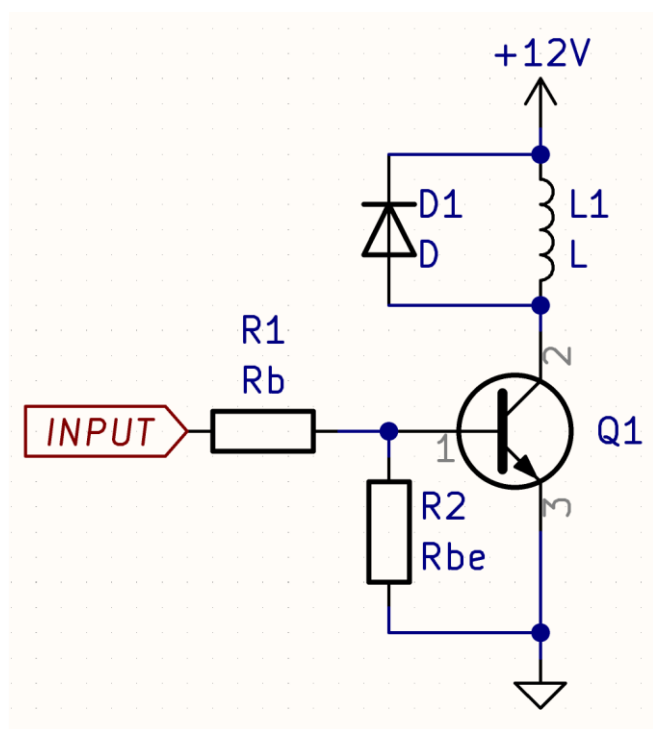


Назначение R1 - ограничение тока базы транзистора. R2 - резистор, подтягивающий базу к эмиттеру, предотвращает ситуацию «база в воздухе». R3 - в данном случае резистивная нагрузка, например лампа накаливания на 12 Вольт. У резистора R1 помимо функции «защиты» базы имеется и вторая функция - защита вывода микросхемы, из которой выходит управляющий сигнал. Нагрузочная способность микросхем будет рассмотрена позднее, на данный момент достаточно понимания того, что у вывода микросхемы часто очень ограничен выходной ток. Поэтому без R1 неограниченный ничем ток выведет из строя управляющую микросхему, так как нагрузочная способность вывода не рассчитана на большой ток.

В данном примере нагрузка R3 подключена в цепь коллектора транзистора, так как подключение в цепь эмиттера было бы ошибочным. Если подключить лампу на 12 Вольт в цепь эмиттера, то при открытии транзистора напряжения на ней не хватит для корректной работы. Это обусловлено тем, что при управляющем сигнальном напряжении 5 Вольт на базе минус падение напряжения¹ 0.7 Вольт на переходе оставляет на нагрузку 4.3 Вольта, чего явно для лампы 12 Вольт мало.

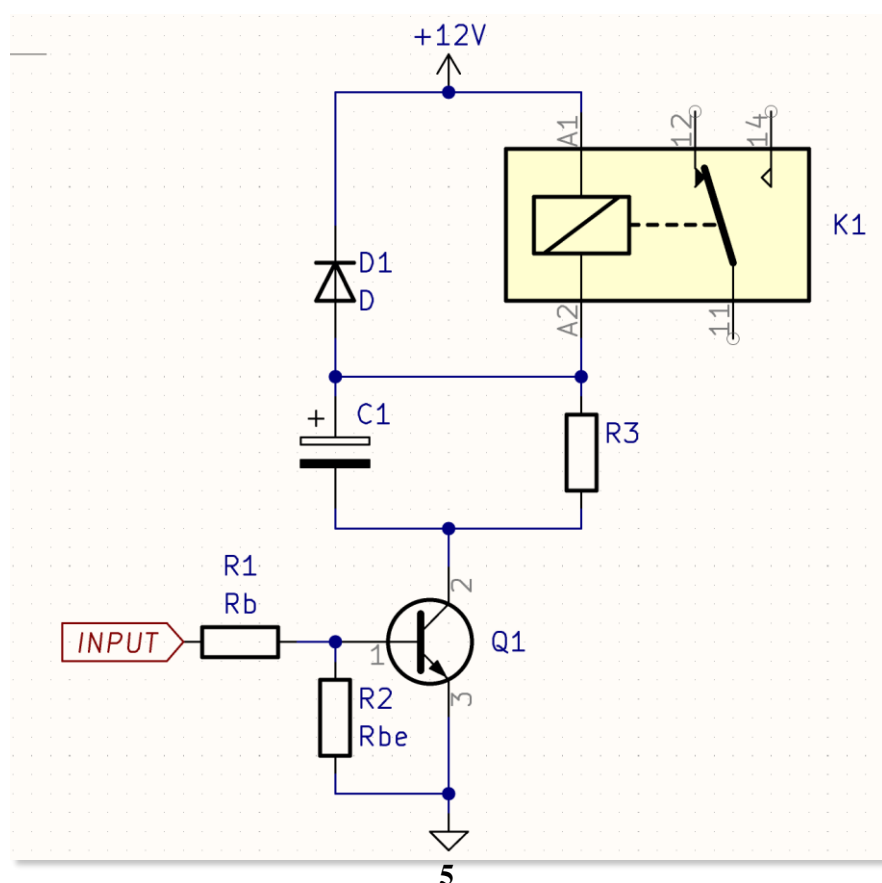
¹ Типовое падение напряжения на переходе база-эмиттер принято считать 0.7 Вольт

Выше было сказано про R3, который является нагрузкой резистивной, что является важным. Так как нагрузка бывает еще и индуктивной, то есть имеющей способность запасать энергию и отдавать ее.



ИНДУКТИВНАЯ НАГРУЗКА

На данной схеме L1 представляет собой индуктивную нагрузку, это может быть обмотка реле, мотор. Диод D1 выполняет защитную функцию, так как при закрытии транзистора энергия, запасенная в L1, позволяет току снизиться до нуля мгновенно, соответственно возникает выброс обратного напряжения на нагрузке, что может привести к повреждению всей схемы. Для этого установлен D1, через который и гасится данный выброс ЭДС. Подключение защитного диода является универсальным для других видов



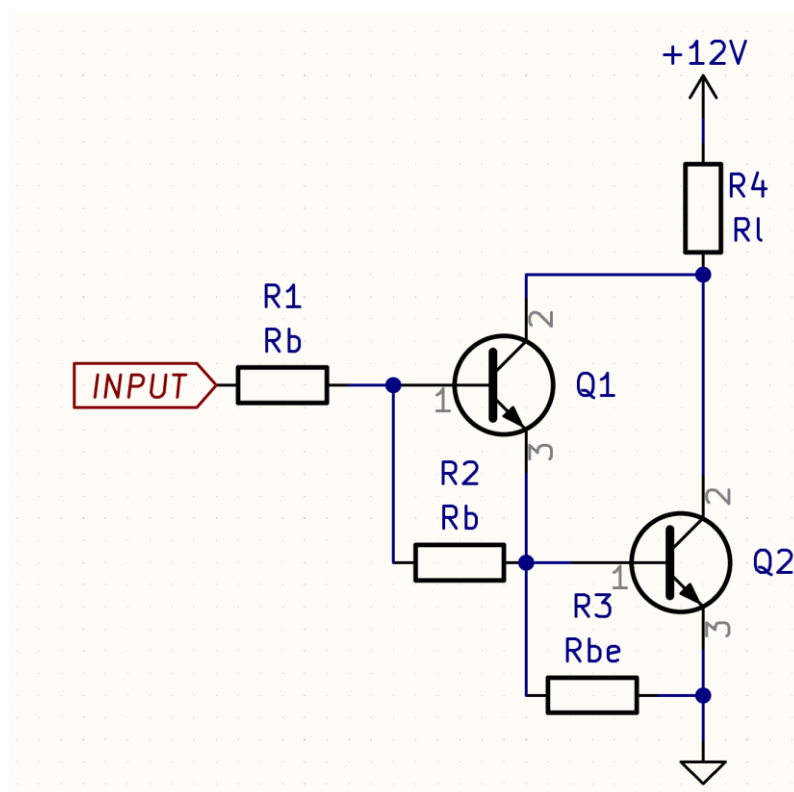
ключей в управлении нагрузками. Включение защитного диода в схему не требуется в случае, если подключаемая нагрузка заведомо является резистивной (не индуктивной).

В данной схеме возможны дополнения, которые иногда можно встретить в практических реализациях. Направлены эти улучшения на снижение энергопотребления. Есть момент срабатывания реле, в котором протекает довольно большой ток, следом идет момент удержания контакта, что требует для своей работы в 2-3 раза меньший ток.

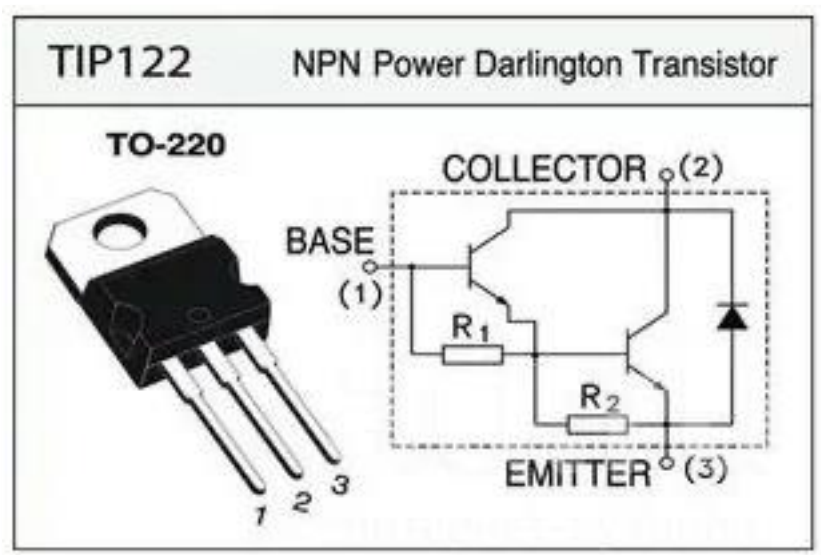
Следовательно данный ток можно ограничить резистором R3 (на схеме), а чтобы хватало тока для момента сработки реле - параллельно резистору R3 требуется конденсатор C1 на 10-20 μF . Работает данная цепь следующим образом: при подаче управляющего сигнала открывается транзистор, при открытии транзистора конденсатор C1 еще не имеет заряда, следовательно через него потечет ток на обмотку реле практически без ограничений (процесс недолгий, но достаточно для срабатывания реле), по мере заряда конденсатора ток через него будет уменьшаться до нуля, обмотка реле к этому времени уже перейдет в режим удержания контакта и будет получать питание через резистор R3. Следует понимать, что данная цепь уменьшает скорость переключения реле, что может иногда быть критичным. Хотя реле — это не тот компонент, который должен постоянно переключаться с высокой скоростью, так как подобный режим работы быстро выведет его из строя.

СОСТАВНОЙ ТРАНЗИСТОР

Если требуется подключить мощную нагрузку, через которую может протекать ток в несколько ампер, то в данной ситуации можно использовать составной транзисторный каскад. В этой конфигурации первый транзистор действует как управляющий для второго транзистора, обеспечивая усиление тока. Такая схема подключения называется схемой Дарлингтона.

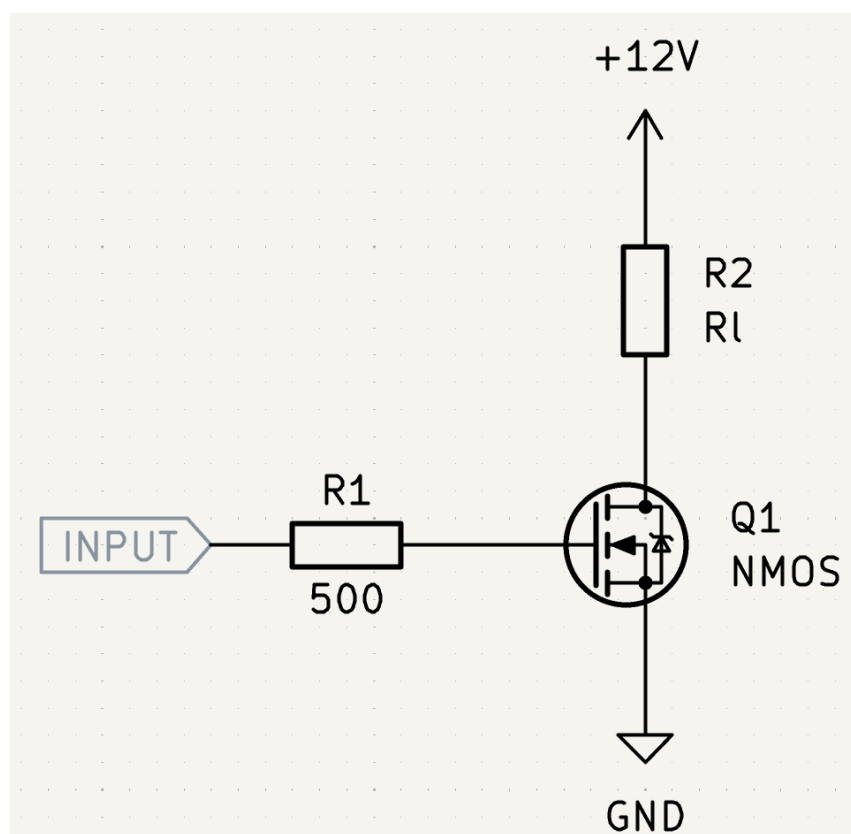


При использовании данной схемы происходит умножение коэффициентов усиления h_{FE} каждого транзистора, что в итоге приводит к значительному общему коэффициенту передачи тока. Чтобы ускорить процесс выключения транзисторов, рекомендуется соединить базу каждого транзистора с эмиттером через резистор. Значения резисторов R2 и R3 следует подбирать довольно большими, чтобы исключить влияние на ток, текущий через направление база-эмиттер. В типовых схемах часто используются резисторы от 5 кОм до 10 кОм для низковольтных питающих напряжений в диапазоне от 5 В до 12 В. Физически транзисторы Дарлингтона обычно выпускаются в виде отдельных, завершенных компонентов.



КЛЮЧ НА ПОЛЕВОМ ТРАНЗИСТОРЕ

МОП-структура представляет собой полупроводниковую структуру, применяемую при изготовлении микросхем и дискретных полевых транзисторов. МОП-транзисторы — это полупроводниковые устройства, построенные на основе этой структуры. Они также называются МДП-транзисторами (от слов "металл-диэлектрик-полупроводник") или транзисторами с изолированным затвором, так как у них затвор отделен от канала слоем диэлектрика.



Рассмотрено подключение нагрузки через N-канальный MOSFET, который является полевым транзистором с изолированным затвором. Этот тип транзисторов управляется напряжением, то есть он открывается, когда напряжение на затворе превышает пороговое значение. Важно отметить, что управляющий ток через транзистор отсутствует, пока он находится в открытом или закрытом состоянии, что является одним из главных преимуществ по сравнению с биполярными транзисторами. Выбор N-канального транзистора обычно обусловлен его более низкой стоимостью и лучшими характеристиками по сравнению с P-канальными.

Важно учесть нюанс прямого подключения к управляющему выводу микросхемы такого ключа. Здесь возникает паразитная емкость между затвором и подложкой, фактически создавая конденсатор. В процессе открытия и закрытия транзистора этот конденсатор заряжается и разряжается через линию управляющего сигнала. Это может привести к протеканию большого тока через управляющий вывод микросхемы и, в конечном итоге, вызвать её выход из строя. По факту получается RC-цепь, в которой можно вычислить максимальный ток, зная напряжение управления транзистором:

$$I = \frac{U_{INPUT}}{R_1}$$

Чтобы решить данную проблему используют резистор, обычно номиналом 100-1000 Ом, что позволяет ограничить ток в этой цепи. При вычислениях требуется учесть тот факт, что больший номинал резистора неизбежно повлечет за собой увеличение постоянной времени, что скажется на скорости открытия и закрытия транзистора (она станет меньше). Это будет критичным моментом, если потребуется обеспечить высокую скорость переключения, например при ШИМ-регулировании. Но для этой ситуации есть известные схемотехнические решения в виде схемы ускоренного включения или использования специализированных микросхем-драйверов.

Принципиально важно обращать внимание на следующие ключевые параметры МОП-транзисторов:

- Пороговое напряжение (V_{th}): Максимальные значения порогового напряжения могут сильно отличаться у разных транзисторов, даже в пределах одной партии. Однако, если максимальное значение V_{th} , например, 3 В, то данный транзистор можно использовать в схемах с цифровой логикой и напряжением питания 3,3 В или 5 В.

- Максимальный ток стока (I_D): это важный параметр, определяющий, сколько тока транзистор может пропустить через себя в открытом состоянии.

- Сопротивление между стоком и истоком (R_{DS}) у открытого транзистора: Этот параметр обычно мал, но его следует учитывать, особенно при работе с большими

напряжениями управляемой нагрузки. Он может привести к нагреву и выделению тепла при больших напряжениях.

В таблице приведены примеры характеристик МОП-транзисторов. Важно отметить, что значения параметров могут различаться даже в пределах одной модели. Это информация поможет выбрать подходящие транзисторы для конкретных задач, учитывая их максимальные параметры и требования к напряжению питания.

Модель	V_{th}	$I_b \text{ max}$	$R_{DS} \text{ max}$
2N7000	3 В	200 мА	5 Ом
IRFZ44N	4 В	35 А	0,0175 Ом
IRF630	4 В	9 А	0,4 Ом
IRL2505	2 В	74 А	0,008 Ом

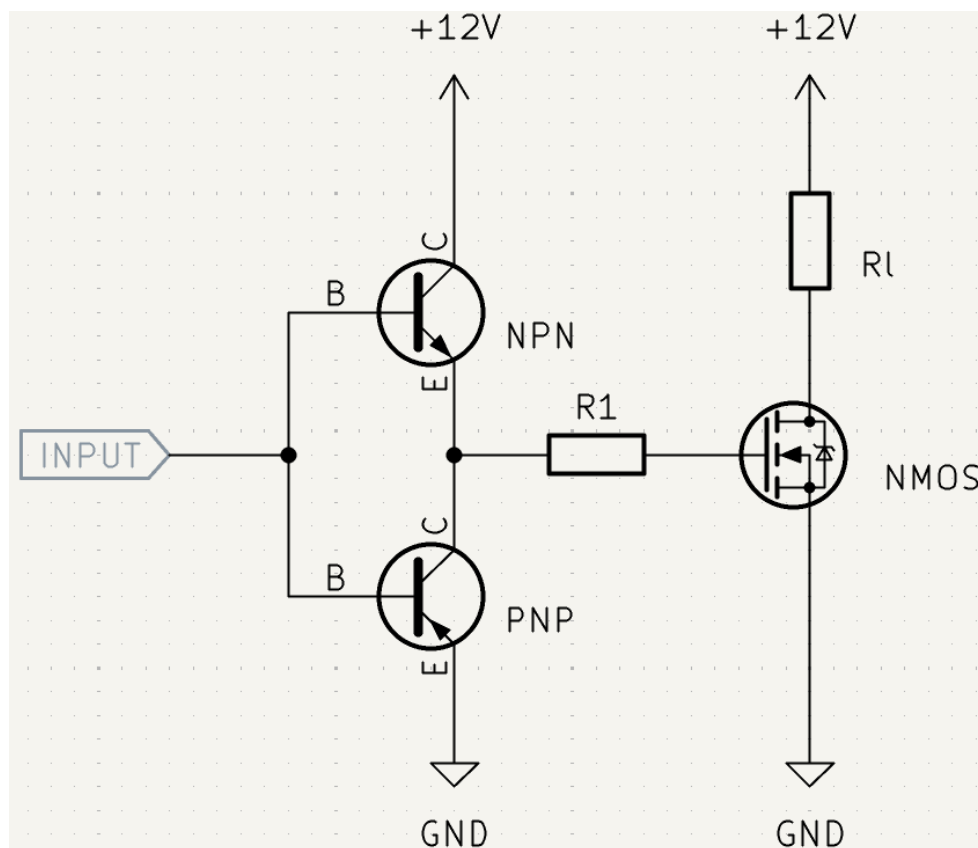
УСКОРЕННОЕ ВКЛЮЧЕНИЕ

Очевидно, что при включении и выключении транзисторов в схемах с высокой частотой, таких как ШИМ-регулирование, необходимо обеспечить быстрый переход между открытым и закрытым состояниями. В этом контексте, паразитная емкость затвора МОП-транзистора может замедлять процесс переключения, так как скорость зарядки и разрядки этой емкости напрямую зависит от тока, протекающего через затвор.

Одним из способов ускорения переключения транзисторов является добавление дополнительного биполярного транзистора, который будет отвечать за управление током через затвор МОП-транзистора. Это позволяет управлять более значительным током, который будет заряжать или разряжать паразитную емкость затвора более быстро.

Схема на двухтактной комплементарной паре² биполярных транзисторов стала стандартным решением для управления МОП-транзисторами в схемах с высокой частотой. Важно учитывать, что зарядка и разрядка паразитной емкости на затворе требует времени, и использование таких управляющих схем позволяет сократить это время, что в свою очередь увеличивает скорость переключения транзисторов.

² Комплементарная пара — это пара транзисторов, которые имеют сходные (или почти) абсолютные значения параметров, но разные типы проводимостей.



Кроме того, комбинированные пары транзисторов в одном корпусе, например, как BC817DPN.115, обеспечивают более удобное и компактное решение для подобных задач, обеспечивая более эффективное управление и быстрое переключение транзисторов.

[Небольшой список пар для ознакомления.](#)

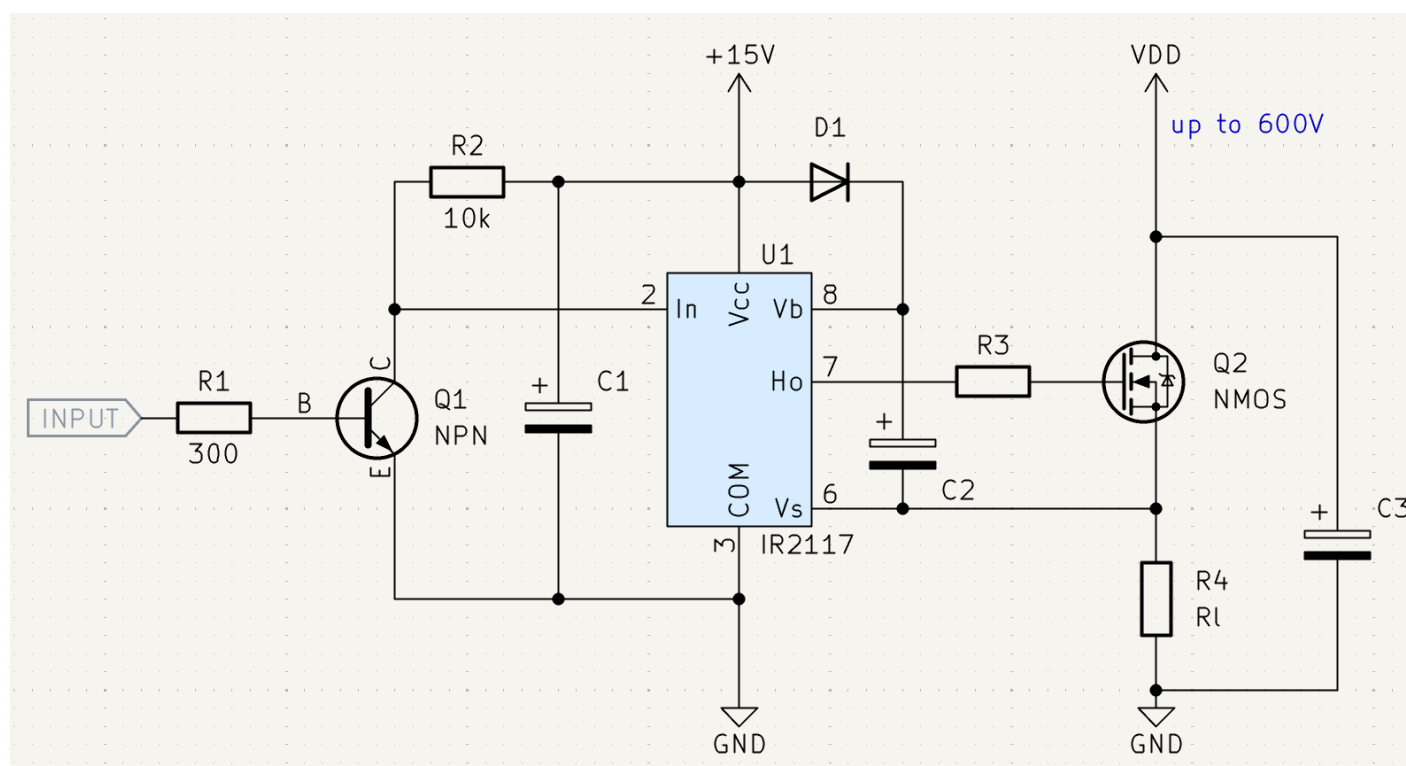
Для обеспечения надлежащей работоспособности схемы традиционно нагрузка размещается перед стоком N-канального транзистора. Это объясняется тем, что если нагрузка будет подключена к истоку, то возможно снижение напряжения на ней, что в свою очередь может привести к недостаточному напряжению между затвором и истоком, и транзистор не откроется полностью. В итоге это может вызвать излишний нагрев и повреждение транзистора из-за перегрева.

ДРАЙВЕР ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРА

Иногда возникают ситуации, когда необходимо подключить нагрузку к истоку N-канального транзистора, то есть между транзистором и землей. В таких случаях применяется специальная микросхема, называемая "драйвером верхнего плеча". Это название связано с тем, что транзистор находится сверху нагрузки в схеме.

Существуют микросхемы, которые включают в себя драйверы как для верхнего, так и для нижнего плеча, что позволяет создать двухтактное подключение (например, L6385E, IR2151). Однако для простых случаев управления нагрузкой часто достаточно одного драйвера верхнего плеча. Такой подход применяется, если требуется обеспечить активное подключение нагрузки к земле в периоды бездействия (не оставлять нагрузку в воздухе).

В схеме ниже приведен пример использования драйвера IR2117. Подключение выполняется согласно даташиту на данный компонент, требуется уделить внимание выводу 2 (IN) минимальное напряжение для этого входа является 9.5 Вольт, что при логической единице 3.3V (STM32) или 5V (Arduino) легко решается использованием биполярного транзистора Q1, мощный не требуется, его задача согласовать по напряжению. Инвертирование сигнала вполне решается в самом коде управляющей программы микроконтроллера.



В действительности, установка драйвера действительно является более предпочтительным подходом. Помимо основных функций, таких как формирование управляющих сигналов, драйвер также обеспечивает дополнительные меры защиты и оптимизации работы схемы.

Важно подчеркнуть, что драйверы могут предоставлять разнообразные механизмы защиты, включая токовую защиту, защиту от пробоя и перенапряжения. Также они способствуют оптимизации времени открытия транзистора, что может быть важно для обеспечения более точного и быстрого управления нагрузкой.

Таким образом, оправдывая расход тока на свое питание, драйвер предоставляет ценные дополнительные функции, которые способствуют стабильной и надежной работе схемы управления нагрузкой.

Важно помнить, что существуют драйверы как для верхнего, так и для нижнего плеча (или комбинированные, полумостовые).

Выбор конкретного драйвера зависит от схемы подключения нагрузки и управляющего транзистора. Если обратить внимание, можно заметить, что как в верхнем, так и в нижнем плече используются N-канальные транзисторы. Просто они обладают более высокими

характеристиками по сравнению с Р-канальными. Однако возникает другая проблема - для того, чтобы открыть N-канальный транзистор в верхнем плече, необходимо подать на его затвор напряжение выше, чем на стоке, и это, фактически, выше напряжения питания.

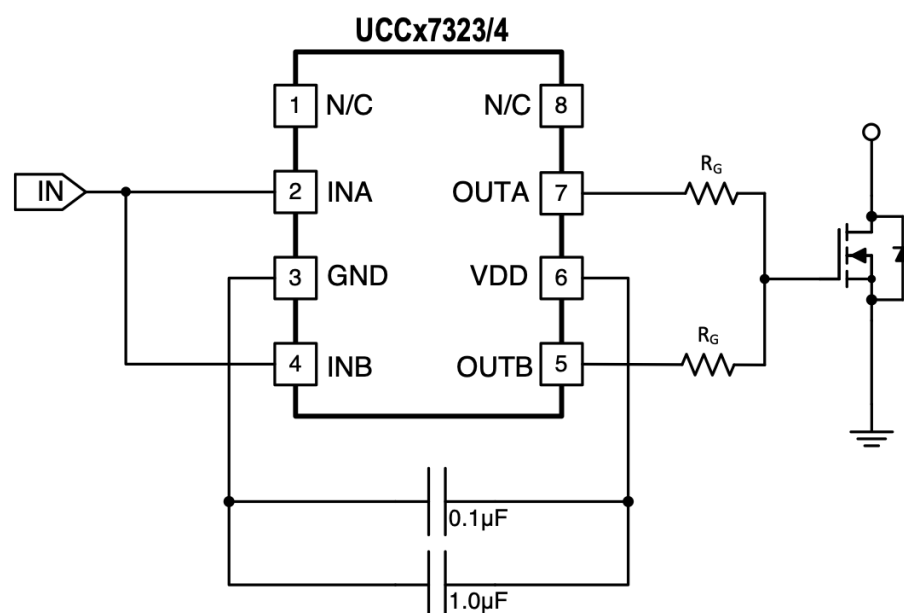
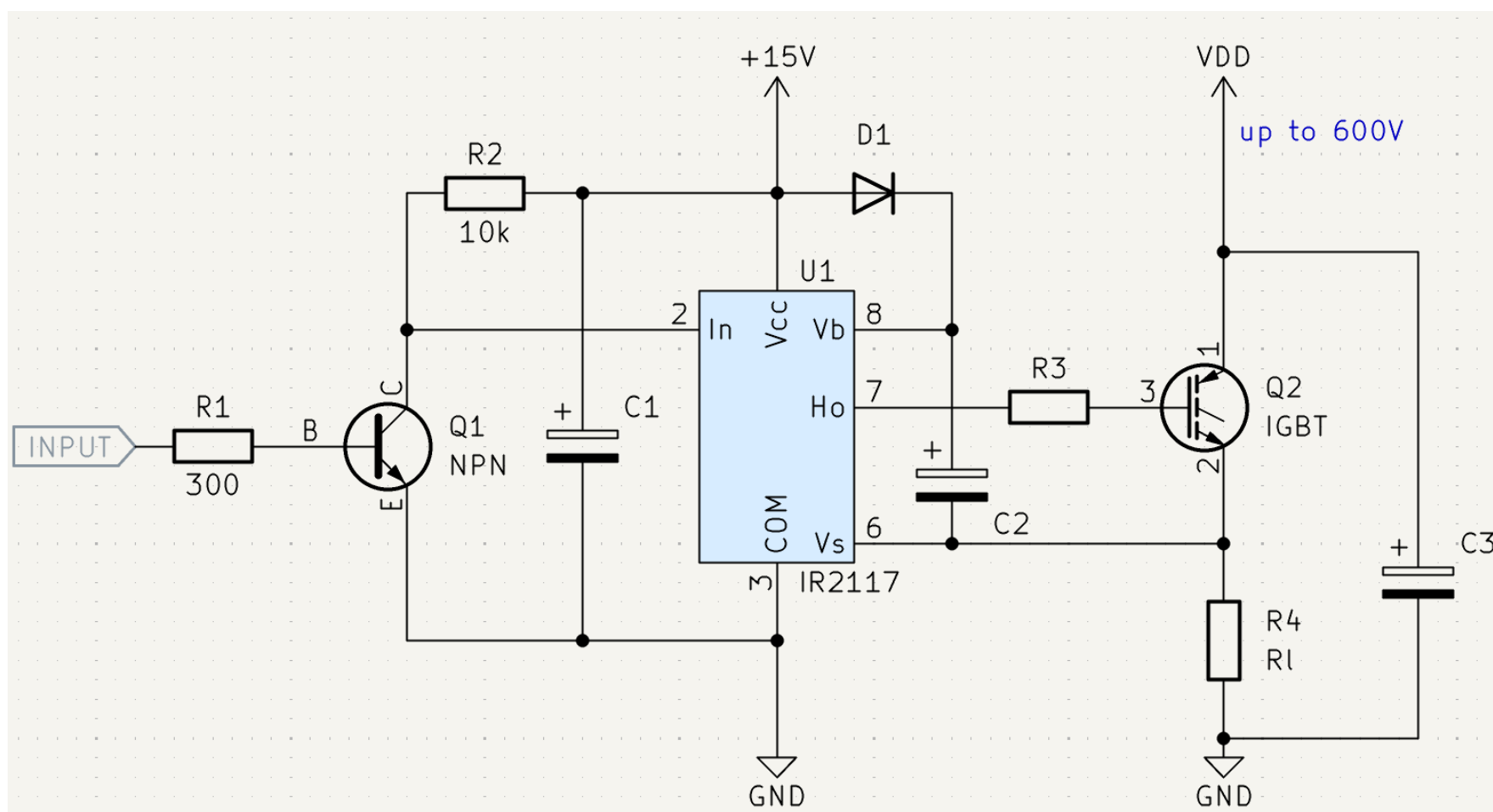


Figure 8. Parallel Operation of UCCx7323 and UCCx7324

В связи с этим в драйвере верхнего плеча используется метод накачки напряжения³. И вот здесь заключается различие между драйвером нижнего плеча и драйвером верхнего плеча.

УПРАВЛЕНИЕ IGBT ТРАНЗИСТОРОМ



Среди разнообразных видов транзисторов существует интересный класс, который часто применяется в качестве ключа — это IGBT (биполярный транзистор с изолированным

³ Подробнее рассмотрено в переводе статьи Джонатана Адамса «Выбор бустрепных компонентов для управляющих ИС» на портале «РЫНОК МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ». [Ссылка на статью](#)

затвором). Эти транзисторы объединяют в себе лучшие характеристики как МОП-транзисторов, так и биполярных транзисторов: возможность управления напряжением, широкий диапазон допустимых токов и напряжений.

Управление IGBT-транзистором аналогично управлению MOSFET-транзистором, который рассмотрен в предыдущем примере. Эти транзисторы часто применяются для построения силовых импульсных электронных схем, и для обеспечения управления ими используют драйверы.

Например, драйвер верхнего плеча IR2117, который был упомянут выше, согласно своей документации, может использоваться и для управления IGBT-транзисторами.

Управление нагрузкой переменного тока

Все рассмотренные выше примеры объединяет одна общая характеристика: мощные нагрузки, работающие от постоянного тока. В представленных схемах можно выделить линии питания и земли.

Для управления нагрузками в цепях переменного тока применяются другие подходы. В таких случаях часто используются симисторы, тиристоры и реле. Эти элементы позволяют контролировать подключение и отключение нагрузки в зависимости от фазы переменного напряжения или других условий.

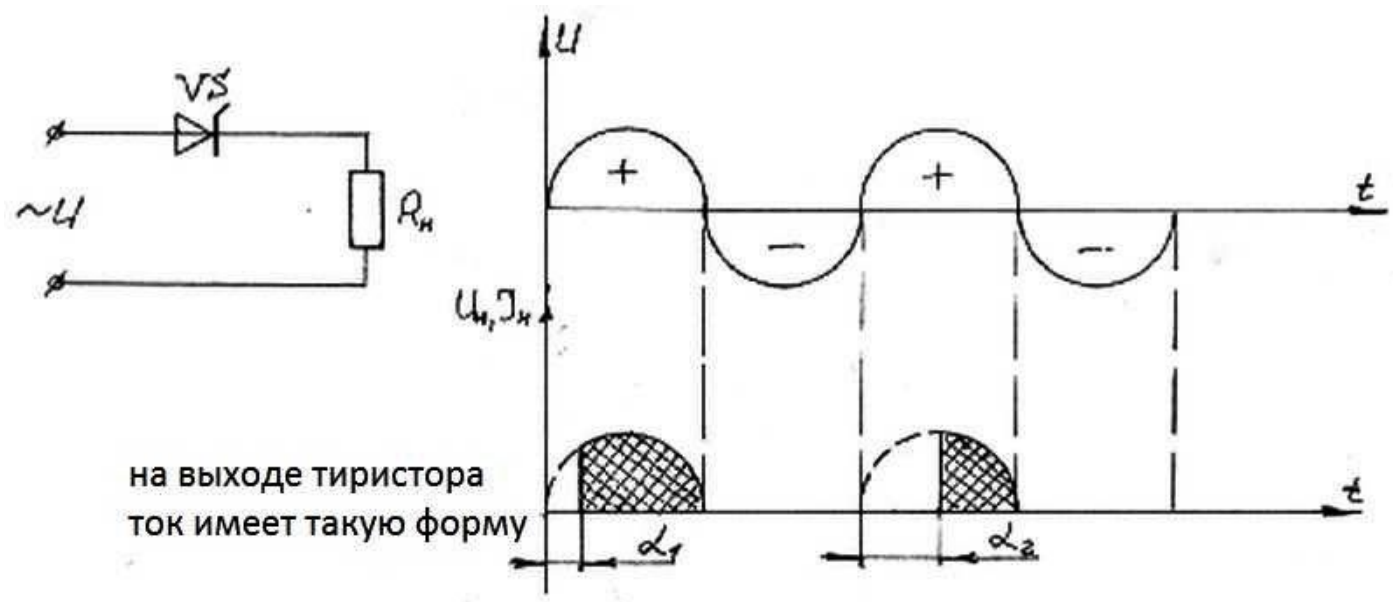
ТИРИСТОР



Тиристор – это полупроводниковый элемент, характеризующийся двумя устойчивыми состояниями: «открытым» (пропускает ток) и «закрытым» (не пропускает ток). Смена состояний происходит лишь при определенных условиях. Переход между состояниями осуществляется очень быстро, но не мгновенно. С точки зрения работы, тиристор схож с переключателем или ключом. Разница в том, что его переключение зависит от напряжения, а отключение происходит при уменьшении тока или снятии нагрузки.

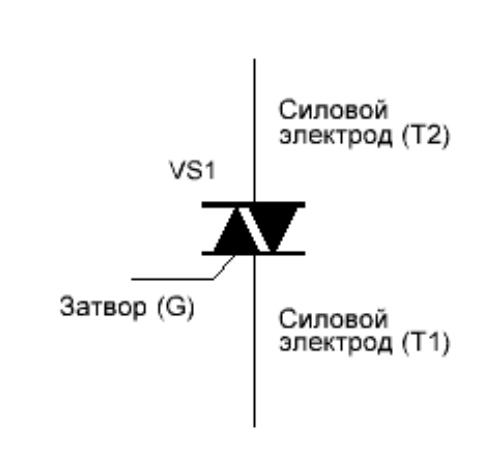
Принцип работы тиристора можно представить как ключ, управляемый электрически. Тиристор обычно имеет три вывода: один управляющий и два, через которые проходит ток. Процесс работы можно описать следующим образом: подача напряжения на управляющий вывод активирует цепь между анодом и коллектором. Фактически, он аналогичен транзистору, но отличается тем, что тиристор может быть либо полностью

открытым, либо полностью закрытым, без влияния на пропускаемый ток в зависимости от напряжения на управляющем выводе.



Особенностью тиристорov является то, что они могут проводить ток только в одном направлении, что делает их не совсем подходящими для управления нагрузкой в цепях переменного тока. Это означает, что в каждом периоде переменного тока тиристор будет работать только в положительной полуволне.

СИМИСТОР



Симистор, также известный как TRIAC, является двунаправленным управляемым полупроводниковым элементом. Он позволяет пропускать как положительные, так и отрицательные полуволны переменного напряжения, что делает его подходящим для управления нагрузкой в схемах с переменным током.

Для открытия симистора (или тиристора) существует два основных способа:

1. Подача отпирающего тока на управляющий электрод.
2. Подача достаточно высокого напряжения на рабочие электроды (T1 или T2).

Симистор может быть закрыт путем смены полярности или уменьшения тока через него до значения меньшего, чем ток удержания (I_H). В случае с питанием переменным током, закрытие произойдет автоматически по окончании полупериода.

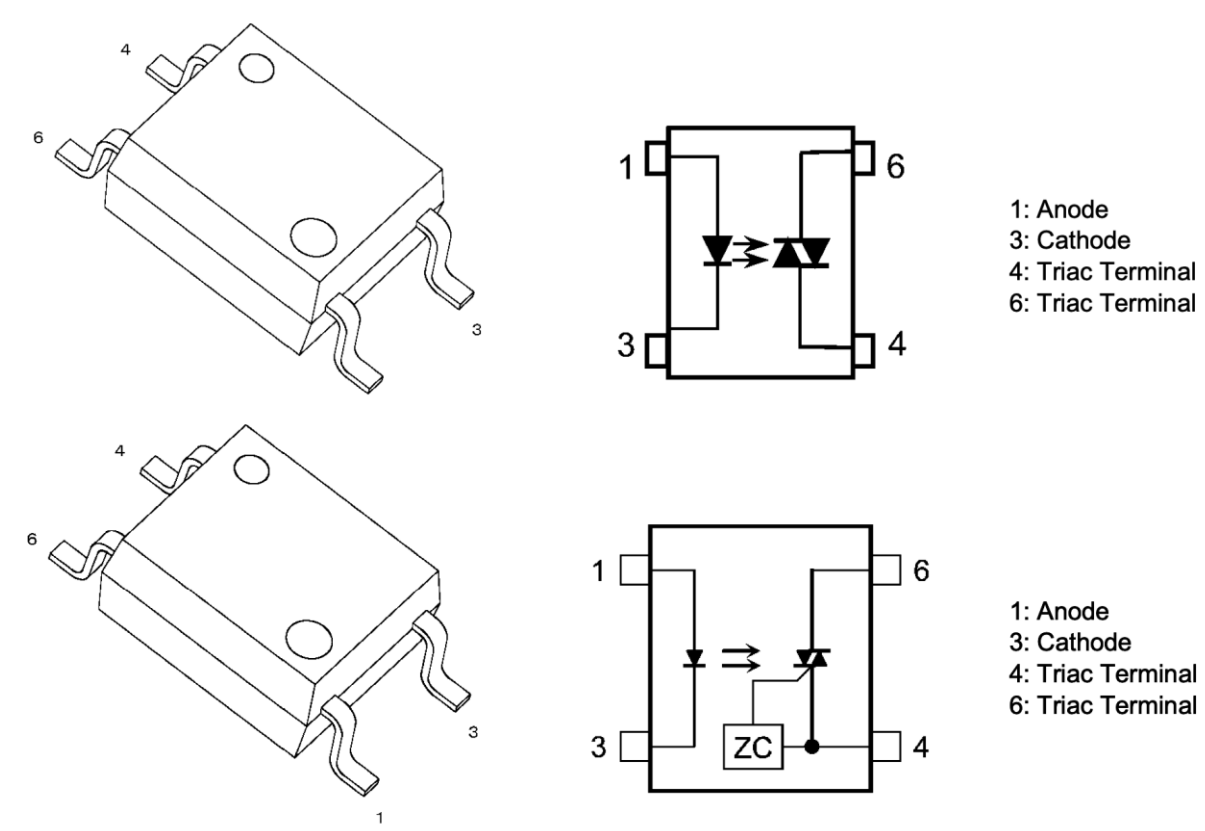
При выборе симистора важно учесть параметр тока удержания (I_H). Слишком мощный симистор с высоким током удержания может привести к ситуации, когда ток через нагрузку будет слишком маленьким для открытия симистора, и он не сможет правильно функционировать.

СИМИСТОРНЫЙ КЛЮЧ

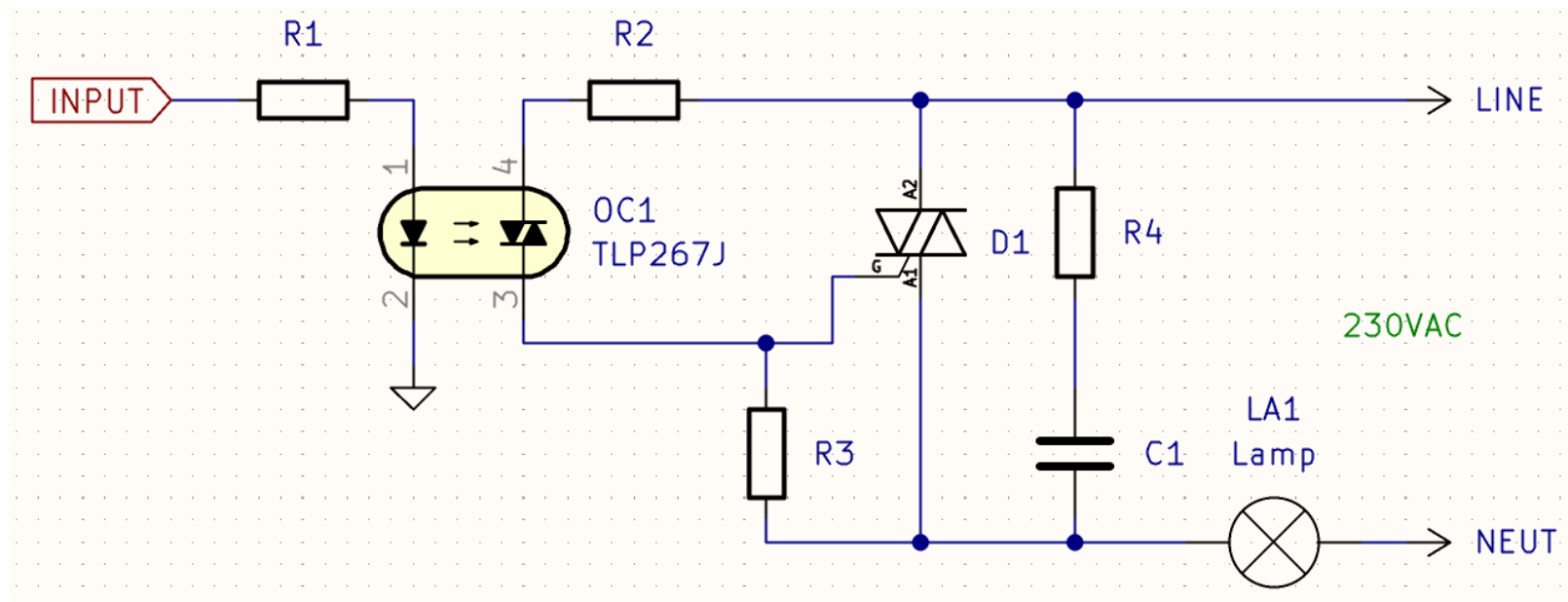
Довольно частой задачей является подключение нагрузки 220 Вольт с помощью симисторов управляющим сигналом от микроконтроллера. Как известно этот управляющий сигнал маломощный и логические уровни его находятся в пределах 3.3-5 Вольт (бывает и меньше). Напрямую мощный симистор не получится открыть от GPIO контроллера, для этого есть известное схемотехническое решение с применением опторазвязки, специального симисторного драйвера. Данным подключением решается одна из немаловажных целей- гальваническая развязка сигнальных и силовых цепей.

К примеру, оптроны TLP267J и TLP268J являются устройствами, состоящими из инфракрасного светодиода и фотосимистора. Эти компоненты используются для передачи оптического сигнала и обеспечивают электрическую изоляцию между входом и выходом устройства. Они способны обеспечивать низкое потребление энергии, так как требуют всего 3 мА (для стандартного исполнения) или 2 мА (для исполнения IFT2, как у TLP267J(IFT2) и TLP268J(IFT2)) тока управления.

Эти оптроны могут быть использованы для управления мощными симисторами. Например, TLP267J включает симистор и может использоваться в схемах с жесткой коммутацией, где происходит переключение при произвольном напряжении. С другой стороны, TLP268J включает дополнительную схему, известную как "ZC" (Zero Cross), которая позволяет устройству осуществлять мягкое переключение симистора, включая его при нулевом напряжении на нем. Это может быть полезно для уменьшения помех и электромагнитных шумов при переключении нагрузки.



TLP268J



TLP267J и TLP268J представляют собой оптопары, специально разработанные для эффективного применения в симисторных драйверах, программируемых логических контроллерах, выходных модулях переменного тока и твердотельных реле. Эти компоненты находят своё применение в различных сферах бытовой техники и промышленных устройствах.

Рассмотрим схему управления резистивной нагрузкой в виде лампы накаливания. В данном варианте подключения представленной оптопары, она выполняет функцию драйвера симистора.

Сопротивление резистора R1 можно рассчитать так, как это обычно делается для светодиода, чтобы обеспечить оптимальный ток через инфракрасный светодиод оптопары.

Сопротивления R2 и R3 определяются на основе документации и учитывают пиковое напряжение в электросети плюс отпирающий ток силового симистора D1. Эти сопротивления позволяют корректно управлять симистором, обеспечивая надежное отпирание.

Сопротивление R4 и конденсатор C1 могут не устанавливаться, если известно, что нагрузка будет резистивной и отсутствует необходимость в дополнительной фильтрации или задержке включения.

При расчетах важно помнить, что **действующее** напряжение в бытовой электросети составляет 230 В, а для учета **пикового** напряжения необходимо использовать формулу:

$$\sqrt{2} \times 230 \approx 325V$$

ИНДУКТИВНАЯ НАГРУЗКА В ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ

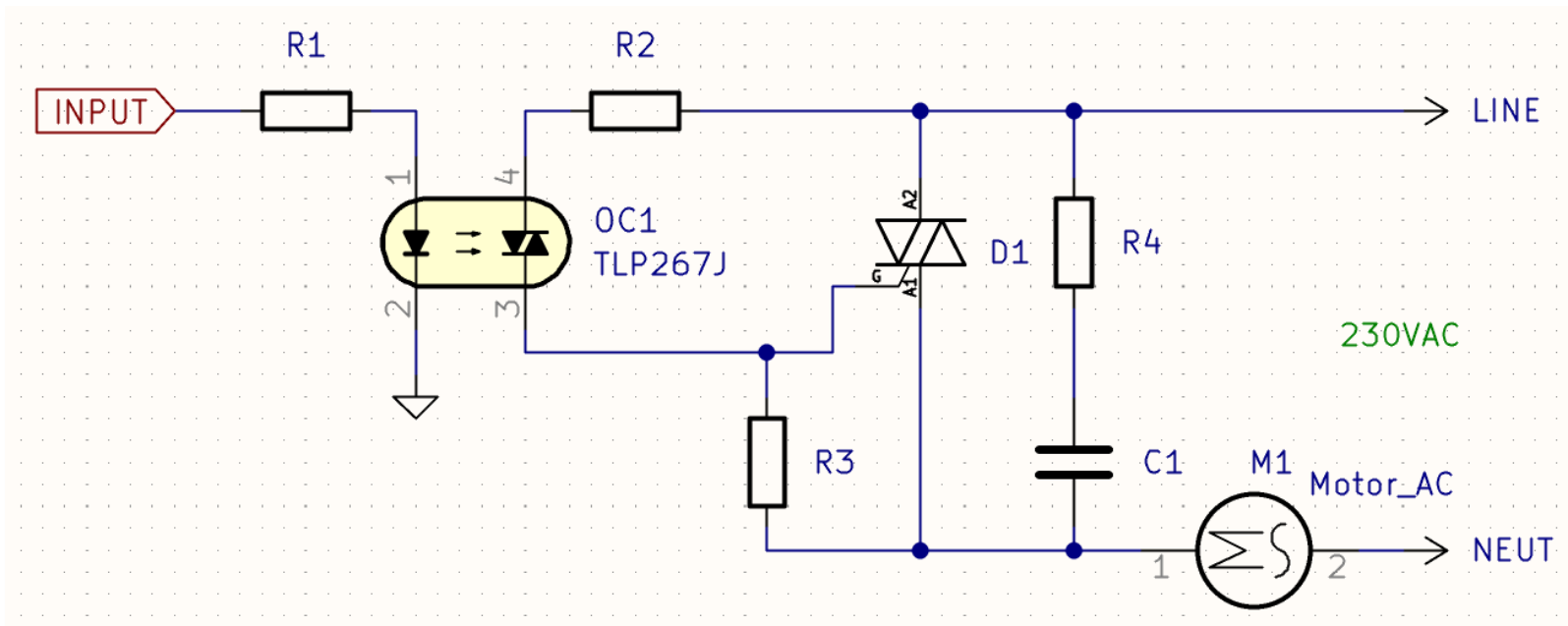


Схема для управления индуктивной нагрузкой практически идентична варианту, описанному выше. Однако в данном случае имеет большое значение наличие сопротивления R4 и конденсатора C1, создающих цепочку снаббера. Снаббер является дополнительной частью схемы и служит для сглаживания переходных процессов и борьбы с помехами, которые могут возникнуть в сети при управлении индуктивной нагрузкой, такой как электродвигатель.

Сопротивление R4 и конденсатор C1 в снаббере образуют параллельный контур, который помогает сгладить резкие изменения тока, возникающие при переключении индуктивной нагрузки. Это позволяет уменьшить электромагнитные помехи и перенапряжения в сети, что может повысить надежность и стабильность работы системы.

Снабберная цепь может лишь ограничено улучшить ситуацию с выбросами, но она все же способна смягчить негативное воздействие переходных процессов.

При выборе керамического конденсатора для использования в снаббере важно учесть его рабочее напряжение, которое должно быть выше пикового напряжения в сети питания. В случае с напряжением 230 В в сети, рекомендуется выбирать конденсаторы с рабочим напряжением не менее 325 В, и даже с некоторым запасом для надежности.

С учетом типичных значений, как $C1 = 0.01$ мкФ и $R4 = 39$ Ом (минимум 0.5 Вт), можно создать снаббер, который будет дополнительно уменьшать воздействие переходных процессов на схему ⁴.

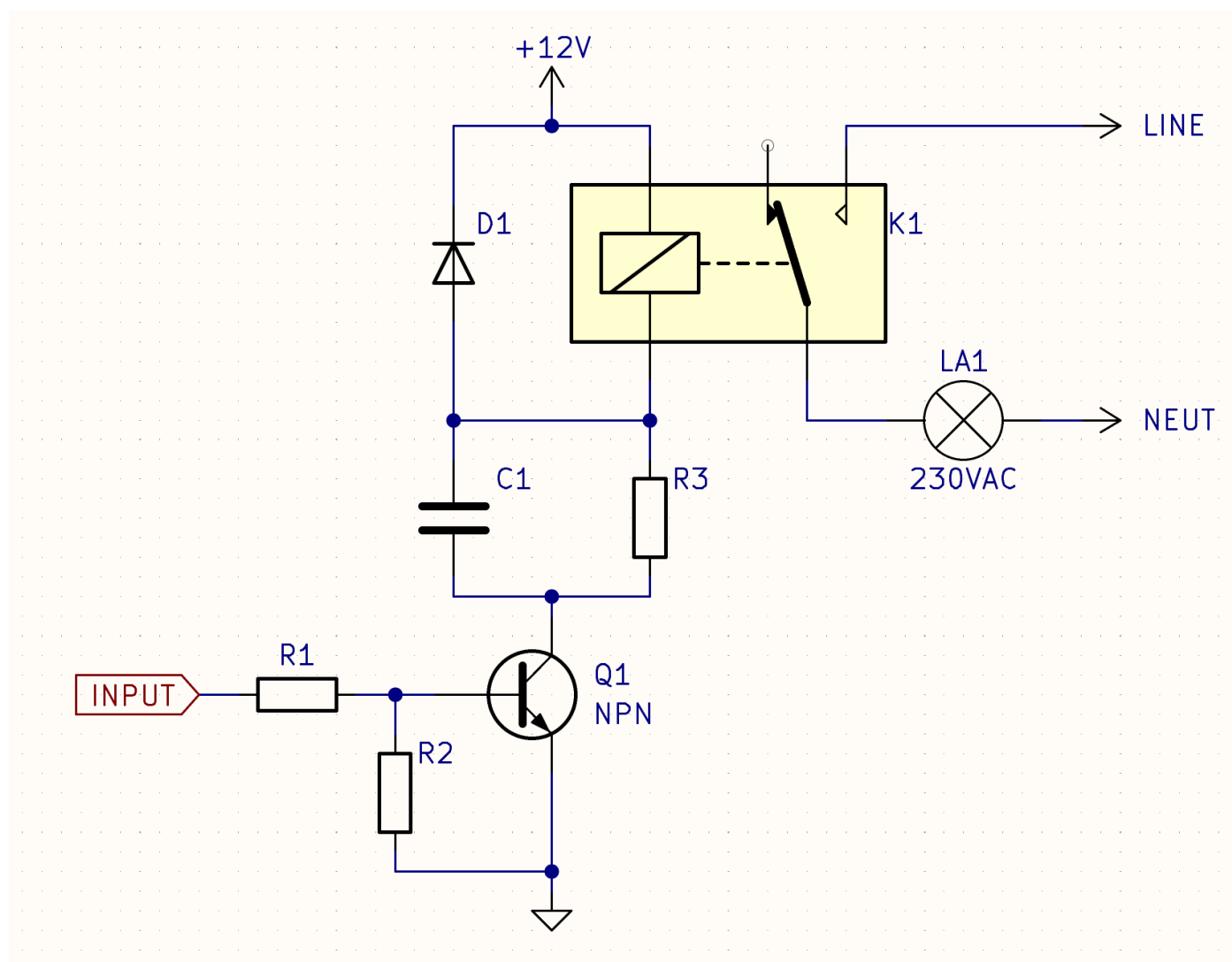
⁴ Больше информации в статье Игоря Ветрова «Общий подход к расчету снабберных RC-цепей». [Ссылка на статью Appnote AN-3004](#) подробно рассматривает расчет снаббера.

Также стоит отметить, что существуют модели симисторов, которые уже имеют встроенные механизмы или характеристики, позволяющие им работать без использования снаббера. Примером может быть симистор ВТА06-600С, который обладает такими характеристиками. Это позволяет немного сократить сложность и стоимость схемы, однако, как всегда, выбор компонентов зависит от конкретных требований и условий применения.

РЕЛЕ

Реле являются популярным и простым средством для управления мощной нагрузкой, особенно в схемах с микроконтроллерами. Однако они также имеют свои недостатки, которые могут оказать влияние на их эффективность и надежность.

Для микроконтроллера реле само по себе является мощной нагрузкой, к тому же еще и индуктивной. Поэтому рассмотренный ранее транзисторный ключ является уместным для этого способа коммутации. Примером реле может служить модель HLS8-22F-12VDC, которое контролируется сигналом напряжения 12 В и имеет возможность коммутировать нагрузку с током до 15 А и напряжением до 240VAC.



Одним из недостатков схемы с реле является наличие механических компонентов внутри реле. Это ограничивает скорость переключений реле и обычно позволяет использовать их с частотой переключений не выше 0.5 Гц или даже меньше. Таким образом, управление нагрузкой с использованием реле ограничивается базовыми

режимами включения и выключения, без возможности регулирования мощности, подаваемой на нагрузку.

Твердотельные реле, в свою очередь, представляют собой современное решение для управления нагрузкой. Они обладают гальванической развязкой и полупроводниковой схемой управления, что означает отсутствие подвижных контактов и повышение надежности в сравнении с механическими реле. Такие реле также способны коммутировать большие токи и обладают более высокой скоростью переключения, чем механические реле. Кроме того, они не проявляют "щелчка" при переключении.

Варианты управления нагрузками, рассмотренные выше являются базовыми. Их комбинирование и применение способно закрыть большую часть задач, которые могут встать перед разработчиком. Важно изучать и анализировать различные схемотехнические решения и наработки, которые можно встретить в сети и литературе, чтобы иметь возможность применить в своих проектах.