

Охлаждение блоков обработки сигналов и информации

Алексей Карих (Москва)

В блоке элементы и детали размещаются с высокой плотностью в ограниченном объёме, что неизбежно влечёт за собой большое выделение тепла, и отвод тепла становится основной задачей при проектировании блока. В статье рассматриваются методы охлаждения конструкций блоков обработки информации и сигналов.

Тепловой режим аппаратуры определяется совокупностью температур отдельных её точек, так называемым температурным полем. Если температура в любой точке блока не выходит за допустимые пределы, то такой тепловой режим является нормальным. В зависимости от стабильности во времени, тепловой режим может быть стационарным (неизменным во времени) и нестационарным. Стационарный режим имеет место при одиночных и кратковременно повторяющихся тепловых нагрузках. Перенос тепла от нагретых элементов происходит за счёт теплопроводности, конвекции и теплового излучения. Учесть и рассчитать одновременно все виды теплообмена невозможно, и на практике расчёт проводится, как правило, для одного наиболее эффективного вида теплообмена, другие во внимание не принимаются.

Выбор конструкции (размеры, элементы охлаждения, конструктивные элементы) блока определяется выделяемым объёмом в общем конструктиве, в который этот блок входит, и количеством теплоты, которое необходимо отвести, а также элементами теплоотвода.

Охлаждение блока может осуществляться несколькими способами:

- благодаря теплопроводности;
- воздушным охлаждением;
- жидкостным охлаждением;
- полупроводниковыми холодильниками на основе элементов Пельтье.

Эффективность основных систем охлаждения

Система охлаждения	Коэффициент теплоотдачи, Вт/(м ² °С)
Естественная, воздушная, излучением	2...10
Принудительная воздушная	10...150
Естественная жидкостная	200...600
Принудительная жидкостная	300...3000

Эффективность систем охлаждения характеризуется коэффициентом теплоотдачи, его значения для некоторых систем охлаждения приведены в таблице.

Так как тепловое излучение имеет небольшую величину и в процессе отвода тепла в блоке практически не участвует, этот вид охлаждения в данной статье рассматриваться не будет.

Теплопроводность – это перенос тепловой энергии структурными частицами вещества (молекулами, атомами, ионами) в процессе их теплового движения. Теплопроводность подчиняется закону Фурье, который утверждает, что количество тепла, проходящее через тело в единицу времени, прямо пропорционально площади поперечного сечения, потоку тепла и температурному градиенту вдоль потока.

При передаче тепла через плоскую стенку толщиной b количество тепла, передаваемого за единицу времени через участок стенки площадью S , равно:

$$Q = (\lambda/b)S(t_{ct1} - t_{ct2}) = S\Phi, \quad (1)$$

где: t_{ct1} , t_{ct2} – постоянные во времени температуры поверхностей стенок (t_{ct1} – блока, t_{ct2} – радиатора), °С; S – площадь, м²; λ – константа, характеризующая теплопроводность материала; Φ – тепловой поток, Вт.

Между контактирующими поверхностями существует тепловое сопротивление, равное:

$$R_c = b/(\lambda S) = R_r/S, \quad (2)$$

где R_r – контактное тепловое сопротивление, зависящее от сочетания материалов в тепловом контакте, удельной нагрузки и шероховатости поверхности контактной пары. Для удельной нагрузки 100 Н/см² и шероховатости $R_z = 20$ контактное тепловое сопротивление равно:

- для контакта сплав Д16–Д16: 0,25 см²/К Вт;
- для контакта сплав Д16–сталь: 1,2 см²/К Вт;
- для контакта металл–краска–металл: 20 см²/К Вт.

Тепловые сопротивления образуют последовательную цепь: сопротивление между элементами ячеек и клиновой группой, между клиновой группой и направляющей блока, между корпусом блока и радиатором (основанием), на котором он закреплён:

$$t_{ct1} - t_{ct2} = \sum_{i=1}^3 R_{ci} Q. \quad (3)$$

На основе приведённых уравнений составляется тепловая модель блока и вычисляется температура корпуса блока. После вычисления температуры корпуса блока выбирается тип конструктива и способ съёма тепла.

На рис. 1 представлен блок вычислительных средств мощностью 50 Вт. Охлаждение естественное, с помощью теплопроводности и конвекции. Съём тепла осуществляется за счёт массивного основания, к которому прикреплен блок, и потока приточного воздуха, омывающего блок с четырёх сторон. Для лучшего съёма тепла теплопроводностью следует применить меры для исключения воздушных зазоров в местах тепловых контактов: уменьшить шероховатость, увеличить площадь контакта и давление соприкосновения.

Воздушное конвекционное охлаждение может быть естественным и принудительным, т.е. с использованием элементов обдува. Из всех видов охлаждения оно наиболее простое, легко реализуемое и высокоэффективное.

Передача теплоты с помощью конвекции подчиняется закону Ньютона–Рихмана:

$$P_{\text{кв}} = \alpha S \Delta T, \quad (4)$$

где: $P_{\text{кв}}$ – мощность теплового потока, Вт; α – коэффициент теплоотдачи конвекцией от блока к окружающей среде; S – площадь поверхности теплоотдачи, ΔT – перегрев поверхности относительно окружающей среды.

Естественное воздушное охлаждение основано на разной плотности холодного и тёплого воздуха. Перемещаясь вверх, тёплый воздух замещает холодный, осуществляя теплообмен. Эффективность естественного охлаждения тем больше, чем больше разность температур между корпусом и окружающей средой и чем больше площадь поверхности корпуса и объём замещаемого воздуха. Также имеет значение плотность воздуха окружающей среды, при уменьшении которой отвод теплоты от поверхности блока уменьшается.

Количество теплоты, удаляемой от поверхности S естественной конвекцией:

$$Q = 4,187 \times 10^4 b_c S \Delta T, \quad (5)$$

где: S – площадь поверхности; ΔT – перегрев; b_c – коэффициент конвективной теплоотдачи, определяемый как:

$$b_c = 0,52 C_{\text{п}} (55 \Delta T / L)^{0,25}, \quad (6)$$

где: $C_{\text{п}}$ – постоянная, зависящая от ориентации поверхности, L – длина пути теплового потока. Для вертикальной плоскости $C_{\text{п}} = 0,56$; для верхней горизонтальной плоскости $C_{\text{п}} = 0,52$; для нижней горизонтальной плоскости $C_{\text{п}} = 0,26$.

Если рассматривать блок, то эффективность охлаждения зависит от места расположения блока в общем конструктиве. Необходимо обеспечить естественный приток воздуха со всех сторон блока. Расстояние от стенок блока до соседних устройств, входящих в конструктив, должно быть не менее 10 мм. Для увеличения площади поверхности применяют ребрение –

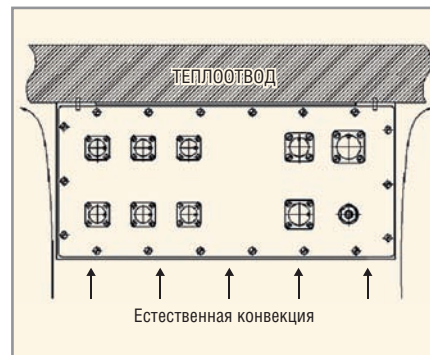


Рис. 1. Блок вычислительных средств

радиатор. При проектировании общего конструктива необходимо избегать образования «ловушек тепла», в которых отсутствуют конвективные потоки воздуха; ими являются полости и углы.

Метод теплового расчёта при конвекционном охлаждении достаточно подробно описан в [8], где при помощи графиков можно произвести расчёт. Для этого необходимо знать объём блока, рассеиваемую мощность, условия эксплуатации. На практике блок в нормальных климатических условиях при естественном охлаждении может создавать тепло-

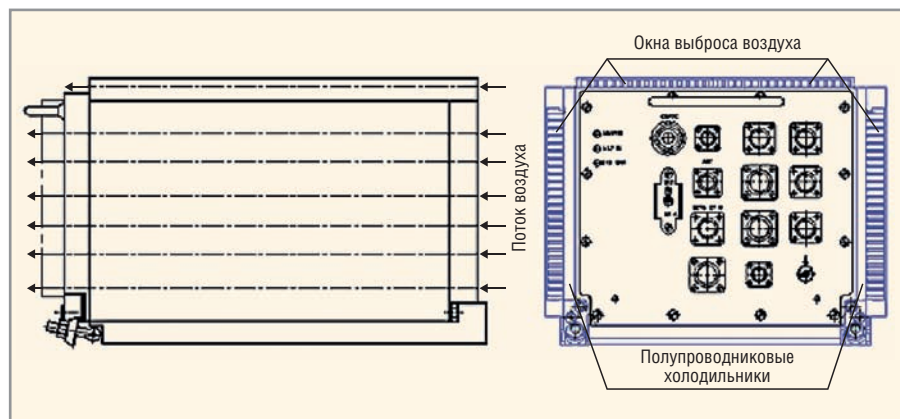


Рис. 2. Блок обработки сигналов

вой поток $0,25 \text{ Вт/м}^2$ от охлаждаемой поверхности при допустимом перегреве поверхности корпуса 30°C . Чтобы не увеличивать габариты блока, но повысить эффективность теплоотвода, применяют принудительную конвекцию.

При внешнем принудительном охлаждении движение потока воздуха осуществляется вентилятором. Вентилятор создаёт воздушный поток, который преодолевает сопротивление среды, проходит через рёбра блока и охлаждает их.

Тепловой расчёт для принудительного охлаждения менее точен, чем для других способов охлаждения, так как невозможно рассчитать скорость воздуха в каждой точке теплового потока. На практике пользуются эмпирическими данными, полученными для элементов правильной геометрической формы.

Количество тепла, отводимого при обдуве:

$$Q = CW\Delta T, \quad (7)$$

где: C – удельная теплоёмкость воздуха (при нормальных условиях $0,24 \text{ ккал/кг}^\circ\text{C}$); W – количество воздуха, кг; ΔT – температура перегрева, $^\circ\text{C}$.

Мощность, рассеиваемая в блоке в виде тепла, принимается равной потребляемой электрической мощности. При полном переходе электрической энергии в тепловую справедливо соотношение $1 \text{ кВт ч} = 860 \text{ ккал}$.

Расход воздуха, необходимый для отвода заданной мощности, $\text{м}^3/\text{час}$:

$$V_p = 860kP/C_p\Delta T, \quad (8)$$

где: P – мощность, выделяемая в блоке, кВт; k – коэффициент, учитывающий утечку охлажденного воздуха через неплотности в конструкции подвода

воздуха (обычно $1,25$); ρ – плотность воздуха (при 0°C и нормальном атмосферном давлении $\rho = 1,293 \text{ кг/м}^3$). Для ориентировочного расчёта можно считать, что при перегреве $\Delta T = 10^\circ\text{C}$ для отвода 1 кВт тепла необходимо 400 м^3 воздуха в час.

В зависимости от полученного значения V_p выбирается тип вентилятора, а от конструкции зависит сопротивление воздушному потоку и статическое давление. Статическим давлением называется разница между давлением воздушного потока, формируемого вентилятором, и атмосферным давлением; оно измеряется в мм водяного столба и зависит от производительности вентилятора.

Сегодня серийно производятся вентиляторы самой разной производительности и разных габаритов. Следует помнить, что производительность указывается при нулевом статическом давлении, а реальная работа происходит при давлении, отличном от нуля. Так как поток воздуха от вентилятора встречает на своём пути препятствия (углы, стенки и т.д.), возникает сопротивление движению воздуха, уменьшается воздушный поток и растёт статическое давление. Поэтому необходимо заложить запас по производительности на $20...30\%$ больше расчётного.

Статическое давление, создаваемое воздушным потоком, уровень шума и потребляемая электрическая мощность вентилятора зависят от таких характеристик, как скорость вращения и диаметр вентилятора. При увеличении производительности вентилятора на 10% за счёт увеличения скорости его вращения статическое давление увеличивается на 20% .

Если нельзя подобрать вентилятор по производительности и заданному статическому давлению или его габариты

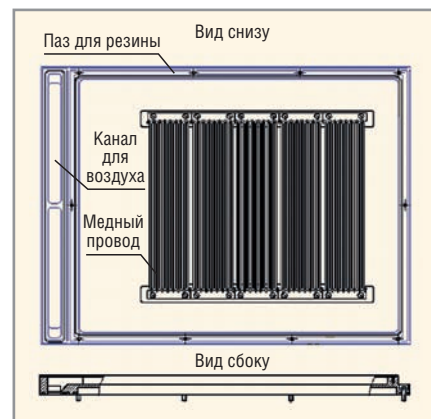


Рис. 3. Верхняя крышка блока

риты оказываются слишком большими, применяют каскадирование. Параллельная работа двух вентиляторов позволяет получить удвоенный воздушный поток при неизменном статическом давлении, а последовательная установка позволяет удвоить статическое давление при неизменном воздушном потоке.

Принудительное охлаждение достигается или откачкой нагретого воздуха из корпуса вентилятором на выпускной стороне, или нагнетанием холодного воздуха вентилятором на входной стороне. Наиболее эффективно применить нагнетающий вентилятор, который образует направленный воздушный поток, обдувая внешние стенки блока.

Чтобы избежать попадания в рёбра и пазы пыли, охлаждающий воздух фильтруют. Материалом фильтров является резиновая крошка, минеральная вата, стекловолокно, фильтрованная ткань или капрон. К фильтрам должен обеспечиваться лёгкий доступ для периодической их замены и чистки.

На рис. 2 представлен блок обработки сигналов мощностью 100 Вт . Блок закрытый, пылебрызгозащищённый, внутри замещения теплого воздуха холодным не происходит, внутренняя конвекция отсутствует. Охлаждение за счёт естественного охлаждения не существенно. Основное охлаждение блока – внешнее принудительное воздушное охлаждение вентилятором производительностью $280 \text{ м}^3/\text{ч}$ и при помощи термоэлектрического холодильника. Тепло от нагретых составных элементов (ячеек) передаётся при помощи клиновой группы на корпус блока за счёт теплопроводности. Для увеличения площади съёма тепла ячеек в верхней крышке блока закреплён медный жгут (рис. 3), который прижимается к верхней планке ячеек (рис. 2).

Такой дополнительный способ съёма тепла увеличивает теплоотдачу на 5...8%.

Воздух, поступающий от системы обдува в приточные отверстия с правой и с левой сторон блока, нагревается и выбрасывается наружу. Подобный блок, только без полупроводниковых холодильников, был испытан на мощность 230 Вт. При том же воздушном потоке вентиляторов перегрев составлял 25°C.

В блоке обработки (рис. 4) кроме естественного охлаждения применена система внутреннего принудительного воздушного охлаждения двумя вентиляторами производительностью 100 м³/ч. Ячейки располагаются вертикально, чтобы воздушному потоку ничего не препятствовало и теплые слои воздуха заменялись холодными. Минимальное расстояние между ячейками должно быть 6...10 мм. Воздух в замкнутом объёме циркулирует с постоянной скоростью и при прохождении через рёбра отдаёт тепло стенкам блока. Экспериментально установлено, что при перегреве 15°C больше чем 90 Вт мощности снять с блока нельзя.

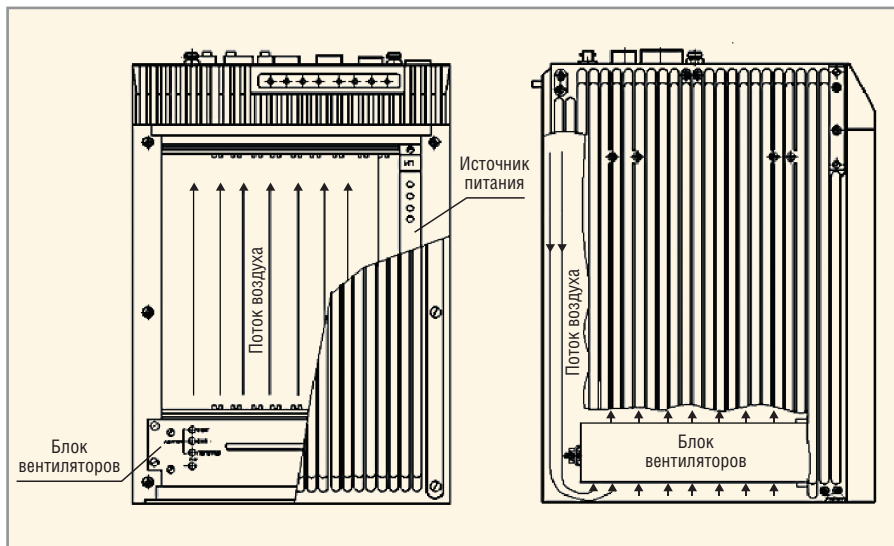


Рис. 4. Блок обработки и сопряжения

Жидкостное охлаждение может быть естественным и принудительным. Этот способ охлаждения самый эффективный. Незамерзающая жидкость (антифриз, тосол) прокачивается через радиаторы охлаждаемого блока, в которых она нагревается. После этого нагретая жидкость поступает в теплообменник, в котором обменивается теплом с окружающим пространством

и охлаждается. Для эффективного теплообмена с окружающим пространством, в теплообменниках, как правило, используются вентиляторы. Для циркуляции жидкости по контуру используется специальный насос – помпа.

Этот тип охлаждения применяют, когда другие виды охлаждения становятся малоэффективными и поверх-

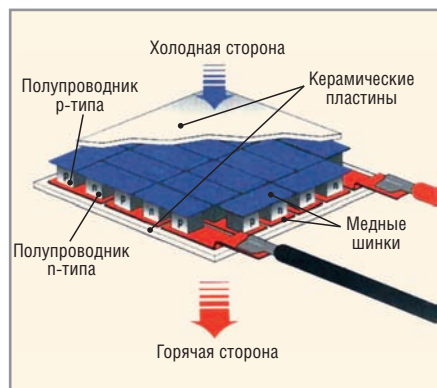


Рис. 5. Термоэлектрический элемент

ность блока нагревается до температуры свыше 100°C. Такая температура в блоках обработки бывает очень редко. Этот тип охлаждения сложен в построении, требует серьёзного обслуживания, применим для изделий узкого назначения и здесь рассматриваться не будет.

Полупроводниковые термоэлектрические модули Пельтье, применяемые в составе средств охлаждения электронных элементов и систем, становятся сейчас перспективными из-за уменьшающейся стоимости. Они применяются, когда использование других систем охлаждения по каким-либо причинам нецелесообразно. Они не имеют движущихся частей и характеризуются сравнительно высокой надёжностью (ресурс около 1 млн. ч), в отличие от традиционных холодильников. При прохождении постоянного электрического тока через контакт двух различных полупроводников возникает разность температур между его сторонами, вследствие чего одна пластина охлаждается, а другая нагревается (рис. 5).

Здесь надо учесть, что отводить придётся не только «перекачиваемое» тепло, но и добавляемое (примерно 50%) самим модулем. Если поддерживать температуру горячей стороны модуля на уровне температуры окружающей среды, то на холодной стороне можно получить температуру, которая будет на десятки градусов ниже.

Эффективность охлаждения модуля зависит от разности температур между холодной и горячей сторонами элемента ΔT и коэффициентом полезного действия:

$$K_{эфф} = (Q_{ис}/Q_{ип}) \times 100\%, \quad (9)$$

где: $Q_{ис}$ – выделяемая мощность, Вт; $Q_{ип}$ – мощность, подводимая источником питания, Вт.

Основной параметр модуля – холодопроизводительность. Это безразмерная величина больше единицы, характеризующая энергетическую эффективность работы холодильного модуля. Она равна отношению холодопроизводительности к количеству энергии (работе), затраченной в единицу времени на осуществление холодильного цикла:

$$\frac{Q_c}{n} = EIT_c - \frac{I^2 R}{2} - K(T_b - T_c), \quad (10)$$

где: n – количество модулей; R – электрическое сопротивление модуля, Ом; K – теплопроводность, Вт/м К; E – коэффициент Зеебека; I – электрический ток, А.

Модуль является обратимым, т.е. при смене полярности постоянного тока горячая и холодная пластины меняются местами. Степень охлаждения пропорциональна величине тока, проходящего через модуль, что позволяет при необходимости плавно регулировать температуру охлаждаемого объекта, причём с высокой точностью.

Накладываются определённые требования к источнику питания модуля. Пульсации постоянного тока не должны превышать 5%. При увеличении пульсаций ухудшаются параметры модуля. Постоянный ток может быть создан как источником тока, так и источником напряжения. Подаваемое на модуль напряжение должно выбираться исходя из максимального напряжения модуля U_{max} и выбранного режима работы – максимальной холодильной мощности или максимального холодильного коэффициента. Максимальный ток источника должен выбираться исходя из величины напряжения и сопротивления модуля. При понижении напряжения питания экономичность будет расти, холодильная мощность будет уменьшаться, но линейно, что очень удобно для организации плавного регулирования температуры.

Наиболее распространённые типы модулей – это стандартные однокаскадные модули максимальной мощностью до 65 Вт (12 В) и 172 Вт (24 В). Для увеличения эффективности своей работы они допускают каскадное использование, что позволяет довести температуру корпуса блока до отрицательных значений даже при

их значительной мощности рассеяния. Но низкие температуры, возникающие в процессе работы модулей, способствуют конденсации влаги из воздуха. Это представляет опасность для электронных компонентов, так как конденсат может вызвать короткое замыкание между элементами и коррозию блока. Для исключения данной опасности целесообразно использовать модули оптимальной мощности. Возникновение конденсации зависит от: температуры окружающей среды (в данном случае температура воздуха внутри блока), температуры охлаждаемого блока и влажности воздуха. Чем выше температура воздуха внутри блока и чем больше влажность, тем вероятнее произойдёт конденсация влаги.

Однако кроме очевидных преимуществ, модули обладают и рядом специфических свойств и характеристик, которые необходимо учитывать при их использовании в составе охлаждающих средств:

- модули отличаются относительно низким холодильным коэффициентом и коэффициентом полезного действия (КПД). Выполняя функции теплового насоса, они сами становятся мощными источниками тепла. Использование модулей в составе блока вызывает значительный рост температуры внутри конструктива, где установлен этот блок. Это означает, что потребуются дополнительные средства для снижения температуры, в частности, увеличение площади радиаторов и производительности вентиляторов, способных эффективно отводить избыточное тепло от охлаждающих модулей;
- модули требуют мощного источника питания постоянного тока;
- в случае выхода их из строя модули изолируют охлаждаемый блок от радиатора. Это приводит к очень быстрому нарушению теплового режима блока и скорому выходу из строя составных элементов (ячеек) от перегрева;
- большая масса по отношению к единице мощности, составляющая 15...90 г/Вт. Для примера: жидкостная система имеет 9...11 г/Вт;
- низкая механическая прочность.

Таким образом, применение полупроводниковых модулей должно быть оправдано как с технической, так и с экономической точки зрения.

Модули применяют в блоках, где ограничен объём, а мощность рассеивания более 100...150 Вт и затруднено воздушное и кондуктивное охлаждение.

Электрические процессы, происходящие в модулях, характеризуются тесной связью тепловых и электрических явлений, наличием множества нелинейных параметров, влияющих на работу блока. Поэтому в начале разработки системы охлаждения на модулях целесообразно уделить основное внимание требованиям к показателям модуля: термоэлектрическим характеристикам, холодопроизводительности. После выбора типа модулей необходимо провести поверочный расчёт. Целью расчёта является нахождение окончательных показателей системы охлаждения, а также выяснение влияния элементов конструкции модуля на характеристики блока. Такая последовательность проектирования является общей, и она нашла своё отражение как в литературе [1, 2], так и в структурах программ, реализующих методы расчёта модулей.

Блок, представленный на рис. 2, как описывалось ранее, имеет дополнительное охлаждение внутренних стенок, которое осуществляется за счёт встроенных в рёбра полупроводниковых холодильников. Модули питаются напряжением 27 В и потребляют 250 Вт. Экспериментально provedено, что такой холодильник снимает 10...15°C.

В результате можно сделать следующие выводы: если мощность блока до 60 Вт, то можно использовать естественное охлаждение (теплопроводностью или конвекцией), свыше 60 Вт – можно использовать систему принудительного воздушного охлаждения. Эти условия верны, если блок эксплуатируется в нормальных климатических условиях и перегрев не меньше 15°C. Если внешняя рабочая температура свыше 40°C и перегрев менее 10°C, то от естественного охлаждения переходят к принудительному воздушному охлаждению, причём могут возникнуть дополнительные требования к скорости и температуре подаваемого воздушного потока.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Анатычук Л.И.* Термоэлементы и термоэлектрические устройства. Справочник. К: Наукова думка, 1979.
2. *Варламова Р.Г.* Справочник конструктора РЭА. М: Советское радио, 1980.
3. *Вихарев Л.* Вентиляторы для радиоэлектронной аппаратуры. Современная электроника. 2006. № 5.
4. *Гончаров А., Негреба О.* Рекомендации по выбору теплового режима модулей питания. Компоненты и технологии. 2007. № 8.
5. *Дульнев Г.Н.* Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре. М: Высшая школа, 1984.
6. *Ненашев А.П.* Конструирование радиоэлектронных средств. М: Высшая школа, 1990.
7. Патент на полезную модель № 79645. Электронный блок с кондуктивным отводом тепла.
8. *Преснухин Л.Н., Шахнов В.А.* Конструирование электронных вычислительных машин и систем. М: Высшая школа, 1986.
9. *Карих А.* Конструирование блоков обработки сигналов и информации. Современная электроника. 2012. №1. ©