

максимальное значение резко возрастает. Следовательно, допустимое среднеквадратическое значение выходного тока для определенного силового модуля будет снижаться для данной температуры теплоотвода и частоты коммутации.

Соответствующие рабочие характеристики (например для SKiiPACK) доступны у SEMIKRON по требованию.

Кроме того, рис.3.13 показывает, что нет никаких температурных выбросов с импульсом частоты. Это также подтверждается расчетами в п.3.2.2.3.

Отдельным случаем с требованиями к температурным перепадам силовых модулей является процесс разгона управляемых напряжением и частотой трехфазных двигателей, управляемых инвертором. На рис.3.14 показан пример зависимого моделирования.

### 3.2.3 Определение температурных характеристик по отношению к сроку службы модуля

Изменение рассеиваемой мощности при снижении частоты повторения около 3 кГц не будет более сглаживать переходной температурный импеданс кристаллов, что приведет к флуктуациям температуры модуля (см.п.3.2.2). Как уже упоминалось в п.1.4.2.4, все внутренние связи силовых модулей влияют на износ и пробой, вызванный изменениями температуры. Усталость материала вызывается температурными перепадами из-за разных коэффициентов расширения соединенных материалов.

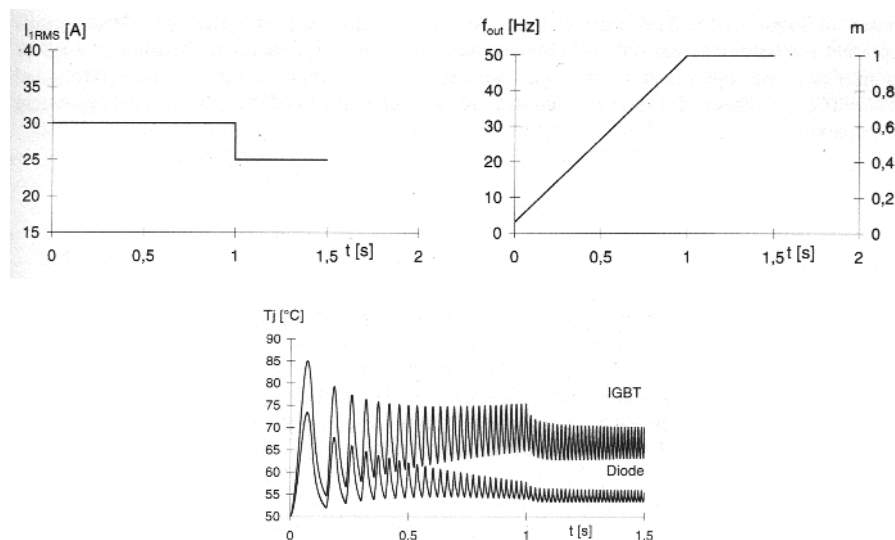


Рис.3.14 Разгон трехфазного двигателя (параметры как на рис.3.13), [194]

Поэтому важно при проверке температурных параметров где возникающие перепады температур при периодическом изменении мощности (частота импульсов, основная частота, цикл мощности) настолько интенсивны, что, в худшем случае, может быть не достигнуто требуемое число рабочих циклов. В этом случае как предельное значение для потерь мощности модуля рассматривается не максимальная температура перехода  $T_{jmax}$ , а разность температур  $\Delta T_j = T_{jmax} - T_{jmin}$  в течение данного цикла мощности.

На корреляцию между возможным числом рабочих циклов  $n$  и циркуляцией амплитуды температур  $\Delta T_j$  влияет много параметров. Соответствующие измерения требуют много времени и оборудования, см. п.2.7 и [231].

При измерениях с активным циклом мощности, срок службы силового модуля зависит не только от разности температур  $\Delta T_j$ , но и от средней температуры  $T_m$  в процессе измерения. Это было точно определено в результате исследовательского проекта LESIT [303]. Результаты испытаний срока службы при циркуляции мощности силовых модулей разных производителей показаны на рис.3.15. Корректировка параметров была выполнена SEMIKRON. Эти результаты уровень 1995 г. Между тем, срок службы возрос с улучшением паянных соединений и оптимизацией соединений внутренних проводов. Так достигнуто 20000 циклов при  $\Delta T = 100$  °C и  $T_{j,min} = 40$  °C. В настоящее время подготавливаются современные характеристики SEMIKRON силовых модулей.

### 3.3 Охлаждение силовых модулей

#### 3.3.1 Устройства охлаждения, охладители и методы охлаждения

Благодаря потерям в силовых модулях, тепловой потенциал должен быть рассеян при помощи теплоотводов, которые предоставляют дополнительную поверхность для конвекции и излучения, распределение теплового потока, а также уменьшение интенсивности переходных температурных процессов. Благодаря своей изоляции все силовые модули одной системы крепятся на один общий теплоотвод, который также может быть элементом конструкции (корпус, шасси, и т.п.)

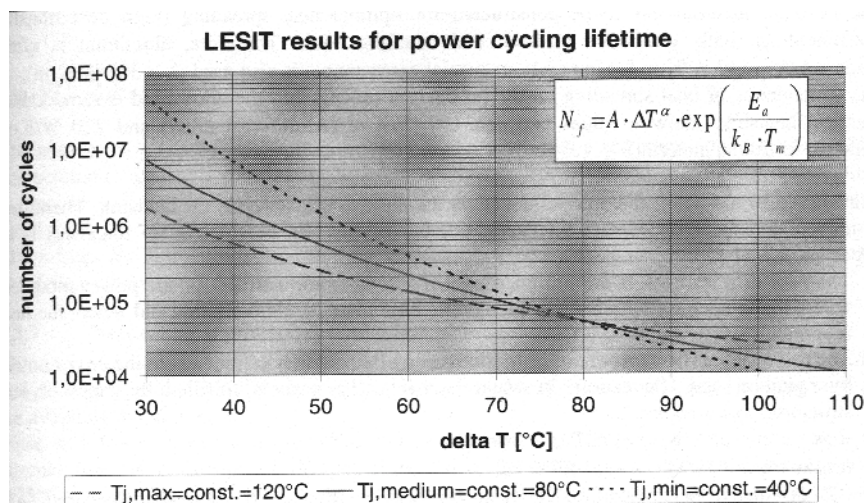


Рис.3.15 Результаты испытаний срока службы LESIT

Рассеивание тепла на радиаторе работает по принципу, что тепло рассеивается охладителем при прямой передаче или через теплоноситель. Теплоносителем может быть воздух, вода или (более редко) изоляционное масло, которое циркулирует при помощи гравитации, вентиляторов или насосов.

Далее мы бы хотели уделить внимание только естественным (свободная конвекция), принудительным воздушным и водяным охлаждающим системам с одной цепью охлаждения, так как более сложные способы охлаждения являются специфическими и масляное охлаждение редко используется с силовыми модулями.

Теплоотвод должен быть из материала с оптимальным распределением тепла (высокий коэффициент теплопроводности  $\lambda$ ), с приемлемой стоимостью обработки. Поэтому, часто предпочтителен алюминий ( $\lambda = 247$  Вт/К·м для чистого алюминия), в специальных случаях также используется медь ( $\lambda = 398$  Вт/К·м). Учитывается зависимость распределения тепла от процесса производства и используемого припоя; реальные радиаторы показывают значения  $\lambda$  между 150 Вт/К·м (штампованный алюминиевый сплав) и 220 Вт/К·м (AlMgSi-прессованный материал).

Распределение тепла имеет значительное влияние на эффективность теплоотвода. Поэтому оптимальная толщина основания, число ребер, их толщина и высота очень важны:

- основание радиатора это его часть поверхности без ребер, где градиент температуры к основной пластине модуля относительно низкий и где распространяется тепло.
- Ребра воздушного радиатора используются для рассеяния основного тепла в окружающую среду с помощью излучения и конвекции. В водяных радиаторах эту задачу выполняют конструкционные водяные каналы.

$$R_{thha} = \Delta T / P_{tot} = 1 / (\alpha \cdot A)$$

Вытекает из  $Q = \alpha \cdot A \cdot \Delta T = P_{tot}$

(Q: количество рассеиваемого тепла,  $\alpha$ : коэффициент теплопроводности, A: площадь передачи тепла,  $\Delta T$ : разность температур с окружающей средой,  $P_{tot}$ : рассеиваемая мощность,  $R_{thha}$ : сопротивление теплоотдаче радиатора)

Рекомендуют выполнять большое число ребер для возрастания рассеивающей поверхности. Но это должно гарантировать, что поставленные условия охлаждения значительно не уменьшат  $\alpha$ .

В соответствии с этими выводами, можно вычесть различия в критериях оптимизации теплоотводов с естественным и принудительным охлаждением.

Радиатор нагревается более равномерно при возрастании рассеиваемой мощности, т.е. расширяется эффективная поверхность теплообмена; на рис.3.16 поверхность теплообмена расширяется при увеличении длины теплоотвода.

### 3.3.2 Температурная модель охлаждающего устройства

При пояснении температурных характеристик силовых модулей в п.1.4.2.2, теплоотвод в эквивалентной температурной блок-схеме показан только одним RC-элементом ( $R_{thha}$ ,  $Z_{thha}$ ).

Однако, с возрастанием рассеиваемой мощности при  $t = 0$  от  $P = 0$  до  $P = P_m$ , характеристика переходного температурного импеданса теплоотвода  $Z_{thha}$  от времени разбивается на несколько временных констант как показано на рис.3.16 в качестве примера. Характеристика общего температурного импеданса  $Z_{thja}(t)$  конструкции может быть определена дополнением графика характеристиками температурного импеданса силового модуля и теплоотдачей радиатора.

$Z_{th}(t)$  – кривые можно построить при суммировании экспоненциальных функций при помощи уравнений:

$$\Delta T(t) = P_m \cdot \sum_v R_{thv} [1 - \exp(-t/\tau_{thv})] \quad \text{и} \quad Z_{thha}(t) = \Delta T(t)/P_m$$

$$\text{т.е.} \quad Z_{thha}(t) = \sum_v R_{thv} [1 - \exp(-t/\tau_{thv})]$$

Количество  $v$  и  $R_{thv}$  - и  $\tau_{thv}$  - значений выбирается так, чтобы можно было выполнить достаточную аппроксимацию характеристики без дополнительных сложных расчетов, независимых от физической структуры. Один из методов итерации, например, описан в [266].

Значения для моделирования, данные SEMIKRONом, и кратко упомянутые в этих разделах, основаны на модели с 4-временными константами ( $v = 4$ ).

### 3.3.3 Естественное воздушное охлаждение (свободная конвекция)

Естественное охлаждение применяется на низких мощностях до 50 Вт, а также при больших мощностях, если использование вентиляторов невозможно или в устройстве имеются большие охлаждающие поверхности.

Хотя при свободной конвекции температурное переходное сопротивление радиаторов обычно превышает внутреннее тепловое сопротивление силовых модулей, разность температур между кристаллом ( $125^{\circ}\text{C}$ ) и охлаждающим воздухом ( $45^{\circ}\text{C}$ ) падает прямо на радиаторе. Возле модулей температура радиатора обычно выше, чем при принудительном воздушном охлаждении, например  $90...100^{\circ}\text{C}$ . Потому, что потери мощности обычно малы при естественном воздушном охлаждении, основание и ребра радиатора не должны быть очень тонкими, так как теплопроводность имеет только слабое влияние на температурные особенности. Расстояние между ребрами нужно выбирать достаточным для получения приемлемого отношения между подъемом воздуха (падение температуры / плотности) и трением воздуха. Черное покрытие радиатора улучшит характеристики излучения и, таким образом, величину  $R_{thha}$  примерно на 15 % при разности температур 50 К между поверхностью крепления и атмосферой [266]. Отделка поверхности, однако, не ухудшит передачу тепла между основной пластиной модуля и радиатором.

### 3.3.4 Принудительное воздушное охлаждение

В отличие от естественного воздушного охлаждения, принудительное воздушное охлаждение может уменьшить температурное сопротивление радиатора до 1/5...1/15. На рис.3.16 сравниваются характеристики  $Z_{thha}(t)$  естественного и принудительного воздушного охлаждения до предельного значения  $R_{thha}$  на примере различных радиаторов P/16... SEMIKRON.

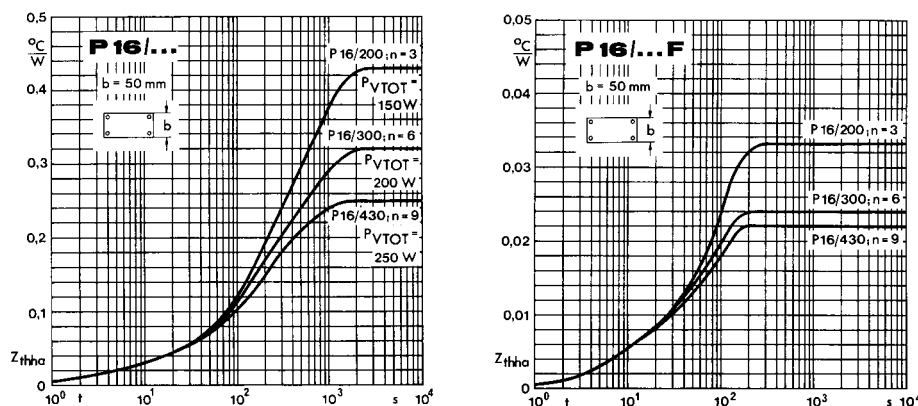


Рис.3.16 Характеристики  $Z_{thha}(t)$ , естественное (а) и принудительное (б) воздушное охлаждение

По сравнению со свободной конвекцией,  $\alpha$  намного больше при принудительном воздушном охлаждении. Номинальная температура поверхности таких радиаторов не должна превышать 80...90 °С при температуре охлаждающего воздуха 35 °С (условие для справочных данных).

Теплопроводность радиатора имеет огромное влияние на эффект охлаждения, что требует толстого основания и максимального числа ребер. Так как конвекция отвечает в основном за рассеивание тепла, черное покрытие радиатора не будет его улучшать при принудительном воздушном охлаждении.

$R_{thha}$  прямо определяется отношением потока воздуха ко времени  $V_{air}/t$ , зависит от средней скорости охлаждающего воздуха  $v_{air}$  и передаточное сечение  $A$ :

$$V_{air}/t = v_{air} \cdot A$$

Взамен общего плоского потока воздуха, воздушные завихрения на поверхностях ребер вызовет эффект турбулентности между ребрами, что улучшит рассеивание тепла в атмосферу. Передаточное сечение радиатора можно уменьшить с возрастанием числа ребер и их ширины, а также длины радиатора (длина ребер  $L$ ) и охлаждающее падение давления воздуха  $\Delta p$  вырастет. Следовательно, рассеивание тепла зависит от характеристик вентилятора, что описывается характеристикой  $\Delta p = f(V_{air}/t)$  (рис.3.17).

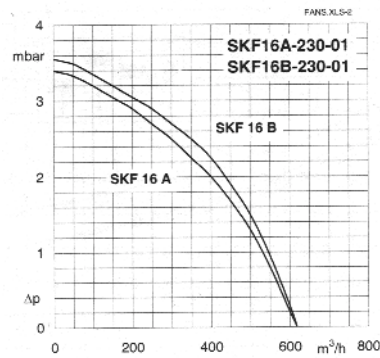


Рис.3.17

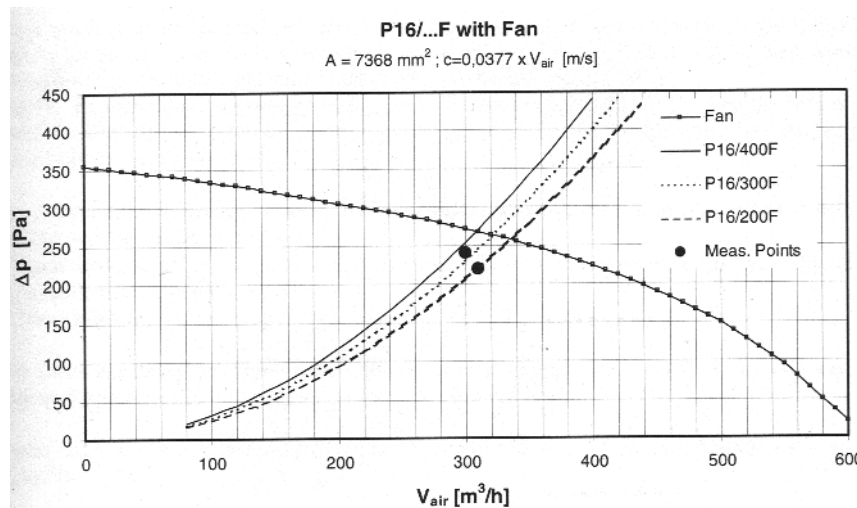


Рис.3.18 Поток воздуха на P16/... радиаторном профиле при его различной длине

Переходное температурное сопротивление радиаторной конструкции  $R_{thha}$  зависит от скорости потока воздуха, показанного на рис.3.18, который можно определить при сопоставлении характеристик вентилятора и падения давления  $\Delta p = f(V_{air}/t, L)$  или  $\Delta p = f(v_{air}, L)$  радиатора.

Кроме воздушного потока,  $R_{thha}$  зависит от распределения и расположения источников тепла (силовых модулей) на радиаторе. Рис.3.19 поясняет эту зависимость на примере выбранной SKiiP сборки.

Designed with SKiiP 600GB (3x200A/1st generation)

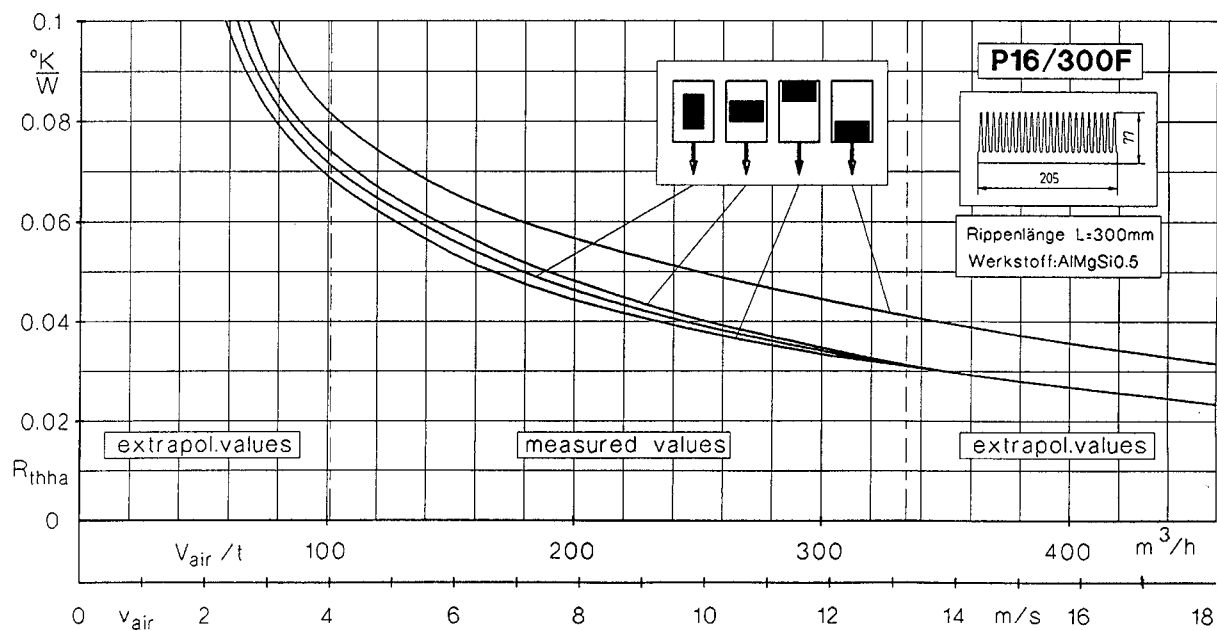


Рис.3.19

На рис.3.20 показана стандартная сборка трехзвенного SKiiPPACK на радиаторе с воздушным охлаждением P16/280F.

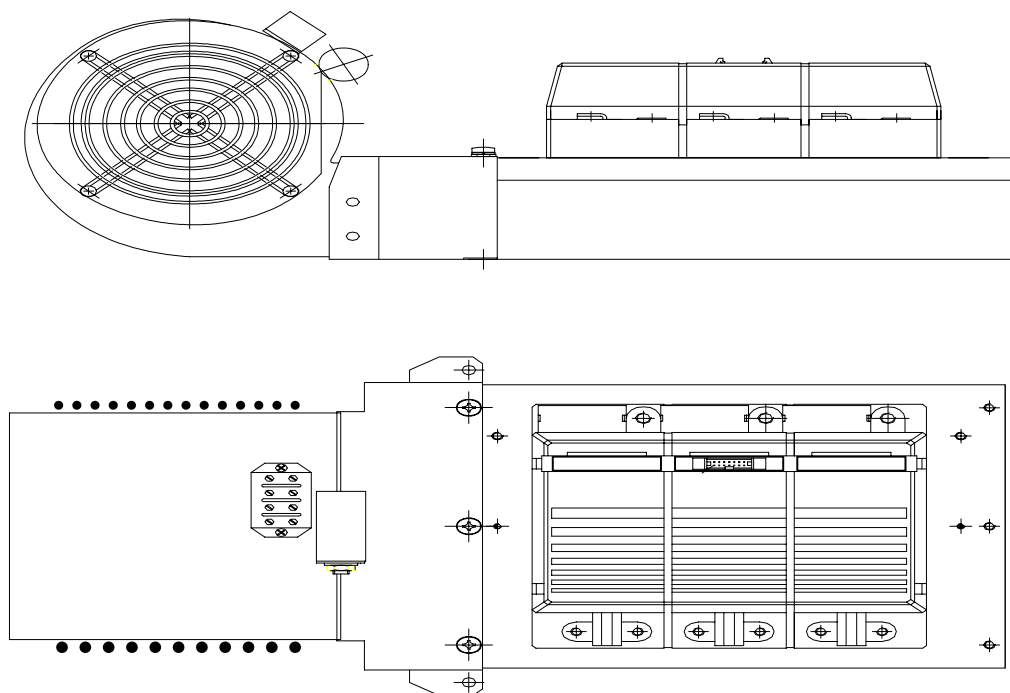


Рис.3.20

Для определения оптимальных условий принудительного охлаждения радиаторного профиля, теплопроводность и конвекцию можно также интегрировать при компоновке высоты ребер, которую можно получить по следующей формуле при условии некоторого упрощения: