

Исследование тепловых режимов мощных полупроводниковых преобразователей энергии*

Канд. техн. наук Е.В. ДИЛЕВСКАЯ, С.И. КАСЬКОВ, акад. РАН А.И. ЛЕОНТЬЕВ
МГТУ им. Н.Э. Баумана

The paper considers problems connected with ensuring normal thermal conditions, for functioning of powerful solid state power transformers, being used in different industries. The operational parameters, schemes and designs are presented. Main factors, determining thermal conditions are identified; methods of investigations and results are presented and the challenges for future investigations are indicated.

Мощные полупроводниковые преобразователи энергии (в дальнейшем ПЭ), основанные на таблеточных тиристорах, в настоящее время широко используются во многих областях техники: на атомных электростанциях, аэродромах, железнодорожном транспорте, тяговых подстанциях метрополитена, на морских судах, в наземных испытаниях оборудования для космических исследований и др.

Силовые (электрические) схемы в зависимости от назначения преобразователей включают от 12 до 36 приборов, каждый из которых во время функционирования выделяет тепло (150...500 Вт), в связи с чем они снабжаются индивидуальными охладителями, обеспечивающими двусторонний теплоотвод. Такие модули занимают

60 – 70 % объема тиристорного шкафа преобразователя. Из этого следует, что их эксплуатационные параметры и габаритные размеры в значительной мере определяются энергоэффективностью охладителей, которые поддерживают необходимую для нормального функционирования преобразователя температуру корпусов тиристоров.

Для терmostатирования тиристоров создана серия теплоотводов (охладителей) на базе фитильных тепловых труб. Теплоотвод состоит из массивного основания и цилиндрических тепловых труб, оребренных на участке конденсации. Ребра охлаждаются естественной или вынужденной конвекцией воздуха. В зависимости от мощности полупроводникового прибора число тепловых труб меняется. Габаритные размеры охладителей для приборов мощностью до 500 Вт составляют 50×140×240 мм. Диаметр тепловых труб 16 мм; толщина ребер 1...1,5 мм, шаг оребрения 5...10 мм; тепловое сопротивление 0,1...0,4 К/Вт.

*Статья подготовлена по результатам выполнения гранта РФФИ № 08-08-12123-офи.

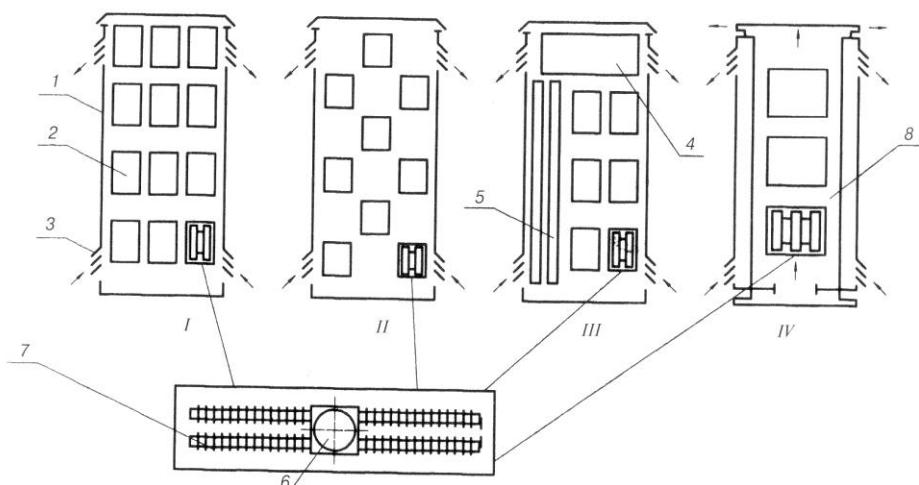


Рис. 1. Схемы размещения модулей «прибор-охладитель» в объеме преобразователя:

I – III – конструкции с естественной конвекцией воздуха; IV – конструкция с вынужденной конвекцией воздуха;
1 – корпус преобразователя; 2 – модуль «прибор-охладитель»; 3 – жалюзи; 4 – блок управления; 5 – токопроводящие шины;
6 – тиристор; 7 – тепловая труба; 8 – герметичный канал

Современные конструкции преобразовательных устройств можно условно характеризовать тепловыми моделями, представленными на рис. 1. Они имеют следующие основные параметры, определяющие их тепловой режим: габаритные размеры преобразовательного устройства $800 \times 600 \times 1600 \dots 800 \times 1200 \times 2200$ мм; число охлаждаемых полупроводниковых приборов 12 – 36; предельная температура их корпусов $85\dots110$ °C; температура охлаждающего воздуха $20\dots45$ °C; мощность тепловыделений одного прибора 150...500 Вт [2, 3].

Конструктивные особенности ПЭ и их схемы обуславливают 2-уровневую систему отвода тепла, выделяемого тиристорами. Первый уровень – передача тепла от полупроводниковой структуры тиристора через его корпус к охладителю и сброс в объем тиристорного (силового) шкафа ПЭ.

Второй уровень – обеспечение вывода суммарного тепла из объема тиристорного шкафа в окружающую среду.

Схема транспортировки теплоты на участке «полупроводниковая структура – окружающая среда» представлена на рис. 2.

Задача первого уровня решается применением специальных охладителей, стыкуемых непосредственно с полупроводниковыми приборами. В современных ПЭ используются охладители на базе тепловых труб с пластинчатым оребрением, о которых шла речь выше. Авторами статьи для повышения эффективности охладителей был предложен метод вихревой интенсификации, реализуемый путем нанесения системы сферических углублений на оребрение тепловых труб [8].

Результаты исследований и конструкции модернизированных охладителей приведены в работах [5 – 8, 10], в которых показана целесообразность применения вихре-

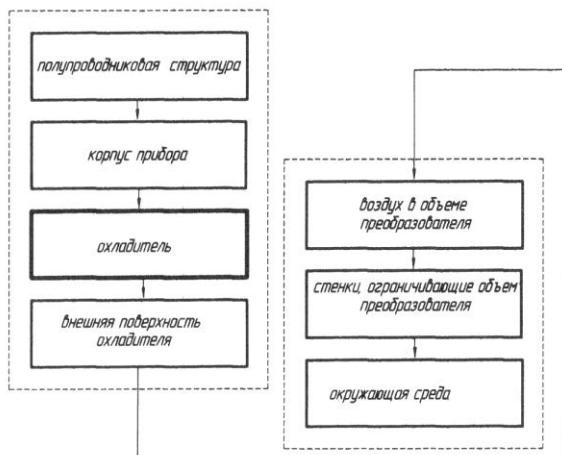


Рис. 2. Схема транспортировки теплоты на участке «полупроводниковая структура – окружающая среда»

вой интенсификации теплообмена для условий силовой электроники.

Задача теплообмена на втором уровне теплоотвода может быть сформулирована следующим образом: исследование процессов теплообмена и аэродинамики в объемах тиристорных шкафов преобразователей энергии, занятых регулярно расположенным объектами, имеющими сложную геометрическую форму, при обтекании их воздухом в условиях естественной и вынужденной конвекций. Эта проблема обусловлена тем, что модули «прибор-охладитель» (12 – 36 шт.) располагаются в шахматном или коридорном порядке согласно заданной компоновке с определенной компактностью (см. рис. 1). Все суммарное тепло, выделяемое модулями, необходимо вывести за пределы ПЭ, обеспечив заданный температурный режим функционирования.

Для этого было необходимо выполнить следующие работы:

- Поиск оптимальной компоновки модулей в объеме тиристорного шкафа преобразователя, обеспечивающей нормальный температурный режим функционирования.
- Выявление взаимосвязей факторов, определяющих тепловой режим ПЭ.
- Исследование зависимости температуры корпусов тиристоров от режимов течения воздуха и тепловых нагрузок при различных вариантах размещения модулей «прибор-охладитель» в объеме преобразователя (по высоте, ширине и глубине). Наличие таких зависимостей позволит получить данные для выполнения процедуры теплового конструирования преобразователей на ранней стадии их проектирования и принять обоснованные решения, обеспечивающие заданные тепловые режимы ПЭ.

Моделирование процессов конвективного теплообмена в рассматриваемых устройствах имеет свои особенности: необходимо составление математической модели для совокупности разнохарактерных процессов, определяющих тепловой режим энергетического объекта в целом. В рассматриваемых устройствах одновременно на разных участках могут иметь место следующие процессы теплообмена:

- теплообмен при обтекании оребренных поверхностей различной конфигурации свободно-конвективным или вынужденным потоком воздуха;
- теплообмен в системе регулярно расположенных по высоте объема источников тепла цилиндрической формы при совместном действии свободной конвекции и излучения;
- теплоотдача от плоских стенок ограждения при совместном действии конвекции и излучения.

В связи со сложностью конструкции и неоднородностью температурного поля на разных участках могут иметь место ламинарный, переходный и турбулентный режи-

мы течения воздуха. Структура потоков воздуха определяется размещением тепловыделяющих объектов относительно друг друга, т.е. компоновкой и степенью заполнения объема (компактностью).

В случае естественно-конвективного теплообмена факторы, определяющие тепловой режим: компоновка тепловыделяющих объектов в объеме шкафа; значение температуры охлаждающего воздуха [относительно температур корпусов силового полупроводникового прибора (СПП) и других элементов]; мощность тепловыделений; характеристики жалюзи в стенках шкафа; параметры охладителя.

Для моделей с вынужденной конвекцией охлаждающей среды компоновка тепловыделяющих объектов оказывает значительно меньшее влияние, чем в первом случае. Здесь тепловой режим существенно зависит от скорости охлаждающего воздуха и характеристик охладителя.

Разработка моделей на основе экспериментальных исследований является слишком трудоемкой и дорогостоящей, аналитические решения, по известным причинам, не могут обеспечить требуемой адекватности результатов. Поэтому с целью поиска необходимых зависимостей был выбран численный метод исследования тепловых режимов рассматриваемых устройств. Для выполнения исследования разработан метод компьютерного моделирования тепловых режимов, с помощью которого выполнен большой объем вычислительных экспериментов [2, 3, 4].

Метод реализуется с помощью двух моделей. Первая, основанная на использовании эмпирических критериальных зависимостей по теплообмену и аэродинамике в сочетании с данными по тепловому сопротивлению модуля «полупроводниковый прибор-охладитель», предназначена для решения задач, связанных с вынужденной конвек-

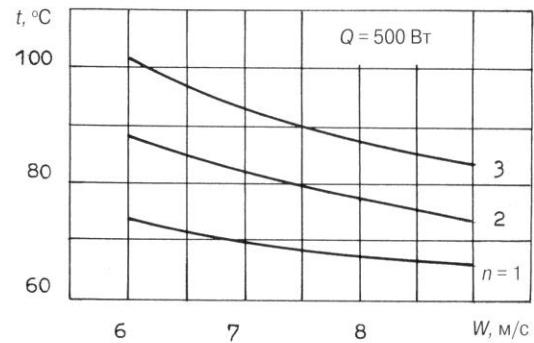


Рис. 4. График зависимости температуры корпуса прибора от скорости воздуха для разного количества приборов по высоте устройства

цией воздуха. Она позволяет выбрать оптимальную компоновку модулей «прибор-охладитель» в объеме преобразователя при варьировании их режимных и конструктивных параметров. Алгоритм расчета основан на принципе последовательного перебора определяющих факторов с последующим сравнением полученного в результате расчета значения температуры корпуса прибора с заданным. Выполнение нескольких итерационных циклов дает возможность получить положительный результат по температуре корпуса прибора при оптимальном сочетании конструктивных параметров. Математическая модель и основные принципы моделирования изложены в [2 – 4].

Вторая модель позволяет осуществлять численное исследование естественной конвекции с помощью двумерной сопряженной модели теплообмена. Математическая постановка этой задачи включает в себя систему уравнений Навье – Стокса и уравнение энергии. В ре-

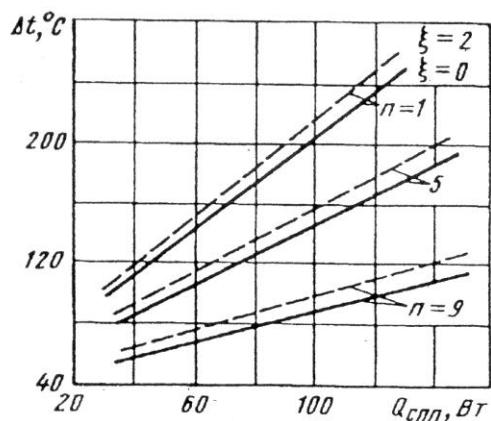


Рис. 3. График зависимости разности температур между корпусом прибора и охлаждающим воздухом от мощности тепловыделений прибора для разного числа приборов по высоте преобразователя:
 ξ – коэффициент аэродинамического сопротивления воздушного тракта (естественное охлаждение)

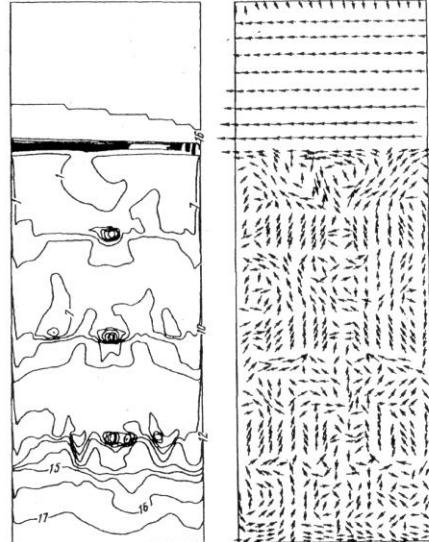


Рис. 5. Поля температур и скоростей в объеме преобразователя

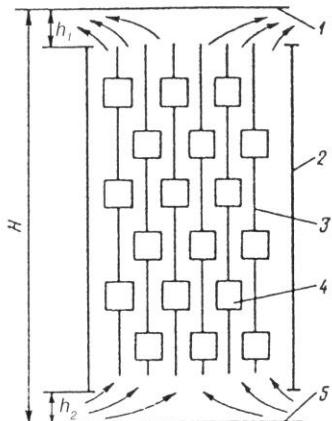


Рис. 6. Схема размещения блоков «прибор-охладитель» в объеме ПЭ при разных соотношениях подъема крыши h_1 и расстояния до основания h_2 :
1 – крыша ПЭ; 2 – корпус ПЭ; 3 – перегородки; 4 – блок «прибор-охладитель»; 5 – основание ПЭ

зультате моделирования получаются поля температур и скоростей. Комплекс программ, основанный на этой модели, снабжен графическим выводом, обеспечивающим построение векторов скоростей и изотерм в расчетной области. Математическая модель, подход к ее формированию, граничные условия и допущения описаны в [2 – 4].

С помощью двух указанных моделей проведена серия вычислительных экспериментов по исследованию процессов конвективного теплообмена в широком диапазоне изменения определяющих факторов. В результате исследований получены зависимости, связывающие мощность, отводимую от полупроводниковых приборов, со скоростью охлаждающего воздуха для случаев с различными числом приборов по высоте устройства, аэродинамическим сопротивлением тракта и температурными напорами. Некоторые результаты вычислительных экспериментов представлены на рис. 3 и 4. Данные получены для случая монолитных ребристых охладителей. Результаты исследования свидетельствуют о том, что существенное влияние на температуру корпусов приборов оказывает число их по высоте. Характер размещения приборов с охладителями в поперечном сечении устройства практически на температуру корпуса не влияет.

Как сказано выше, вторая модель, основанная на уравнениях Навье-Стокса, дает возможность получать картины полей температур и скоростей в объеме преобразовательного устройства с естественной циркуляцией воздуха. Была выполнена серия численных расчетов для разных типов компоновок (шахматная, коридорная, с перегородками между рядами). В качестве примера на рис. 5 представлены поле течения и изотермы для случая коридорной компоновки модулей «прибор-охладитель» в

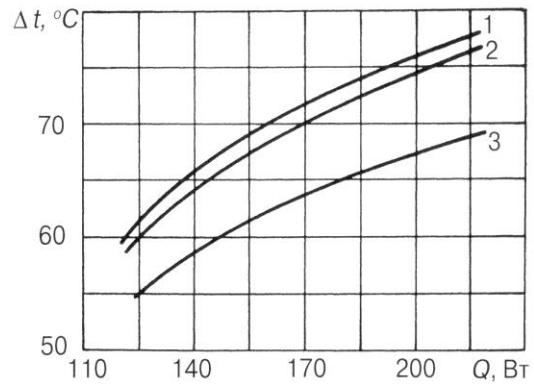


Рис. 7. График зависимости изменения перегрева корпусов приборов от мощности тепловыделений:
1 – $h_1 = \min, h_2 = \min$; 2 – $h_1 = \max, h_2 = \max$;
3 – $h_1 = \max, h_2 = \min$

объеме преобразовательного устройства с естественной конвекцией воздуха.

В ходе исследования естественной конвекции обнаружены интересные закономерности взаимодействия слоев воздуха в верхней и нижней зонах объема ПЭ с основной зоной циркуляции воздуха. Получены результаты по влиянию условий входа и выхода воздуха на распределение температур и скоростей в основной зоне [4].

Помимо компоновки важными параметрами, определяющими структуру поля течения в объеме преобразователя, являются: величина подъема крыши h_1 и расстояние всего комплекса блоков «прибор-охладитель» от пола h_2 (рис. 6). Как показывает анализ полей скоростей и температур, полученных для разных значений h_1 и h_2 , изменение соотношений этих параметров существенно влияет на перегрев корпусов охлаждаемых приборов.

На рис. 7 показан характер зависимости перегрева корпусов приборов относительно температуры охлаждающего воздуха при изменении мощности тепловыделений для разных соотношений h_1 и h_2 , меняющихся от минимальной до максимально возможной величины.

Наименьший перегрев приборов обеспечивается в случае, когда имеет место максимально возможный подъем крыши при минимально возможном расстоянии блоков от пола. Это свидетельствует о том, что изменение параметров h_1 и h_2 приводит к существенному изменению интенсивности свободно-конвективного переноса тепла в объеме преобразователя, что объясняется формированием двух областей, имеющих разный характер температурной стратификации воздуха. Увеличение размера верхней области приводит к уменьшению перегревов, а увеличение нижней вызывает увеличение перегрева корпусов приборов. Нижняя граница верхней области (характеризуемой параметром h_1) имеет более высокую

температуру, чем верхняя ее граница, поэтому с точки зрения возникновения естественной конвекции эта область является «полезной». При этом, чем больше параметр h_1 , тем интенсивнее конвективный перенос.

Во второй области, характеризуемой параметром h_2 , нижняя граница имеет более низкую температуру, чем верхняя, в связи с чем для интенсификации конвекции целесообразно сближение этих границ, т.е. уменьшение параметра h_2 .

Рекомендации, сформулированные на основе результатов численных экспериментов, использованы при создании новых типов преобразовательных устройств с естественной и вынужденной конвекцией охлаждающего воздуха. В связи со сложностью и трудоемкостью выполнения физических экспериментов были проведены натурные испытания опытных образцов моделей, в процессе которых измерялась температура корпусов приборов и охлаждающего воздуха в контрольных точках. Полученные данные свидетельствуют об удовлетворительном совпадении результатов, что подтверждает достаточную степень адекватности принятых моделей ПЭ.

Таким образом, на определенном этапе развития рассматриваемой проблемы изложенные методы позволили выполнять компьютерное моделирование тепловых режимов преобразовательных устройств на основе охлаждаемых полупроводниковых приборов, решать разнообразные задачи, связанные с тепловыми расчетами преобразователей с вынужденным и естественным воздушным охлаждением. Результаты дали возможность определять оптимальные соотношения конструктивных и режимных параметров мощных электронных устройств. Методы моделирования и их результаты использовались в течение ряда лет при создании новых типов преобразовательных устройств, которые в настоящее время эксплуатируются в различных энергетических системах.

Современные достижения в области силовой электроники, совершенствование полупроводниковых приборов и конструкций ПЭ, а также достижения в вычислительной технике и численных методах требуют продолжения этих работ для решения задачи нахождения оптимальной организации процесса конвективного теплообмена в объеме тиристорных шкафов ПЭ.

Возможно, на следующем этапе исследований окажется целесообразным применение метода многоблочных вычислительных технологий в пакете VH2/3 теплофизического и гидродинамического профиля [1, 9].

Этот метод применительно к поставленной выше задаче позволит осуществить как поиск оптимального размещения тепловыделяющих объектов в ПЭ, так и визуализацию процессов теплообмена и аэродинамики, что даст возможность существенно модернизировать разра-

ботанную ранее технологию теплового конструирования ПЭ.

Список литературы

1. Баранов П.А., Исаев С.А., Судаков А.Г., Усачев А.Е. Ретроспективный анализ десятилетней разработки многоблочных вычислительных технологий (МВТ) в пакете VH2/3 теплофизического и гидродинамического профиля // Труды VI Международного форума по тепло- и массообмену. – Минск, 2008.
2. Дилевская Е.В., Третьяков Г.А., Брянцев А.В. Тепловой расчет мощных преобразователей с воздушным охлаждением. – М.: Энергоатомиздат, 1986.
3. Дилевская Е.В., Марин В.В. Компьютерное моделирование тепловых режимов в системах мощных полупроводниковых устройств (англ.) // Труды Международного конгресса по силовой электронике. – Будапешт, 1991. Т. 2.
4. Дилевская Е.В., Марин В.В. Численное моделирование тепловых режимов электронных устройств в условиях свободной конвекции (англ.) // Труды Международной конференции по теплообмену. – Израиль. 1991. Т. 2.
5. Дилевская Е.В., Леонтьев А.И., Канев С.Н., Чудновский Я.П. Вихревая интенсификация теплообмена как форма энергосберегающей технологии (англ.) // Труды международной конференции по энергосбережению. – Хабаровск, 1994.
6. Дилевская Е.В., Чудновский Я.П., Михайлов С.Н. Новый метод интенсификации теплообмена на поверхностях охладителей мощных электронных приборов (англ.) // Труды 10-й Международной конференции. – Брайтон, 1995. Т.6.
7. Дилевская Е.В., Каськов С.И. Исследования теплогидравлических характеристик охладителей с лунным рельефом теплоотводящих поверхностей для устройств электронной техники // Тез. докл. 2-й Российской конф. «Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках». – М.: МЭИ, 2005.
8. Дилевская Е.В., Леонтьев А.И., Каськов С.И. Вихревая интенсификация теплообмена – нетрадиционный способ повышения эффективности охладителей силовых электронных устройств // Вестник Международной академии холода. 2007. № 4.
9. Исаев С.А., Судаков А.Г., Баранов П.А., Усачев А.Е. Конструирование многоблочных вычислительных технологий для численного моделирования вихревого тепломассообмена // Тез. докл. 2-й Российской конф. «Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках». – М.: МЭИ, 2005.
10. Леонтьев А.И., Олимпиев В.В., Дилевская Е.В., Исаев С.А. Существо механизма интенсификации теплообмена на поверхности со сферическими выемками // Изв. Академии наук. Сер. Энергетика. 2002. № 2.