

будет заряжен разностью напряжений $\Delta V^2 = L_K/2 \cdot i^2/C$ и установит предел перенапряжениям. Поглощенная энергия должна разрядиться между двумя процессами заряда для сохранения работоспособности схемы. С простыми снабберами эта задача выполняется путем преобразования в тепло в резисторах снаббера или обратной связью в конденсаторы питания.

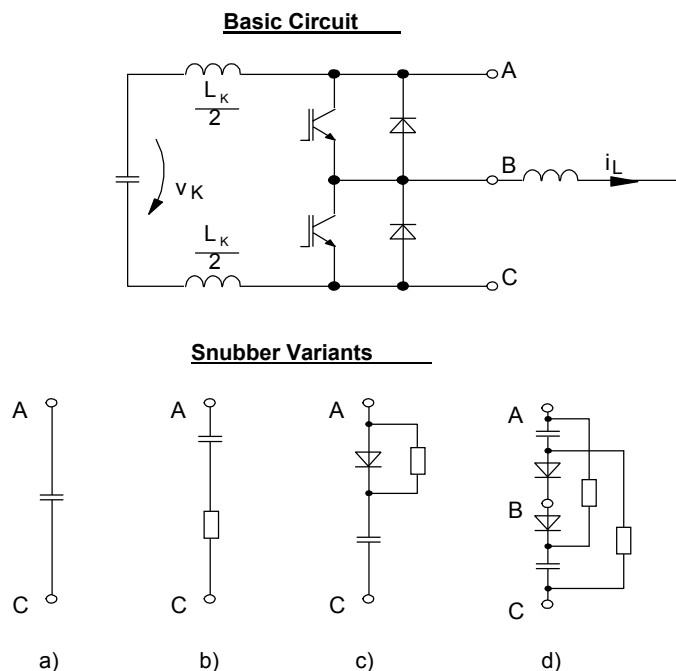


Рис.3.60 Пассивные цепи ограничения напряжения

Простым методом является фиксация напряжения питания прямо на выводах питания силового модуля при помощи конденсатора (пленочный конденсатор и т.п.). Такой способ пригоден для большинства VSI – применений. В этом случае значения емкостей составляют 0.1...2 мкФ (рис.3.60а).

Для поглощения паразитных колебаний между C и L_K , фиксацию напряжения можно получить с помощью RC – цепи (рис.3.60b). Этот способ рекомендуется для низковольтных/сильноточных устройств (напр. MOSFET-преобразователи), во избежание паразитного изменения полярности питающего напряжения на выводах модуля.

Рис.3.60с и d представляют RCD-схемы. Включенные быстрые диоды позволяют снизить перенапряжение при включении и получить параметры мягкого обратного восстановления. Пассивные цепи не требуют активных компонентов, что является дополнительным преимуществом к их простой схеме. С другой стороны, значение предела перенапряжения может сильно зависеть от рабочей точки. Поэтому схему нужно рассчитывать для худшего случая.

Активное ограничение [161], [261], [301]

Активное ограничение MOS-управляемыми транзисторами определяет прямую обратную связь потенциала коллектора/стока к затвору через элемент Зенера. На рис.3.61 показаны основные принципы и варианты на примере IGBT ключа.

Цепь обратной связи состоит из элемента Зенера Z и дополнительного диода D_s , который не дает протекать току драйвера к коллектору, когда IGBT включен. Если напряжение коллектор-эмиттер достигает напряжения лавинного пробоя элемента Зенера, через обратную связь начнет протекать ток в затвор IGBT, что увеличит потенциал затвора до значения, взятого из переходной и выходной характеристики IGBT ($i_c = f(v_{CE}, v_{GE})$) (рис.3.62). Процесс ограничения будет все время, пока подается ток через последовательную индуктивность. Приложенное к транзистору напряжение будет определяться вольтамперной характеристикой элемента Зенера. Транзистор работает в активной зоне своей выходной характеристики (!!безопасная область работы!!) и преобразовывает энергию, сохраненную в L_K , в тепло (рис.3.62.). Рис.3.62 поясняет эти корреляции при помощи типичных характеристик.

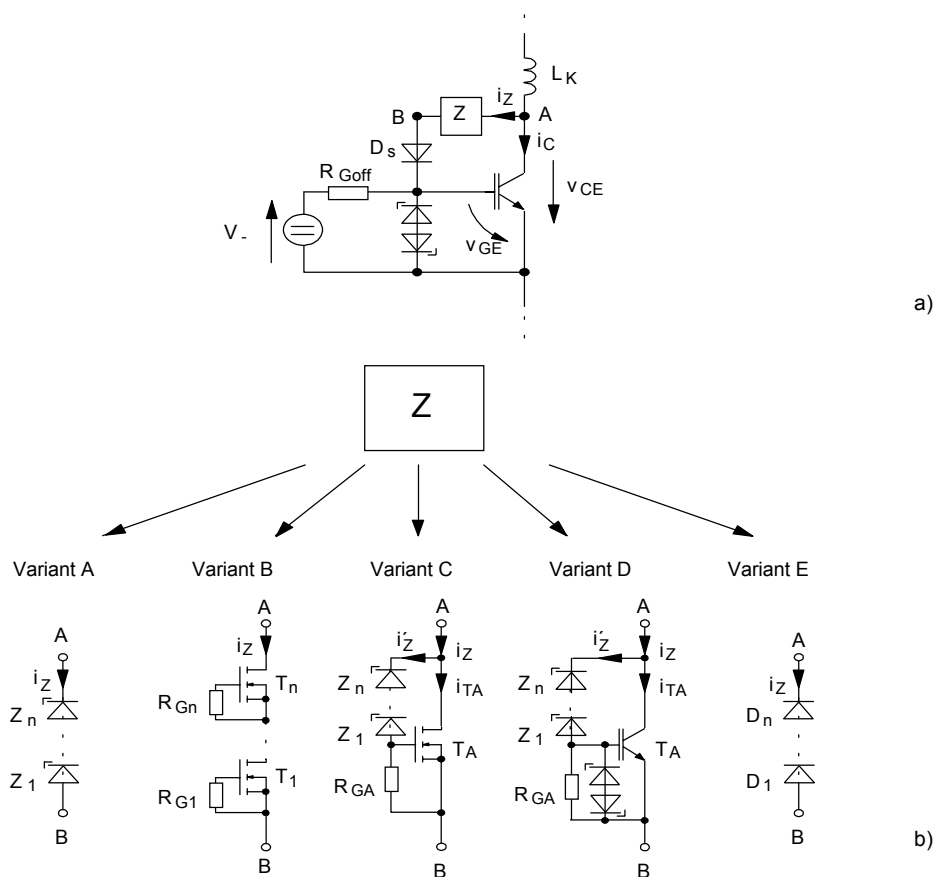


Рис.3.61 Основной принцип (a) активного ограничения и варианты (b)

Импульс тока заряда затвора необходим для повышения напряжения на затворе в начале процесса ограничения, что хорошо видно на рис.3.62.

Выбор подходящего варианта зависит от средней рассеиваемой мощности в элементе Зенера. Это основано на следующем принципе: чем выше разность напряжений между коммутационным напряжением и напряжением ограничения, тем ниже рассеиваемая мощность в ограничивающей схеме. Другим критерием выбора может быть скорость нарастания характеристики Зенера (рис.3.63).

Вариант А на рис.3.61 можно очень легко реализовать и можно использовать в схемах с малой энергией ограничения (напр. в импульсных преобразователях напряжения).

MOSFET и диоды в вариантах В и Е работают в режиме лавинного пробоя. В вариантах С и D MOSFET/IGBT служат усилителем тока Зенера, вариант D характеризуется очень высокой выносливостью.

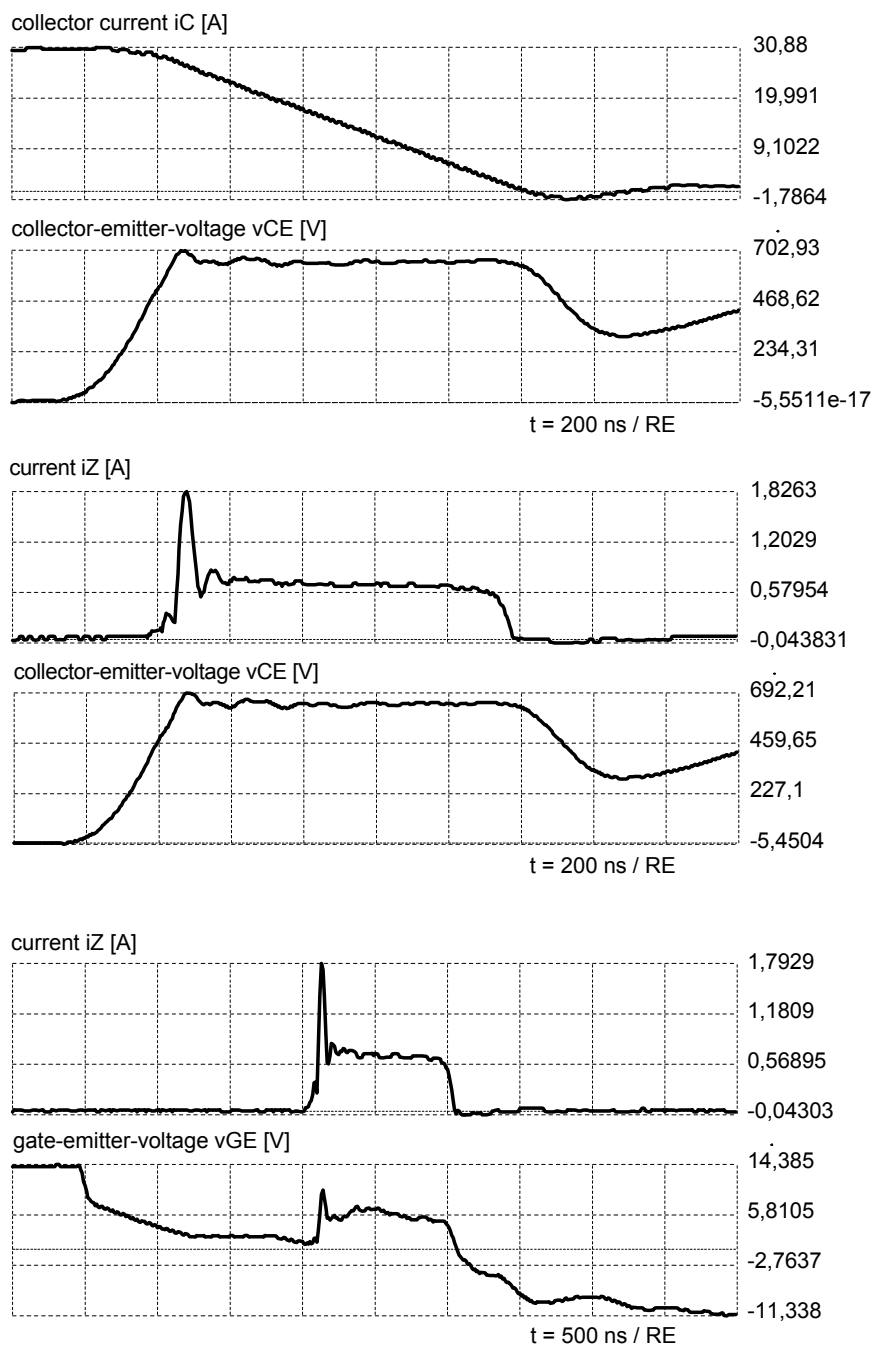


Рис.3.62 Типичные характеристики напряжения и тока при активном ограничении (вариант А), ($v_K = 400 \text{ В}$, $v_{c1} = 640 \text{ В}$, $i_{c0} = 30 \text{ А}$, $L_K = 10 \text{ мГн}$, $T_j = 30 \text{ }^\circ\text{С}$, $V_- = -15 \text{ В}$, SKM100GB123D)

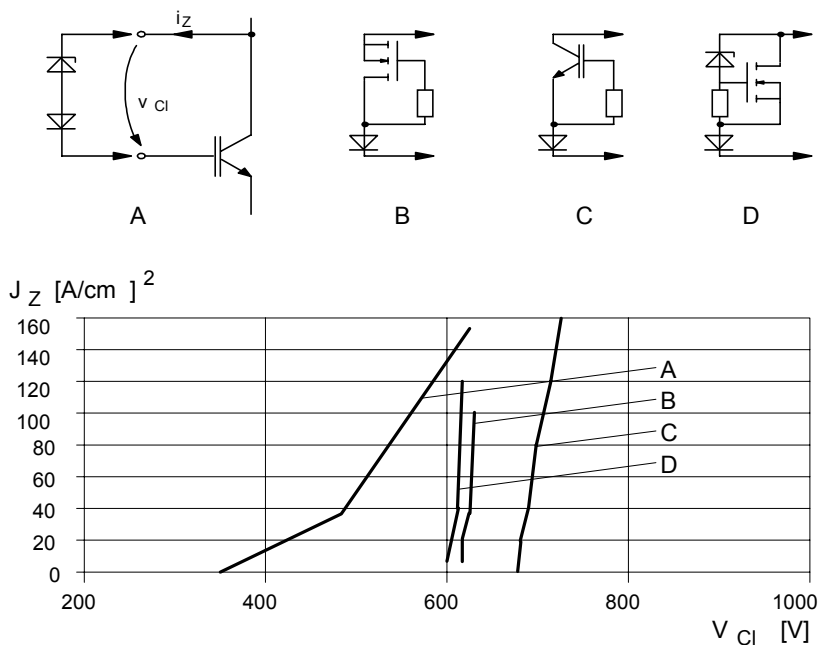


Рис.3.63 Статические характеристики выбранных элементов Зенера [194]

A: Ограничительный диод 06KE350, B: BUZ90 при лавинном пробое
 C: BUP400 при лавинном пробое, D: BUZ78 в качестве усилителя

Особенности активного ограничения суммируются в следующем:

- простая схема,
- защищаемый транзистор является частью схемы защиты и преобразует основную часть сохраненной в L_K энергии при ограничении,
- не требуется мощных резисторов и снабберных конденсаторов,
- резкая характеристика ограничения,
- напряжение коммутации ограничивается независимо от рабочей точки преобразователя,
- принцип не требует отдельного мощного источника,
- можно использовать обычные драйверы,
- точно также ограничиваются перенапряжения при обратном восстановлении di/dt в диодах,
- есть возможность дополнить каждый отдельный транзисторный ключ схемой ограничения или одним главным ограничителем для одной или нескольких пар ключей.

Принцип активного ограничения использовался в промышленности до настоящего времени, только для защиты от коротких замыканий в преобразователях с постоянным напряжением питания, где ограничение работает только в случае неисправности преобразователя при сравнительно низкой энергии.

Исследования, описанные в [161], показывают, однако, что процесс активного ограничения может также иметь преимущества при периодической работе ZCS-ключа и высокой энергии.

(частота ограничения 15...30 кГц). В итоге возможности и ограничения этой концепции защиты все еще проходят расширенные исследования и доработки. Это особенно относится для IGBT с короткой периодической работой и MOSFET на активном участке выходной характеристики.

Динамическое управление затвором

В процессе динамического управления затвором, di/dt , dv/dt и следовательно вызванные перенапряжения непосредственно определяются драйвером.

Другой, более простой защитой с динамическим управлением затвором является замедление выключения IGBT и MOSFET в случае перегрузок по току или коротких замыканий применением последовательных резисторов затвора с большим сопротивлением (напр. часть драйвера SEMIKRON SKHI 23) или выключение определенным током (управление источником тока) (рис.3.64).

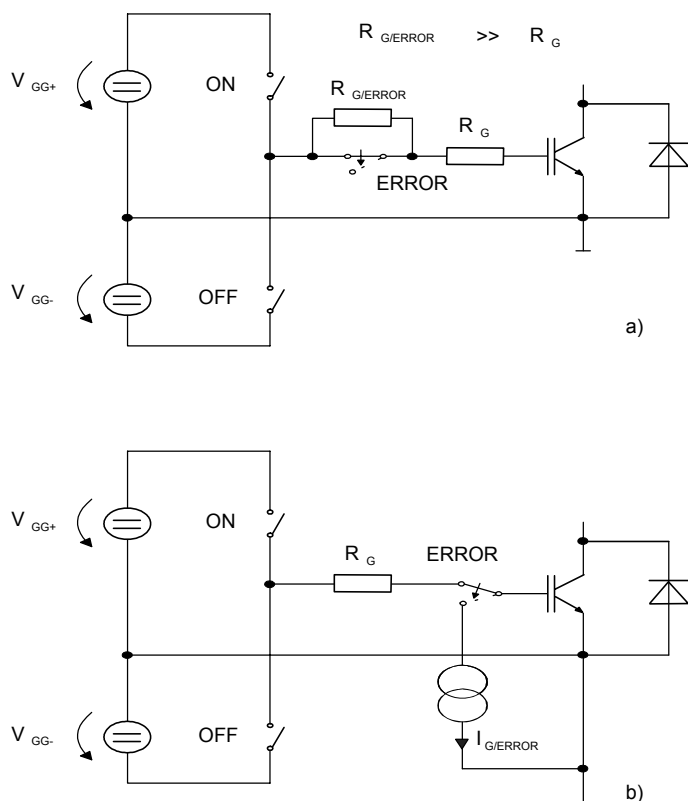


Рис.3.64 Процесс возможного замедления выключения при неполадках в работе инвертора: возросшее R_{Goff} (a); управление источником тока (b)