

# Применение MOSFET транзисторов

---

КУРС ЛЕКЦИЙ

ЧУ ПО «СОЦИАЛЬНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ КОЛЛЕДЖ»

ПРЕПОДАВАТЕЛЬ: БОРИСОВ АЛЕКСЕЙ АЛЬБЕРТОВИЧ

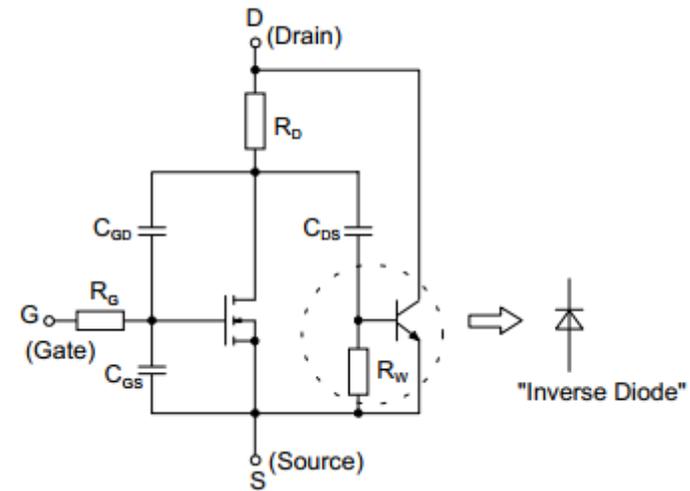
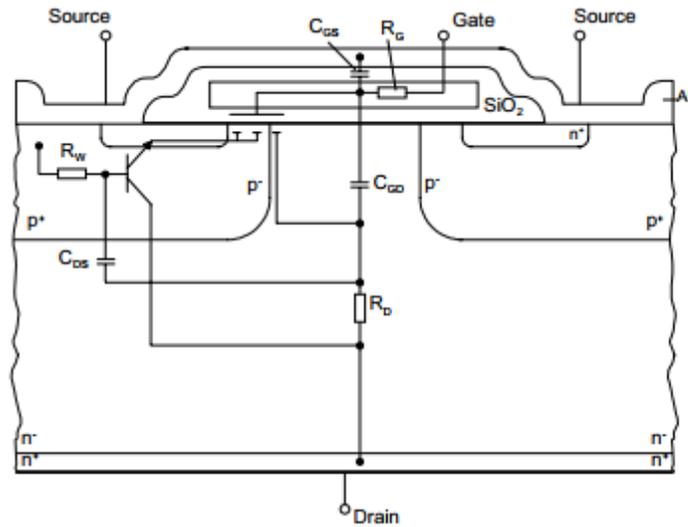
**RAZUMDOM**



# Схемы применения MOSFET

1. Эквивалентная схема
2. Элементы обвязки
3. Схемы на MOSFET

# Эквивалентная схема MOSFET транзисторов



# Управление MOSFET транзистором

Полевые транзисторы управляются напряжением, приложенным к затвору транзистора относительно его истока, при этом:  $I_c = I_u$ ;  $I_3 \rightarrow 0$ . При изменении напряжения  $U_{3u}$  изменяется состояние транзистора и ток стока  $I_c$ .

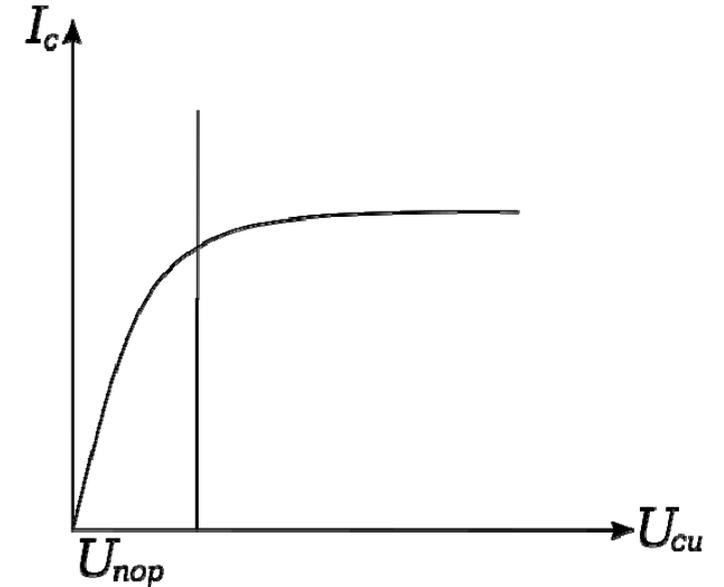
1. Для транзисторов с каналом n-типа при  $U_{3u} < U_{пор}$ ,  $I_c = 0$  транзистор закрыт;
2. При  $U_{3u} > U_{пор}$  транзистор открывается и рабочая точка находится на нелинейном участке управляющей (сток-затворной) характеристики полевого транзистора:

$$I_c = K_n \left[ (U_{3u} - U_{пор}) \cdot U_{cu} - \frac{U_{cu}^2}{2} \right]$$

$K_n$  — удельная крутизна характеристики транзистора;

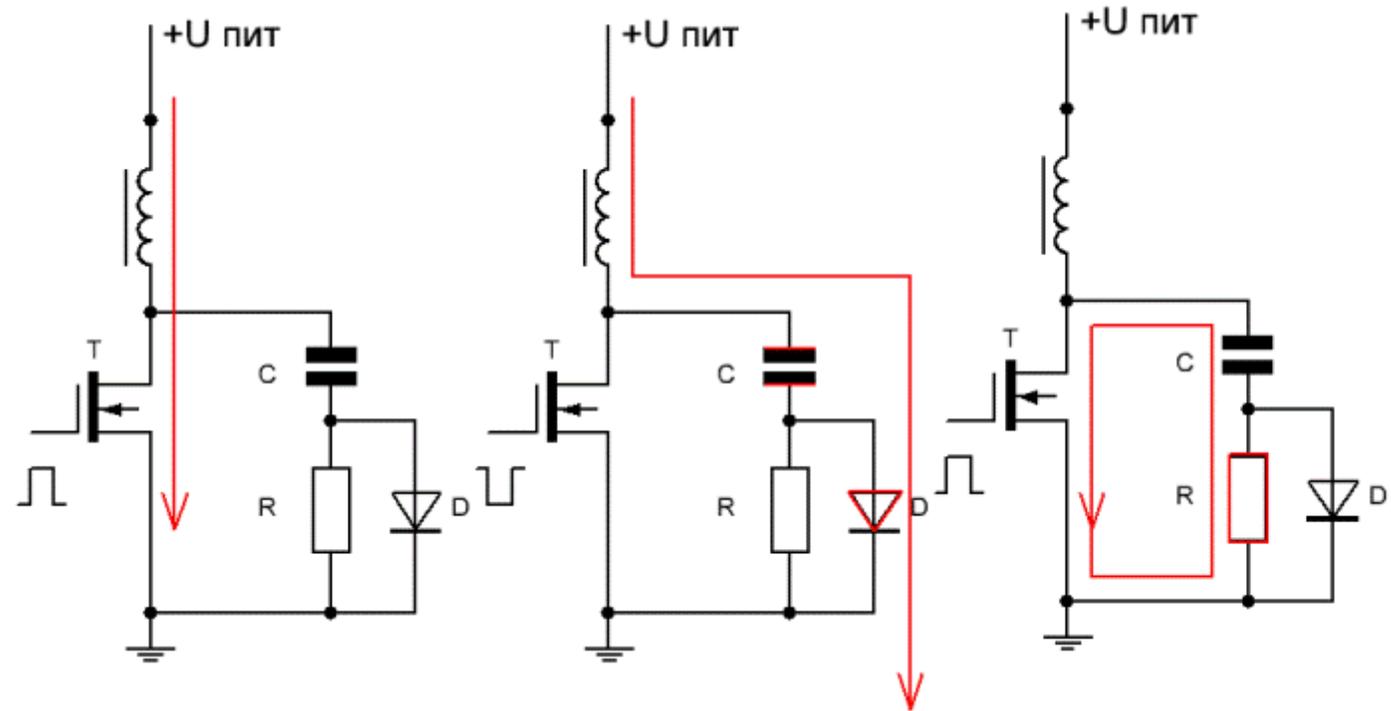
3. При дальнейшем увеличении управляющего напряжения  $U_{3u}$  рабочая точка переходит на линейный участок стоко-затворной характеристики;

$$I_c = K_n / 2 [U_{3u} - U_{пор}]^2 \text{ — уравнение Ховстайна.}$$



# Схемное включение транзистора - Снаббер

1. RC-цепочка (снаббер), включённая параллельно истоку-стоку, для подавления высокочастотных колебаний и больших импульсов тока, возникающих при переключении транзистора из-за паразитных индуктивности и ёмкости подводящих шин. Высокочастотные колебания и импульсные токи увеличивают выделение тепла в транзисторе и могут вывести его из строя, если транзистор работает в предельно-допустимом тепловом режиме). Снаббер также уменьшает скорость нарастания напряжения на выводах сток-исток, чем защищает транзистор от самооткрывания через проходную емкость.



## Схемное включение транзистора

2. **Защитные диоды (супрессоры)**, подключаемые параллельно транзистору и его затвору. При превышении напряжения питания на транзисторе (или при превышении управляющего сигнала на затворе транзистора) выше допустимого, например при импульсных помехах, супрессор ограничивает опасные выбросы напряжения и предохраняет затворный диэлектрик от пробоя.

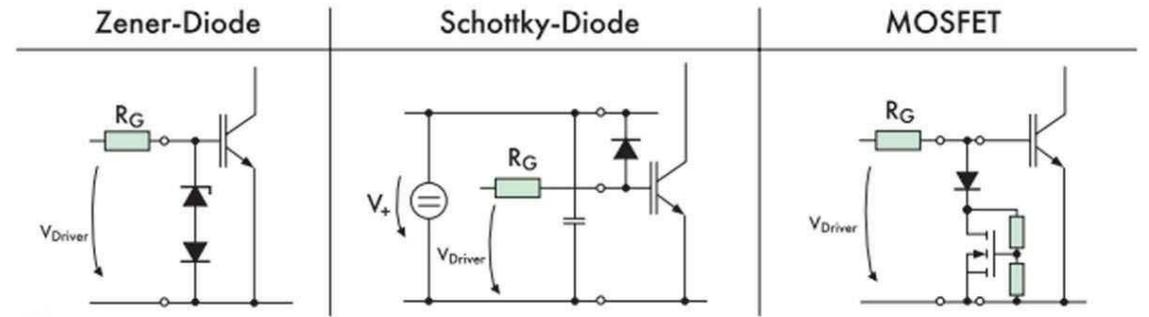
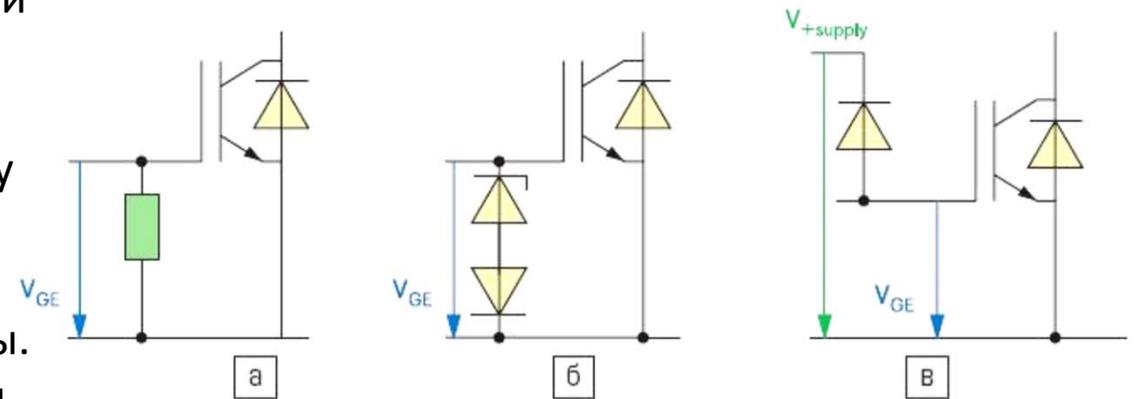


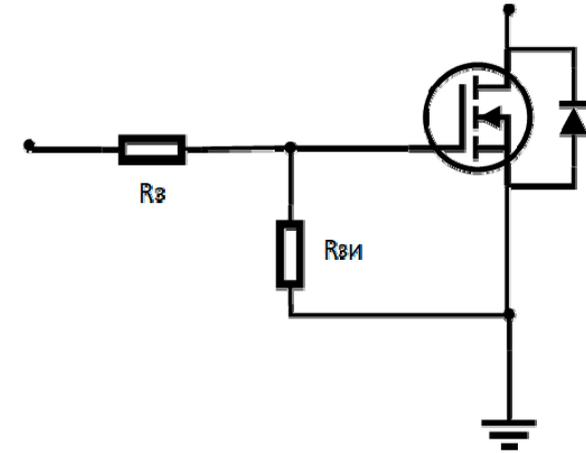
Рис. 13. Защита цепи затвора

3. В сильноточных устройствах с большим уровнем помех и электрических ко входам микросхем, выполненных на МОП-структурах, подключают по **паре диодов Шоттки**, включённых в обратном направлении, т. н. диодную вилку (один диод — между входом и общей шиной, другой — между входом и шиной питания) для предотвращения явления так называемого «защёлкивания» МОП-структуры. Однако, в некоторых случаях, применение диодной вилки может привести к нежелательному эффекту «паразитного питания».

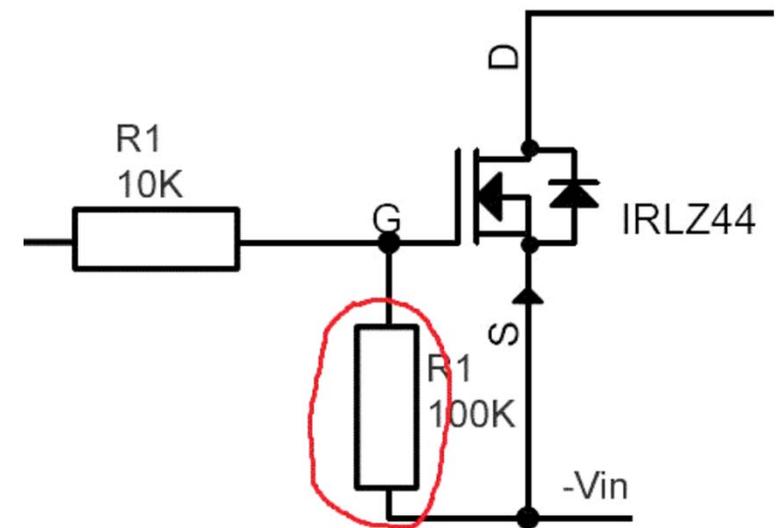


## Схемное включение транзистора

4. **Резистор, включённый последовательно в цепь затвора,** для уменьшения тока перезаряда затвора. Затвор мощного полевого транзистора имеет высокую ёмкость, и электрически эквивалентно представляет собой конденсатор ёмкостью в несколько десятков нанофард, что вызывает значительные импульсные токи во время перезарядки затвора короткими фронтами напряжения управления (до единицы ампер). Большие импульсные токи могут повредить устройство управления затвором транзистора.



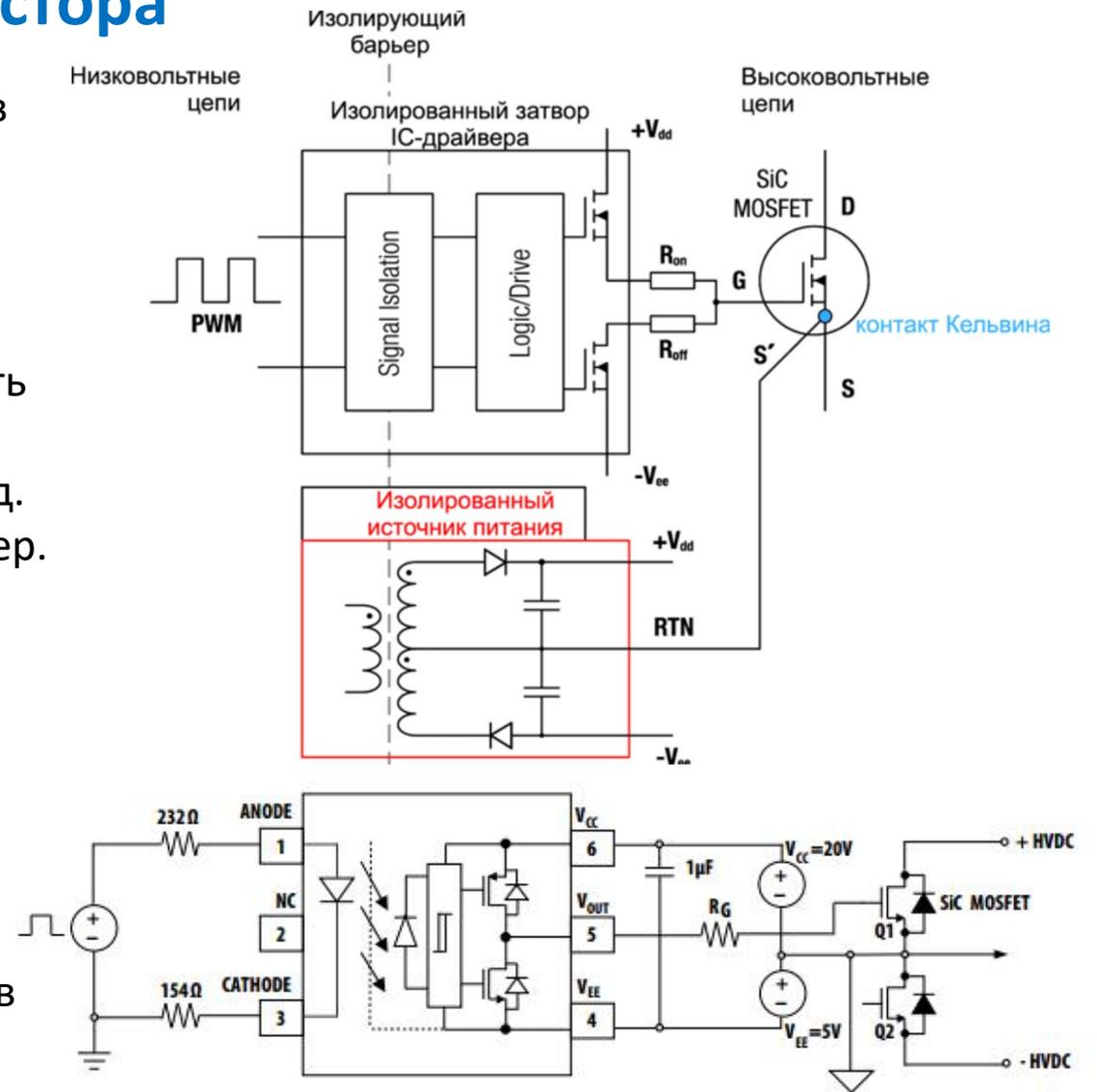
5. **Резистор, включённый между истоком и затвором,** для утечки заряда с затвора. Затвор сохраняет электрический заряд как конденсатор, и после снятия управляющего сигнала МОП-транзистор может не закрыться (или закрыться частично, что приведёт к повышению его сопротивления, нагреву и выходу из строя). Величина резистора подбирается таким образом, чтобы мало влиять на управление транзистора, но, в то же время, быстро сбрасывать электрический заряд с затвора.



# Схемное включение транзистора

6. Управление мощным МОП-транзистором, работающим в ключевом режиме на высоких частотах, осуществляют с помощью **драйвера** — специальной схемы или готовой микросхемы, усиливающей управляющий сигнал и обеспечивающей большой импульсный ток для быстрой перезарядки затвора транзистора. Это увеличивает скорость переключения транзистора. Ёмкость затвора мощного силового транзистора может достигать десятков нанофарад. Для быстрой её перезарядки требуется ток в единицы ампер.

7. Также используются **оптодрайверы** — драйверы, совмещённые с оптопарами. Оптодрайверы обеспечивают гальваническую развязку силовой схемы от управляющей, защищая её в случае аварии, а также обеспечивают гальваническую развязку относительно земли при управлении верхними МОП-транзисторами в мостовых и полумостовых схемах. Совмещение драйвера с оптопарой в одном корпусе упрощает разработку и монтаж схемы, уменьшает габариты изделия, его стоимость.



# Двухтактный преобразователь со средней точкой (Push-Pull converter)

## Принцип работы.

Транзисторы  $Q1$  и  $Q2$  работают в противофазе.

В момент времени  $t = 0$  по сигналу от  $CY$  включается транзистор  $Q1$  и к полуобмотке  $N1$  прикладывается напряжение  $E$  с полярностью без скобок. В точке полуобмотки  $N1$  будет «-», следовательно во всех точках трансформатора  $TV$  будет знак «-».

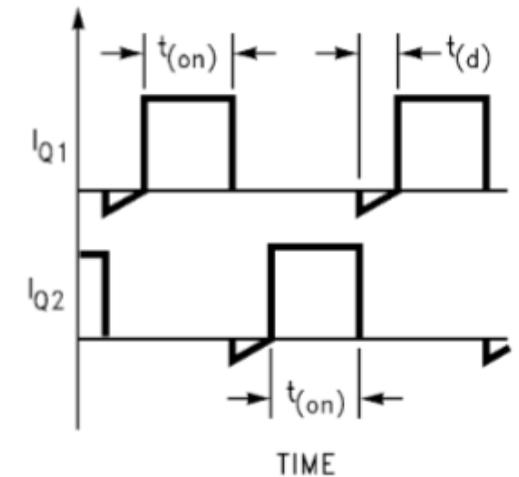
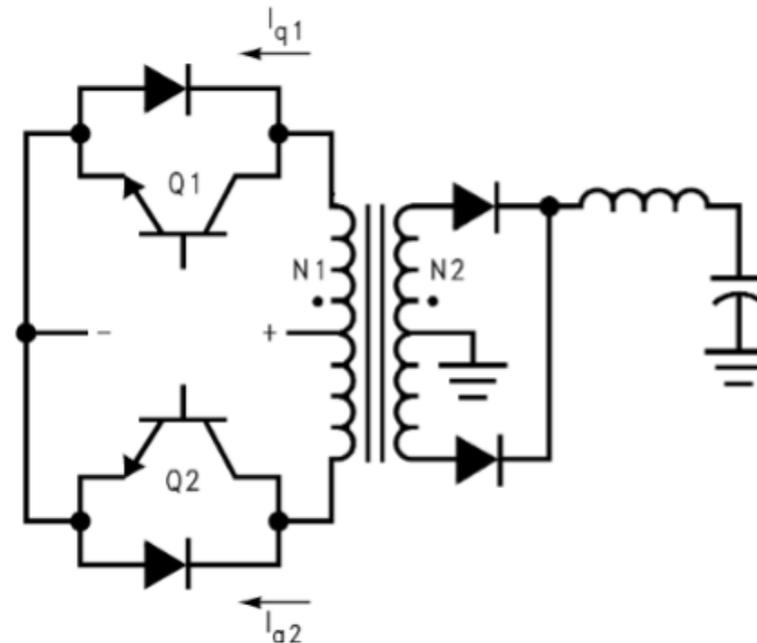
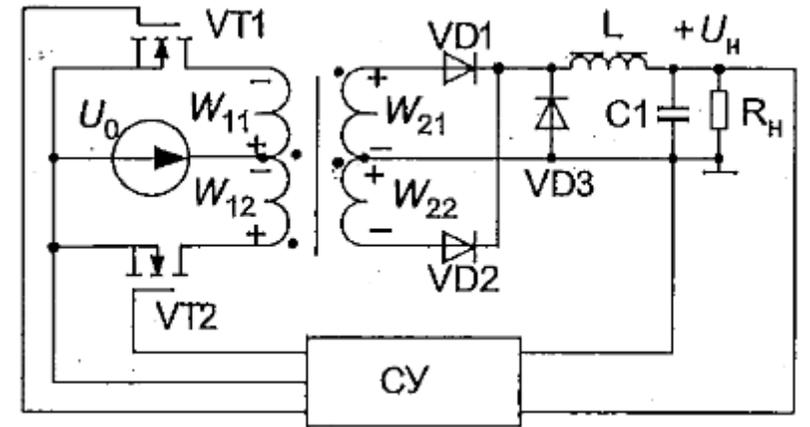
Путь тока:  $+E \rightarrow N1 \rightarrow Q1 \rightarrow -E$ .

Ток течет через  $N1$  и, соответственно, трансформированный ток протекает через нагрузку.

В момент  $t1 = T/2$  транзистор  $Q1$  закрывается, а  $Q2$  открывается. Полуобмотка  $N2$  подключается к источнику  $E$ . Полярность на всех обмотках трансформатора скачком меняется на обратную (полярность в скобках).

Путь тока:  $+E \rightarrow N2 \rightarrow Q2 \rightarrow -E$ .

Ток течет через  $N2$  и, соответственно, трансформированный течет по  $N2$  и через  $R_H$ .



# Полумостовой преобразователь (Half-Bridge converter)

Полумостовой преобразователь применяется для управления электродвигателями и трансформаторами

## Принцип работы.

Конденсаторы  $C1$  и  $C2$  создают двухполярный источник питания для инвертора с напряжением:  $U_{C1} = U_{C2} = E/2$ .

Поэтому в данной схеме напряжение на нагрузке будет в 2 раза меньше, чем в мостовой схеме.

В момент времени  $t = 0$  по сигналу от СУ включается транзистор  $VT1$ .

Нагрузка включается параллельно к конденсатору  $C1$ , на нагрузке:

$$U_{RH} = U_{C1} = E/2 .$$

В момент  $t_1 = T/2$  транзистор  $VT1$  закрывается, а  $VT2$  открывается.

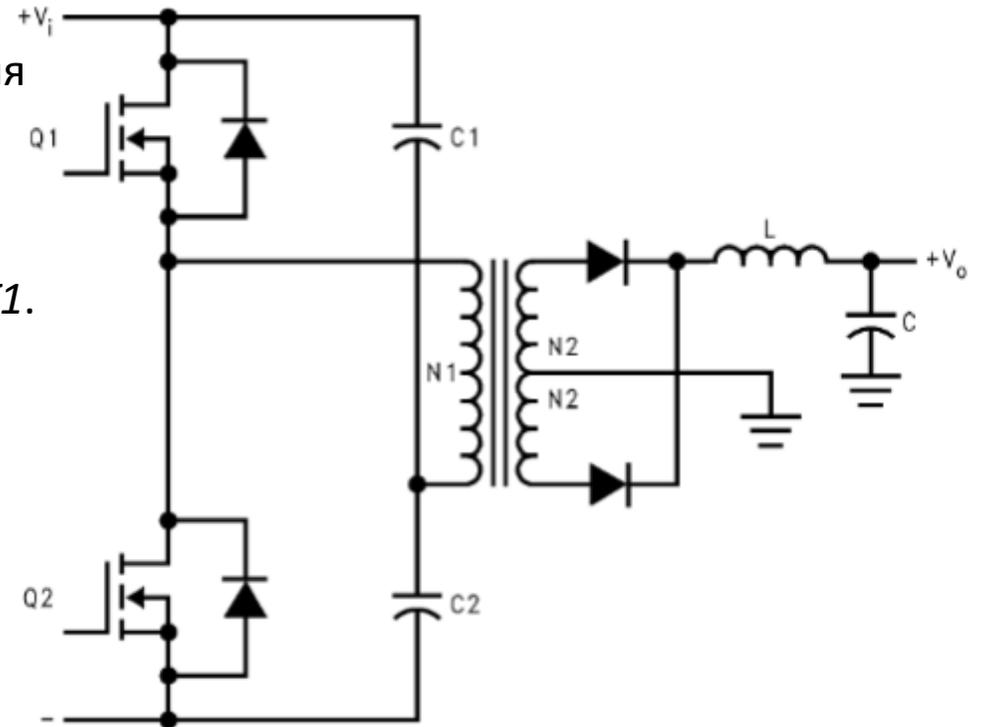
Нагрузка включается параллельно к конденсатору  $C2$ :

$$U_{RH} = U_{C2} = E/2 .$$

Полярность на  $R_H$  скачком изменяется на обратную.

Полярность на  $R_H$  без скобок.

Выбор конденсаторов осуществляется исходя из допустимой пульсации на них.



# Мостовой преобразователь (Full-Bridge converter)

Мостовой преобразователь применяется для управления электродвигателями и трансформаторами

## Принцип работы.

В момент времени  $t = 0$  по сигналу от СУ включаются транзисторы  $VT1$  и  $VT3$ . Нагрузка включается параллельно к источнику  $E$ .

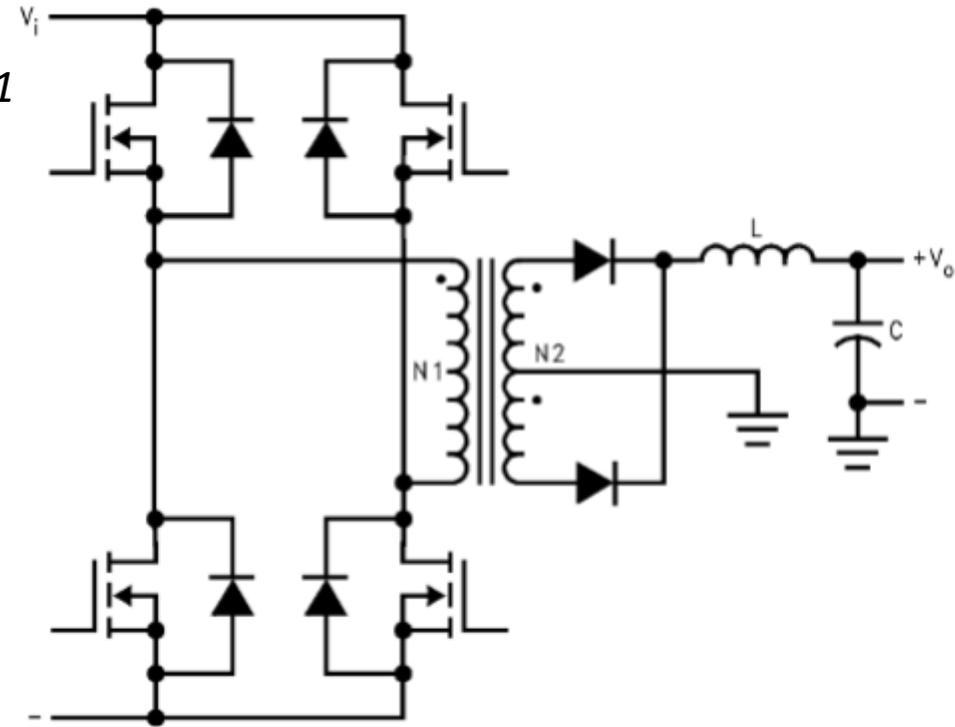
Путь тока:  $+E \rightarrow VT1 \rightarrow R_n \rightarrow VT3 \rightarrow -E$ .

Полярность на  $R_n$  без скобок.

В момент  $t_1 = T/2$  транзисторы  $VT1$  и  $VT3$  закрываются, а  $VT2$  и  $VT4$  открываются, полярность на  $R_n$  скачком изменяется на обратную.

Путь тока:  $+E \rightarrow VT2 \rightarrow R_n \rightarrow VT4 \rightarrow -E$

Из-за инерционности транзисторов возможна ситуация, при которой верхний и нижний транзисторы одного из плечей моста будут одновременно открыты (один еще не закрылся, а другой уже открылся). Для формирования паузы один из транзисторов выключают чуть раньше, чем  $T/2$ .

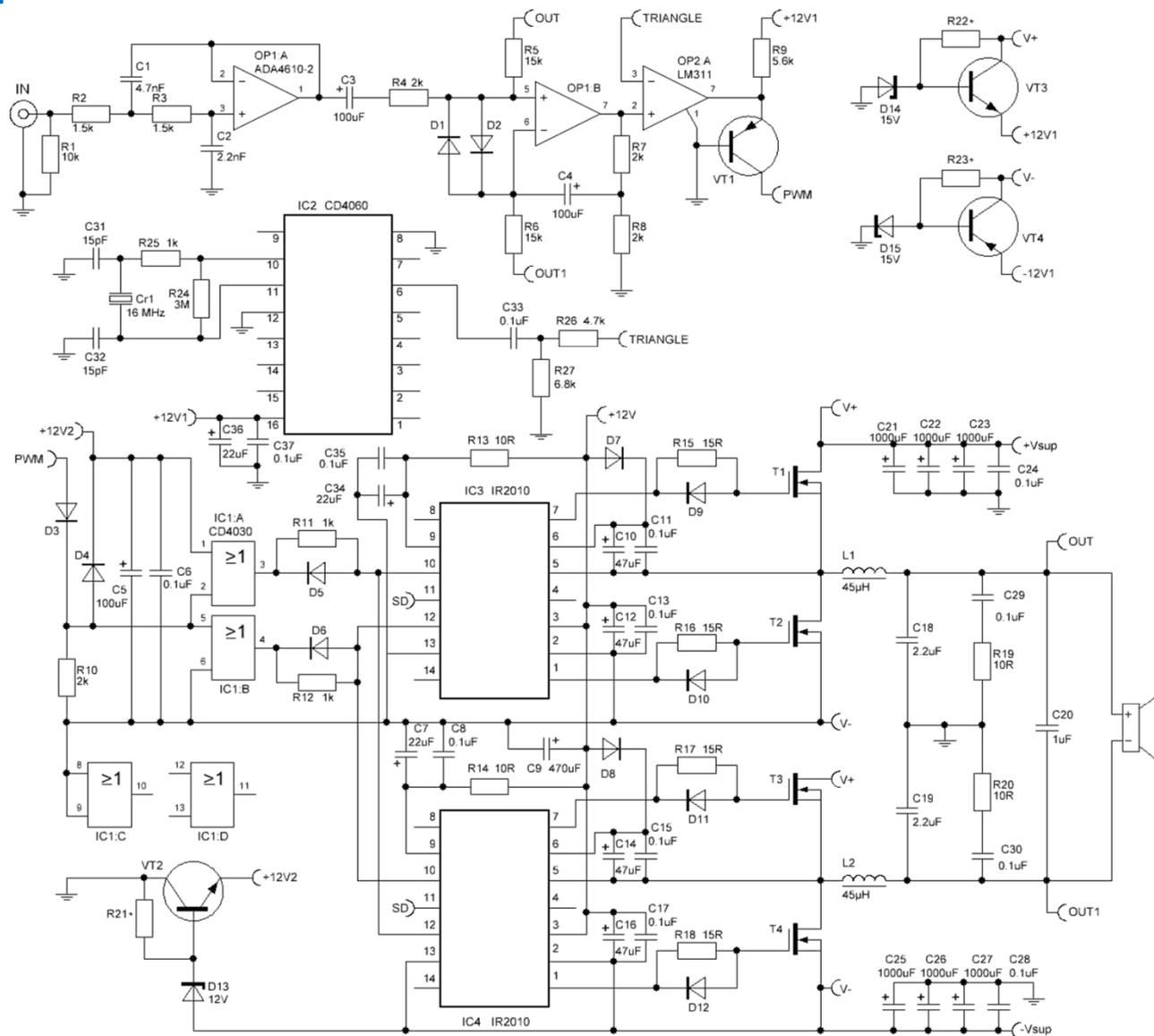


# Примеры применения MOSFET

## Усилитель класса D.

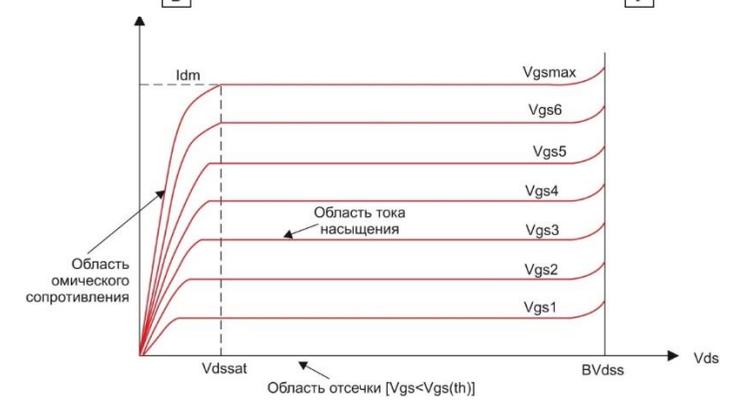
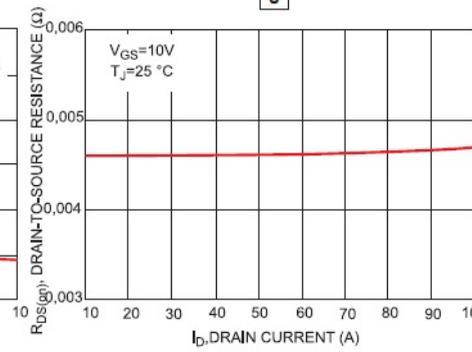
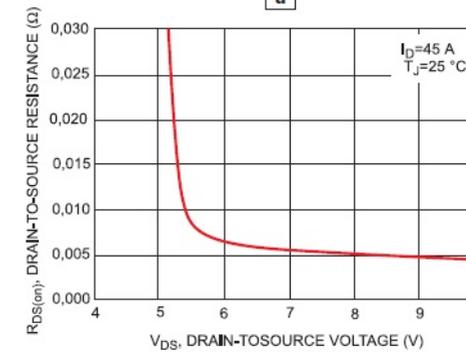
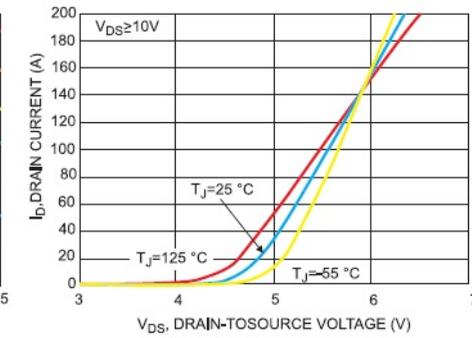
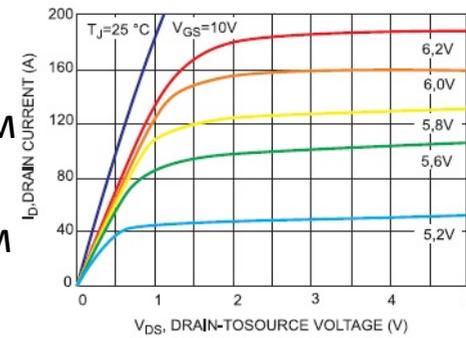
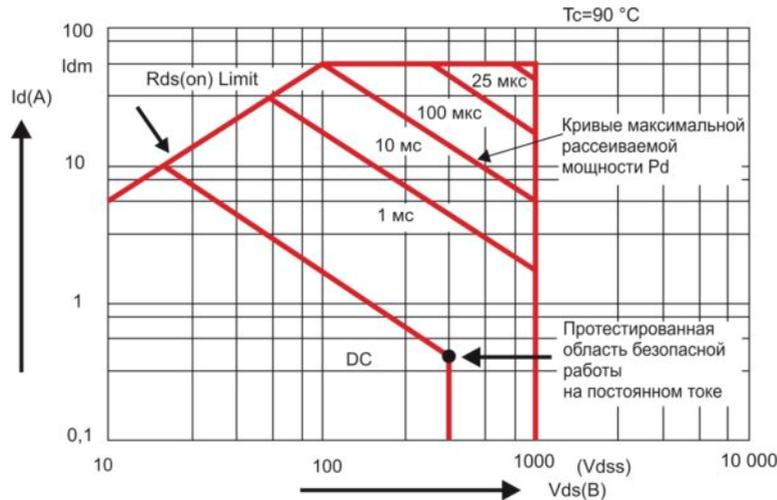
Транзисторы работают в импульсном режиме.  
Амплитуда на выходе регулируется с помощью ШИМ сигналов.

Для сглаживания и уменьшения гармоник используется фильтры L1 C18 и L2 C19.



# MOSFET в линейном режиме

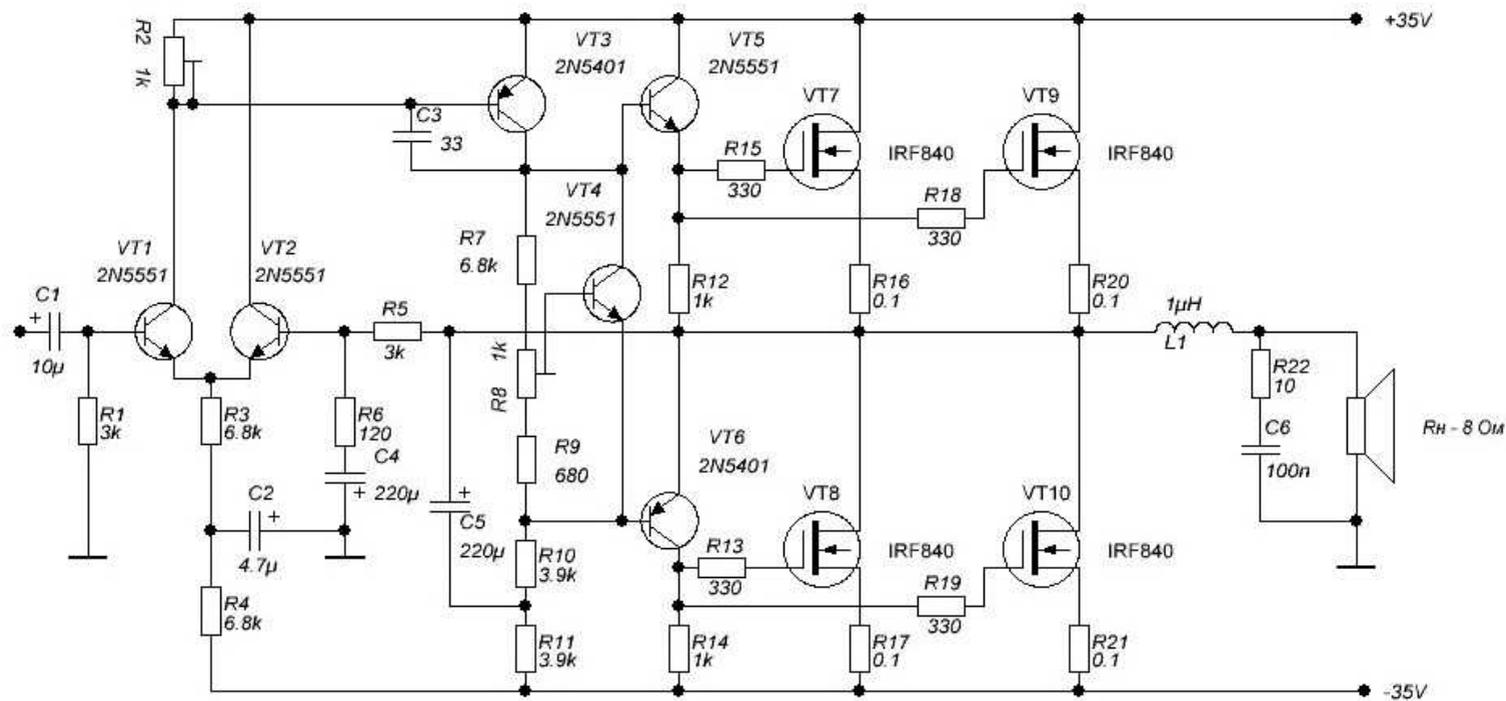
Активная нагрузка, линейные регуляторы и усилители класса А. Такой режим работы сильно отличается от «обычного» ключевого режима, когда транзистор находится либо во включенном, либо в выключенном состоянии. MOSFET, работающий в линейном режиме, подвержен воздействию большого тока протекающего при высоком приложенном напряжении, что приводит к значительной рассеиваемой мощности. Типовая выходная характеристика *N*-канального MOSFET, на которой присутствуют несколько рабочих областей. Область отсечки подразумевает, что напряжение на затворе ниже напряжения включения  $V_{gs(th)}$  и транзистор находится в закрытом состоянии или цепь «сток–исток» разорвана.



# MOSFET в линейном режиме

## Усилитель класса А

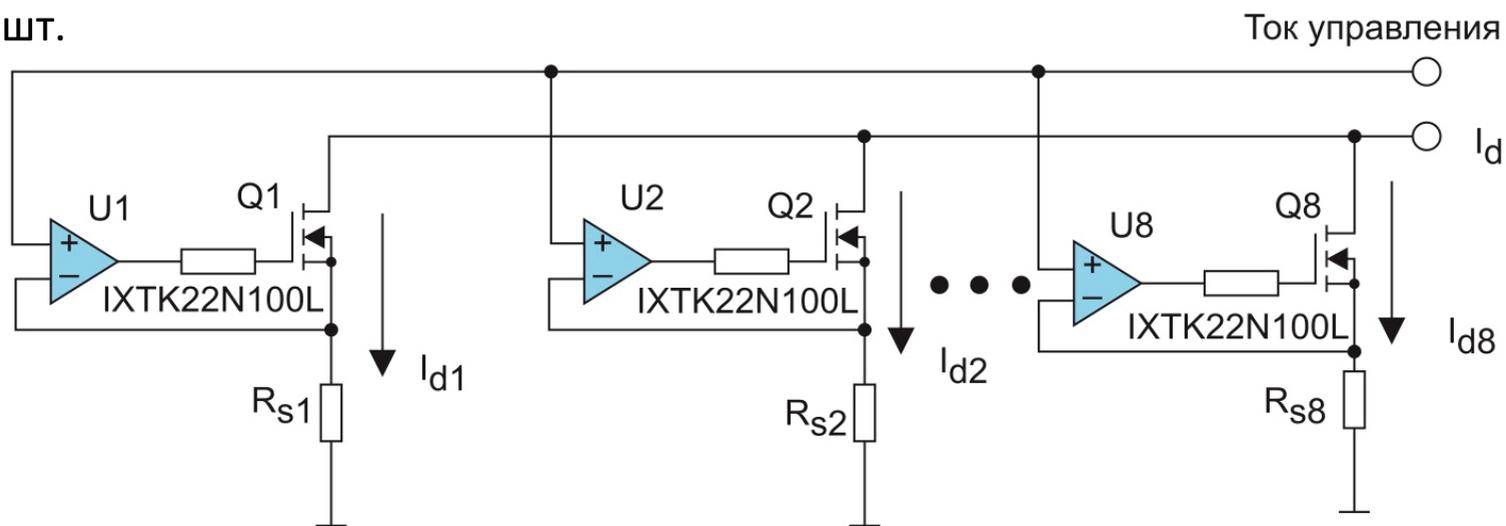
Выходные *N*-канальные силовые MOSFET транзисторы работают в линейном режиме. Данная схема требует рассеивания большой мощности и расширенной области безопасной работы FBSOA.



# MOSFET в линейном режиме

## Активная электронная нагрузка

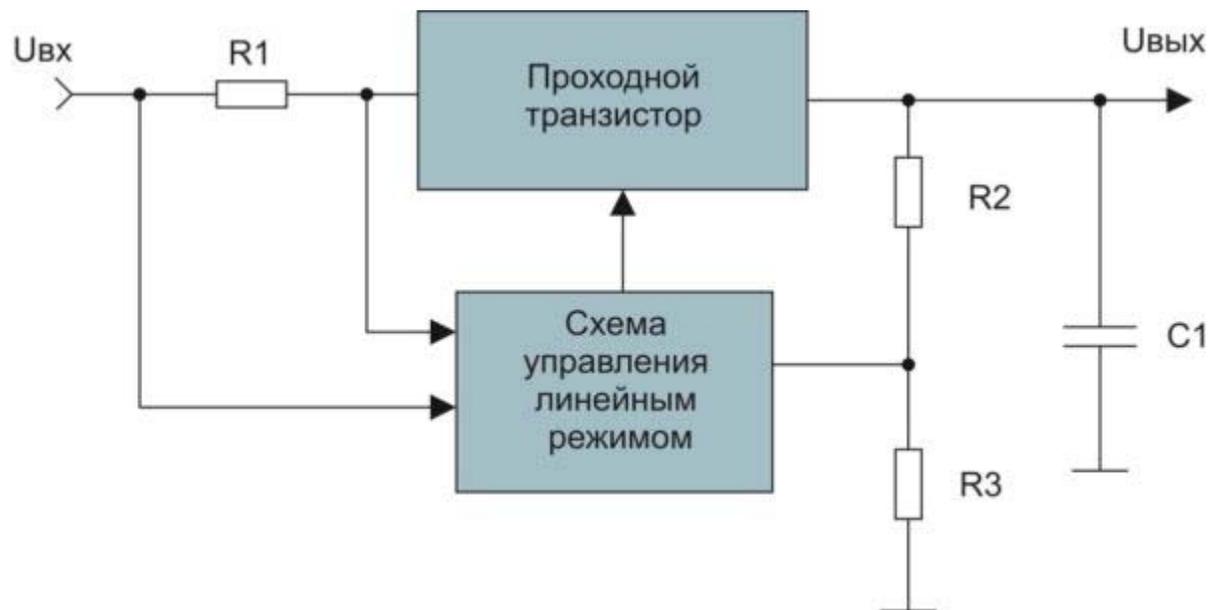
Резисторы  $R_{s1}$ – $R_{s8}$  служат для контролирования тока стока каждого MOSFET. Разброс их сопротивления будет определять точность распараллеливания токов в параллельно работающих транзисторах. Напряжение с измерительных резисторов  $R_{s1}$ – $R_{s8}$  подается на инвертирующий вход операционного усилителя, включенного в затвор MOSFET. Неинвертирующий вход операционного усилителя соединен с общим входом управления током стока. Для линейного режима необходимо оперировать областью безопасной работы SOA с максимальной рассеиваемой мощностью, например, 240 Вт при напряжении 800 В,  $I = 0,3$  А,  $T_c = +90$  °С. Например, максимальная выходная мощность источника питания равна 1200 Вт. При запасе на проверку защиты от короткого замыкания в 20%, мощность сборки из параллельно включенных MOSFET должна составить не менее 1440 Вт. Количество параллельно включенных MOSFET составит  $1440/192 = 8$  шт.



# MOSFET в линейном режиме

## Линейный регулятор

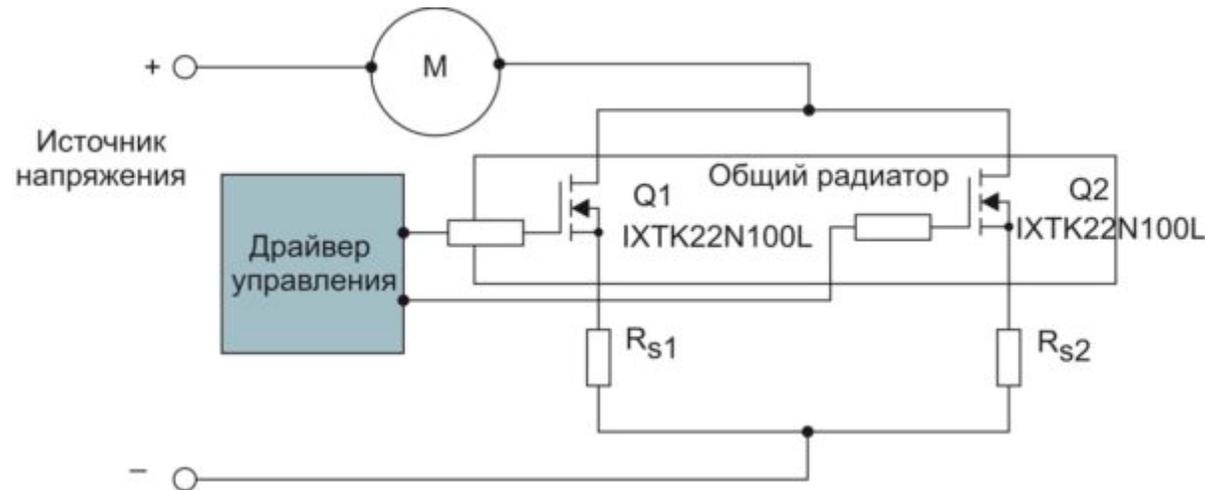
Типовой линейный регулятор, в котором выходные параметры устанавливаются с помощью изменения падения напряжения на проходном транзисторе. Проходной транзистор работает в линейном режиме, и его поведение похоже на переменный резистор. Данная схема требует рассеивания большой мощности и расширенной области безопасной работы FBSOA. *N*-канальные силовые MOSFET, приведенные в таблице, могут быть применены в данных приложениях для обеспечения большой выходной мощности.



# MOSFET в линейном режиме

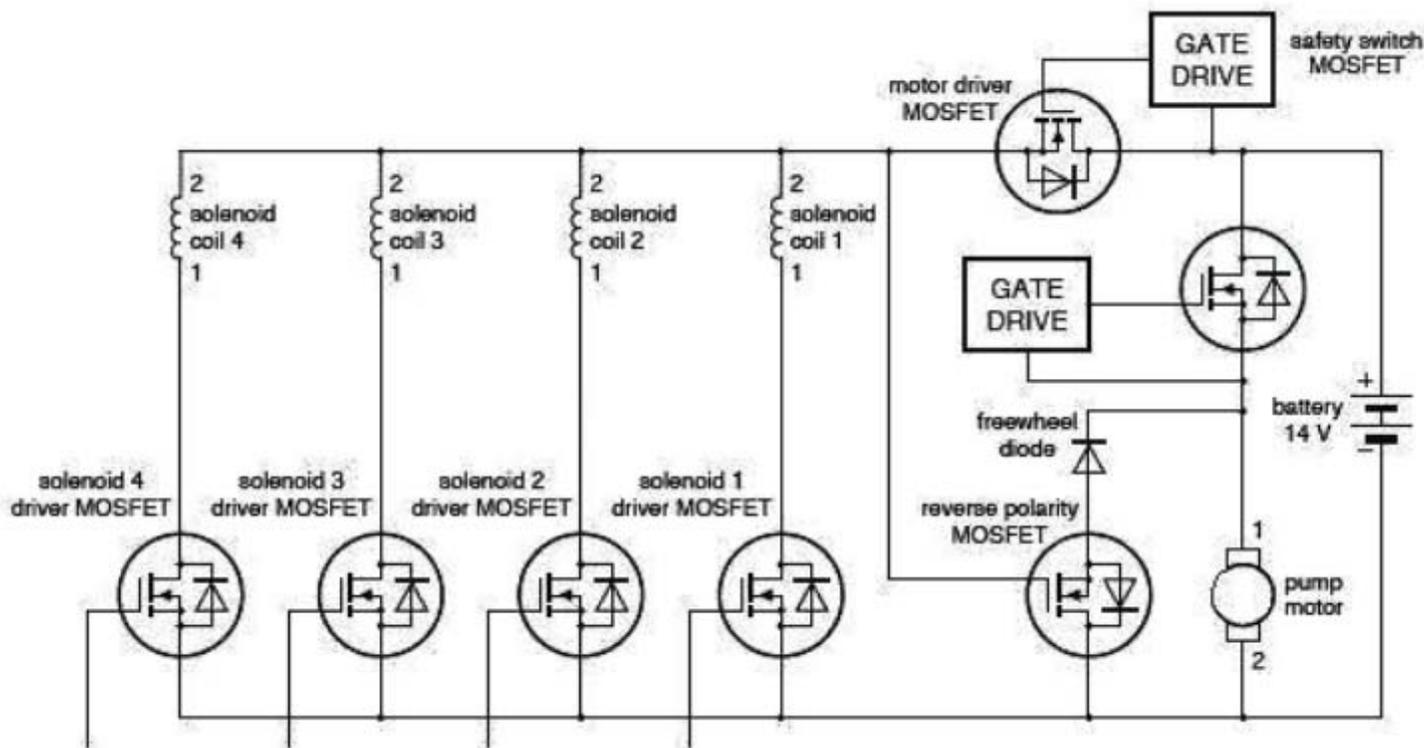
## Управление двигателем

Схема управления электродвигателем, в котором питающее напряжение от батареи подается через два параллельно включенных MOSFET, установленных на одном радиаторе. Ток стока силового MOSFET, работающего в линейном режиме, определяется напряжением «затвор–исток». Напряжение на электродвигателе равно разнице напряжения батареи минус напряжение «исток–сток». Управление осуществляется с помощью драйвера, который отслеживает ток через транзисторы и выставляет нужное напряжение на затворе.



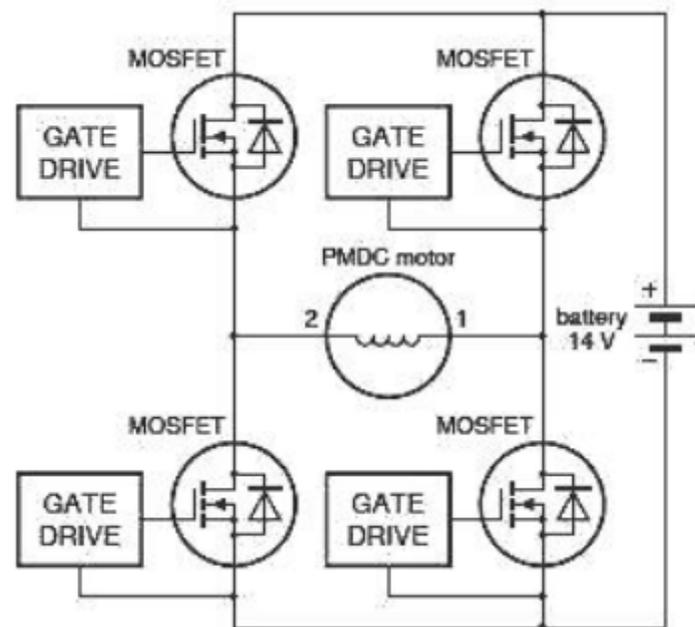
# Примеры применения MOSFET

Типовая блок-схема применения MOSFET транзисторов в антиблокировочной автомобильной системе (ABS) и электронной системе контроля устойчивости автомобиля (ESP).



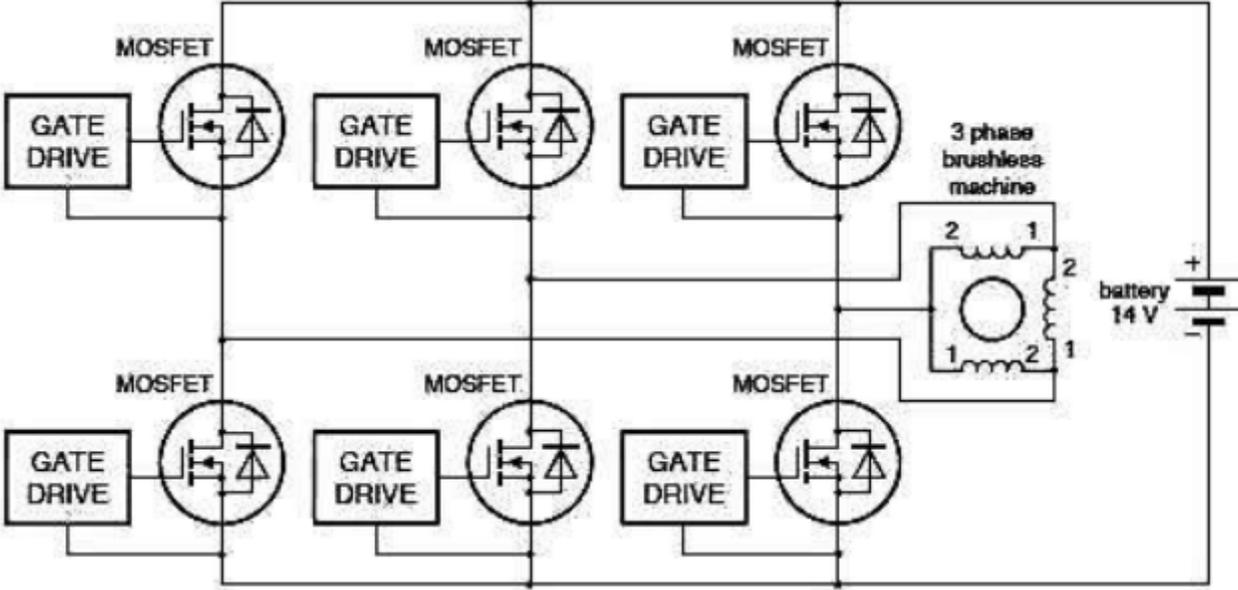
# Примеры применения MOSFET

Блок-схема блока управления приводом **электромотора стояночного тормоза** автомобиля построенном на MOSFET транзисторах.



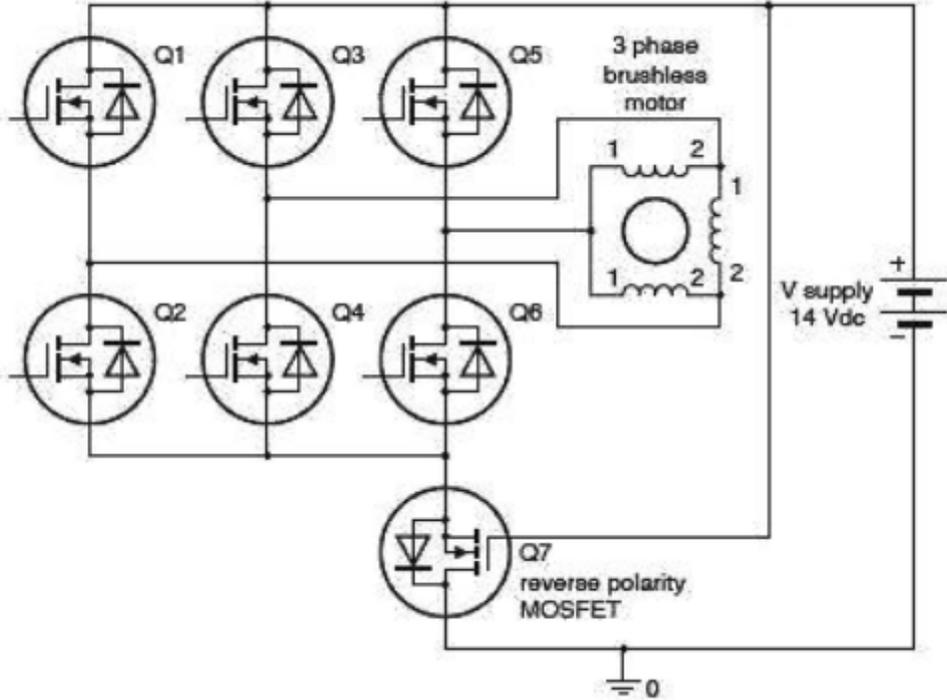
# Примеры применения MOSFET

Гибридная схема подключения блока управления стартером генератора с помощью MOSFET транзисторов.



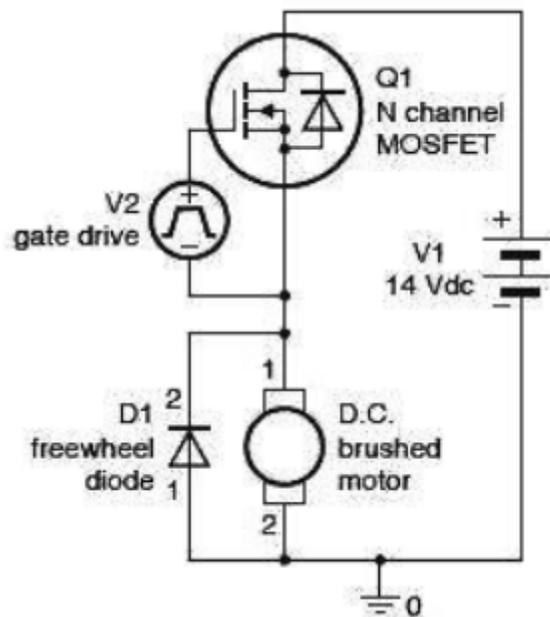
# Примеры применения MOSFET

Блок-схема управления бесщеточным трехфазным электромотором с защитой от переплюсовки.



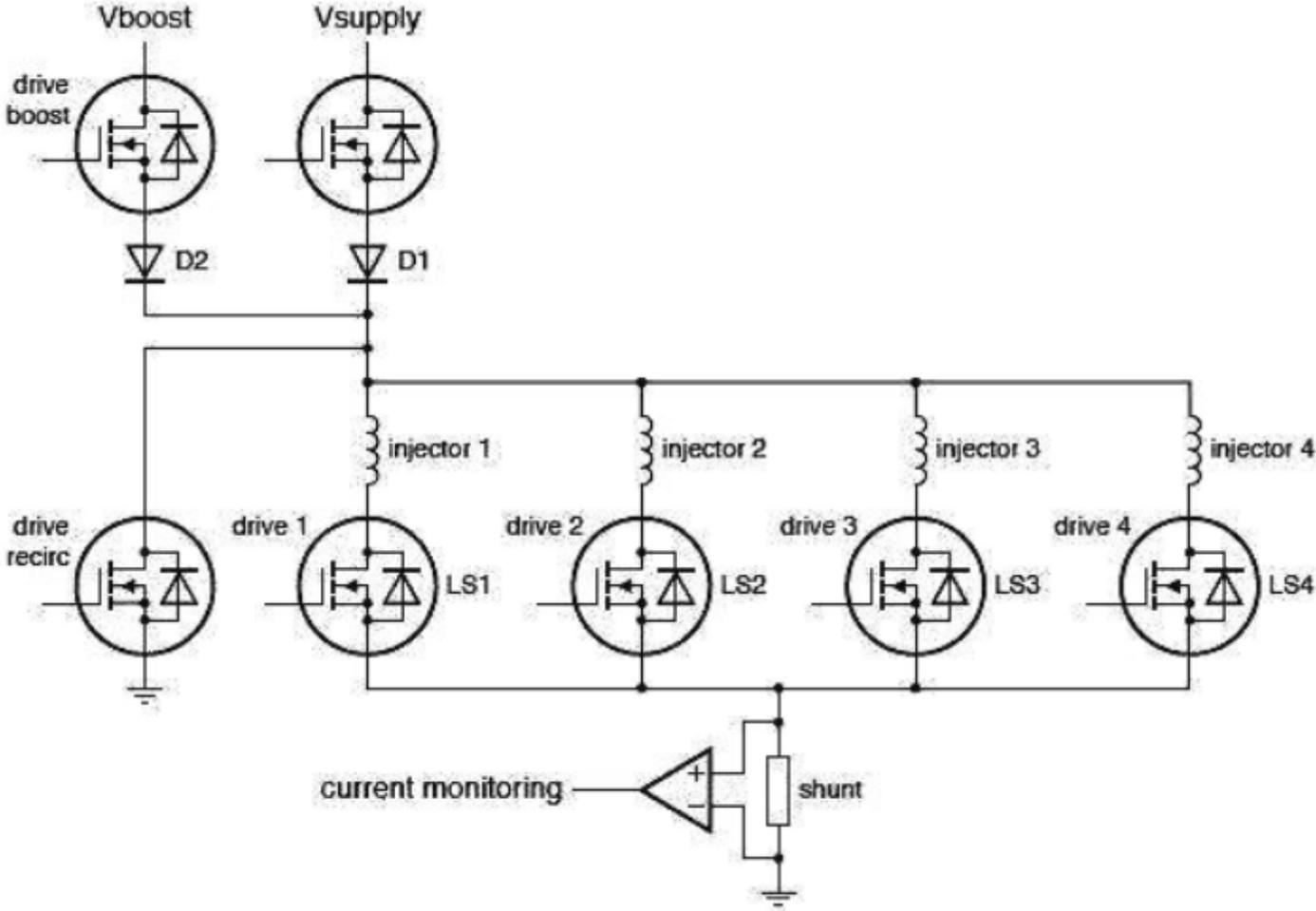
## Примеры применения MOSFET

Блок-схема управления электромотором. Данная схема предназначена для управления высокоскоростным электромотором постоянного тока.



# Примеры применения MOSFET

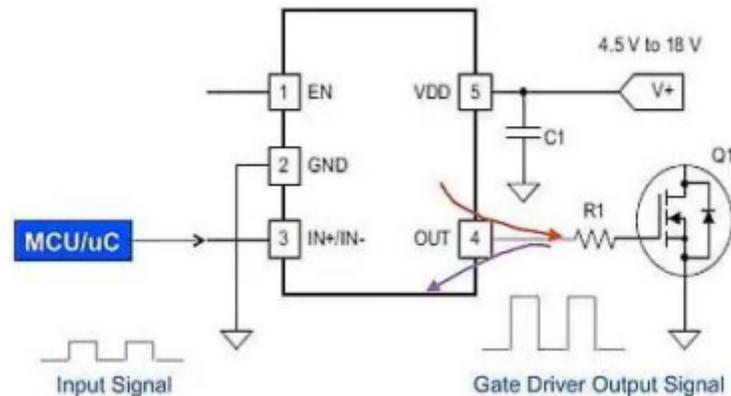
Блок-схема впрыска для типового дизельного автомобильного двигателя, построенного на MOSFET.



# Драйверы затвора

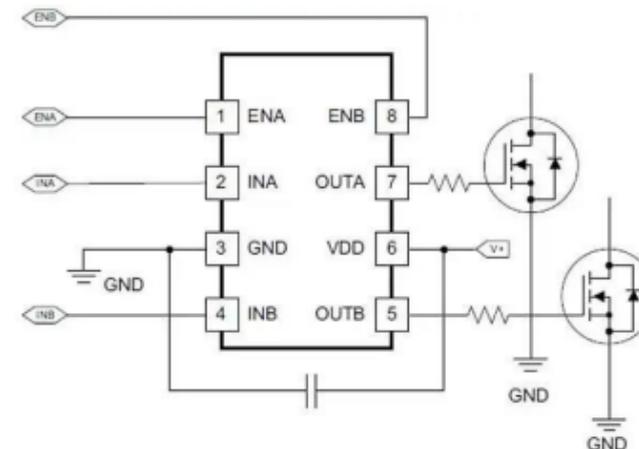
## ПРЕИМУЩЕСТВА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

- Упрощает схему управления, разгружает ее по току
- Обеспечивает быстрое переключения транзистора для минимизации коммутационных потерь (увеличение КПД)
- Согласование уровней между управляющей схемой и транзистором
- Простая реализация схемы управления транзистора в верхнем плече
- Безопасная работа с полумостовой схемой, исключающая возникновение сквозного тока
- Защита транзистора при аварийном режиме работы
- Увеличение помехоустойчивости и стойкости к электромагнитным помехам схемы управления



## ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ

- AC/AC-, AC/DC-преобразователи
- Резонансные и квазирезонансные источники питания
- Корректоры коэффициента мощности
- Схемы синхронного выпрямления
- Приводы электродвигателей переменного и постоянного тока
- Мощные коммутаторы нагрузки
- Инверторы для солнечных панелей
- Интеллектуальные модули питания
- Мощные DC/DC-преобразователи
- Источники бесперебойного питания



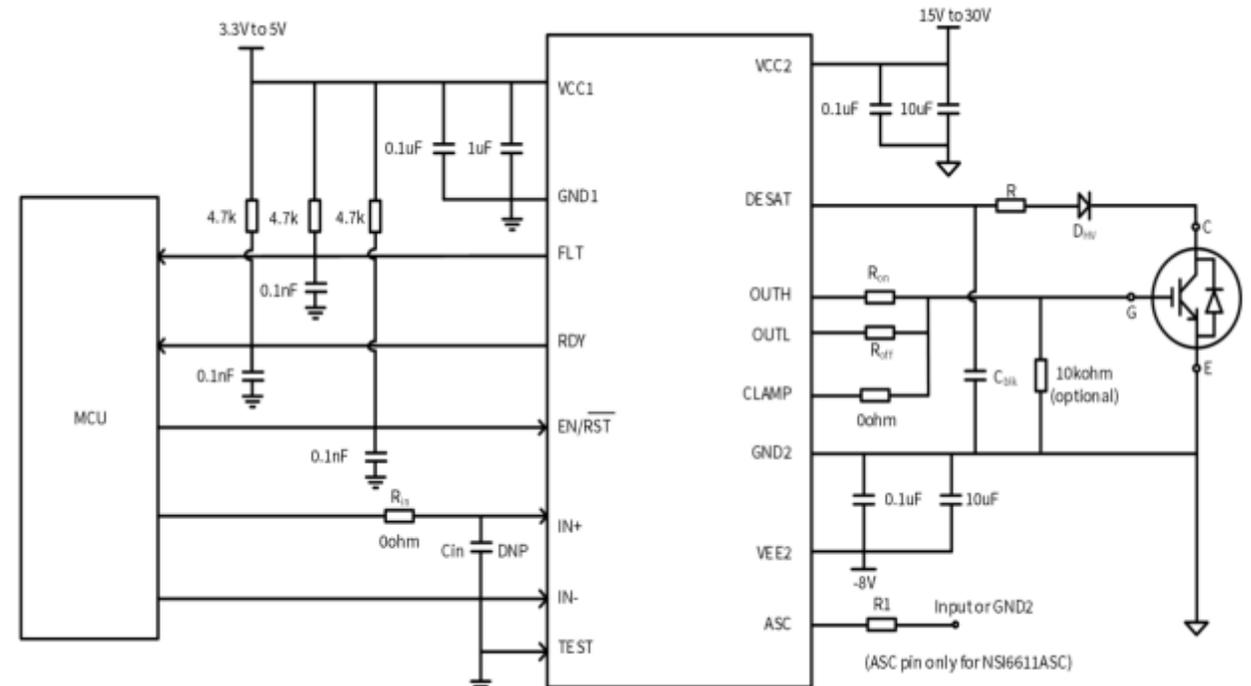
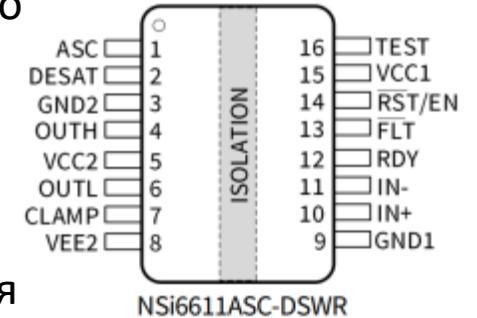
# Интеллектуальные изолированные драйверы от Novosense

## ОСОБЕННОСТИ

- Работа с IGBT и SiC MOSFET
- Напряжение изоляции 5.7 кВ (RMS)
- Рабочее напряжение драйвера 1500 В (RMS)
- Питание драйвера до 32 В со схемой UVLO
- Выходной ток  $\pm 10$  А
- Высокая стойкость к синфазным помехам  $\pm 150$  кВ/мкс
- Функция активного короткого замыкания ASC
- Высокое быстродействие схемы DESAT 200 нс
- Мониторинг состояние работы микросхемы (выводы Fault и Ready)
- Типовая задержка распространения 80 нс
- Мягкое выключение током 400 мА
- Макс. искажение длительности импульса 30 нс
- Схема активного подавления эффекта Миллера
- Температурный диапазон работы  $-40^{\circ}\text{C} \sim 125^{\circ}\text{C}$
- Широкий корпус SO16-300 (SOW16)
- Квалификация AEC-Q100 для автомобильного применения (NSi66x1AxC-Q)

## ПРИМЕНЕНИЕ

- Тяговые инверторы для электромобилей
- Зарядные устройства для гибридных авто и электромобилей
- Промышленные приводы электродвигателей
- Инверторы солнечных панелей
- Мощные импульсные источники питания



**Спасибо за внимание**

**ЧУ ПО «Социально-технологический колледж» г Тула**

**Преподаватель: Борисов Алексей Альбертович**