

Низкочастотные фильтры, формирователи импульсов и триггеры, через которые проходит сигнал для снижения помех, должны вносить минимальные искажения и время задержки сигнала.

#### **3.5.4 Встроенные функции защиты и контроля в драйвере**

Для защиты MOSFET или IGBT модулей при поломках, рекомендуется применять в драйвере различные быстродействующие и эффективные функции защиты, такие как защита при перегрузках по току и коротких замыканиях, защита при превышении напряжения сток-исток и коллектор-эмиттер, защита от перенапряжений затвора, от перегрева, и контроль управляющих напряжений  $V_{GG+}$  и  $V_{GG-}$ .

Далее приводятся пояснения по поводу встроенных защитных функций драйвера на примере рис.3.40. Аспекты по реализации и заданию параметров изложены в п.3.6.

##### *Защита при перегрузках по току и коротких замыканиях*

Источник тока можно получить как аналоговый сигнал (измеренный через шунт, датчик тока,  $R_{DS(on)}$  управляемого силового MOSFET или чувствительные ячейки истока или эмиттера) или как превышение максимального значения (обеднение IGBT). Как только будет обнаружен сбой при сравнении текущего значения с фиксированным максимальным значением, устанавливается режим сбоя (ERROR статус) в коммутирующем потенциале или – в случае потенциально-изолированных датчиков – в первичной цепи драйвера, что блокирует силовые транзисторы, пока не поступит сигнал RESET. Если запись ошибок интегрирована на вторичной стороне, сигнал состояния будет передан в первичную цепь через схему изоляции потенциала. Если интегрированы высокоточные датчики тока с изоляцией потенциала – например, в SKiiPACK и в некоторых MiniSKiiP – их выходной сигнал может служить реальным значением для схем управления или для обнаружения токов в общей шине.

##### *Защита при превышении напряжения затвора*

В отличие от всех функций защиты, описанных до сих пор, защита драйвера должна периодически ограничивать напряжение затвора без сигнала сбоя, который требует отключения силовых транзисторов. Поэтому нет связи с записью ошибок. Более детально это описано в п.3.6.1 и 3.6.3.

##### *Защита при превышении напряжения сток-исток и коллектор-эмиттер*

Ограничение напряжения на главных выводах силового транзистора можно реализовать внутри самого транзистора (защита от пробоев у MOSFET) при помощи пассивных или активных цепей, которые реализуют определенное частичное включение транзистора при перенапряжениях (см.п.3.6.3).

Простую защиту, которая не способна обнаружить выбросы напряжений при коммутации и другие короткие перенапряжения, можно по выбору реализовать (опция «U») в драйвер SKiiPPACK как контроль постоянного напряжения питания. Квази-потенциально изолированный датчик будет показывать реальное напряжение питания, и передавать его в основные цепи управления как аналоговый сигнал, записывать в память ERROR при превышении предельного значения. Кроме того, ключ brake может защитить, например, конденсаторы питания при обратных связях.

#### *Защита при перегреве*

Температуру кристаллов силовых транзисторов и радиатора возле кристаллов можно определить методом расчета, описанным в п.3.6.3.3. Если датчик изолирован, сигнал температуры (напр. напряжение) также может быть передан в основную цепь управления. При превышении предельного значения в память ошибок записывается ERROR.

#### *Защита от пониженных напряжений питания затвора $V_{GG+}$ и $V_{GG-}$ .*

Если управляющее напряжения затвора значительно упадет, вторичное управление, защита и функции передачи могут перестать работать. Кроме того, силовые транзисторы больше не будут полностью управляемы или вообще закроются. Для обнаружения этого состояния необходимо контролировать одно из напряжений или работу внутреннего источника питания драйвера. При поломке в память ошибок записывается ERROR.

### **3.5.5 Временные константы и функции блокировки**

#### *Подавление коротких импульсов*

Когда трансформаторы импульсов или оптопары используются для изоляции потенциала управляющих сигналов, особенно нужно защитить драйвер от импульсов с малой амплитудой или коротких управляющих импульсов (помехи) которые могут испортить драйвер. Триггеры Шмидта, например, можно последовательно включить с изоляторами потенциала, которые подавят все сигналы включения и выключения с амплитудой ниже логического уровня (CMOS, TTL) или  $< 0.2 \dots 0.5$  мкс. Подобное решение нужно применить и на вторичной стороне оптопар.

#### *Мертвая зона при управлении плечом моста и блокировка при коротком замыкании плеча*

MOSFET и IGBT одного плеча моста не должны включаться в одно время в цепях источника напряжения во избежание короткого замыкания плеча. В статическом состоянии этого можно избежать блокировкой обоих драйверов, даже если на входные сигналы драйверов действуют помехи (непригодно для цепей с источниками тока, так как от драйверов будет требоваться работа с перекрытием).

В зависимости от типа транзистора, применения и драйвера, мертвая зона может составлять 2...10 мкс.

*Длительность селекторного импульса защиты от короткого замыкания при измерении тока стока или коллектора и напряжения сток-исток или коллектор-эмиттер соответственно*

Если транзистор выключился из-за превышения одного из предельных значений, измеряется импульс тока включения. При контроле процесса обеднения в IGBT, нужно также учитывать характеристики напряжения динамического насыщения. В течение первых микросекунд времени включения,  $V_{CEsatdyn}$  значительно возрастает по сравнению с  $V_{CEsat}$  (рис.3.42). Поэтому, цепь контроля должна реагировать в соответствии с кривой  $V_{CEsat}$  во время стробирования, как показано на рис.3.42. Для мягкой защиты от коротких замыканий, время стробирования должно составлять около 10 мкс макс. (см.п.3.6).

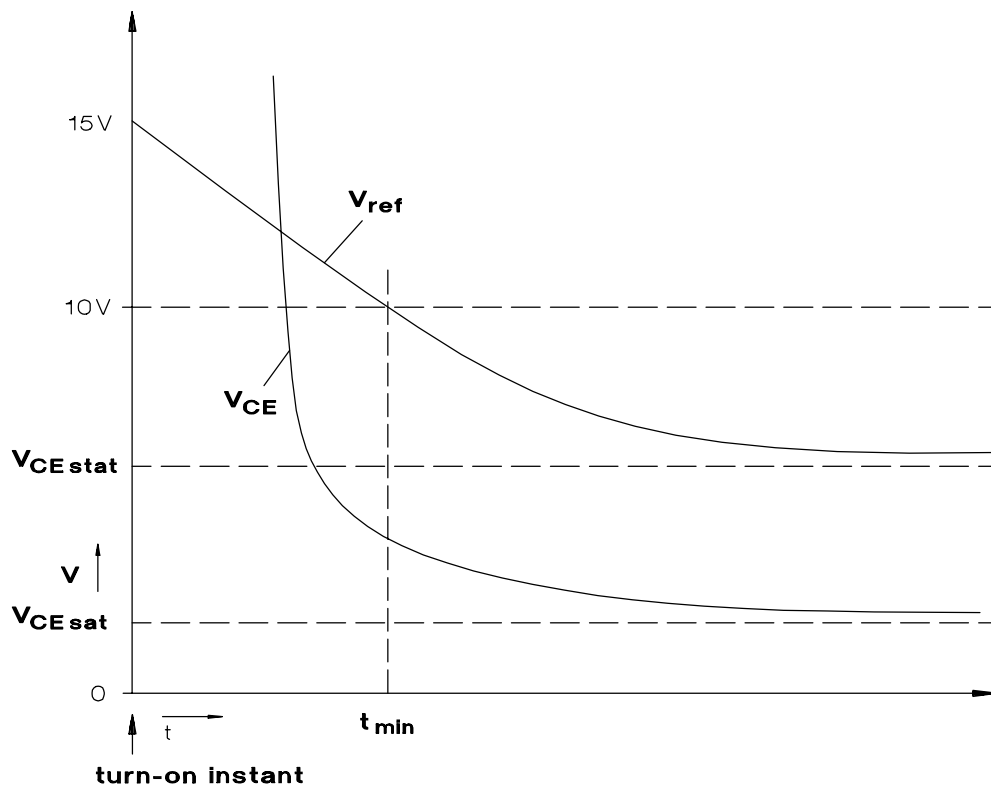


Рис.3.42 Характеристика напряжения динамического насыщения IGBT и возможный уровень защиты  $V_{ref}$

### 3.5.6 Передача управляющих сигналов и энергия управления

Управляющий сигнал и энергия управления должна быть передана от управляющего устройства к каскаду драйвера, который, в свою очередь, передает дальше управляющие и сигналы ошибки и, если потребуется, аналоговые измеренные значения (ток, температура, напряжение питания (по выбору)).

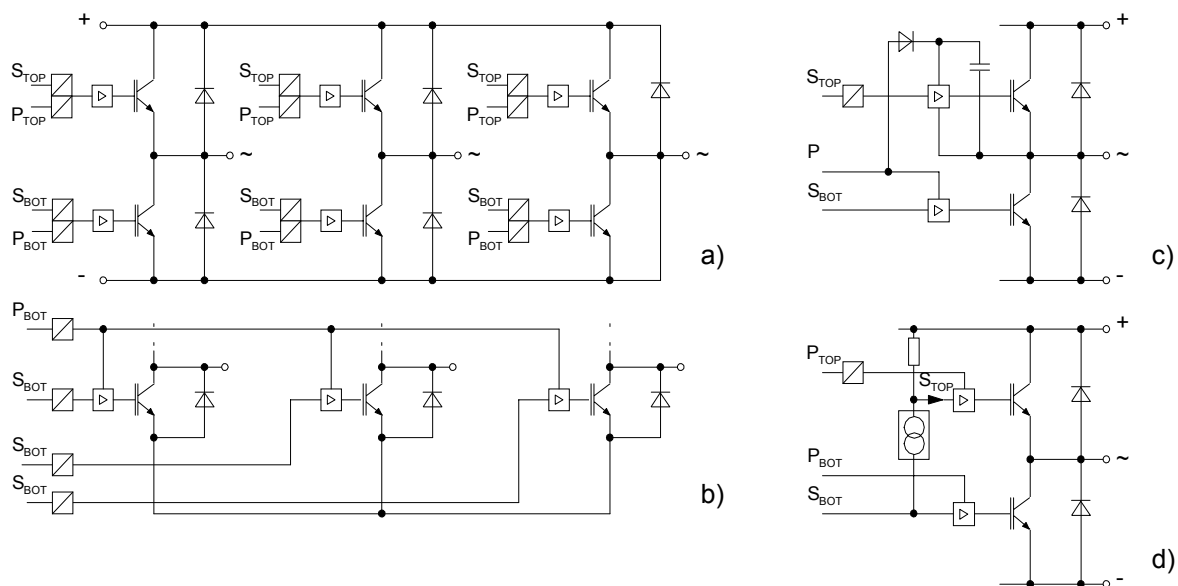


Рис.3.43 Принципы селекции сигнала и передачи энергии

$S_{TOP}$ ,  $S_{BOT}$ : управляющие сигналы для верхнего /нижнего ключей

$P_{TOP}$ ,  $P_{BOT}$ : энергия управления для верхнего /нижнего ключей

a) максимальный вариант    b) с общим источником энергии верхних драйверов

c) схема с компенсирующей обратной связью    d) схема сдвига уровня

В большинстве случаев сигналы передаются через оптические или трансформаторные (индуктивные) изоляторы потенциала или через квази-изоляторы потенциала, такие как цепи с длинными линиями или со сдвигом уровня. На рис.3.43 показана наиболее важная схема передачи сигнала и энергии.

На рис.3.43а общая конфигурация с изоляцией потенциала управляющих сигналов (S) и управляющей энергии (P), по одному на каждый драйвер. Такая конфигурация предпочтительней (кроме дешевых устройств), так как имеет низкую восприимчивость к помехам и минимальные взаимные влияния ключей.

Вариант b) содержит отдельную изоляцию потенциалов для управляющих сигналов и всех нижних драйверов, и только одно общее разделение потенциалов для управляющей энергии нижних драйверов. Это используется в основном в маломощных устройствах и предпочтительно в большинстве ИРМ.

Принцип схемы с компенсирующей обратной связью для питания верхних ключей без реальной изоляции потенциалов показан на рис 3.43с. Рис.3.43d представляет схему для сдвига уровня, где сигнал управления  $S_{TOP}$  передается без гальванической развязки через высоковольтный источник тока. Простым решением для устройств с очень коротким временем коммутации является управление затвором напрямую через импульсный

трансформатор, который будет передавать управляющие сигналы, модулированные управляющей энергией (переменное напряжение) [277].

Наиболее важными требованиями к гальванической развязке являются высокое напряжение изоляции (2.5...4.5 кВэфф) и значительная  $dv/dt$ - выносливость (15...75 кВ/мкс). Высокую  $dv/dt$ - выносливость можно получить при малых взаимных емкостях в пределах пФ- диапазона с первичной во вторичную сторону. Это будет минимизировать передачу помех, вызванных токами смещения при коммутации (рис.3.44).

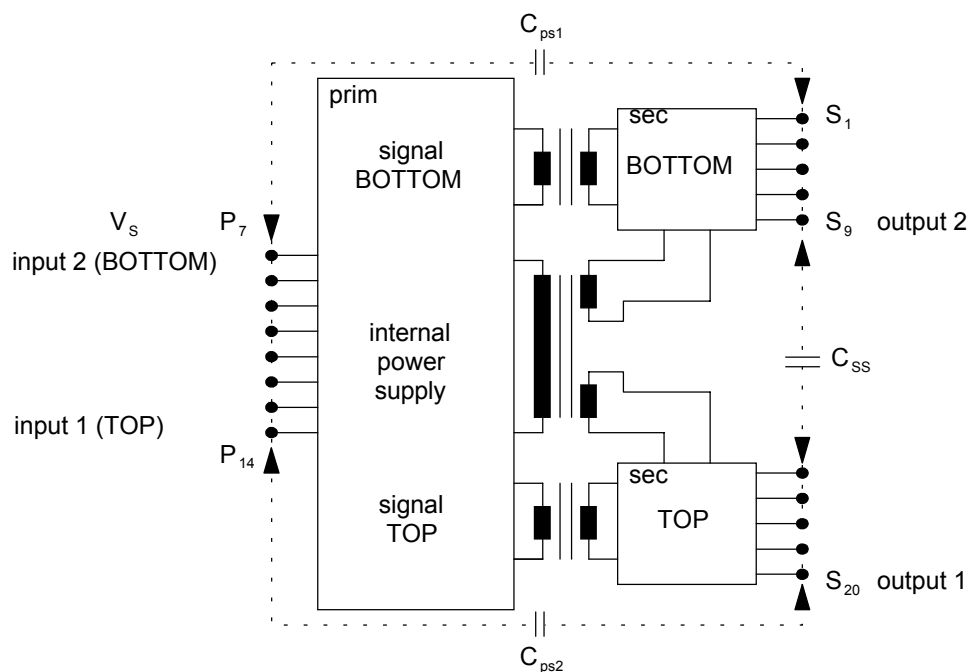


Рис.3.44 Эквивалентные взаимные емкости в полумостовом драйвере с изоляцией потенциалов

- $C_{ps1}$ : емкость между первичной и верхней вторичной стороной
- $C_{ps2}$ : емкость между первичной и нижней вторичной стороной
- $C_{ss}$ : емкость между верхней и нижней вторичными сторонами

### 3.5.6.1 Данные управления и обратная связь

Следующая таблица содержит наиболее часто используемые единицы передачи с и без изоляции потенциалов и их возможности.

| Изоляция потенциалов   | Трансформаторная         | Оптическая       | Оптическая                 | Без изоляции      |
|------------------------|--------------------------|------------------|----------------------------|-------------------|
| Система                | Импульсный трансформатор | Оптопара         | Волоконно-оптическая связь | Со сдвигом уровня |
| Для силовых модулей до | > 1700 В                 | 1700 В           | > 1700 В                   | > 1200 В          |
| Направление передачи   | двунаправленное          | однонаправленное | одно-двунаправленное       | Однонаправленное  |
| Ограничение            | есть                     | нет              | нет                        | нет               |

|   |           |          |         |         |
|---|-----------|----------|---------|---------|
| <b>рабочего цикла</b>                         |           |          |         |         |
| <b>Взаимная емкость</b>                       | 5...20 пФ | 1...5 пФ | < 1 пФ  | > 20 пФ |
| <b>Невосприимчивость к <math>dv/dt</math></b> | высокая   | низкая   | высокая | низкая  |
| <b>Стоимость</b>                              | средняя   | низкая   | высокая | низкая  |

При помощи дополнительных цепей импульсный трансформатор способен передавать сигналы обратной связи как постоянную информацию во время разрывов в работе драйвера (напр. мертвая зона в полумостовых схемах); волоконно-оптическая связь, оснащенная двойными передатчиками / приемниками может работать так же само.

Аналоговые выходные сигналы могут поступать назад с драйвера в основные цепи управления, например при импульсной модуляции с помощью импульсных трансформаторов, оптопар или волоконно-оптической связи.

Изоляция потенциалов уже имеется в датчиках тока на основе датчиков Холла или компенсационных магнитных датчиков.

### 3.5.6.2 Энергия управления

Основные применяемые решения и их наиболее важные особенности приведены ниже:

| <b>Изоляция потенциалов</b>       | <b>Трансформаторная</b>              |                             |                        | <b>Без изоляции</b>                   |
|-----------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------|------------------------|---------------------------------------|
| <b>Система</b>                    | 50 Гц источник питания               | Импульсный источник питания |                        | схема с компенсир. обратной связью    |
| <b>Питание</b>                    | Доп. источник или сетевое напряжение | Доп. источник               | От основного источника | Рабочее напряжение на верхней стороне |
| <b>Частота переменного напр.</b>  | Низкая                               | Очень высокая               | Средняя                | Средняя (имп. част.)                  |
| <b>Фильтрация</b>                 | Высокая                              | Очень низкая                | Низкая                 | низкая                                |
| <b>Для силовых модулей</b>        | 1200 В                               | > 1700 В                    | 1700 В                 | 1200 В                                |
| <b>Выходное напряж.</b>           | Положит. и отрицательное             | Положит. и отрицательное    |                        | Только положительное                  |
| <b>Ограничение рабочего цикла</b> | нет                                  | нет                         | нет                    | есть                                  |
| <b>Взаимная емкость</b>           | высокая                              | низкая                      | средняя                | низкая                                |
| <b>Излучение помех (ВЧ)</b>       | нет                                  | высокое                     | низкое                 | нет                                   |
| <b>Стоимость</b>                  | низкая                               | низкая                      | высокая                | очень низкая                          |

### 3.5.7 Цепи драйвера для силовых MOSFET и IGBT

В большинстве случаев современные драйверы оснащены монолитными микросхемами, которые могут предназначаться для одинарных, полумостовых и мостовых драйверов разной конфигурации. Такие схемы часто выполняют следующие функции:

- источник напряжений для затвора;
- вход для контроля  $V_{CEsat}$  или  $V_{DS(on)}$ , иногда также вход для шунта или датчика-эмиттера;
- контроль превышения напряжения питания;
- память ошибок или выход обратной связи ошибок;
- подстраиваемое время мертвой зоны и отдельную фильтрацию питания для верхнего драйвера.

Эти стандартные драйверы не обеспечивают реальное разделение потенциалов. В некоторых вариантах управляющий вход можно сконфигурировать для связи через оптопару или импульсные трансформаторы.

Кроме того, наблюдался прогресс в разработке быстрых оптопар с силовыми драйверами, в которые интегрирован контроль источника питания и  $V_{CEsat}$  или  $V_{DS(on)}$ . Для получения простых драйверов могут прибавляться преобразователи постоянного напряжения и несколько пассивных компонентов.

С возрастающим разнообразием функций и параметров в цепях драйвера, необходимые на первичной стороне конструкции также должны отвечать более сложным требованиям, включающим например, логический входной сигнал, подавление коротких импульсов, создание мертвых зон, память ошибок и оценка ошибок, управление преобразователями постоянного напряжения и импульсными трансформаторами.

Для производства драйверов с низкой стоимостью эти функции могут комбинироваться в управляющих специализированных ИС, разработанных SEMIKRON, SKIC 2001 [154]. SKIC 2001 применяется в SEMIKRON драйверах также доступна как отдельная ИС.