

входной емкости (MOSFET: емкость  $C_{GS}$  затвор-исток / IGBT: емкость  $C_{GE}$  затвор-эмиттер). IGBT и силовые MOSFET с большими площадями кристаллов характеризуются большими входными емкостями и относятся к менее чувствительным, по сравнению с маломощными компонентами, в соответствии со стандартом MIL-STD 883C, 3015.6.

В отношении к обращению с IGBT и MOSFET, нужно также придерживаться упомянутого MIL стандарта, а также DIN VDE 0843 TS, который идентичен с IEC 801-2. Исследование и дальнейшая обработка должны проводиться только в специально подготовленных рабочих местах с токопроводящими столами, заземлениями и т.п. персоналом в соответствующей одежде (антистатические халаты, заземление на запястье, если есть). Все оборудование для сборки и транспортировки а также печатные платы должны отвечать требованиям ESD.

Силовые модули поставляются с закороченными выводами затвора и истока (MOSFET) или затвора и эмиттера (IGBT) при помощи проводящего пенопласта или резины, в соответствующей токопроводящей упаковке. Такое короткое замыкание должно оставаться как можно дольше до подключения затвора.

### **3.9.2 Инструкции по монтажу**

Для оптимального температурного соединения между силовым модулем и радиатором, основная пластина модуля и поверхность радиатора должны быть чистыми и обеспыленными. Шероховатость радиатора не должна превышать 10 мкм (MiniSKiiP и SEMITOR: 6.3 мкм), дефекты не должны влиять на неровность более чем 20 мкм для расстояния 10 см.

До того, как силовой модуль установится на радиатор, на обе крепежные поверхности нужно нанести очень тонкий (30...50 мкм) и однородный слой термопасты при помощи резинового ролика, например. Для SEMIKRON силовых модулей рекомендуется использовать термопасту P12 (Wacker Chemie), которая, однако, содержит немного силикона. Другой пригодной пастой без силикона является, например, WLPF5 (Fisher-Electronic).

При выборе соединительных и фиксирующих винтов нужно учитывать:

- сборка с шайбой и стопорной шайбой;
- минимальную и максимальную длину соединительных винтов, соответствующих размерам модуля и расположению шин;
- минимальную силу зажима из справочных данных или для требуемого крутящего момента прижима;
- окончательную поверхность и сопротивление коррозии.

При необходимости на SEMIKRON имеются нужные универсальные винты со стопорными шайбами.

При винтовой сборке нужно учитывать крутящий момент, приведенный в справочных данных. В начале крепежные винты нужно затягивать наполовину крутящего момента, а затем на полный момент с той же последовательностью. Из-за размягчения термопасты, винты должны затягиваться после нескольких часов.

Что касается паяных контактов, смотрите подробное изложение пайки в справочных данных.

Для сборки MiniSKiiP убедитесь, что контактные площадки на печатной плате не содержат тонких вздутий, что может нарушить прижим. Если необходимо, площадки нужно залудить. При использовании очищающего флюса, очистку платы можно исключить.

### **3.9.3 SKiiPPACK: температурные испытания [265], [93], [233]**

SKiiPPACK модули комплектуются радиатором; производитель модуля гарантирует качественную сборку и оптимальные температурные соединения.

Окончательный функциональный тест включает полный процесс нагревания для проверки температурных соединений. Это позволяет избежать проблем при сборке потребителем и гарантирует высокую надежность.

## **3.10 Программное обеспечение для расчета схем**

### **3.10.1 Уровни математических моделей для описания схемы**

На самом деле расчет схем с силовыми полупроводниками идентичен расчету схемы коммутационной цепи. Если параметры подключения коммутационной цепи можно легко найти, рассматривая все возможные пути, схему можно просто построить. Для ограничения системы по параметрам коммутационной цепи, разработка системы должна быть более сложной для получения четких соотношений параметров соединения. Что касается системы преобразования, окончательная схема управления, основные накопители энергии и фильтры должны рассчитываться до определения силовых полупроводников и системы охлаждения. Определенное нисходящее проектирование системы автоматически требует использование моделей разных уровней с противоположными охватами системы и интенсивностью модели (рис.3.90).

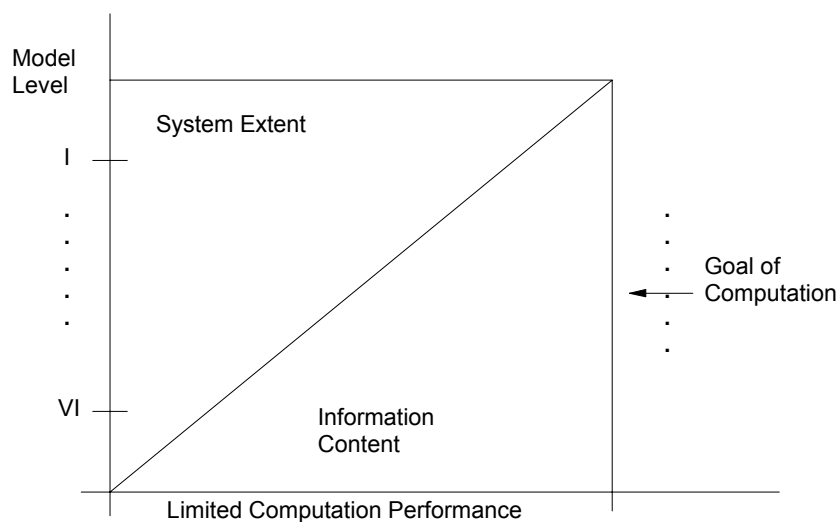


Рис.3.90 Соотношение между уровнем модели, охватом системы и информативностью

Информативность модели определяет, в то же время, возможные цели расчета. На рис.3.91 показаны модели разных уровней расчета схемы. Так как цепь коммутации является основной частью преобразователя, уровни моделей расположены по типу математического анализа процесса коммутации.

*Линейная усредненная модель (уровень I)*

Линеаризацией в одной рабочей точке, множественные связи между постоянными значениями и нелинейные характеристики устраняются линейными корреляциями. Система затем описывается линейной системой дифференциальных уравнений, которая справедлива только для очень малых отклонений от рабочей точки. Этот уровень аппроксимации годен для испытания стабильности всей системы, включая цепи управления, до предельных значений, и все постоянные значения контролируются и берутся по отношению к отклонениям от рабочей точки. Имеется всестороннее моделирование системы, исходящее из автоматической технологии управления. Поэтому нельзя недооценивать способ линеаризации на основе полиномов Тейлора.

*Нелинейная усредненная модель (уровень II)*

Если параметры переноса основной силовой схемы описываются преобразованными усредненными постоянными значениями, кроме функций коммутации, в результате получится нелинейная усредненная модель. Средние значения или основные гармоники

относятся к периоду частоты коммутации силовых полупроводниковых приборов.

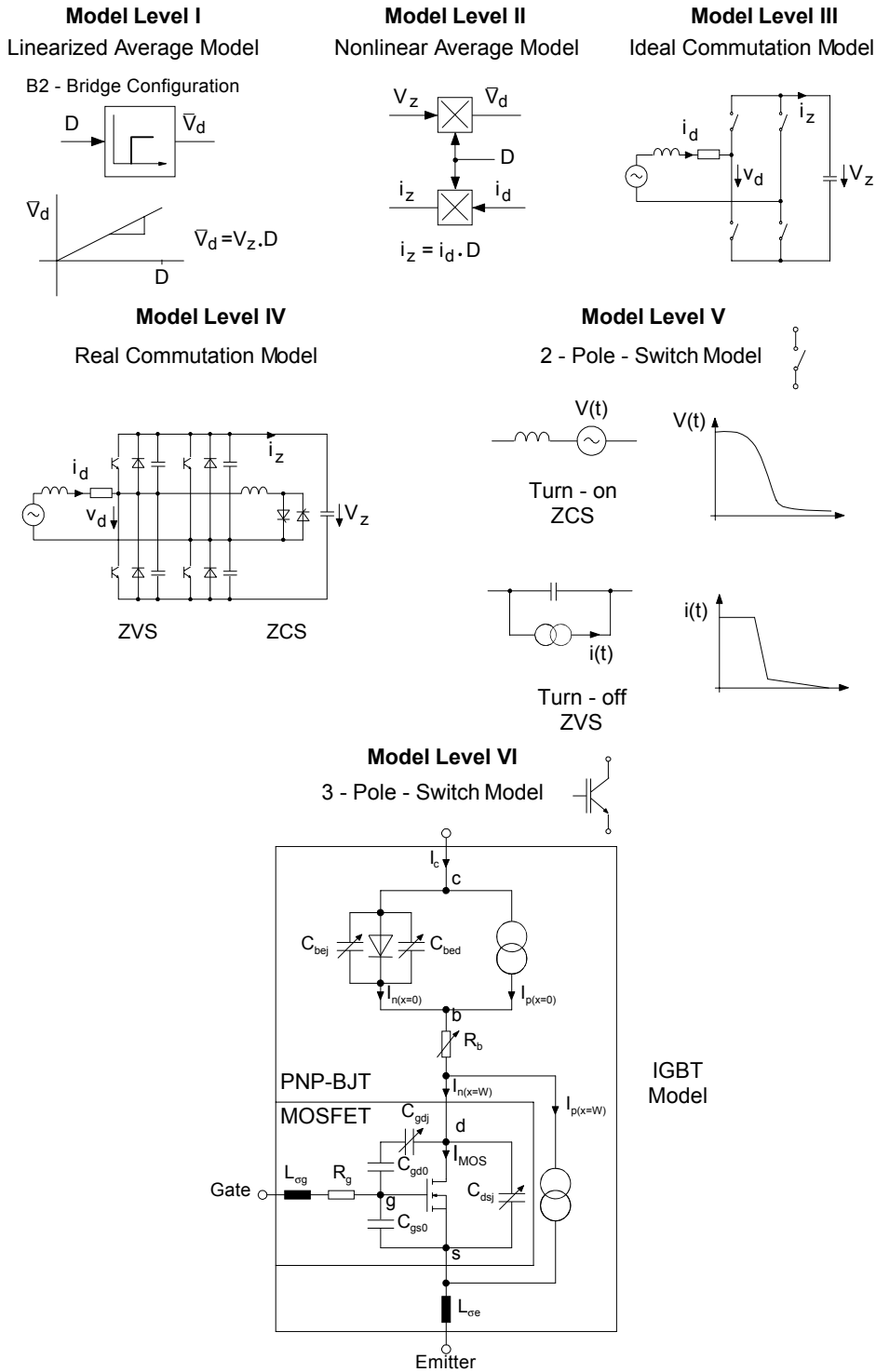


Рис.3.91 Уровни моделей для расчета схем

Продолжительная или дискретная функция управления многосторонне связана с трансформируемыми постоянными значениями. Особенно если определены коэффициенты преобразования (импульсные цепи, продолжительный режим), система может быть описана более эффективно на этом уровне модели, если можно опустить влияние импульсной частоты. Результаты справедливы при условии бесконечно высоких импульсных частот, и

аппроксимация сравнительно точная, если постоянные значения значительно не изменяются за один период импульсной частоты. В этом случае также рекомендуются программы моделирования, ориентированные на автоматическую технологию управления.

#### *Идеальная коммутационная модель (уровень III)*

Этот уровень модели основан на идеальной функции ключа. Процессы коммутации тока и напряжения протекают неопределенно короткий период времени. По отношению к эквивалентной схеме коммутации это означает, что пренебрегаются коммутационные индуктивности и емкости. Поскольку время переключения и коммутации мало по сравнению с продолжительностью периода импульса в устройствах с жесткой коммутацией, уровень модели дает довольно точные результаты, особенно для основных схем с жесткой коммутацией. Прямые функции управления теперь переходят в дискретные функции управления, или они должны создаваться схемой управления преобразователя из квази-продолжительных входных управляющих параметров в соответствии с принципом управления цепью коммутации. Непрерывное или дискретное описание системы, которое все еще подходит для усредненных моделей, может использоваться только частично из-за функции переключения. Любое положение ключа, которое зависит от процессов в системе или управления, приведет к последовательности состояний системы, любое из которых должно описываться отдельной системой уравнений. Численно разработаны два разных способа. Первый, ориентированный на состояния, рассчитывает индивидуальную систему уравнений для текущего состояния с минимальным порядковым номером. Второй, схемно-ориентированный, описывает цепь ключа с помощью однородной системы уравнений и с зависящими от работы изменениями параметров. В обоих случаях требуется числовое дискретное во времени управление с контролем событий и функциональным анализом. Оба метода отличаются специфическими преимуществами и недостатками.

#### *Реальная коммутационная модель (уровень IV)*

Реальная коммутационная модель основана на анализе элементов в цепи коммутации. В цепях ключей с нулевым напряжением и, особенно с нулевым током, время коммутации можно более не игнорировать по отношению к продолжительности периода частоты коммутации. Временем переключения все еще пренебрегают. В то время как начинается процесс коммутации с активным сигналом управления, он заканчивается пассивными процессами в электрической цепи (нулевой ток или нулевая разность напряжений). Рассмотрение параметров управления в непрерывной или дискретной системе управления, а также системы управления преобразователем и числовое описание целой схемы основывается на тех же методах, что и идеальная модель коммутации.

#### *Модель с 2-полюсным ключом (уровень V)*

Этот уровень модели применяется, если нельзя более игнорировать время переключения силовых полупроводников при реальной коммутации. В резонансной или особенно в квазирезонансной схеме это играет большую роль для общих функций для удовлетворения всех условий резонанса. Поскольку ослабление резонансных цепей в основном определяются потерями при коммутации силовых полупроводников, модель с 2-полюсным ключом обобщает ключи с нулевым током или нулевым напряжением при помощи источников тока или напряжения с фиксированными временными функциями при коммутации. Эти временные функции определяются экспериментально для специфической рабочей точки. Для модели с 2-полюсным ключом требуется другое определение времени перехода между переключением и временем коммутации, чем для реальной коммутационной модели.

#### *Модель с 3-полюсным ключом (уровень VI)*

На этом уровне модели постоянные параметры описываются непрерывными функциями, так как характеристики силового полупроводника реализованы эквивалентной цепью с анализом управляющего входа. Система может ухудшиться только прерывным управлением драйвера. Поэтому описание модели на этом уровне требует библиотеку моделей, в которую включены все силовые полупроводниковые приборы, использующие активные компоненты выходных цепей драйвера. Полупроводниковые модели состоят из пассивных компонентов и активных источников тока и напряжения. Точные параметры определяются только при всесторонних измерениях и данных от производителя прибора. Благодаря обширности системы, этот уровень модели часто ограничивается расчетом единичных периодов частоты коммутации. Численно мы всегда рекомендуем использовать схемно-ориентированные методы, поскольку они имеют большое число выводов электрической схемы.

При выборе программы для моделирования нужно четко представить цели расчетов и результирующий уровень модели. Средств моделирования, которые одинаково пригодны для всех уровней моделей, не существует. Состояние и управление или единичные параметры в моделях уровней I и II постоянны, что делает их пригодными для описания методов, используемых в управляющей технике. Существует большое разнообразие средств для этого. Модель уровня VI специализированна для расчета электрических схем, и предоставляется многими поставщиками в разных вариантах. Что касается уровней моделей между ними, нужно учитывать особенности разнообразных состояний и управляющих параметров, которые требуют специального числового представления прерывного во времени управления и детектора событий.

### **3.10.2 Программное обеспечение SEMIKRON**

SEMIKRON предоставляет разнообразные возможности расчета и много способов для моделирования различных схем и условий нагрузки для программного обеспечения силовых

модулей, особенно для SKiiPPACK и MiniSKiiP. Наиболее важным средством для потребителя является программа SKiiPsel, которая, однако, ограничена расчетом SKiiPPACK и MiniSKiiP [273], [274], [276]. SKiiPsel имеется на SEMIKRON-CD-ROM [265].

Эта программа предоставляет пользователям SKiiPPACK и MiniSKiiP компонентов возможность расчета потерь мощности IGBT и диодов в схемах при условии синусоидального выходного тока и фиксированных условий управления.

Разработка программы рассчитана на удобство пользования отдельным человеком, использование программы без дополнительного обучения и быструю «оценку» компонентов по их требованиям в устройстве.

Основана на вводе рабочих условий (ток, напряжение, частота, цикл нагрузки, температура), программа способна рассчитать потери мощности в IGBT и обратных диодах, а также окончательные температуры кристалла и радиатора. Программа выберет подходящий прибор по определенному пользователем критерию выбора, и проверит работоспособность предложенной пользователем схемы. Для условий охлаждения пользователь может выбрать специальные функции или выбрать такие из программы (воздушное или водяное охлаждение, скорость потока охладителя).

Результаты расчета представляются графически и как отчет в ACCESS. По результатам о температурных циклах установленных программой при рассчитанных условиях нагрузки будет возможность сделать оценку об ожидаемом сроке службы силового полупроводника.

SKiiPsel работает с отдельными характеристическими моделями, основанными на измеренных и интерполированных зависимостях.

Характеристики, требуемые для кристаллов IGBT и диодов, которые используются в SKiiPPACK и MiniSKiiP показаны ниже:

$$V_{CE} = f(I_C) \text{ (IGBT)} \quad V_F = f(I_F) \text{ (диод)}$$

$$V_{CE} = f(T_j) \quad V_F = f(T_j)$$

И потери мощности в плечах IGBT / обратных диодах

$$E_{on} = f(I_L) \quad E_{off} = f(I_L)$$

$$E_{on} = f(T_j) \quad E_{off} = f(T_j)$$

Полученных при условии

- управления SKiiPPACK интегрированным драйвером
- управления MiniSKiiP в соответствии с рекомендациями из справочных данных.

Они хранятся в программе и доступны пользователю.

Потери мощности в IGBT и обратных диодах рассчитывается итеративно в зависимости от выходного тока, температуры кристалла и условий охлаждения в соответствии с принципом, описанным в п.3.2.

## **MathCAD**

Другая возможная техническая поддержка при расчете схем с несинусоидальными выходными токами и традиционными IGBT или MOSFET модулями, которая не входит в состав SKiiPsel. Для этого SEMIKRON разработал специальную программу на основе MathCAD, которая способна выполнить температурное моделирование любой схемы пользователя, например, вольтодобавочных преобразователей, систем инвертирования источника тока и преобразователей с линейной коммутацией.

Кроме максимальных значений и характеристик силовых полупроводниковых приборов SEMIKRON, встроенная база данных содержит, например, данные о радиаторах и экспериментальные результаты испытаний цикла нагрузки с силовыми модулями.

Поэтому расчеты температурных циклов и срока службы компонентов возможны для любых циклов нагрузки.