

- высокое  $di/dt$  (...10 кА/мкс...) в случае коротких замыканий и при выключении токов короткого замыкания в преобразователях с постоянным напряжением питания силовой части,
- активное прерывание токов источника питания в CGI-топологии (большие индуктивности).

Кроме того, перенапряжения в силовых электронных устройствах могут быть вызваны статической или динамической асимметрией последовательно соединенных ключей (см.п.3.7).

Перенапряжения при нормальной работе преобразователя и при неисправностях могут появляться периодически (...Гц...кГц...) или аperiodически.

Причины перенапряжений между управляющими выводами:

- неисправность источника питания драйвера,
- $dv/dt$  – обратная связь (ток смещения затвора) через емкость Миллера (напр. короткое замыкание II, см.п.3.6.2),
- эмиттер/исток -  $di/dt$  – обратная связь (см.п.3.4.1),
- возросшее напряжение затвора при активной фиксации уровня (см.п.3.6.3.2).

#### *Перегрев*

Опасным становится перегрев, если превышаете максимальная температура перехода, данная производителем (напр. 150 °С для кремниевых устройств).

При работе инвертора перегрев может произойти по причине:

- возросшей рассеиваемой энергии из-за перегрузок по току,
- возросшей рассеиваемой энергии из-за неисправных драйверов,
- неисправность системы охлаждения.

### **3.6.2 Поведение IGBT и MOSFET при перегрузках и коротких замыканиях**

#### *Перегрузка:*

В основном, при перегрузках параметры коммутации и в открытом состоянии не отличаются от «стандартной работы» с номинальными условиями. Для того, чтобы не превышалась максимальная температура перехода, нужно ограничивать пределы перегрузки, поскольку возросший ток нагрузки повлечет за собой возрастание рассеиваемой мощности в устройстве. Поэтому установлены предельное значение температуры перехода и число циклов температурной перегрузки, которые приводятся в справочных данных на SOA-диаграммах.

На рис.3.52 показан выбранный пример для MOSFET и IGBT.

#### *Короткое замыкание:*

В принципе MOSFET и IGBT стойки к коротким замыканиям, т.е. они могут подвергаться коротким замыканиям при определенных данных условиях, и затем выключаться без повреждения силового полупроводника.

При рассмотрении коротких замыканий (с помощью IGBT), различат два разных случая.

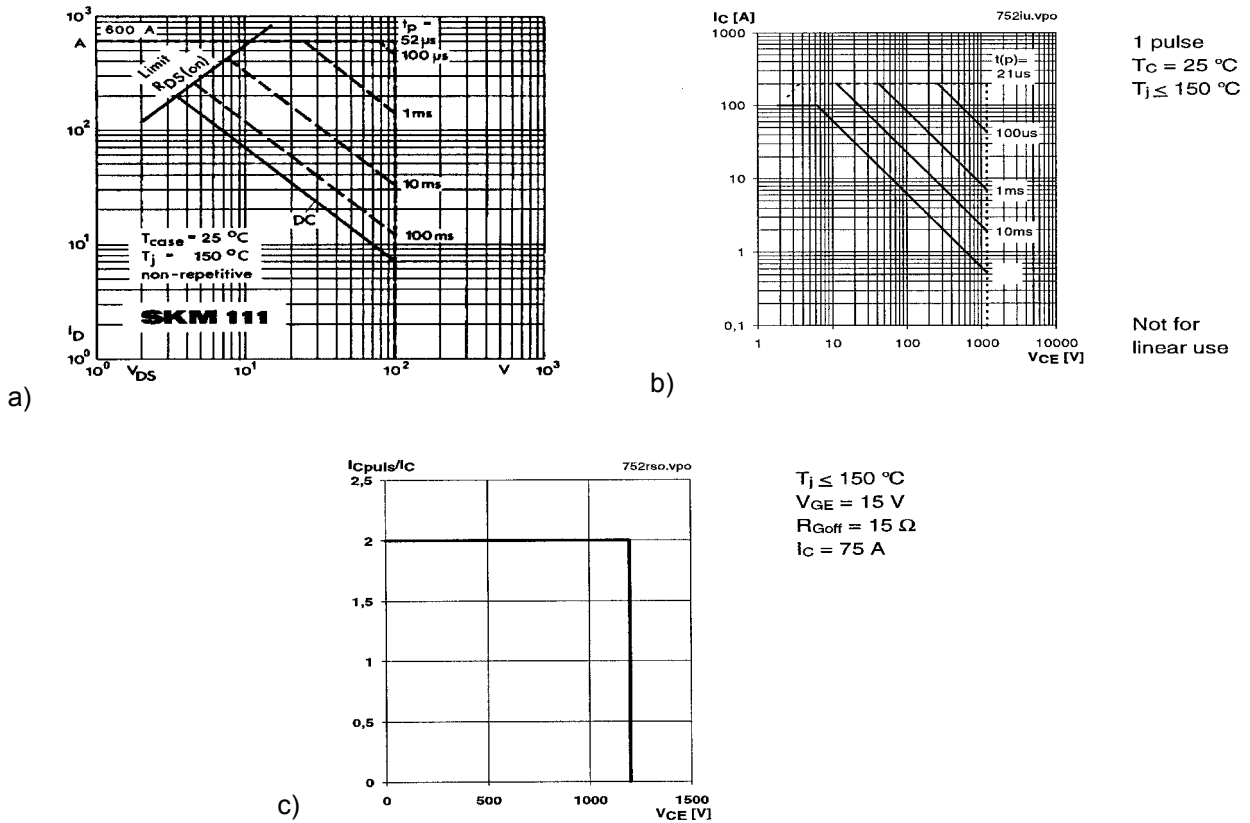


Рис.3.52 SOA-диаграммы для MOSFET и IGBT

- a) макс. безопасная область работы MOSFET SKM111
- b) макс. безопасная область работы IGBT SKM100GB123D
- c) безопасная область работы при выключении (!периодическом!) IGBT SKM100GB123D

*Короткое замыкание I (SC I)*

В случае SC I транзистор включается на имеющееся короткое замыкание нагрузки, т.е. все напряжение питания приложено к транзистору до короткого замыкания.  $di/dt$  короткого замыкания определено параметрами драйвера (напряжение драйвера, резистор затвора). Этот возросший ток транзистора вызовет падение напряжения на паразитной индуктивности короткого замыкания, которое показано как рост характеристики напряжения коллектор-эмиттер (рис.3.53).

Стационарные токи короткого замыкания подстраиваются под значение, которое определено выходной характеристикой транзистора. Типичные значения для IGBT составляют 8-10 номинальных токов (см.рис.3.56b).

*Короткое замыкание II (SC II)*

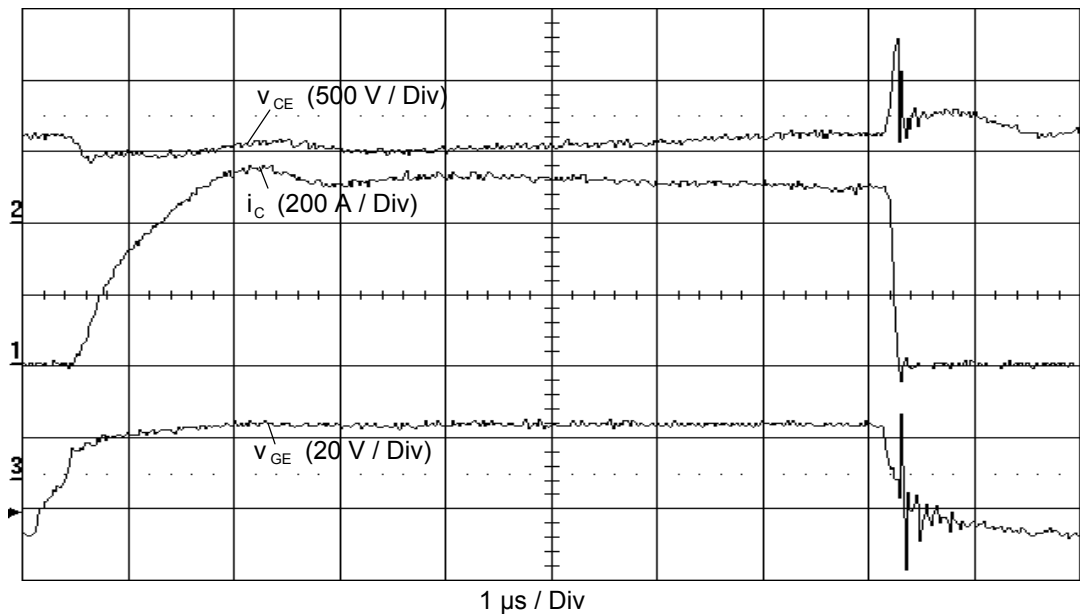
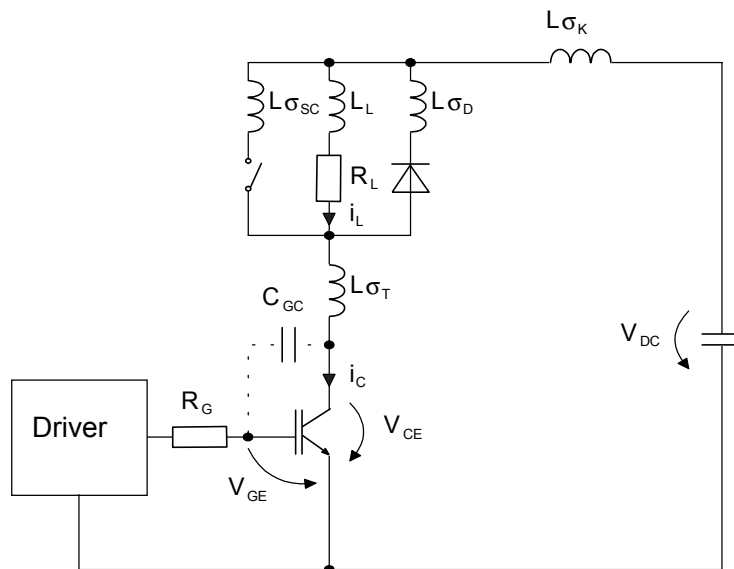


Рис.3.53 SC I характеристики IGBT (SKM100GB123D)



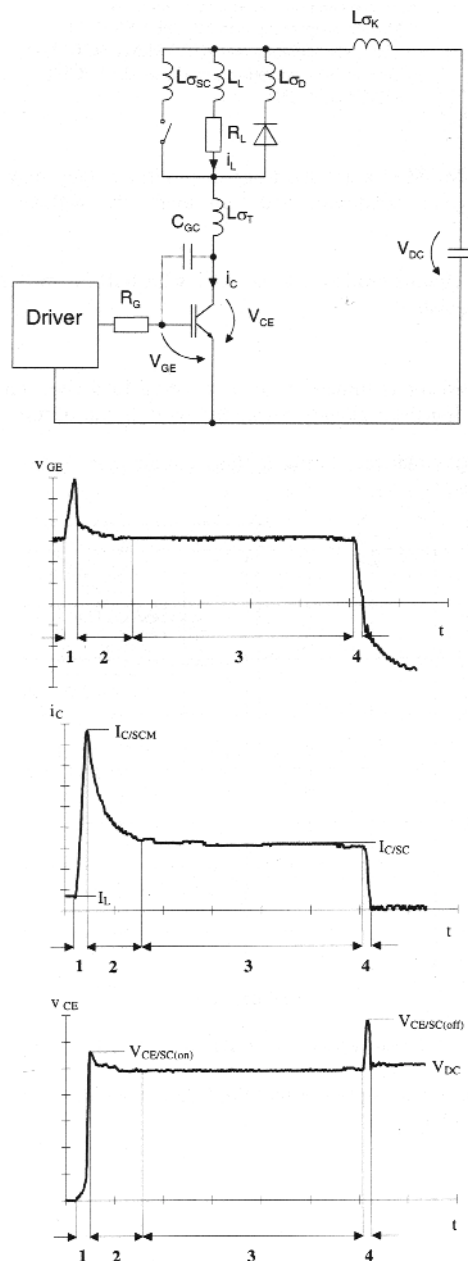


Рис.3.54 Эквивалентная схема и характеристики SC II [194]

В этом случае транзистор уже включен до того, как произошло короткое замыкание. По сравнению с SC I, в этом случае транзистор подвергается большим перегрузкам.

На рис.3.54 показана эквивалентная схема и характеристики для пояснения SC II. Как только происходит короткое замыкание, очень резко начнет увеличиваться ток коллектора.  $di/dt$  определяется напряжением питания  $V_{DC}$  и индуктивностью петли короткого замыкания.

В течение интервала времени 1 IGBT обедняется. В результате высокое  $dv/dt$  напряжения коллектор-эмиттер вызовет ток смещения через емкость затвор-коллектор, из-за чего возрастет напряжения затвор-эмиттер. Это в свою очередь создаст динамический выброс тока короткого замыкания  $I_{C/SCM}$ .

После прохождения фазы обеднения, ток короткого замыкания упадет до своего постоянного значения  $I_{C/SC}$  (интервал 2). В течение этого процесса напряжение будет индуцироваться на паразитной индуктивности, что вызовет перенапряжение на IGBT.

За стационарной фазой короткого замыкания (интервал 3) следует прекращение протекания тока короткого замыкания по направлению к коммутационной индуктивности цепи  $L_K$ , что опять будет причиной перенапряжения на IGBT (интервал 4).

Перенапряжения в транзисторе при коротком замыкании могут превысить рабочие значения в несколько раз.

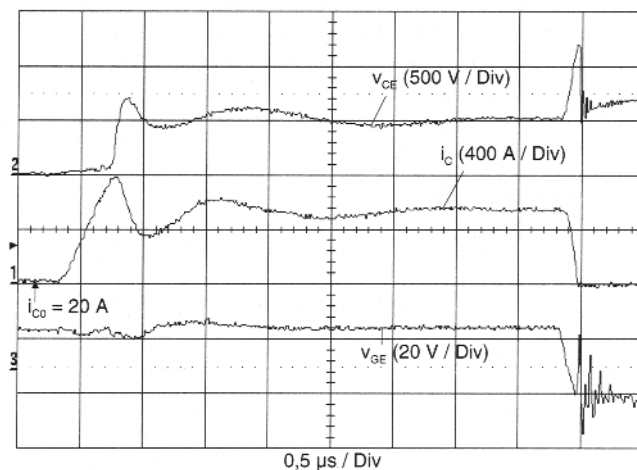


Рис.3.55 SC II характеристики IGBT (SKM100GB123D с ограничением уровня затвора) SOA диаграмма при коротком замыкании из справочных данных на IGBT показывает пределы безопасного управления при этом (рис.3.56а).

Для гарантии безопасной работы должны удовлетворяться следующие важные граничные условия:

- короткое замыкание должно быть обнаружено и устранено в течение времени до 10 мкс,
- время между двумя короткими замыканиями должно быть не более 1 с,
- IGBT не должен подвергаться более чем 1000 коротких замыканий за весь его срок службы.

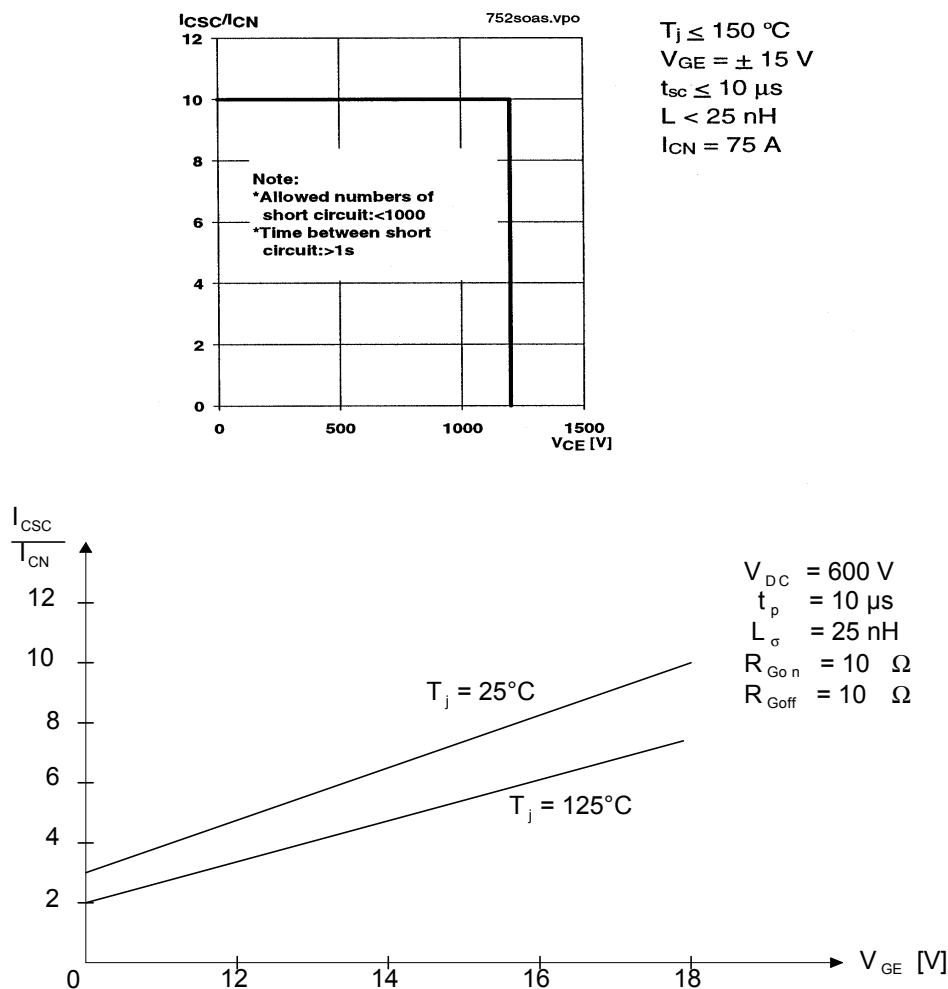


Рис.3.56 SOA при коротком замыкании NPT-IGBT (SC SOA)

- зависимость нормализованного тока короткого замыкания от напряжения коллектор-эмиттер (SKM100GB123D)
- зависимость нормализованного тока короткого замыкания от напряжения затвор-эмиттер (основная)

На рис.3.56 показано влияние напряжения затвор-эмиттер и температуры перехода на стационарный ток короткого замыкания. Замыкания I и II будут причиной высокой рассеиваемой мощности в транзисторе, из-за чего вырастет температура перехода. Здесь положительный температурный коэффициент напряжения коллектор-эмиттер имеет благоприятное воздействие (это также относится к напряжению сток-исток), поскольку уменьшит ток коллектора при стационарном коротком замыкании (см. ри.3.56b).

Возможности надежного определения предельных токов и ограничения при перенапряжениях изложены в п.3.6.3.

### 3.6.3 Обнаружение перегрузок и защита

Неполадки в инверторах можно определить разными способами и реакция на обнаруженные сбои может очень отличаться.