

$$P_{\text{off}/D2} = (1/\pi) \cdot f_s \cdot E_{\text{off}/D}(\hat{i}_1) \quad (3.8)$$

Это уравнение также основано на предположении, что потери коммутации в диоде, возникающие в течение одной полуволны синусоиды такие же, как и потери коммутации при протекании эквивалентного постоянного тока, который будет соответствовать среднему значению полуволны синусоиды.

Потери при коммутации в IGBT примерно линейно преобразуются в другие постоянные напряжения.

Результаты, полученные с помощью данных расчетов важны для оценки ожидаемой рассеиваемой мощности при реальной работе преобразователя. Убедительные преимущества предоставляются пользователю в том, что все необходимые параметры можно взять прямо из справочных данных на соответствующий модуль.

3.2.2 Расчет температуры перехода

3.2.2.1 Основные сведения

Расчет температур переходов основан на упрощенной температурной эквивалентной блок-схеме, на рис.3.8. Обозначения транзисторов и диодов аналогичны таковым на рис.3.5.

Эквивалентная блок-диаграмма ограничивается одним транзистором и его коммутирующим диодом в силовом модуле, т.е. теми двумя компонентами, через которые проходит ток нагрузки в течение одной полуволны синусоиды (здесь T1 и D2). Эквивалентную блок-диаграмму для T2 и D1 можно нарисовать аналогично.

Обозначения на схеме:

P_{tot}	общая рассеиваемая мощность внутри транзистора и обратного диода
T_j	температуры переходов
Z_{thjc}	температурный импеданс от перехода к корпусу модуля
T_c	температура корпуса
Z_{thch}	температурный импеданс от корпуса модуля к теплоотводу
T_h	температура теплоотвода
Z_{thch}	температурный импеданс от теплоотвода к внешней среде (см.п.3.3)
T_a	внешняя температура

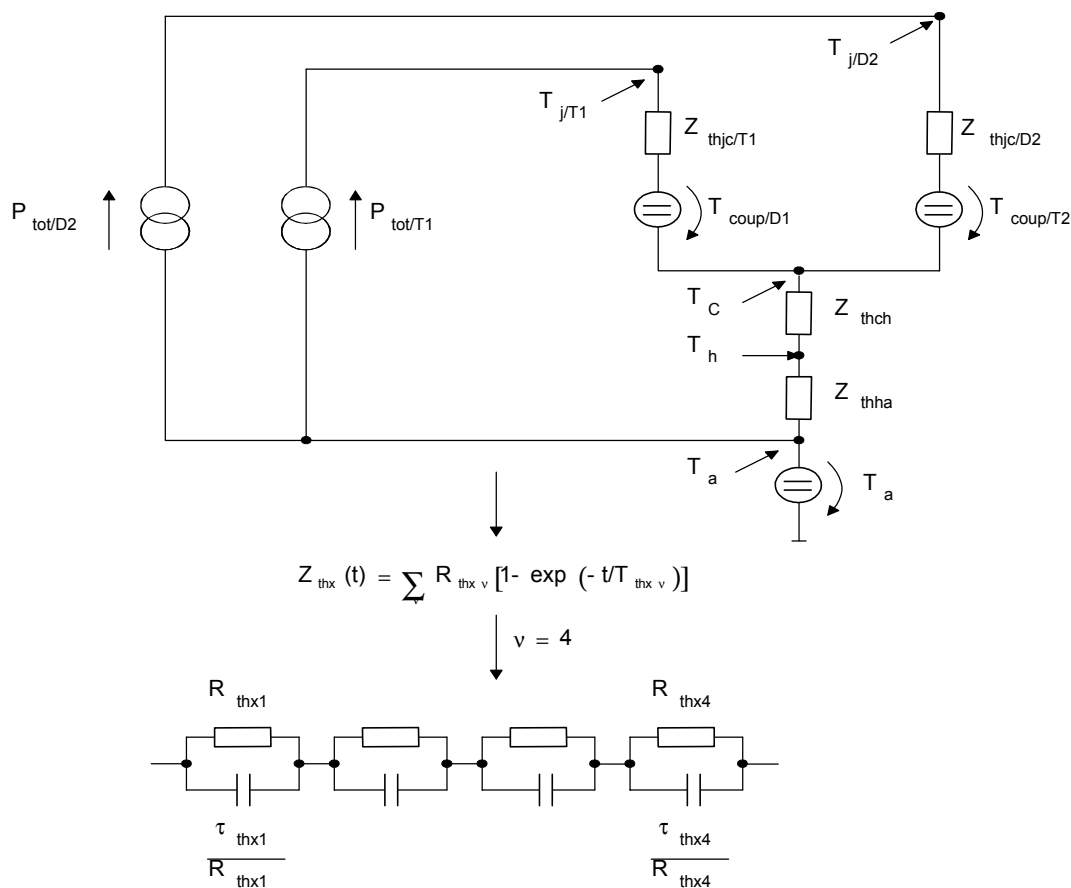


Рис.3.8 Упрощенная температурная эквивалентная блок-схема IGBT и обратного диода в силовом модуле

Транзисторы и обратные диоды в силовом модуле припаяны на общую медную пластину. Поэтому элементы $T_{coup/D1}$ и $T_{coup/D2}$ стоят для температурной связи T1 и D2 с соответствующими непараллельными элементами D1 и T2, которые становятся эффективными особенно на низких основных частотах.

Точное определение этого эффекта необходимо для всестороннего температурного моделирования структуры модуля [194]. Поэтому, этим обычно пренебрегают при упрощенных расчетах.

Если транзистор и обратный диод интегрированы в один модуль, для упрощения допускается использование общей температуры корпуса и радиатора. Если это упрощение не приемлемо для одиночных ключей большой мощности, значения Z_{thch} нужно брать отдельно для транзистора и диода.

Эффективные температурные параметры между корпусом и теплоотводом также зависят от следующих факторов: качество основной пластины модуля, контактное давление между модулем и радиатором, термопаста, качество поверхности радиатора. Пожалуйста, уделите внимание параметрам и рекомендациям, данным производителями (см.п.1.4.2.2).

Для компьютерного моделирования мгновенных параметров температуры перехода, температурные импедансы можно разделить на отдельные RC цепи (см.рис.3.8). Для удобства пользователей, SEMIKRON предоставляет в справочных данных параметры 4-6 RC компонентов для определения Z_{thjc} силовых модулей. При необходимости можно также получить параметры систем охлаждения (см.п.3.3.6).

С помощью эквивалентной блок-схемы на рис.3.8, можно рассчитать зависимость температуры переходов транзистора и диода от времени в соответствии с приведенными уравнениями, основывающимися на температуре корпуса:

$$T_{jT1}(t) = T_C + T_{coup/D1} + P_{T1}(t) \cdot \sum_{v=1}^n R_{thvT1} [1 - \exp(-t/\tau_{thvT1})] \quad (3.9)$$

$$T_{jD2}(t) = T_C + T_{coup/D2} + P_{D2}(t) \cdot \sum_{v=1}^n R_{thvD2} [1 - \exp(-t/\tau_{thvD2})] \quad (3.10)$$

Часто только средние температуры переходов и их неравномерность влияют на температурную компоновку преобразователей. Примеры расчетов для обычных нагрузок приведены далее.

3.2.2.2 Температура перехода при кратковременной работе

Кратковременная работа позволяет проводить большие токи в силовых полупроводниках, чем приведенные в справочных данных для продолжительной работы. Однако, возникающая при этом большая температура перехода не должна превышать максимальное значение 150°C . Температуру перехода можно рассчитать при помощи формул 3.9 и 3.10 в п.3.2.2.1.

Примеры:

Единичный импульс мощности

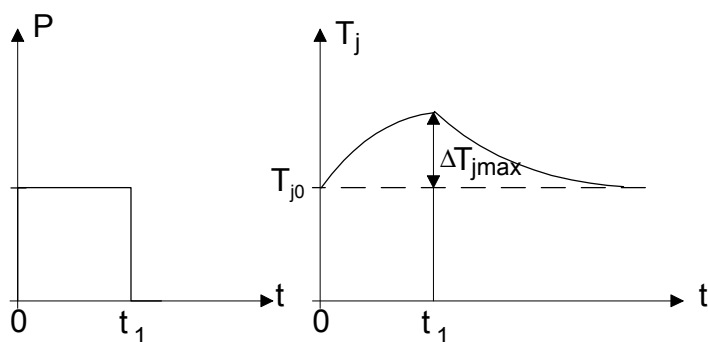


Рис.3.9 Зависимость от времени рассеиваемой мощности и температуры перехода при единичном импульсе мощности.

Максимальное значение температуры перехода при t_1 :

$$\Delta T_{jmax} = \Delta T_j(t_1) = P \cdot \sum_{v=1}^n R_{thv} [1 - \exp(-t_1/\tau_{thv})] \quad (3.11)$$

Температура перехода в период охлаждения:

$$\Delta T(t > t_1) = P \cdot \sum_{v=1}^n R_{thv} [1 - \exp(-t/\tau_{thv})] - P \cdot \sum_{v=1}^n R_{thv} [1 - \exp(-(t - t_1)/\tau_{thv})] \quad (3.12)$$

Эти формулы основаны на постоянной номинальной температуре корпуса.

Единичная последовательность m импульсов мощности

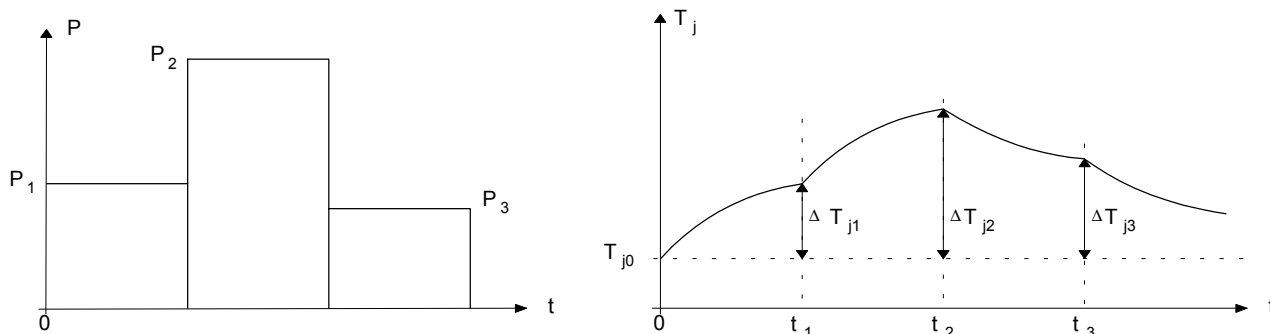


Рис.3.10 Зависимость от времени рассеиваемой мощности и температуры перехода при единичной последовательности m импульсов мощности.

Значение температуры перехода при t_1 :

$$\Delta T_{j1} = P_1 \cdot \sum_{v=1}^n R_{thv} [1 - \exp(-t_1/\tau_{thv})] \quad (3.13)$$

Значение температуры перехода при t_2 :

$$\Delta T_{j2} = P_1 \cdot \sum_{v=1}^n R_{thv} [1 - \exp(-t_2/\tau_{thv})] + (P_2 - P_1) \cdot \sum_{v=1}^n R_{thv} [1 - \exp(-(t_2 - t_1)/\tau_{thv})] \quad (3.14)$$

Значение температуры перехода при t_m :

$$\Delta T_j(t_m) = \sum_{\mu=1}^m (P_\mu - P_{\mu-1}) \cdot \sum_{v=1}^n R_{thv} [1 - \exp(-(t_m - t_{\mu-1})/\tau_{thv})] \quad (3.15)$$

Эти формулы основаны на постоянной номинальной температуре корпуса.

3.2.2.3 Температура перехода при импульсной работе

Приведенные в справочных данных Z_{thjc} характеристики транзистора и диода при периодической импульсной последовательности можно использовать для расчета средней и максимальной температуры перехода при периодическом рассеивании мощности на нагрузке в соответствии с несущей частотой.

На рис.3.11 представлены несколько таких кривых для IGBT и диода SKM100GB123D модуля и типичная характеристика тока и температуры перехода транзистора при импульсной работе.

Средняя температура перехода T_{javg} находится при умножении температурного сопротивления R_{thjc} на среднюю рассеиваемую мощность P_{totavg} . Далее рассчитывается средняя рассеиваемая энергия за всю продолжительность одного импульса или коммутации T_s .

$$P_{\text{totavg}} = f_s \cdot (E_{\text{on}} + E_{\text{off}} + E_{\text{fw}})$$

$$T_{\text{javg}} = T_c + P_{\text{totavg}} \cdot R_{\text{thjc}}$$

Максимальная температура перехода T_{jmax} находится при умножении Z_{thjc} на максимальную рассеиваемую мощность P_{totmax} . Далее рассчитывается средняя рассеиваемая энергия за импульс во время включения t транзистора или диода, соответственно, за длительность импульса T_s .

$$P_{\text{totmax}} = (E_{\text{on}} + E_{\text{off}} + E_{\text{fw}})/t$$

$$T_{\text{jmax}} = T_c + P_{\text{totmax}} \cdot Z_{\text{thjc}}$$

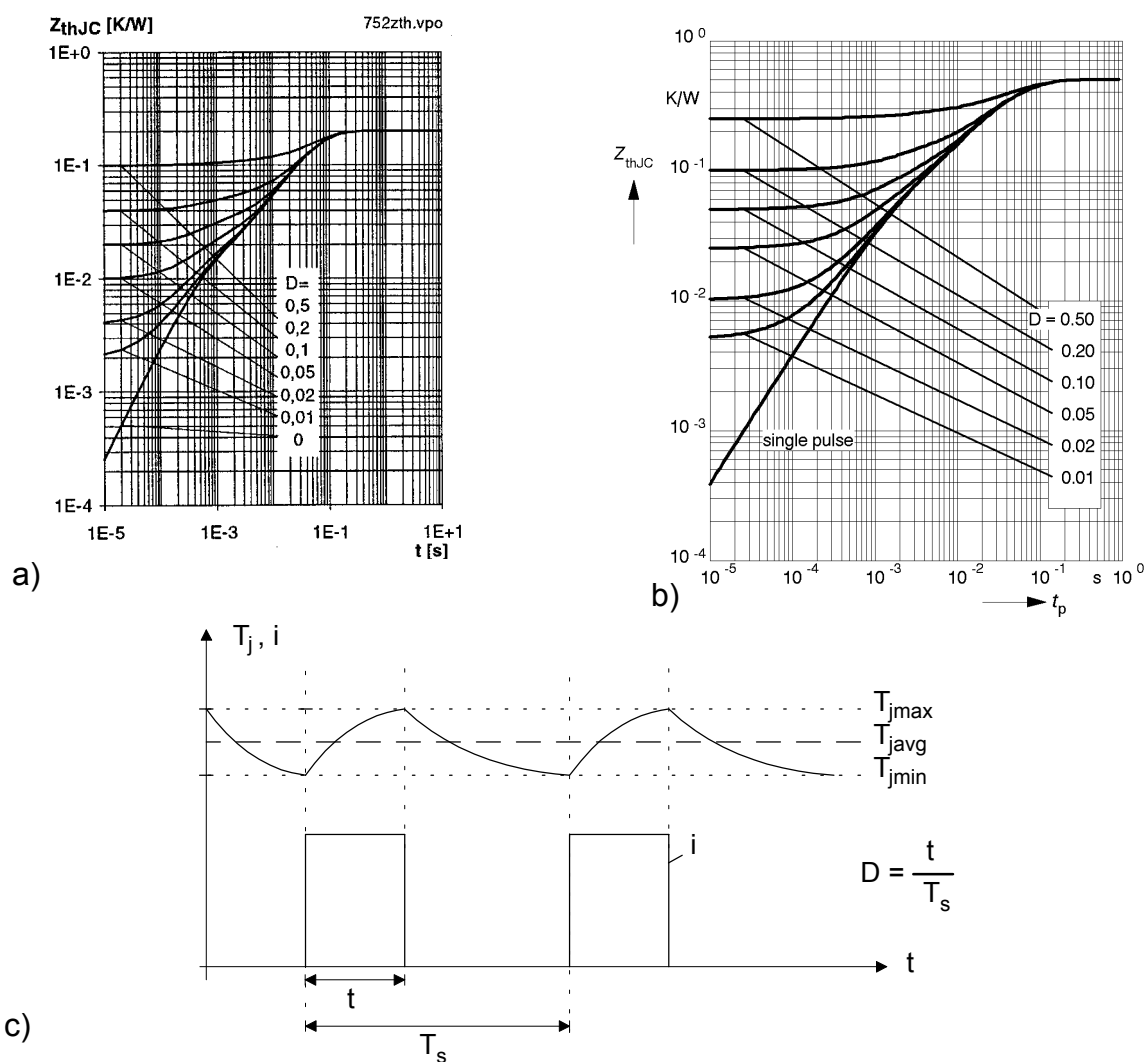


Рис.3.11 Переходной температурный импеданс Z_{thjc} IGBT (a) и диода SKM100GB123D модуля и характеристика тока и температуры (c)

Примеры для SKM100GB123D IGBT

Example 1: $f_s = 10 \text{ kHz}$; $T_s = 100 \text{ } \mu\text{s}$; $D_T = 0.2$; $t = 20 \text{ } \mu\text{s}$
 $T_c = 80^\circ\text{C}$; $E_{on} + E_{off} + E_{fw} = 25 \text{ mJ}$
 $R_{thjc} = 0.2^\circ\text{C/W}$, $Z_{thjc} = 0.04^\circ\text{C/W}$ (see Figure 3.11a)

Consequently: $P_{totavg} = 250 \text{ W}$; $P_{totmax} = 1250 \text{ W}$
 $T_{javg} = 80^\circ\text{C} + 250 \text{ W} * 0.2^\circ\text{C/W} = 130^\circ\text{C}$
 $T_{jmax} = 80^\circ\text{C} + 1250 \text{ W} * 0.04^\circ\text{C/W} = 130^\circ\text{C}$

Example 2: $f_s = 2 \text{ kHz}$; $T_s = 500 \text{ } \mu\text{s}$; $D_T = 0.2$; $t = 100 \text{ } \mu\text{s}$
 $T_c = 80^\circ\text{C}$; $E_{on} + E_{off} + E_{fw} = 25 \text{ mJ}$
 $R_{thjc} = 0.2^\circ\text{C/W}$, $Z_{thjc} = 0.042^\circ\text{C/W}$ (see Figure 3.11a)

Consequently: $P_{totavg} = 50 \text{ W}$; $P_{totmax} = 250 \text{ W}$
 $T_{javg} = 80^\circ\text{C} + 50 \text{ W} * 0.2^\circ\text{C/W} = 90^\circ\text{C}$
 $T_{jmax} = 80^\circ\text{C} + 250 \text{ W} * 0.042^\circ\text{C/W} = 90.5^\circ\text{C}$

Example 3: $f_s = 2 \text{ kHz}$; $T_s = 500 \text{ } \mu\text{s}$; $D_T = 0.2$; $t = 100 \text{ } \mu\text{s}$
 $T_c = 80^\circ\text{C}$; $E_{on} + E_{off} + E_{fw} = 125 \text{ mJ}$
 $R_{thjc} = 0.2^\circ\text{C/W}$, $Z_{thjc} = 0.042^\circ\text{C/W}$ (see Figure 3.11a)

Consequently: $P_{totavg} = 250 \text{ W}$; $P_{totmax} = 1250 \text{ W}$
 $T_{javg} = 80^\circ\text{C} + 250 \text{ W} * 0.2^\circ\text{C/W} = 130^\circ\text{C}$
 $T_{jmax} = 80^\circ\text{C} + 1250 \text{ W} * 0.042^\circ\text{C/W} = 132.5^\circ\text{C}$

Example 4: $f_s = 50 \text{ Hz}$; $T_s = 20 \text{ ms}$; $D_T = 0.5$; $t = 10 \text{ ms}$
 $T_c = 80^\circ\text{C}$; $E_{on} + E_{off} + E_{fw} = 5 \text{ J}$
 $R_{thjc} = 0.2^\circ\text{C/W}$, $Z_{thjc} = 0.12^\circ\text{C/W}$ (see Figure 3.11a)

Consequently: $P_{totavg} = 250 \text{ W}$; $P_{totmax} = 500 \text{ W}$
 $T_{javg} = 80^\circ\text{C} + 250 \text{ W} * 0.2^\circ\text{C/W} = 130^\circ\text{C}$
 $T_{jmax} = 80^\circ\text{C} + 500 \text{ W} * 0.12^\circ\text{C/W} = 140^\circ\text{C}$

Пример 1 рассчитан при стандартной частоте импульсов для IGBT 10 кГц. В результате нет отклонений между средним и максимальным значениями температуры перехода из-за низких температурных импедансов на высоких частотах. Частота импульсов в примерах 2 и 3 уменьшена до 2 кГц, однако брались постоянные значения для значения рассеиваемой энергии в примере 2 и для средней и максимальной общей рассеиваемой мощности в примере 3. Оба примера показывают отклонения между средним и максимальным значениями температуры перехода.

Можно предположить, что расчеты, основанные на средней рассеиваемой мощности и постоянном температурном сопротивлении, достаточны для частот свыше 3 кГц. Пример 4 показывает резкое различие между средней и максимальной температурами перехода на очень низких рабочих частотах.

3.2.2.4 Температура перехода при гармонических основных частотах

Расчет температуры перехода по основной выходной частоте тока преобразователя эффективен только при компьютерных вычислениях.

Необходимо подробно рассчитать температурную и электрическую систему за один импульс для интегрирования температуры перехода IGBT и диода более чем за одну полуволну синусоиды. На рис.3.12 показана схема расчета, которая была разработана в [194].

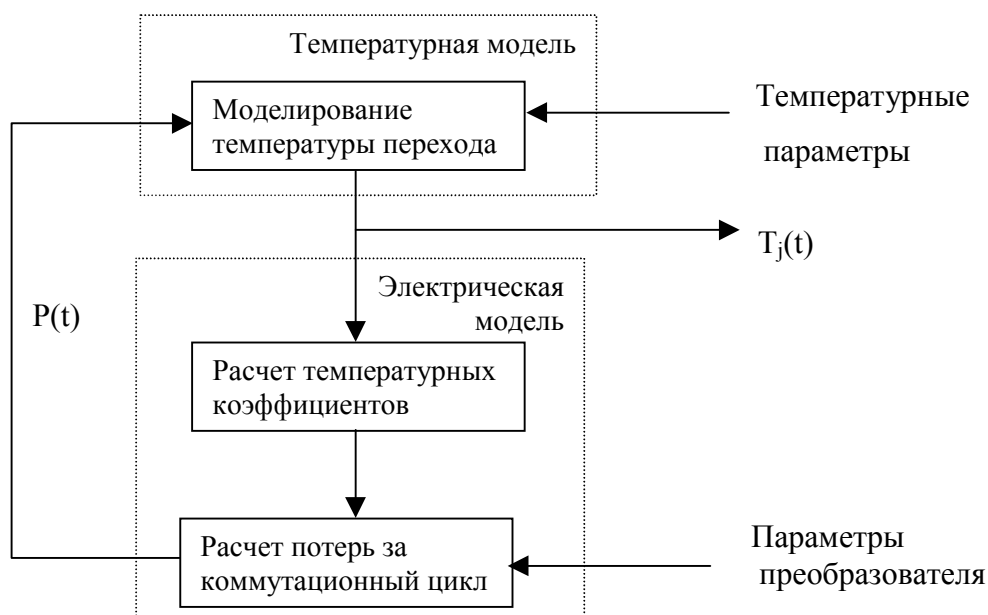


Рис.3.12 Основные расчеты температуры перехода преобразователей с синусоидальными выходными токами [194]

Температурная модель точно соответствует рис.3.8 для моделирования температурного импеданса при помощи RC-элементов.

Потери при коммутации за импульс можно рассчитать, основываясь на сохраненных характеристиках, если даны параметры преобразователя тока, такие как напряжение питания и мгновенное значение тока. Мгновенная температура перехода вводится в расчеты через температурные коэффициенты.

На рис.3.13 показана характеристика рассеиваемой мощности и средняя рассеиваемая мощность в IGBT, а также характеристики результирующей температуры перехода при различных основных выходных частотах, полученные при моделировании в соответствии с [194].

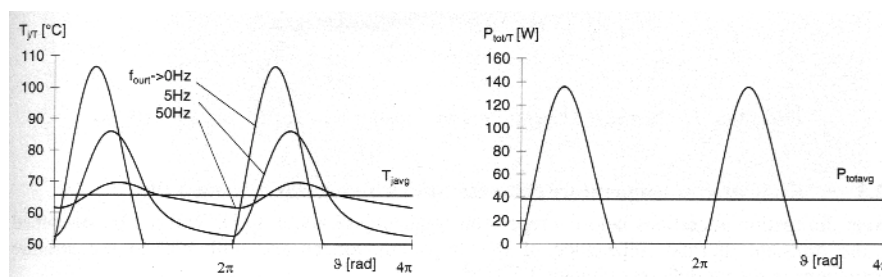


Рис.3.13 Характеристика рассеиваемой мощности и температуры перехода 1200V/50A-IGBT; $v_d = 540$ В; $i_{1rms} = 25$ А; $f_s = 8$ кГц, $\cos \varphi = 0.8$; $m = 0.8$; $T_h = 50$ °С

В этом примере максимальная температура перехода превышает среднее значение только на 4 – 5 К на частоте 50 Гц. На низких частотах среднюю температуру перехода нельзя использовать для определения температурной конструкции системы, так как