

ЭФФЕКТИВНЫЕ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ТИРИСТОРНЫХ МОДУЛЕЙ

В. П. Гончаренко, В. А. Дивавин, И. Ф. Малышев

Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры
им. Д. В. Ефремова, Ленинград

Э. И. Карагезов

Бреванский физический институт

При разработке мощных систем питания электрофизических установок используются силовые тиристорные и диодные модули с унифицированными узлами в части блоков управления, защиты, охлаждения. Совершенствование и дальнейшее развитие систем охлаждения преобразовательных устройств с целью снижения их материалоемкости, достижения минимальных габаритов при высокой токовой нагрузке, снижения затрат на изготовление и эксплуатацию систем охлаждения и вентильной части преобразователей является актуальной задачей /1/.

В докладе рассматриваются принципы проектирования систем водяного и испарительного охлаждения мощных преобразователей. Силовоточные тиристорные и диодные модули выполнены на базе полупроводниковых приборов таблеточного исполнения, соединенных до 5+20 шт. последовательно в одном модуле. Охлаждение их осуществляется обычно в замкнутом водяном контуре, при этом водяные радиаторы располагаются между полупроводниковыми приборами.

Для минимизации расхода воды сняты переходные тепловые сопротивления контакта "охладитель - охлаждающая среда" двух типов охладителей: стандартных типа ОМ-104 и разработанных в НИИЭФА на основе двухзаходной спирали Архимеда. В стандартном радиаторе поток охлаждающей жидкости ламинарный, в спиральном радиаторе - турбулентный.

В эксперименте использовались четыре диода типа Д4-143-800, включенные последовательно в цепь постоянного тока 950 А, с водяными охладителями между ними. У среднего диода измерялось падение напряжения, температура на входе и выходе воды, температура в трех точках на поверхности радиатора t_1 , t_2 , t_3 , - соответственно со стороны входной оливки, в центре и выходной оливки. Стандартные охладители включались по воде последовательно, спиральные - параллельно. Результаты измерений приведены в таблице 1. Анализ результатов измерений показывает, что при конструировании высоковольтных полупроводниковых модулей с номинальной токовой нагрузкой с использованием радиаторов типа ОМ-104 и последовательным соединением их по воде последовательно может быть включено не более десяти приборов при расходе воды 8 л/мин. Разница температуры между верхним и нижним полупроводниковым прибором будет 25° . Такой перепад температуры в одном полупроводниковом модуле нежелателен, т.к. это приведет к существенному разбросу основных характеристик (времени включения, времени выключения, токов утечки). Спиральные радиаторы при 16-кратном уменьшении расхода воды через один охладитель имеют такое же тепловое сопротивление "поверхность охладителя - охлаждающая среда", как и ОМ-104. Последовательное соединение их по воде недопустимо из-за большого перегрева воды на выходе. Однако спиральные радиаторы наиболее оптимальны для систем параллельного охлаждения.

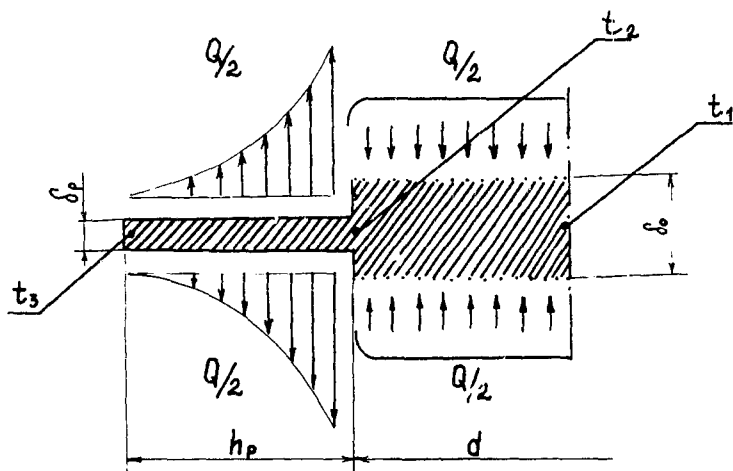
При параллельном охлаждении исключается влияние количества включенных последовательно и параллельно полупроводниковых приборов, в то время как потери напора в системе охлаждения существенно снижаются. Все это в целом позволяет при параллельном охлаждении снизить весогабаритные характеристики полупроводниковых модулей. Разработанный спиральный радиатор имеет толщину 6 мм, массу менее 0,3 кг.

При определении максимальной токовой нагрузки полупроводникового модуля необходимо суммировать переходное сопротивление "полупроводник-корпус" и "охладитель-среда". Значение этих коэффициентов приводится для режима постоянного тока, т.е. с их помощью можно учесть перепад температуры "полупроводниковый переход-охлаждающая среда" для среднего значения мощности потерь. Однако в импульсных режимах, например, для прямоугольной формы тока с углом проводимости 30° , тепловое сопротивление "переход-корпус" увеличивается в 5 раз [2]. Поэтому разработка конструкции с охлаждением непосредственно полупроводниковых шайб без корпуса и с использованием принципа параллельности охлаждения позволяет существенно повысить коэффициент использования полупроводниковых приборов по току, снизить массу, габариты и индуктивность высоковольтных модулей. Наиболее перспективным для этих целей является использование конструкций погружного испарительного охлаждения в среде фреона, который одновременно выполняет роль высоковольтной изоляции [3].

В процессе исследования такого метода охлаждения полупроводниковых модулей авторами настоящего сообщения была проведена оптимизация одиночного (являющегося частью регулярной структуры наборного модуля) элемента медного охладителя с кольцевым теплоотводящим ребром (рис.), погруженных в объем фреона Ф-113, имеющего температуру кипения при атмосферном давлении ($t_{\text{кип}} = 48^\circ\text{C}$). Подвод тепла к элементу предполагается равномерным по плоскости контакта "охладитель-полупроводник" на диаметре $d_{\text{охл}} = 76$ мм. В расчетах использовались теоретические зависимости, полученные в [4] для асимптотических кольцевых ребер. В результате оптимизации определены минимально возможные габариты единичного элемента для условий максимума отводимого теплового потока при температуре t_1 на оси охладителя, равной величине рекомендуемой (по условиям эксплуатации) температуре полупроводника ($t_p \approx 100^\circ\text{C}$ для тиристорных модулей и $t_p \approx 120^\circ$ для диодных). Результаты оптимизации для трех толщин ребер и двух значений $t_1 = t_p$ приведены в таблице 2.

Из таблицы 2 видно, что с увеличением толщины ребра увеличивается и его теплоотводящая способность, однако при этом растет высота ребра h_p и толщина охладителя δ_0 , т.е. весогабаритные характеристики. Другим способом увеличения предельной величины теплового потока, притом в тех же габаритах, является повышение допустимой температуры полупроводника.

Для увеличения мощности теплоотвода от каждого диода (тиристора) в наборном модуле при том же уровне температур возможно групповое обременение охладителя с одновременным увеличением величины δ_0 пропорционально мощности тепловыделения Q . Однако такое наращивание толщины в пределах одного охладителя, естественно, не может быть безграничным. С возрастанием δ_0 появляется существенная неравномерность температур по толщине охладителя. Теплоотдающая способность ребер, наиболее удаленных от контакта "охладитель - полупроводник", резко падает из-за снижения температуры t_2 у корня ребра, что приводит либо к резкому падению суммарной мощности Q при условии $t_1 = t_{\text{дон}}$, либо к недопустимому перегреву полупроводника при наращивании Q . Таким образом, для полупроводниковых приборов низкого



Элемент охладителя с кольцевым теплоотводящим ребром.

Таблица I. Результаты измерений температур стандартного и спирального радиатора

Тип радиатора	Расход воды л/мин	$t_{вх}$ °C	$t_{вых}$ °C	t_1 °C	t_2 °C	t_3 °C	Тепловое сопротивление охладит. среда °C/Вт	Примечание
ОМ-104	2	20	30	82	80	78	$3,5 \cdot 10^{-2}$	Прямое напряжение 1,45 В Постоянный ток 950 А Температура нагрева радиатора 1350 Вм
	8	20	22,5	62	61	60	$2,75 \cdot 10^{-2}$	
Спиральный радиатор	0,5	20	60	93	95	93	$2,7 \cdot 10^{-2}$	
	0,625	20	52	84	86	84	$2,5 \cdot 10^{-2}$	

Таблица 3. Результаты оптимизации для трех толщин ребер и двух значений температур

	d	t_2	t_3	δ_p	h_p	δ_o	Q
	мм	°C	°C	мм	мм	мм	Вт
$t_1 = 100^\circ\text{C}$	76	76	48	1	13	3,3	380
				2	18,5	4,85	560
				3	22,5	6,2	720
$t_1 = 120^\circ\text{C}$	76	85	48	1	14	3	525
				2	19	4,2	735
				3	24	5,6	950

класса (IC+I5), для которых характерно малое прямое падение напряжения, желательно использовать тонкие единичные охладители на среднюю мощность 300 - 600 Вт, для приборов высокого класса - толстые единичные охладители мощностью 600 - 900 Вт. В случае лимитирования габаритных размеров модулей необходима оптимизация оребренных охладителей с учетом двумерного характера температурного поля радиатора.

Л и т е р а т у р а

1. Ильин Г.В. Оптимальные способы охлаждения преобразовательной техники. Электротехническая промышленность, 1984, вып.4 (I62), с.12.
2. Ази М.А., Оруаас Я.А., Тоомсоо Г.К. Тепловые характеристики мощных полупроводниковых приборов при разных формах нагрузки. Электротехническая промышленность 1983, вып.6 (I52), с.7.
3. Исакеев А.И., Киселев И.Г., Филатов В.В. Эффективные способы охлаждения силовых полупроводниковых приборов. Л.: Энергоиздат, 1982, 136 с.
4. Ройзен Л.И., Рубин И.Р., Македонская Л.Н. Теплообмен при кипении жидкости на кольцевых ребрах. ИФЖ, 1977, т.32, № I, с.5.