

называются обратной связью по сети в преобразователе, они обычно характеризуются дискретным гармоническим спектром тока примерно до 2 кГц. Свыше 10 кГц эти колебания называются радиопомехами, измеряются селективным методом в дБ/мкВ. Для узкого частотного диапазона, в котором работают современные силовые полупроводники, первая попытка была сделана при ознакомлении с процессом измерения и с предельными значениями. Различия между обозначениями, такими как нулевой ток, ток утечки или асимметричные помехи даны только в классификации на разные частотные диапазоны и в зависимости от частоты всех параметров коммутации.



Рис.3.24 Энергетические процессы в преобразователях [299]

3.4.2.2 Причины интерференционных токов

Все помехи вызваны режимом коммутации в силовых полупроводниках. Причины помех можно пояснить на эквивалентной схеме коммутации, на рис.3.25.

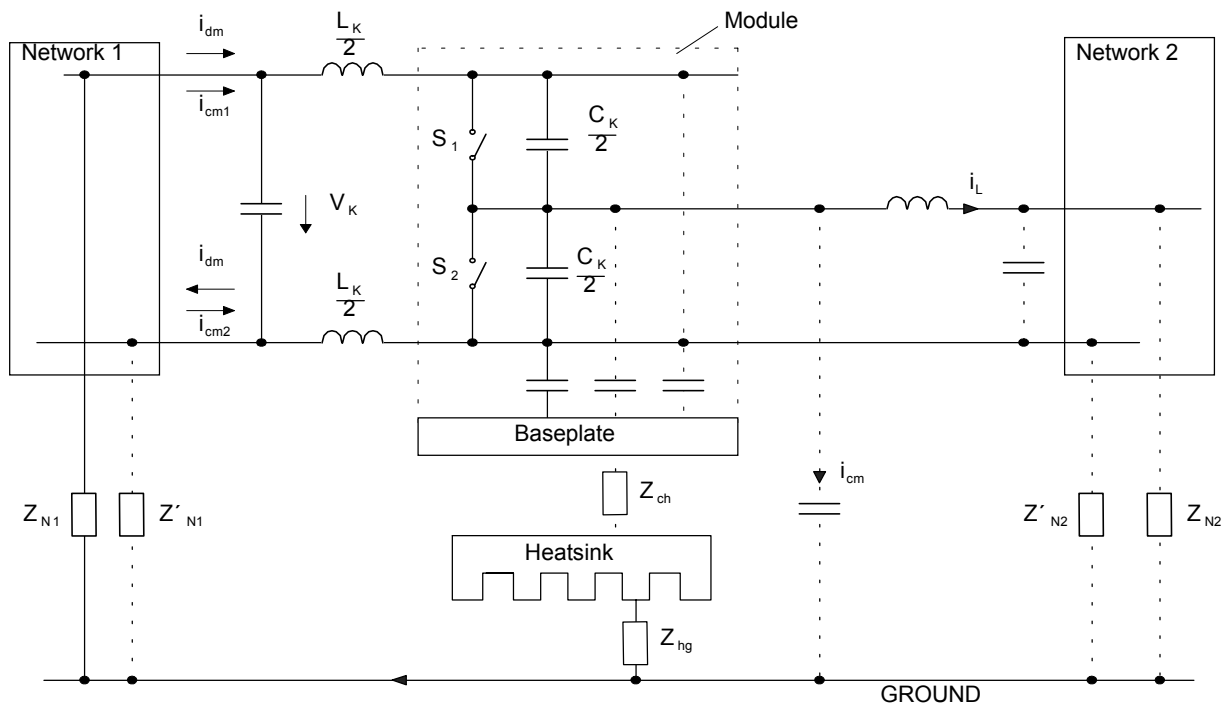


Рис.3.25

В случае *индуктивной коммутации*, ключ S_1 будет переключать на проводящий ключ S_2 .

В процессе жесткой коммутации ($L_K = L_{Kmin}$, $C_K = C_{Kmin}$) сначала ток будет переключаться с di/dt , данной характеристикой полупроводникового ключа 1. Завершается коммутация с di/dt обратного восстановления ключа 2, которую определяет коммутируемое напряжение и, следовательно, dv/dt вместе с токопроводящей индуктивностью и эффективными емкостями C_K . Эффективные емкости включают все емкости C_{Σ} , которые эффективны по отношению к общему потенциалу. Вместе с импедансами соединений коммутируемого напряжения с нулевым потенциалом будут эффективны параллельные импедансы коммутационных емкостей. В начале процесса коммутации, di/dt ключа 1 вызовет симметричный ток i_{dm} в коммутационной емкости и в параллельной цепи 1. В конце процесса коммутации dv/dt , вызванное обратным восстановлением di/dt ключа 2 и индуктивности L , которая снабжает током, проходят токи i_{cm} асимметрично земляной шине через параллельные провода к коммутационной емкости C_K .

Переход к мягкому включению при возрастании L_K (п.3.8) уменьшит di/dt и симметричные токовые помехи. В то же время, возросшая L_K будет влиять на цепь асимметричного тока помех. Dv/dt в начале процесса коммутации определено характеристиками коммутации S_1 . Скачек напряжения в конце процесса коммутации определяется параметрами обратного восстановления тока ключа S_2 . Переход к мягкой коммутации в ZCS-режиме уменьшит токовые помехи и изменит частотный диапазон асимметричных токов, без значительного его уменьшения, см. также п.3.8.3.

При емкостной коммутации ($C_K = C_{Kmin}$) асимметричный ток помех определяется импедансами по отношению к общему потенциалу, что становится эффективным при параллельных коммутационных емкостях и характеристиках полупроводникового ключа S_1 . Коммутация тока следует за коммутацией напряжения и, таким образом, ток симметричных помех определяется параметрами выключения S_1 и включения S_2 .

Возрастание C_K требует ключа с нулевым напряжением и мягким выключением (п.3.8) процесс выключения начинается на первой стадии коммутации тока с di/dt , что определено ключом S_1 при уменьшенном напряжении. Задержанное dv/dt уменьшит асимметричные токи при коммутации напряжения. Пассивное включение S_2 определяет di/dt на второй стадии коммутации тока. Асимметричный ток помех будет уменьшен мягкой коммутацией в ZVS-режиме без значительного изменения симметричных токов. Тем не менее, возросшая емкость C_K минимизирует симметричный ток помех в цепи 1 по отношению к емкостному делителю тока. Цепи с мягкой коммутацией в преобразователе с фазосдвигающим управлением включения или выключения уменьшат симметричные и асимметричные токи помех при использовании ключей с нулевым напряжением или током соответственно. В цепях преобразователя с дополнительными плечами коммутации, где можно выбрать ZVS или ZCS, токи помех значительно не уменьшаются по сравнению с жесткими цепями коммутации, см.п.3.8.3.

3.4.2.3 Пути распространения

Для проведения измерений радиопомех селективно измеряются флуктуации напряжения в местах соединения сети инвертора и общей шины. Потенциал флуктуаций относится к определенной точке общей шины, которая определяется при стандартных измерениях с помощью схемы стабилизации импеданса сети. Что касается симметричных и асимметричных токов помех в диапазоне частот радиопомех, все простые низкочастотные элементы коммутации снабжаются дополнительными индуктивностями сопротивлениями и емкостями, которые сделают чище моделирование от его частотной зависимости.

На рис.3.26 показан пример простой схемы понижающего преобразователя, в которой цепь 1 представлена схемой линейной стабилизации импеданса (LISN) и цепь 2 – приложенная нагрузка, в отличие от рис.3.25.

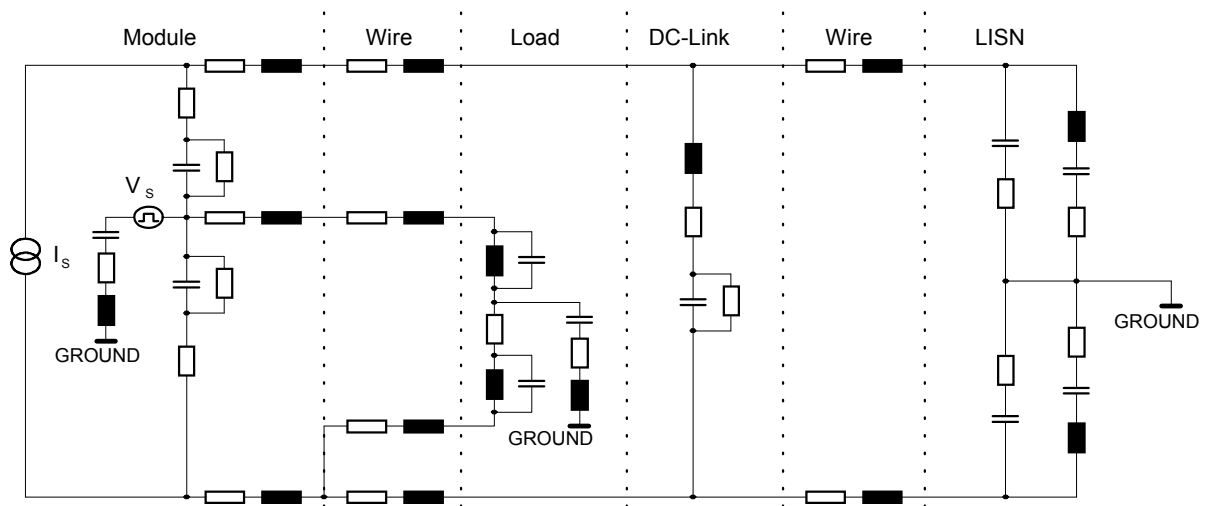


Рис.3.26 Эквивалентная схема ЭМП понижающего преобразователя [193]

Модели ключей S1 и S2 модуля состоят из коммутационных индуктивностей и емкостей. Возникновение токов помех, описанных ранее, показано в упрощенном виде, а именно как источник тока I_s для симметричных токов помех, и как источник напряжения V_s для асимметричных токов помех. В двух источниках характеристики полупроводника показаны как функции от времени (рис.3.27).

На рис.3.28 показаны результаты моделирования на примере, взятом из [193], и основанном на модели из рис.3.26; эти результаты наиболее полно соответствуют реально взятым измерениям. Воздействие дополнительных путей распространения через энергетические и информационные линии передачи цепей драйвера разъяснено в [299].

3.4.2.4 Способы подавления ЭМП

Обычное подавление помех основано на использовании подстраиваемых фильтров, которые устанавливаются на входе устройства. В соответствии с граничными характеристиками для определенного типа устройств (см. напр. табл.) используются различные фильтры в цепи линейной стабилизации импеданса и стандартные измерительные устройства, пока во всем частотном диапазоне не установятся граничные значения [259].

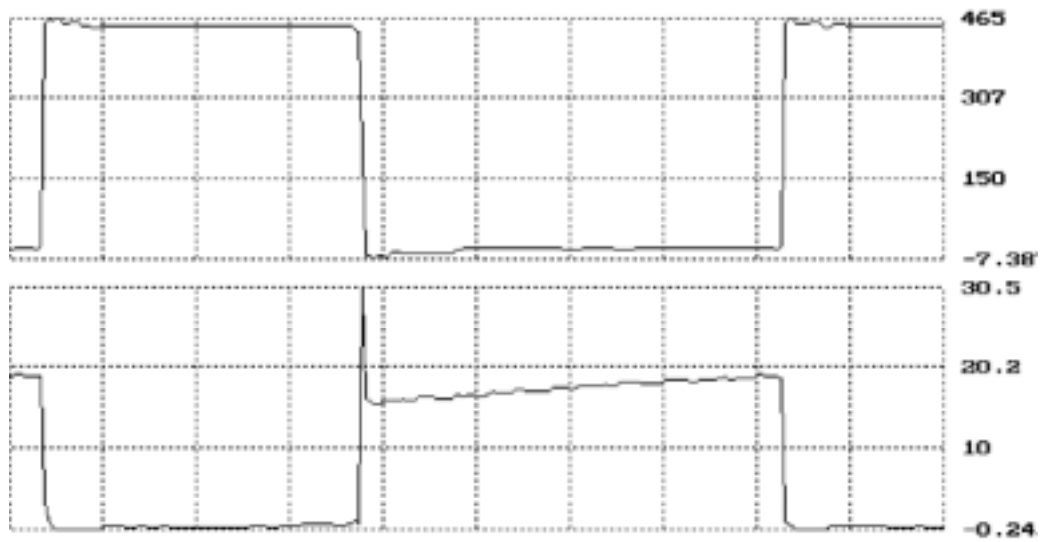


Рис.3.27 Типичные характеристики тока и напряжения IGBT ключа (верхняя характеристика в В, нижняя в А) [193]

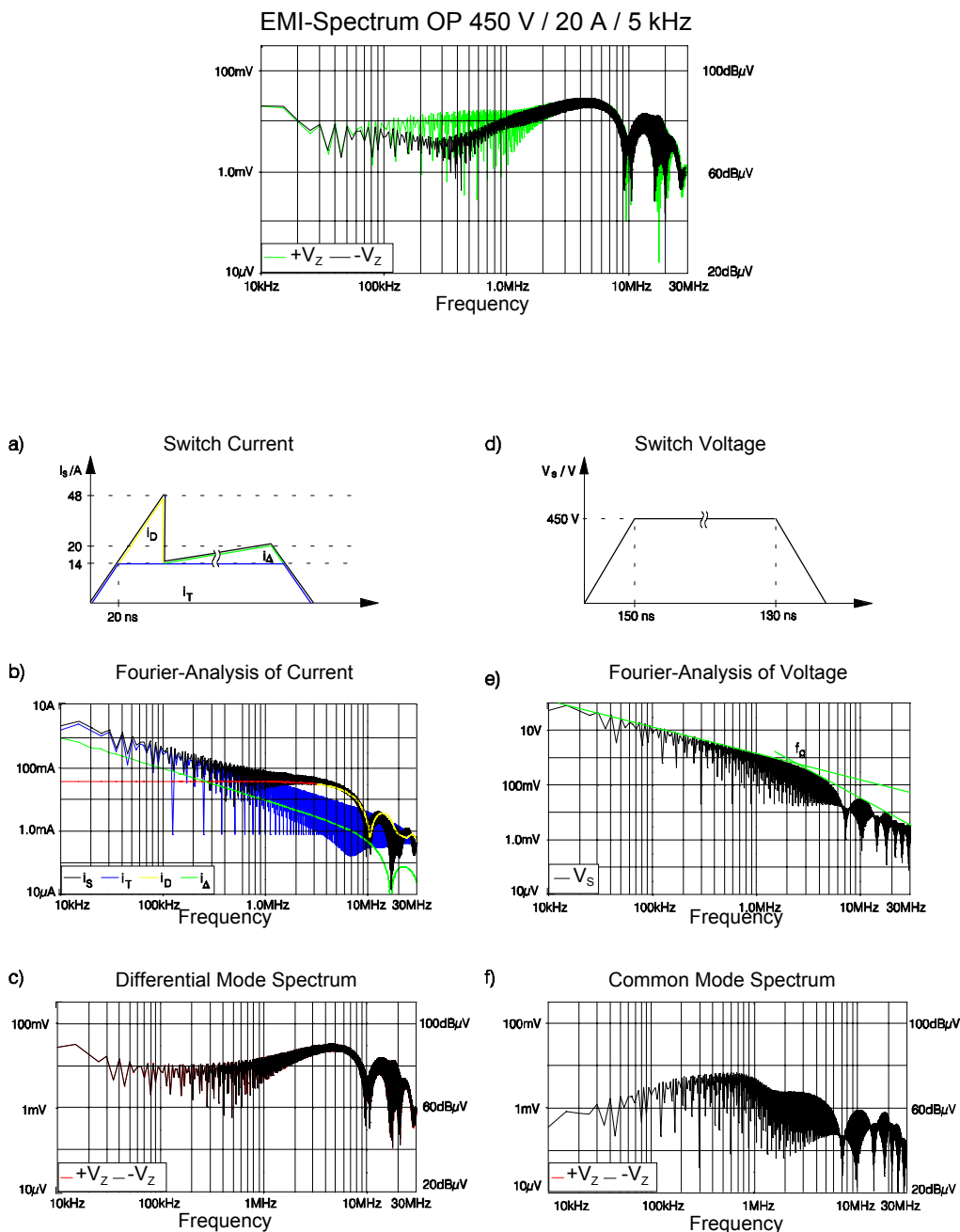


Рис.3.28 Результаты моделирования 1200 В/50 А – NPT – IGBT сдвоенного модуля

Рабочие параметры: Напряжение питания $V_{DC} = 450$ В

Ток нагрузки = 20 А

Частота импульсов = 5 кГц

Таблица инженерных стандартов

GENERIC	Engineering standard	Application	Interference factor
EN 50 082/1	VDE 0839, part 82-1	Residential, commercial and trade applications, small businesses	EMI immunity
EN 50 081/1	VDE 0839, part 81-1		Interference emission
EN 50 082/2	VDE 0839, part 82-2	Industry, power stations etc.	EMI Immunity
EN 50 081/2	VDE 0839, part 81-2		Interference emission

Примеры для существующих стандартов на изделия

Classification of equipment	Product Standards	Interference factor
ISM-devices (industrial, scientific and medical HF-devices)	EN 55 011	Interference emission
	Generic EN 50 082-1/2	EMI immunity
Radio and television receivers and connected equipment	EN 55 013	Interference emission
	EN 55 020	EMI immunity
Household appliances	EN 55 014	Interference emission
	Generic EN 50 082-1	EMI immunity
Fluorescent lamps and lights	EN 55 015	Interference emission
	Generic EN 50 082-1	EMI immunity
Data processing systems	EN 55 022	Interference emission
	prEN 55 101, EN 55 024	EMI immunity

В этой в основном практической процедуре часто используют дорогостоящие фильтры. Они могут быть более эффективны при конструировании схемы, если начинать рассмотрение с самого начала любого процесса разработки влияние электромагнитных помех и оптимизацию путей распространения, их возникновение и пути измерений. Оптимизация подразумевает или создание путей распространения с высоким сопротивлением для токов помех с помощью селективных блокирующих схем или создание короткозамкнутых путей с малым сопротивлением для токов помех при помощи селективных фильтров.

Далее даны пояснения по селективным измерениям к рис.3.25.

Схемы симметричных токовых помех будут замкнуты через емкость коммутационного источника напряжения. Необходима идеальная емкость, подключенная к ключам 1 и 2 без воздействия любых линейных импедансов для создания короткозамкнутого пути для токов помех. Напряжение радиопомех, которое можно измерить, будет генерировать импульс напряжения в емкости, из-за чего будет протекать ток через параллельные эффективные цепи. Поэтому все мероприятия, которые можно выполнить для уменьшения симметричных токовых помех, сводятся к расположению соответствующего фильтра параллельно проводам с коммутационным напряжением. Все действия в этом отношении можно уменьшить до создания фильтра как можно ближе расположенного к коммутирующим ключам и состоящего из почти идеальных емкостей и активных фильтров.

В принципе асимметричные токи помех могут распространяться через общий провод. Для подавления помех важно иметь импедансы с очень высоким сопротивлением во всех коммутируемых точках и с резким возрастанием потенциала относительно земли, и в то же время с ограничением скачков потенциала при отсутствии коммутации ключей. На примере эквивалентной схемы на рис.3.25 первоначальное подавление помех может быть с уменьшением связи емкостей драйверов и эффективных емкостей через основную пластину модуля и теплоотвода. Если драйверы не получают информацию о коммутациях и не питаются от вспомогательного источника и общей шины, то никаких токов смещения не будет протекать через общий провод, т.е. цепь будет замкнута внутри устройства. Не будут протекать токи асимметричных помех. Распространение токов помех через основную