

К. т. н. В. И. ГНИЛИЧЕНКО, к. т. н. С. П. ТКАЧЕВ,
к. т. н. В. Б. ТКАЧЕНКО

Украина, г. Одесса, НИИ "Шторм", Гос. политехнический ун-т,
ОАО "Нептун"

Дата поступления в редакцию
12.04 2000 г.

Оппонент к. т. н. Ю. Е. НИКОЛАЕНКО

ИСТОЧНИКИ ВТОРИЧНОГО ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ С ОХЛАЖДЕНИЕМ НА ОСНОВЕ ТЕПЛОВЫХ ТРУБ И ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

Показаны варианты использования тепловых труб и термоэлектрических устройств для улучшения характеристик систем охлаждения транзисторных модулей ИВЭП.

Анализ имеющейся литературы по тепловым режимам РЭА и конструированию систем обеспечения тепловых режимов (СОТР) РЭА не обнаруживает сведений об опыте исследований и разработки теплоотводов на основе тепловых труб для теплонагруженных источников вторичного электропитания (ИВЭП). Вместе с тем предварительные теплофизические представления позволяют предположить, что применение технологии тепловых труб (см., например, [1]) может оказаться перспективным для обеспечения теплового режима таких устройств, улучшения их энергетических и массогабаритных характеристик.

Тепловые трубы могут составлять основу теплоотводов как для отдельных элементов РЭА — транзисторов, тиристоров и т. д. (назовем их теплоотводами I уровня), так и для блоков и узлов РЭА в целом (теплоотводы II уровня).

Рассмотрим конструктивно-технологические решения применения тепловых труб (ТТ) в системах теплоотвода I уровня для серийных транзисторных модулей ИВЭП с повышенной плотностью тепловыделения.

Основными функциональными характеристиками СОТР, которые должны быть обеспечены независимо от конструктивного исполнения и условий эксплуатации изделия, являются рассеиваемый тепловой поток и допустимая температура. СОТР ИВЭП должны обеспечивать отвод суммарного теплового потока 20 Вт (модуль ИВЭП ПНС-50) и 10 Вт (ПНС-20) от дискретных источников тепловыделения в заданных условиях эксплуатации. При этом температура корпуса модуля (T) в зоне установки тепловыделяющих элементов должна быть не выше 348 К, а температура корпуса в зоне установки теплоотводящего устройства — не выше 338 К. Тепловой поток может передаваться к окружающей среде через корпус типового элемента замены (ТЭЭ) или

через корпус теплопередающего устройства на основе тепловой трубы.

Температура воздуха в изделии, как правило, отличается от температуры окружающей среды (T_c). По условиям применения возможно использование ИВЭП в двух характерных случаях: окружающая среда непосредственно контактирует с ИВЭП; ИВЭП находится внутри модуля II уровня. Во втором случае возможны два варианта: а) воздух соответствующей температуры поступает от автономного или централизованного источника; б) модуль II уровня герметичен, теплопередача осуществляется через теплостоки в виде шин, тепловых труб, термоэлектрических микроохладильников, элементов конструкции.

Конструктивное исполнение устройства охлаждения модулей ПНС-50(-20) зависит от условий охлаждения. Возможные варианты компоновки модулей и устройств охлаждения приведены на **рис. 1**.

Вариант рис. 1, а является наиболее простым случаем, когда для обеспечения теплового режима модуля ПНС не требуется специального устройства охлаждения. Тепловой поток, выделяемый дискретными источниками, последовательно проходит через корпус модуля и стенку платы, с поверхности которой тепло отводится в окружающую среду при вынужденной конвекции воздуха. При необходимости увеличения размера теплоотводящей поверхности на плату через пасту КПТ-8 устанавливается радиатор.

Варианты рис. 1, б, в отличаются от варианта рис. 1, а конструкцией устройства охлаждения. В связи с тем, что тепловой поток от элемента к корпусу модуля ПНС поступает дискретно и неравномерно, в варианте рис. 1, а не может быть обеспечена одинаковая по поверхности платы и радиатора эффективность отвода тепла к окружающей среде. Для выравнивания температурного поля по поверхности в вариантах рис. 1, б, в предусмотрена установка плоских тепловых труб. (Тепловая труба может быть установлена в углублении основания шасси ПНС — рис. 1, б, либо контактировать с его гладкой поверхностью — рис. 1, в. Другая сторона тепловой трубы прижимается через пасту КПТ-8 к плате или к основанию радиатора.)

Кондуктивный отвод теплового потока к элементам корпуса изделия показан в варианте рис. 1, г. При этом модуль ПНС-50 устанавливается основанием шасси через пасту КПТ-8 на "холодную" плату.

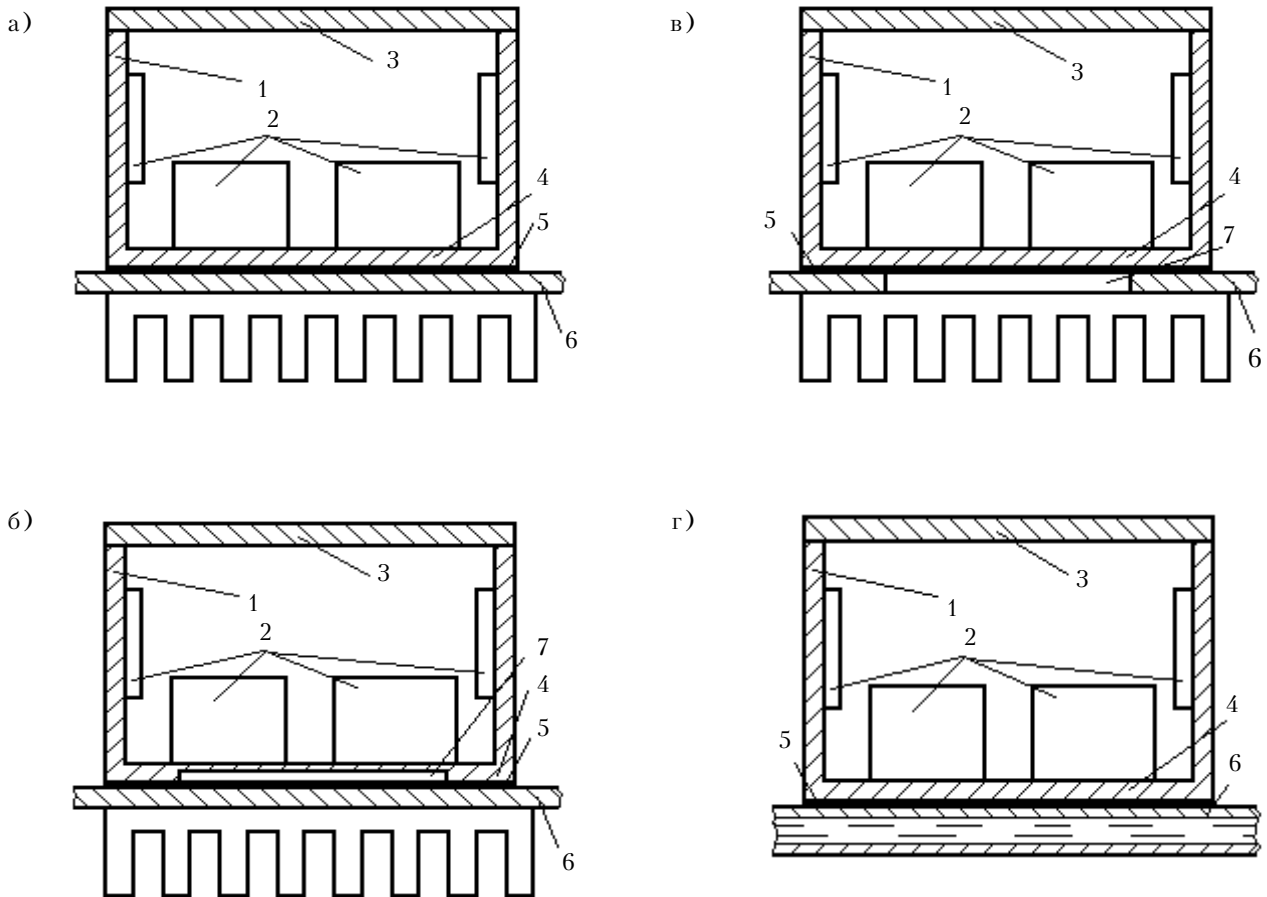


Рис. 1. Компонка модуля ПНС и устройства охлаждения:

1 – шасси; 2 – тепловыделяющие элементы; 3 – крышка; 4 – основание шасси; 5 – слой пасты КПТ-8; 6 – плата; 7 – тепловая труба

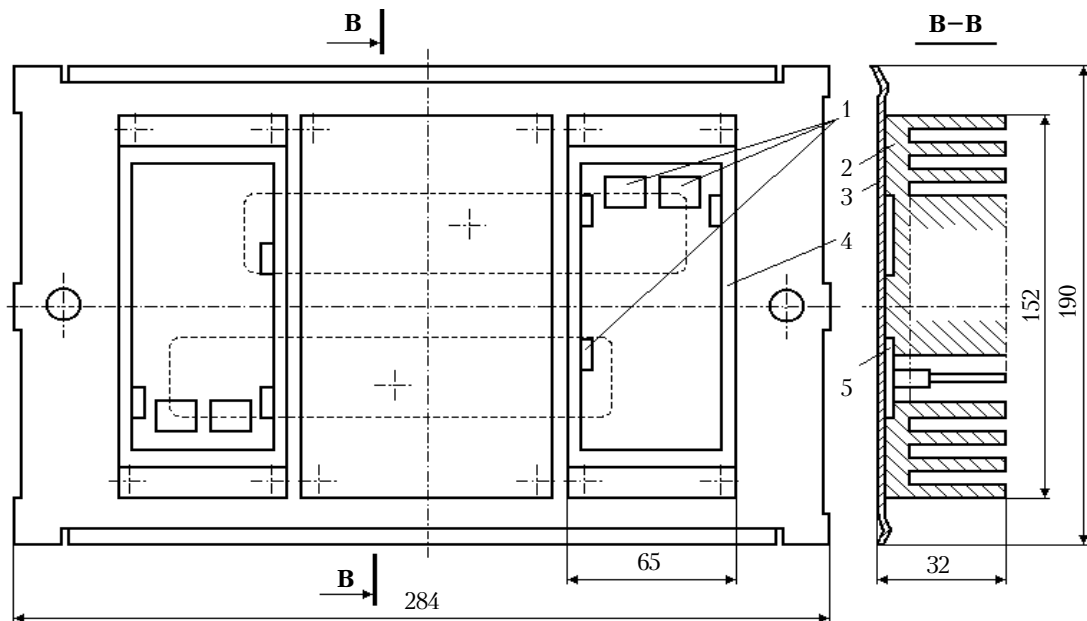


Рис. 2. Компонка ТЭЗ с двумя модулями ПНС-50М:

1 – тепловыделяющие элементы; 2 – радиатор; 3 – плата ТЭЗ; 4 – модуль ПНС-50; 5 – тепловая труба

На **рис. 2** приведена компоновка ТЭЗ с двумя ПНС-50. Устройство охлаждения состоит из двух тепловых труб и радиатора. Участки испарительной зоны тепловых труб прижимаются через пасту КПТ-8 основанием шасси ПНС-50 к несущей плате в зоне установки тепловыделяющих элементов. В связи с тем, что микросхема и диоды установлены на боковых стенках не симметрично поперечной оси модуля, предусмотрена установка тепловых труб таким образом, чтобы одной тепловой трубой обеспечить отвод теплового потока от диодов, расположенных в различных корпусах ПНС.

Каждый из конденсационных участков тепловых труб расположен между двумя испарительными зонами и прижимается к несущей плате основанием радиатора (размерами 80×162×31 мм) через пасту КПТ-8. Высота радиатора равна высоте корпуса ПНС-50. Обдув радиатора осуществляется потоком воздуха, поступающего через верхнюю либо нижнюю перфорированную стенку корпуса.

Тепловой поток от модуля ПНС-50 передается теплопроводностью к теплоносителю ТТ через слой пасты КПТ-8, корпус и капиллярно-пористую структуру (КПС)

ТТ на испарительной зоне, затем за счет скрытой теплоты парообразования теплоносителя – к конденсационной зоне ТТ и, далее, теплопроводностью через КПС, корпус, пасту КПТ-8 – к радиатору, с поверхности которого отводится в окружающую среду при вынужденной конвекции воздуха.

Концентрация тепловыделяющих элементов в модуле ПНС-50М на половине площади основания шасси в одной плоскости, параллельной плоскости несущей платы и основанию радиатора, позволила разработать различные варианты эффективных устройств охлаждения на основе плоских тепловых труб. На **рис. 3** представлен вариант компоновки трех корпусов ПНС-50М и устройства охлаждения на основе плоских тепловых труб на ТЭЗ.

Плоские тепловые трубы установлены по две на один ПНС-50М между основанием шасси и радиатора. С основанием шасси ПНС-50М трубы контактируют участками испарительных зон через пасту КПТ-8 на длине корпуса 80 мм, соответствующей площади, занимаемой тепловыделяющими элементами. Остальная поверхность основания шасси, на которой расположены конденсацион-

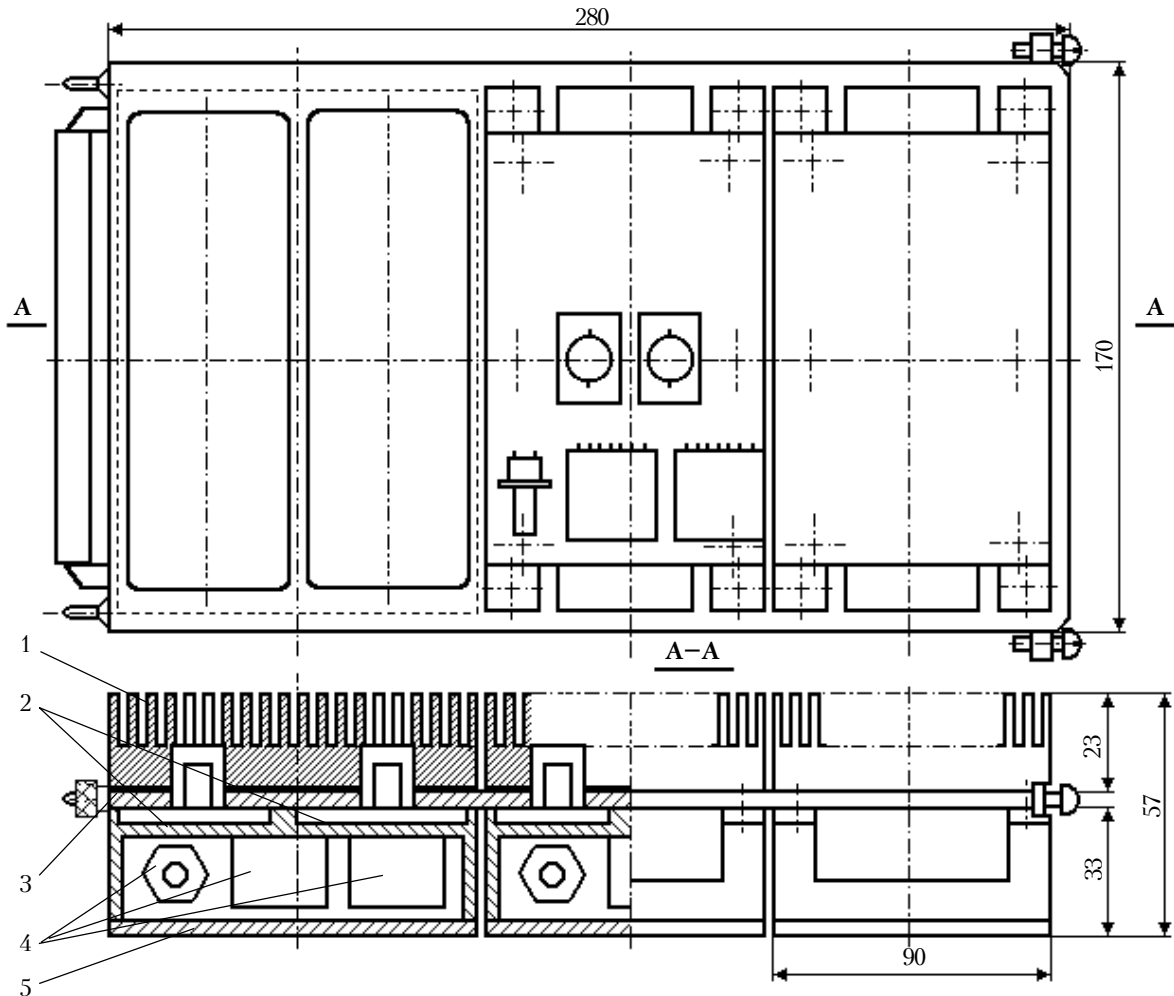


Рис. 3. Компоновка ТЭЗ с тремя модулями ПНС-50М:

1 – радиатор; 2 – тепловые трубы; 3 – несущая плата ТЭЗ; 4 – тепловыделяющие элементы; 5 – корпус модуля ПНС-50М

ные зоны, теплоизолирована от корпуса тепловой трубы за счет прокладки из материала с низкой теплопроводностью, установленной по периметру этой части основания и создающей воздушный зазор между ТТ и основанием шасси. Штенгель тепловой трубы может быть введен в корпус ПНС-50М в случае ограничений по высоте радиатора либо размещен в объеме, выделенном для радиатора, если высота радиатора больше высоты штенгеля. Условия отвода теплового потока от радиатора в окружающую среду – вынужденная конвекция воздуха.

Применение тепловых труб позволяет транспортировать тепловой поток на всю поверхность радиатора и уменьшить толщину основания шасси до размеров, определяемых жесткостью корпуса ПНС-50М и конструкцией крепления элементной базы на основании.

Один из возможных путей совершенствования теплового режима элементов и составных частей РЭА в диапазоне температур 150 – 343 К при $T_c \leq 343$ К и рассеиваемой мощности до 50 Вт является использование термоэлектрического способа охлаждения.

Отвод тепла от тепловыделяющих объектов осуществляется обычно с помощью радиаторов. Если перепад температур между объектом и средой невелик, то габаритные размеры радиатора становятся большими. Использование термоэлектрических устройств (ТЭУ), располагаемых между объектом и радиатором, при сравнительно небольших затратах электрической мощности позволяет значительно повысить температуру радиатора. При этом размеры радиатора значительно снижаются.

Для обеспечения теплового режима модуля ПНС-50 (-20) с температурой корпуса, равной температуре окружающей среды, проработан вариант компоновки, схема которого приведена на рис. 4. Конструктивная проработка варианта ТЭУ выполнена на основе унифицированных модулей «Микрон», обеспеченных двухсторонними керамическими теплопереходами.

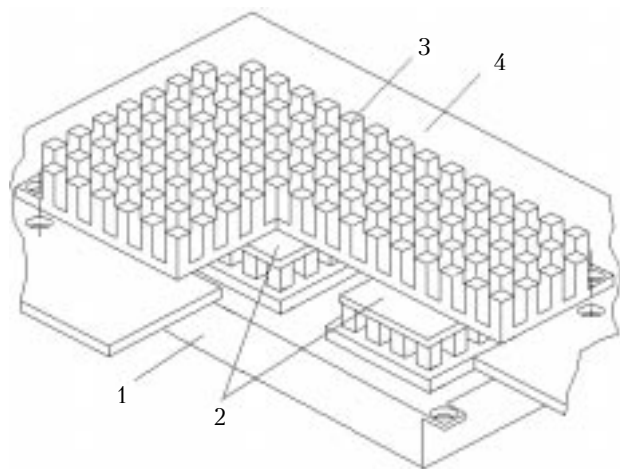


Рис. 4. Схема охлаждения модуля ПНС-50(-20)

термоэлектрическими холодильниками:

1 – модуль ПНС-50(-20); 2 – термоэлектрические микрохолодильники «Микрон» М4,5-27; 3 – радиатор; 4 – плата

Предложено следующее конструктивное решение: объект охлаждения – модуль ПНС-50 (-20) – установлен через слой пасты КПТ-8 на теплопоглощающих спаях ТЭУ, состоящего из четырех модулей типа М4,5-27. Прижим и крепление модулей осуществлены механическим способом через окна в плате.

В результате проведенных расчетов определены условия, необходимые для обеспечения тепловых режимов модулей ПНС, которые позволяют дать рекомендации по применению устройств охлаждения (УО). Рассмотрены следующие варианты конструктивного исполнения:

- модуль установлен на ТЭЗ, представляющий собой алюминиевую пластину (коэффициент теплопроводности $\lambda=146,8$ Вт/(м·К), толщина $2 \cdot 10^{-3}$ м);
- модуль с вмонтированной в его основание тепловой трубой установлен на такой же ТЭЗ.

Моделирование на ЭВМ температурных полей корпуса модуля ПНС и платы, на которой модуль установлен, подразумевает задание граничных условий, характеризующих взаимодействие поверхностей конструкции с окружающей средой. При проведении расчетов заданы следующие граничные условия:

- на внешней поверхности (за исключением нижней поверхности платы) теплоотдача отсутствует;
- на нижней поверхности платы – ряд значений коэффициента теплоотдачи α (граничные условия третьего рода).

Для задания граничных условий третьего рода рассчитывается средний коэффициент теплоотдачи с поверхности платы.

Проведены расчеты температурных полей для различных вариантов компоновки модуля и ТЭЗ при коэффициентах теплоотдачи с поверхности платы 10,5, 31,5, 52,7, 105,4 Вт/(м²·К).

Результаты расчетов показали, что отвод теплового потока с поверхности платы при вынужденной конвекции в указанном диапазоне коэффициентов теплоотдачи обеспечивает перегрев основания шасси модуля ПНС-50 относительно температуры охлаждающего воздуха $\Delta T=18...167$ К. При температуре охлаждающего воздуха 323 К минимальное значение перегрева превышает допустимое значение на 3 К.

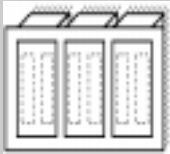
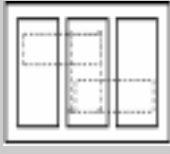
Основной вклад в перегрев основания шасси модуля относительно температуры охлаждающего воздуха вносит перепад температур между платой и охлаждающей средой, т. к. перепад температур по толщине основания шасси модуля ПНС-50, контакту «шасси – плата» и по плате не превышает 0,5 К.

Установка ТТ между несущей платой и основанием шасси модуля ПНС-50 повышает перегрев на 3 К, т. к. дополнительное термическое сопротивление контакта и ТТ не компенсируется повышением равномерности распределения температур по поверхности платы при относительно небольших – $(2...4) \cdot 10^4$ Вт/м² – плотностях теплового потока от элементов модуля ПНС-50.

Отвод теплового потока от модуля ПНС к окружающей среде может осуществляться при выполнении поверхности в виде радиаторов. Для выбора конструкции радиатора, соответствующей расчетным

Таблица 1

Конструктивные характеристики и результаты теплового расчета устройств охлаждения для модулей ПНС-50М

Вариант компоновки	Q_{Σ} , Вт	Кол-во радиаторов	Габариты радиатора, м	Кол-во ТТ	Габариты ТТ, м	G_V , $10^3 \text{ м}^3/\text{с}$	w , м/с	Δt_{Σ} , К	$t_{\text{ПНС}}$, К	ΔP_p , Па
	60	3	0,162×0,090×0,020	6	0,148×0,040×0,0024	4,2	0,8	15,6	338,6	4,2
						18,0	3,3	7,0	330,0	73,6
	40	1	0,162×0,080×0,032	2	0,178×0,065×0,0024	4,2	1,6	10,4	333,4	17,5
						18,0	7,0	5,1	328,1	335

значениям α и перепадов температур от основания радиатора к окружающей среде (ΔT_p), выполнены проектные и поверочные расчеты радиаторов со стандартными габаритами.

Для различных схем компоновки модулей ПНС-50 и ПНС-50М на ТЭЗ проведены тепловые расчеты, позволяющие оценить суммарные перепады температур по конструкции ТЭЗ с УО при минимальном ($4,14 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$) и максимальном ($18,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$) расходах охлаждающего воздуха.

В качестве примера в табл. 1 представлены результаты расчета теплового режима двух модулей ПНС-50 (компоновку на ТЭЗ см. на рис. 2). (Здесь w – скорость воздуха в радиаторе, $t_{\text{ПНС}}$ – температура корпуса ПНС, ΔP_p – потери давления в радиаторе.)

Суммарный тепловой поток, выделяемый двумя модулями ПНС-50, равен $Q_{\Sigma}=40$ Вт (каждый по 20 Вт), температура охлаждающего воздуха 323 К.

Здесь радиатор общий для двух ТТ: длина 0,162 м, ширина 0,08 м, высота 0,032 м, высота штыря 0,027 м, диаметр штыря 0,002 м, шаг установки штырей 0,005 м.

Каждая ТТ имеет длину 0,148 м, ширину 0,040 м, длину испарительной зоны ($0,062+0,004$)=0,066 м, длину конденсационной зоны 0,08 м, толщину стенки корпуса $0,5 \cdot 10^{-3}$ м. На внутренней поверхности ТТ, контактирующей с модулем ПНС-50 и радиатором, установлена капиллярно-пористая структура из одного слоя сетки из нержавеющей стали 12Х18Н10Т с размером ячейки $0,04 \cdot 10^{-3}$ м, диаметром проволоки $0,03 \cdot 10^{-3}$ м, пористостью 0,632. На противоположной внутренней поверхности ТТ установлена артерия из двух слоев сетки с размером ячейки $0,071 \cdot 10^{-3}$ м, диаметром проволоки $0,055 \cdot 10^{-3}$ м,

пористостью 0,628. Теплоноситель ТТ – дистиллированная вода.

Проведены расчеты тепловых режимов конструкции при установке трех (вариант 1) и двух (вариант 2) модулей ПНС-50М на ТЭЗ при заданных минимальном ($G_V=4,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$) и максимальном ($G_V=18 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$) расходах воздуха.

Для расчета характеристик термоэлектрических устройств использованы исходные данные, представленные в табл. 2.

Таблица 2

Исходные данные для расчета характеристик термоэлектрических устройств

Характеристика	Вариант компоновки модулей	
	1	2
Габариты объекта, мм	65×118	65×140
Тепловой поток, выделяемый объектом, Вт	10	20
Максимальная температура окружающей среды, К	343	
Коэффициент теплоотдачи, Вт/(м ² ·К)	10, 20, 50, 100	

Анализ расчетных данных показал, что с увеличением перепада температур ($\Delta t_{\Sigma}=T-T_c$) теплоотводящая способность радиатора увеличивается, т. е. для того, чтобы отвести один и тот же тепловой поток при большем перепаде температур, можно использовать меньший по размеру радиатор. В то же время мощность потребления ТЭУ (W) с рос-

том Δt_{Σ} увеличивается (рис. 5). Поэтому при проектировании термоэлектрического устройства с тепло-

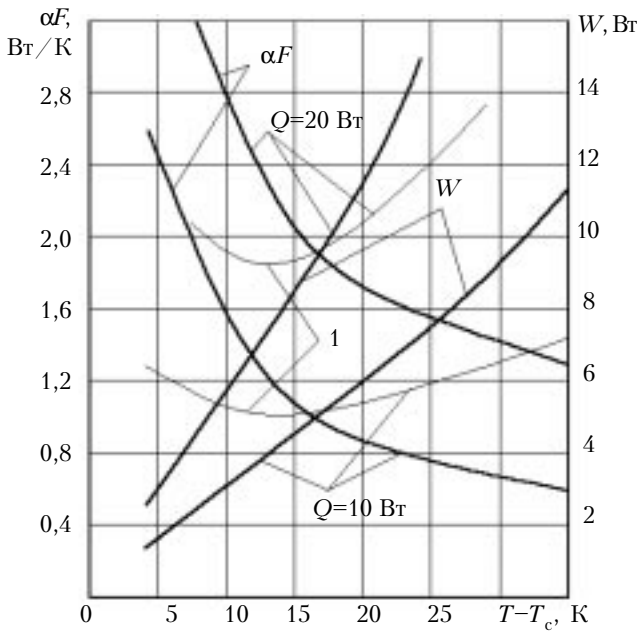


Рис. 5. Зависимость теплоотводящей способности радиатора (αF) и мощности потребления ТЭУ от перепада температур $T - T_c$:

1 — приемлемые значения характеристик устройства при равнозначности энергетических и массогабаритных характеристик

отводящим радиатором следует учитывать энергетические и массогабаритные характеристики всего устройства в целом. Погрешность расчетных значений характеристик устройства составляет 20—30%.

Исследования показали, что при условии равнозначности энергетических и массогабаритных характеристик предпочтителен вариант при $\Delta t_{\Sigma} = 15$ К. Для обеспечения эффективного отвода от объекта теплового потока 10 и 20 Вт при максимальной температуре окружающей среды 343 К необходимо использовать унифицированные модули типа М4,5-27 соответственно по 3 и 6 шт. в ТЭУ при мощности потребления 4,5 и 9 Вт и теплоотводящей способности радиатора 0,9 и 1,8 Вт/К.

Таким образом, проведенные исследования подтверждают, что применение технологии тепловых труб позволяет улучшить удельные энергетические и массогабаритные характеристики устройств охлаждения модулей источников вторичного электропитания. Введение термоэлектрических устройств при рассмотренных типичных условиях работы модулей ИВЭП также дает положительный эффект.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Гниличенко В. И., Смирнов Г. Ф., Ткаченко В. Б. Тепловые трубы в системах обеспечения тепловых режимов электронных средств // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 1999. — № 4. — С. 15—19.

Вайнер А. А., Мусеев В. Ф. Совмещенные приборы криотермоэлектрической электроники.— Одесса : Студия «Негоциант», 2000.— 100 с.

Разработаны основы теории и представлен современный подход к созданию высоконадежных и функционально более совершенных радио- и электронных твердотельных приборов, совмещенных с источником холода и, таким образом, уже не нуждающихся в дополнительном охлаждении.

Аналитически рассматривается метод совмещений как определяющий новое и прогрессивное направление твердотельной электроники.

В системе предложенной классификации исследованы и реализованы конструктивное, электрическое, гибридное и функциональное совмещения, а также совместная компоновка самих источников холода различных видов, раскрывающие своеобразие новых идей, с которыми криотермоэлектрическое приборостроение вступает в новый век.

Книга рассчитана на широкий круг специалистов и будет полезной также учащимся, студентам, аспирантам и научно-техническому персоналу смежных теплофизических специальностей.

Федасюк Д. Методы и средства теплового проектирования микронэлектронных устройств.— Львов : Изд. ГУ «Львівська політехніка», 1999.— 228 с. (На украинском языке.)

Рассматривается математическое и программное обеспечение для моделирования температурных полей МЭП различного конструктивно-технологического исполнения, основанное на аналитических, числовых и аналоговых методах решения физико-математических задач теплообмена.

