МИНИСТЕРСТВО ТОПЛИВА И ЭНЕРГЕТИКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФИРМА ПО НАЛАДКЕ, СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ ТЕХНОЛОГИИ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ И СЕТЕЙ ОРГРЭС

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫБОРУ СПОСОБА ОПТИМАЛЬНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ БЩУ

СПО
ОРГРЭС
МОСКВА 1993

gost.e-ecolog.ru

МИНИСТЕРСТВО ТОПЛИВА И ЭНЕРГЕТИКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФИРМА ПО НАЛАДКЕ, СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ ТЕХНОЛОГИИ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ И СЕТЕЙ ОРГРЭС

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫБОРУ СПОСОБА ОПТИМАЛЬНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ БЩУ

СЛУЖБА ПЕРЕДОВОГО ОПЫТА ОРГРЭС

Москва 1993

Р А З Р А Б О Т А Н О предприятием "Уралтехэнерго" фирмы по наладке, совершенствованию технологии и эксплуатации электростанций и сетей ОРГРЭС

И С П О Л Н И Т Е Л И З.С.БАГАУТДИНОВ, А.Л.СИДОРКИН

У Т В Е Р Ж Д Е Н О фирмой ОРГРЭС II.II.9I г.
Главный инженер К.В.ШАХСУВАРОВ

© СПО ОРГРЭС, 1993

Подписано к печати 09.02.93 Формат 60x84 I/I6
Печать офсетная Усл.печ.л.1,63 Уч.-изд.л. 1,5 Тираж 950 экз.
Заказ №22/93 Издат. № 92098

Производственная служба передового опыта эксплуатации энергопредприятий ОРГРЭС
I05023, Москва, Семеновский пер., д.I5

Участок оперативной полиграфии СПО ОРГРЭС
I09432, Москва, 2-й Кожуховский проезд, д.29, строение 6

УДК 62-52-59-75-78

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫБОРУ СПОСОБА ОПТИМАЛЬНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ БЩУ

Рекомендации распространяются на работы, связанные с проектированием систем обеспечения теплового режима электронного оборудования (ЭО) АСУ ТП и помещений БЩУ вновь строящихся и реконструируемых энергоблоков электрических станций.

Рекомендации отражают основные этапы выбора способа оптимального охлаждения оборудования и помещений БЩУ с последующей разработкой схемных решений для отдельных шкафов (стоек), группы шкафов и помещений в целом.

Рекомендации разработаны для применения на электростанциях Минтопэнерго РФ, могут быть также использованы разработчиками и на заводах-изготовителях электронного оборудования.

I. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

I.I. В процессе работы элементы ЭО подвергаются внешним и внутренним тепловым воздействиям. Внешние тепловые воздействия вызваны изменениями температуры окружающей среды и тепловым потоком, поступающим к границе элемента от соседних элементов, внутренние - его собственным тепловыделением. Под влиянием этих тепловых воздействий происходит изменение теплового режима элемента, что проявляется в изменении его характеристик и параметров.

В свою очередь изменение функциональных параметров устройств в системе АСУ ТП ТЭС повышает вероятность искажения входной и выходной информации и неверных ответных действий АСУ и персонала с последующим возможным возникновением аварийной ситуации.

Исходя из требований надежности электронной аппаратуры АСУ, соответствующей надежности основного оборудования ТЭС, при проектировании аппаратуры задают допустимые параметры термочувствительных элементов и допустимые перепады температур, которые безусловно должны быть обеспечены во всех режимах эксплуатации.

I.2. При расчетах тепловых режимов, выборе схемных и конструктивных решений системы охлаждения (СО) выделяют, как принято при конструировании и компоновке электронной аппаратуры, следующие иерархические уровни (в порядке их возрастания):

первый уровень - микросхемы, микросборки, дискретные электрорадиоэлементы, являющиеся элементной базой микроэлектронной аппаратуры (МЭА);

второй уровень - функциональные ячейки, обычно представляющие собой печатные платы, на которых компонуются элементы первого уровня;

третий уровень - блоки, объединяющие в одной несущей конструкции пакет функциональных ячеек;

четвертый уровень - многоблочные конструкции, в которых блоки компонуются в общем несущем основании (например, шкафы, стойки, пульты, стеллажи, монтажные рамы);

пятый уровень - аппаратные помещения с размещенными в них радиотехническими комплексами.

При проектировании вопросы теплового режима должны рассматриваться на всех уровнях компоновки - от функциональных узлов до многоблочных конструкций (шкафов) и помещений. Выбор СО каждого уровня должен проводиться с учетом возможности отвода теплоты и наличия фоновых перегревов на более высоком иерархическом уровне. Поэтому, в принципе тепловое проектирование ведется с верхних уровней, в этих случаях при переходе на более низкий уровень для рассматриваемого модуля имеется достоверная информация о тепловых воздействиях со стороны других модулей.

Как правило, при проектировании и изготовлении ЭО, в том числе скомплектованного из различных устройств, эти моменты учтены. В этом случае завод-изготовитель в сопроводительной документации на поставляемую продукцию должен указать, на какую СО рассчитано оборудование и какие тепловые режимы должны быть обеспечены для нормального функционирования ЭО. Эти сведения совместно с другими исходными данными являются базой для обоснования способа охлаждения отдельных шкафов групп шкафов и помещения в целом.

При отсутствии данных завода-изготовителя о тепловом режиме аппаратуры данного уровня компоновки приходится определять условия

ее охлаждения на основании анализа допустимых тепловых параметров устройств предыдущего уровня компоновки, входящих в состав данной аппаратуры (приложения I, 2, 3).

Выбор принципиальной схемы, вида и конструктивных параметров СО можно рассматривать только применительно к приборам (оборудованию) конкретных видов.

I.3. Разработка СО основана на анализе основных тепловых параметров устройств, обслуживаемых данной системой. При этом параметры прибора сопоставляются с параметрами окружающей среды (см. приложение I).

Основные тепловые параметры прибора:

рассеиваемая мощность $Q_п$;

поверхностная (объемная) плотность теплового потока

$$q_п = Q_п / S_п \quad (q_{пv} = Q_п / V_п);$$

абсолютные значения и интервал изменения допустимых для элементов устройства температур $\Delta T_{доп} = T_{доп\ макс} - T_{доп\ мин}$.

Основные параметры окружающей среды:

абсолютные значения и пределы изменения температуры $\Delta T_с = T_{с\ макс} - T_{с\ мин}$; давления $\Delta p_с = p_{с\ макс} - p_{с\ мин}$; скорости движения $\Delta W_с = W_{с\ макс} - W_{с\ мин}$; влажности $\Delta \varphi_с = \varphi_{с\ макс} - \varphi_{с\ мин}$; вещество среды, запыленность и пр.

Определяющую роль играет температура.

I.4. Система охлаждения должна обеспечить отвод количества тепла $Q_п$ при сохранении допустимого уровня температур элементов устройства, обслуживаемых данной СО, пределах $\Delta T_{доп}$ и изменении температуры окружающей среды в пределах $\Delta T_с$, которые обычно бывают заданы.

Для естественного воздушного охлаждения в качестве температуры окружающей среды принимается максимальное ее значение, для при-

нудительного воздушного охлаждения - температура воздуха на входе в аппарат.

Для полупроводниковой МЭА принудительное охлаждение наиболее часто применяется при $Q_{\Pi} = 20 \div 100$ Вт и более, скорость набегающего потока рекомендуется до 4 м/с.

Анализ термических свойств и условий работы элементов, формирующих устройства, приборы, подсистемы и прочие АСУ ТП, показывает, что поддержание требуемых тепловых режимов всех элементов может быть достигнуто только путем отвода избыточного тепла. Требуемый тепловой режим оборудования АСУ ТП БЩУ может быть организован путем воздушного естественного или принудительного охлаждения.

Характерные способы организации воздушного охлаждения ЭО помещений БЩУ, смонтированного в шкафах, показаны на рис.I.

Рассмотрение различных вариантов схем СО удобнее сначала вести по частям (внутренняя, внешняя, транспортная), а затем провести их анализ и увязку. После предварительного анализа теплового режима шкафов и помещения намечают несколько вариантов схем внешней части СО и устанавливают основные критерии, по которым производится выбор наиболее выгодной для данных условий схемы.

I.5. В Рекомендациях приведен порядок расчета и обоснование оптимальной схемы охлаждения ЭО и занимаемого им помещения.

В том случае, когда тепловой режим ЭО 4-го уровня компоновки заводом-изготовителем или проектной организацией не задан, в приложениях 2 и 3 дан подход и порядок расчета теплового режима устройств 2-4-го уровня компоновки.

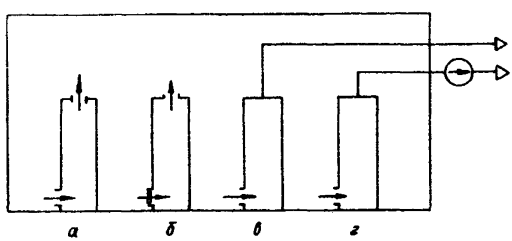

Рис.I. Способы воздушного охлаждения шкафов с электронным оборудованием:

а - естественное с поступлением тепла в помещение; *б* - принудительное с поступлением тепла в помещение; *в* - естественное с отводом тепла из помещения; *г* - принудительное с отводом тепла из помещения

Рекомендации имеют целью подготовить базу для последующих стадий проектирования (расчет и разработка конструктивных элементов СО ЭО, выбор оборудования и т.д.), не касаясь и не меняя их содержания и полноты.

2. СБОР ИСХОДНЫХ ДАННЫХ

2.1. Характеристика помещений БЩУ

2.1.1. Для вновь строящихся энергоблоков характеристика помещений определяется и задается на основании потребностей различных частей проекта, в том числе с учетом обеспечения требуемого теплового режима оборудования АСУ ТП, определенного с использованием настоящих Рекомендаций.

2.1.2. При реконструкции действующих энергоблоков минимально необходимыми являются следующие данные:

функциональное назначение помещений;

планы по отметкам, габаритные размеры, взаимное расположение помещений относительно друг друга; наличие перегородок, дверных, оконных и иных проемов;

теплофизические свойства стеновых ограждений и перекрытий;

характеристика и размещение оборудования систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха;

абсолютные значения допустимых температур внутри помещений и пределы их изменений.

2.2. Характеристика оборудования АСУ ТП

2.2.1. Для расчета теплового режима соответствующего уровня компоновки необходимы следующие данные:

функциональное назначение оборудования данного уровня компоновки, состав, количество, тип исполнения, габаритные размеры;

тепловыделения, допустимые пределы изменения температуры и окружающего воздуха для устройств данного уровня компоновки.

При отсутствии этих данных необходимо собрать дополнительные сведения:

тепловыделения устройств предыдущего уровня компоновки, допустимые пределы изменения температур поверхности устройств и окружающего воздуха;

габаритные размеры и конструктивное исполнение устройств предыдущего уровня компоновки, их взаимное расположение.

2.3. Критерии сопоставления и обоснования выбора способа и схемы охлаждения

2.3.1. Требуемый тепловой режим ЭО может быть достигнут различными методами и соответствующими им средствами, однако, в зависимости от конкретных требований и условий следует выбрать наиболее оптимальный метод. Для объективной оценки и сопоставления различных вариантов СО необходимо заранее определить ряд основных критериев или показателей, и согласовать их с Заказчиком.

Критерии могут определяться из технических, технологических, энергетических, экономических, экологических, санитарных, эстетических, или иных соображений. Критериев не должно быть очень много (не более 2-3), т.к. одновременное их выполнение, как правило, невозможно.

2.3.2. Некоторые из критериев:

степень влияния тепловыделений ЭО на температуру помещения;

энергозатраты на отвод теплоизбытков (кВт/кВт);

затраты на проектирование, изготовление, монтаж (реализацию) и наладку;

продолжительность межремонтных периодов;

затраты на ремонт и эксплуатацию системы охлаждения;

быстрота обеспечения доступа к функциональным блокам объекта охлаждения для ремонта и замены;

уровень шума от работы СО в помещении;

вес и габаритные размеры оборудования и элементов СО;

удобство эксплуатации;

наличие обслуживающего персонала достаточной квалификации;

наличие необходимых оборудования и материалов для реализации;

влияние температуры наружного воздуха на тепловой режим ЭО;

степень утилизации отводимого тепла и др.

2.3.3. Схемные решения, рассмотренные в данных Рекомендациях, предложены из соображений минимального влияния на температуру помещения и затрат на реализацию и эксплуатацию системы воздушного охлаждения АСУ ТП ВШУ.

3. ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ ПОМЕЩЕНИЙ БШУ

3.1. Оценка теплового режима помещения проводится с целью сопоставления и объективного обоснования выбора того или иного варианта охлаждения шкафов с учетом условий теплообмена на их поверхностях по средней температуре в помещении при заданных исходных параметрах.

В приведенном расчете, основанном на материально-тепловом балансе воздушной среды помещения, включены статьи и параметры, связанные только с системой охлаждения электронного оборудования, поэтому, при наличии иных составляющих тепломассообмена (например, тепла от системы теплоснабжения), их следует учесть при составлении балансовых уравнений.

Из-за незначительности теплопотерь через стеновые ограждения и перекрытия помещения они опущены для упрощения расчетов.

3.2. Балансовые уравнения помещения:

по теплу $$G_0 c_p T_0 + \sum_{i=1}^{m} Q_i + \sum_{j=1}^{n} Q_{rnj} + \sum_{j=1}^{n} Q_{nj} = \sum_{j=1}^{n} G_j T_{cp} c_p + G_2 T_2 c_p ;$$

по воздуху $$G_0 = \sum_{j=1}^{n} G_j + G_2 ,$$

при этом средняя температура в помещении определяется как

$$T_{cp} = \frac{T_0 + T_2}{2} ,$$

где m - количество шкафов с поступлением тепла непосредственно в помещение;

n - количество шкафов с отводом тепла минуя среду помещения;

G_0, T_0 - соответственно количество и температура воздуха, подводимого в помещение;

Q_i - общая тепловая энергия, выделяемая шкафом;

Q_{rnj} - теплообмен конвекцией с поверхности шкафа;

Q_{nj} - теплообмен излучением с поверхности шкафа;

G_j - расход воздуха, отводимого от шкафа за пределы помещения;

G_2, T_2 - соответственно количество и температура воздуха, отводимого из объема помещения.

Для определения T_{cp} из балансовых уравнений определяется температура T_2

$$T_2 = T_0 + \frac{\sum_{i=1}^{m} G_i + \sum_{i=1}^{n} Q_{rnj} + \sum_{j=1}^{n} Q_{nj}}{c_p\left(G_0 - 0{,}5\sum_{j=1}^{n} G_j\right)} .$$

3.3. Отдельные составляющие и величины для нахождения T_{cp} оцениваются следующим образом:

3.3.1. G_0 и T_0 считаются известными.

3.3.2. Значение Q задается заводом-изготовителем (проектной организацией) или определяется путем расчета теплового режима шкафа по приложению 3 и оценивается как сумма электрических мощностей устройств, размещенных в данном шкафу.

3.3.3. Значение определяется по формуле

$$Q_{rnj} = \alpha_j F_j (T_{nj} - T_{cp}),$$

где α_j - коэффициент теплообмена для неподвижной среды на вертикальной или горизонтальной поверхности;

F_j - площадь поверхности теплообмена;

T_{nj} - средняя температура поверхности шкафа.

T_{nj} оценивается по результатам расчета теплового режима шкафа с учетом термического сопротивления его стенки, F_j - из габаритных размеров шкафа, α_j для вертикальной стенки - из уравнения

$$\alpha = Nu\,\lambda/\ell,$$

здесь $Nu = 0{,}45$ при $(GrPr) \leq 10^{-3}$;
$Nu = 1{,}18\,(GrPr)^{0{,}125}$ при $10^{-3} < (GrPr) < 10^{2}$;
$Nu = 0{,}54\,(GrPr)^{0{,}25}$ при $10^{2} < (GrPr) < 2\cdot10^{7}$;
$Nu = 0{,}135\,(GrPr)^{0{,}33}$ при $2\cdot10^{7} < (GrPr)$.

При горизонтальном расположении теплоотдающей поверхности значение коэффициента теплоотдачи должно быть увеличено на 30%.

Значение температуры T_{cp} принимается в приближении и уточняется при повторных вычислениях.

3.3.4. Поступление тепла излучением оценивается с поверхностей шкафов, обращенных в сторону стен и потолка помещения, считая, что теплообмен между соседними шкафами отсутствует.

$$Q_{nj} = 5{,}67\,\varepsilon_{np}\left[\left(\frac{T_{nj}}{100}\right)^{4} - \left(\frac{T_{ст}}{100}\right)^{4}\right]F_j\ ,$$

где ε_{np} - приведенная степень черноты поверхностей лучистого теплообмена, в первом приближении принимается равной 0,85;

$T_{ст}$ - средняя температура поверхности стен и потолка помещения, в первом приближении принимаемая равной T_{cp}.

Конвективная и лучистая составляющие теплопоступлений оцениваются только для шкафов с отводом охлаждающего воздуха за пределы помещения, поскольку для шкафов с поступлением тепла в помещение эти составляющие уже входят в Q_i .

3.3.5. Количество охлаждающего воздуха G_j на шкаф с "отводимым" теплом может быть определено на основании расчетов теплового режима шкафа по приложению 3.

3.4. Сравнивая значения средних температур $T_{ср}$ различных вариантов схем охлаждения электронного оборудования в данном помещении, выбирают наиболее приемлемую, отвечающую поставленным критериям (см.п.2.3).

При этом следует учитывать, что $T_{ср}$ является исходной температурой охлаждающего воздуха, поступающего во все шкафы данного помещения. Поэтому $T_{ср}$ должна соответствовать расчетным, которые используются при оценке теплового режима электронного оборудования второго-четвертого уровней.

4. РЕКОМЕНДУЕМАЯ СХЕМА ОХЛАЖДЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ БШУ

4.I. При стабильных во времени тепловыделениях стационарный тепловой режим электронного оборудования и помещения в целом целесообразно организовать путем поддержания постоянства температуры T_0 подаваемого в помещение воздуха. Схема, реализующая такой подход, представлена на рис.2.

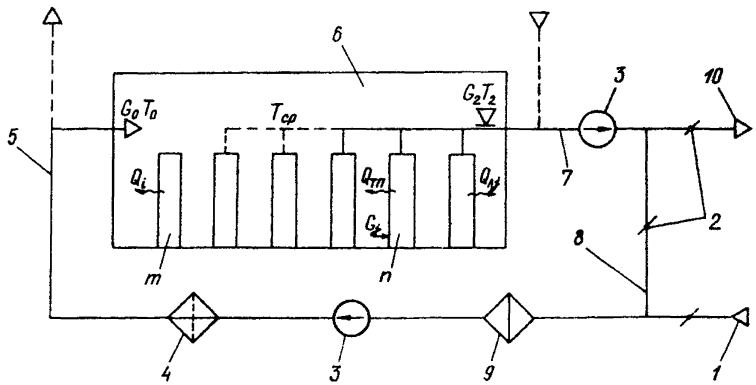

Рис.2. Рекомендуемая схема охлаждения электронного оборудования БШУ:
I - забор наружного воздуха; 2 - регулирующий клапан; 3 - вентилятор; 4 - теплообменник; 5 - напорный воздуховод; 6 - помещение; 7 - вытяжной воздуховод; 8 - рециркуляционный воздуховод; 9 - фильтр; I0 - сброс нагретого воздуха;
m - шкафы без отвода нагретого воздуха; *n* - шкафы с отводом нагретого воздуха

4.2. Стабилизация температуры подаваемого воздуха осуществляется за счет его тепловой обработки (подогрев или охлаждение) и изменения соотношения отбора наружного и рециркуляционного воздуха.

В холодный период года рециркуляция используется для повышения температуры смеси в целях утилизации тепла, удаляемого из помещения, и снижения затрат на подогрев при тепловой обработке воздуха. В теплый период года при температуре наружного воздуха выше T_2 (с работающим охладителем) рециркуляционный воздух используется для охлаждения подаваемого наружного воздуха.

При определении объема рециркуляционного воздуха кроме температурных параметров следует учитывать санитарные нормы, регламентирующие долю рециркуляционного воздуха для различных категорий помещений с постоянным или временным пребыванием в них персонала.

Вентиляторы на напорной и всасывающей линиях и блок тепловой обработки воздуха могут обслуживать несколько помещений БЩУ, занятых электронным оборудованием.

Приложение I

КЛАССИФИКАЦИЯ УСТРОЙСТВ ЭС ПО ТЕПЛОВЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ

По значению плотности теплового потока устройства можно разделить на выделяющие тепло и не выделяющие. К невыделяющим тепло относят также устройства, у которых $q_п$ столь мало, что для обеспечения их нормального теплового режима никаких специальных средств отвода тепла не требуется. Допустимая температура таких приборов мало отличается от температуры окружающей среды, а $q_п \leqslant 10 \div 50$ Вт/м^2.

Тепловыделяющие приборы подразделяются на теплонагруженные ($q_п \geqslant 10^4 \div 10^5$ Вт/м^2) и не теплонагруженные ($50 < q_п < 10^4$ Вт/м^2).

При сопоставлении $\Delta T_{доп}$ и ΔT_c, $T_{доп\ макс}$ и $T_{с\ макс}$, $T_{доп\ мин}$ и $T_{с\ мин}$ наиболее часто встречаются следующие случаи (рис.3):

I) $\Delta T_{доп} > \Delta T_c$ и $T_{доп\ макс} > T_{с\ макс}$, $T_{доп\ мин} \approx T_{с\ мин}$.

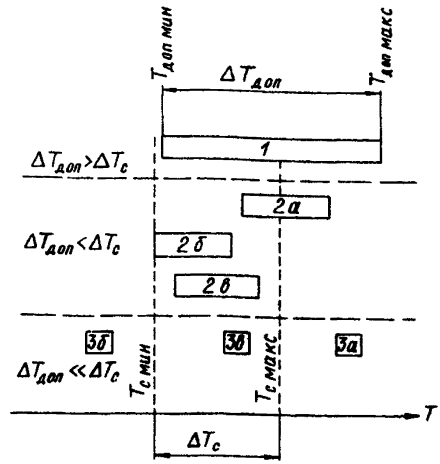

Рис.3. Сопоставление допустимых интервалов температур электронных устройств с температурой окружающей среды:
I,2а, 3а - горячие устройства; 2б, 3б -холодные; 2в, 3в - среднетемпературные

Рабочая температура такого устройства может быть всегда выше температуры окружающей среды. Устройство обладает широким диапазоном изменения допустимых температур (широкоинтервальные). Создавать искусственно определенный уровень температур не нужно, достаточно интенсифицировать теплообмен;

2) $\Delta T_{доп} < \Delta T_c$:

а) $T_{доп\ макс} > T_{с\ макс}$, $T_{доп\ мин} > T_{с\ мин}$;

б) $T_{доп\ макс} < T_{с\ макс}$, $T_{доп\ мин} \approx T_{с\ мин}$;

в) $T_{доп\ макс} < T_{с\ макс}$, $T_{доп\ мин} > T_{с\ мин}$.

Рабочая температура такого прибора обычно отличается от комнатной не более, чем на несколько десятков градусов (среднеинтервальные). Нужно не только интенсифицировать теплообмен, но и при определенном соотношении $T_{доп}$ и T_c создавать необходимый уровень температур, регулировать тепловой поток по величине и направлению;

3) $\Delta T_{доп} \ll \Delta T_c$:

а) $T_{доп\ мин} > T_{c\ макс}$;

б) $T_{доп\ макс} < T_{c\ мин}$;

в) $T_{доп\ макс} < T_{c\ макс}$; $T_{доп\ мин} > T_{c\ мин}$.

Интервал изменения рабочих температур узок (несколько градусов), необходимо обеспечивать подогрев и охлаждение с высокой точностью (узкоинтервальные приборы).

Приборы в случаях I, 2*а*, 3*а* называют горячими, 2*б*, 3*б* - холодными, 2*в*, 3*в* - среднетемпературными.

Отсюда, для обеспечения теплового режима широкоинтервальных горячих приборов требуются системы охлаждения, среднеинтервальных - системы термостабилизации, узкоинтервальных - системы термостатирования.

Приложение 2

ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ УСТРОЙСТВ ВТОРОГО УРОВНЯ КОМПОНОВКИ

I. Для обеспечения требуемой интенсивности теплообмена каждого элемента платы или кассеты, являющейся устройством второго уровня компоновки, в соответствии с уравнением

$$q_э = \alpha_э (T_э - T_c),$$

где $q_э$ - тепловой поток с поверхности элементов, Вт/м^2;
$\alpha_э$ - коэффициент теплоотдачи на поверхности элемента, Вт/м^2 · К;
$T_э$ - требуемая температура поверхности элемента, К;
T_c - температура охлаждающей среды, К.

Следует обеспечить минимально необходимый коэффициент теплоотдачи на границе поверхности этого элемента к охлаждающему воздуху.

Расчет условий охлаждения конкретной платы (кассеты) следует производить таким образом, чтобы был обеспечен тепловой режим наиболее термочувствительного элемента, размещенного на данной плате. Таким образом, делается оценка коэффициента теплоотдачи для наиболее термочувствительного элемента

$$\alpha'_э = \frac{q'_э}{T'_э - T_c}$$

и условий его обеспечения.

Величины $q_э$ и $T_э$ определены при конструировании элементов (первый уровень компоновки).

Значение ожидаемого коэффициента теплоотдачи α рассчитывается в зависимости от условий теплообмена и сопоставляется с требуемым $\alpha'_э$. Если условие $\alpha \geqslant \alpha'_э$ не выполняется, то изменяя исходные параметры, влияющие на величину α , выполняют повторные расчеты до выполнения этого условия. Для вновь проектируемой аппаратуры и СО условия теплообмена могут быть изменены за счет способа охлаждения, ориентации плат относительно охлаждающего потока, ширины зазора, размеров платы, температуры и объема подаваемого воздуха; в случае реконструкции СО действующего ЭО - за счет способа охлаждения, температуры и объема подаваемого воздуха.

2. Для второго уровня компоновки электронной аппаратуры при принудительном и естественном охлаждении наиболее характерны случаи теплообмена при расположении плат (кассет) вдоль и перпендикулярно основному направлению движения охлаждающего воздуха (рис.4). Оценка ожидаемых условий теплообмена в этом случае производится по следующим формулам.

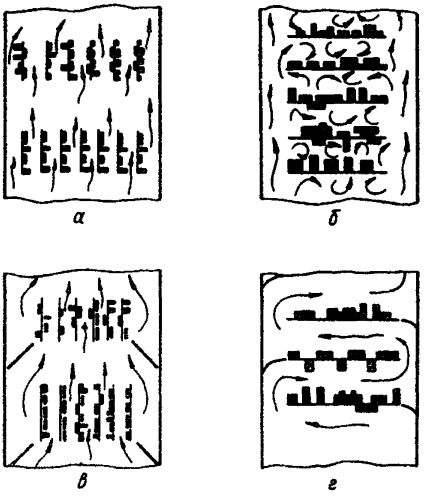

Рис.4. Ориентация кассет и плат относительно направления основного потока охлаждающего воздуха: *а* - вдоль потока; *б* - перпендикулярно потоку; *в*, *г* - использование направляющих козырьков

2.I. Вертикальный воздушный зазор между платами при естественном охлаждении (рис.4,*а*):

$$\alpha = \frac{\lambda C}{x\left(\frac{L}{x}\right)^{1/9}} \times \times \left(Gr\ Pr\right)^{n},$$

где λ - коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/м.К;

x - ширина зазора, м;

C, n - эмпирические коэффициенты;

L - размер платы в направлении движения воздуха, м;

$$Gr = \frac{x^3 g \beta \left(T_з' - T_c\right)}{\nu^2}$$ - число Грасгофа;

$$Pr = \frac{c_p \nu \rho}{\lambda}$$ - число Прандтля;

g - ускорение силы тяжести, м/с^2;

β - коэффициент объемного расширения воздуха, принимаемый равным I/273, I/К;

ν, c_p, ρ - соответственно коэффициент кинематической вязкости (м^2/с), теплоемкость Дж/(кг·К) и плотность воздуха (кг/м^3), при средней температуре среды 0,5 $(T_э + T_c)$.

В зависимости от числа Грасгофа коэффициенты C и n имеют значения:

при $Gr = 2 \cdot I0^3 \div 2 \cdot I0^4$ $C = 0,2$ и $n = 0,25$;

при $Gr = 2 \cdot I0^5 \div I0^7$ $C = 0,07I$ и $n = I/3$.

2.2. Горизонтальный воздушный зазор между платами при естественном охлаждении (рис.4,*б*):

$$\alpha = \frac{\lambda C}{x} (Gr\, Pr)^n .$$

При $Gr = I0^4 \div 3,2 \cdot I0^5$, $C = 0,2I$ и $n = 0,25$;

при $Gr = 3,5 \cdot I0^5 \div I0^7$, $C = 0,075$ и $n = I/3$;

при $Gr < I000$ основную роль играет теплопроводность, в этом случае $\alpha = \lambda / x$.

2.3. Расположение плат вдоль направления движения воздуха при принудительном охлаждении (рис.4,*в,г*):

в этом случае коэффициент теплоотдачи оценивается из соотношения

$$Nu = A Re^m \quad \text{или} \quad \frac{\alpha L}{\lambda} = A \left(\frac{WL}{\nu}\right)^m ,$$

отсюда $\alpha = \lambda A (WL/\nu)^m / L$.

Обеспечение требуемого значения коэффициента теплоотдачи достигается за счет обеспечения скорости движения охлаждающего воздуха относительно платы

$$W' = \frac{\nu}{L}\left(\frac{\alpha_э' L}{A\lambda}\right)^{1/m}.$$

Значения коэффициентов A и m в зависимости от числа Рейнольдса следующие:

при $Re = WL/\nu < 4 \cdot 10^4$, $A = 0{,}58$ и $m = 0{,}5$;

при $Re \geq 4 \cdot 10^4$, $A = 0{,}032$ и $m = 0{,}8$.

Теплофизические свойства воздуха принимаются при средней его температуре в пределах размера платы.

3. Для улучшения условий теплообмена платы, по возможности, рекомендуется располагать вдоль направления движения воздушных потоков. С этой точки зрения в случае естественного охлаждения предпочтительнее вертикальное расположение плат и кассет. При наличии между корпусом шкафа и блоками плат больших зазоров, образующих вертикальные прямоточные каналы, а также при горизонтальном расположении шасси рекомендуется использование направляющих козырьков (см.рис.4,*в*,*г*). Условия охлаждения горизонтально расположенной платы лучше в том случае, когда тепловыделяющие элементы размещены на верхней ее стороне.

4. Выполненные оценки величин α и W для наиболее термочувствительного элемента используются в качестве первого приближения для определения теплового режима остальных элементов и платы в целом.

4.I. Расчет теплового режима плат при принудительном охлаждении с параллельным расположением плат в блоке вдоль потока охлаждаемого воздуха.

Расчет ведется при следующих допущениях:

теплообмен осуществляется путем конвекции в зазоре между двумя соседними платами, имеющими одинаковые габаритные размеры;

температура охлаждающего воздуха принимается средняя (T_c) в пределах зазора между платами

$$T_C = T_{вх} + Q/(2c_p G);$$

передача тепла теплопроводностью через материал плат в соседние зазоры отсутствует;

температура соседних плат одного порядка и теплопередача излучением отсутствует.

Исходные данные: тепловыделения ($Q_э$) и площадь поверхности ($S_э$) элементов, суммарные теплопотери Q с обеих плат, геометрические размеры плат, температура охлаждающего воздуха $T_{вх}$ на входе в зазор.

Расчет выполняется в такой последовательности.

Используя условия обеспечения коэффициента теплоотдачи наиболее термочувствительного элемента по п.2.3 и задаваясь в первом приближении температурой среды, оценивают расход воздуха

$$G = \frac{\sum_{i=1}^{n} Q_i}{2c_p (T_C - T_{вх})}$$

и температуру поверхности остальных элементов

$$T_{эi} = \frac{Q_i}{S_i \alpha} + T_C \quad .$$

Уточняют среднюю температуру охлаждающего воздуха

$$T_C = \sum_{i=1}^{n} T_{ci} Q_i \Big/ \sum_{i=1}^{n} Q_i \ ,$$

где $T_{ci} = 0{,}5 \ (T_{эi} + T_{вх} \ )$;

n - количество элементов на обеих платах.

Полученное значение T_C используют, повторяя вычисления для уточнения расхода охлаждающего воздуха и скорости его движения:

$$W = \frac{G}{x\,h\,\rho} ,$$

где x - ширина зазора между платами, м;

h - длина платы в направлении, перпендикулярном основному движению потока, м;

$\rho = 0{,}463\, P_б / T_c$ - плотность воздуха, кг/м^3;

$P_б$ - барометрическое давление, мм рт.ст.

Коэффициент теплоотдачи уточняют по формуле п.2.3.

Температуру поверхностей элементов сравнивают с допустимыми.

Расчеты повторяют до требуемой погрешности вычислений. Обычно достаточно сделать не более трех приближений.

Аналогичные расчеты выполняют для других плат (зазоров). Необходимость таких расчетов определяют наличием на этих платах термочувствительных элементов, тепловой режим которых жестко регламентирован.

По результатам расчетов тепловых режимов отдельных плат рассчитывают общий расход ($G_б$) охлаждающего воздуха и его среднюю температуру ($T_{вых}$) на выходе из блока плат:

$$T_{вых} = T_{вх} \frac{c_p A + \sum_{j=1}^{m} Q_j}{c_p A - \sum_{j=1}^{m} Q_j} ;$$

$$G_б = \frac{A}{T_{вых} - T_{вх}} ;$$

где $A = 0{,}927\, W_{макс}\, P_б\, h \sum_{j=1}^{m-1} x_j$;

m - количество плат в охлажденном блоке;

$W_{макс}$ - наибольшая скорость воздуха из расчетных для отдельных зазоров данного блока, м/с.

4.2. Расчет теплового режима плат при естественном охлаждении.

Расчет ведется при том же составе исходных данных и допущениях, что и в случае принудительного охлаждения исходный коэффициент теплоотдачи принимается по пп.2.I или 2.2, в зависимости от расположения плат.

При горизонтальном расположении расчет начинают с нижней платы в такой последовательности:

оценивают в первом приближении температуру поверхности каждого элемента

$$T_{эi} = \frac{Q_i}{S_i \alpha_i} + T_{вх} ;$$

среднюю температуру среды по отношению к каждому элементу

$$T_{ci} = \frac{1}{2}\left(T_{эi} + T_{вх}\right) ;$$

оценивают общую среднюю температуру среды

$$T_c = \frac{\sum_{i=1}^{n} T_{ci} Q_i}{\sum_{i=1}^{n} Q_i} ,$$

где n - количество элементов на плате;

уточняют коэффициент теплоотдачи по п.2.2 с найденными значениями $T_{эi}$ и T_c и вновь выполняют расчеты до получения требуемой погрешности вычислений;

сравнивают полученные температуры поверхностей элементов с допустимыми.

Переходят к аналогичным вычислениям для вышележащей платы, при этом за $T_{вх}$ принимают температуру $T_{вых}$ воздуха после охлаждения нижележащей платы

$$T_{вх\,j} = T_{вых\,j-1} = 2T_{oj-1} - T_{вх\,j-1},$$

где j - номер платы в блоке, считая снизу.

При вертикальном расположении расчет теплового режима плат осуществляют в такой же последовательности с той разницей, что $T_{вх}$ для всех плат общая, а вычисление коэффициента теплоотдачи выполняют по п.2.I.

Приложение 3

РАСЧЕТ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ ОТДЕЛЬНЫХ ШКАФОВ

I. Поверочный расчет теплового режима шкафа проводится с целью определения потребного расхода и способа подачи охлаждающего воздуха, оценки температуры поверхностей блоков, их рационального размещения внутри шкафа и получения исходных данных для последующих этапов оптимизации охлаждения групп шкафов и помещений БПУ.

Для выполнения расчетов в объеме шкафа следует выделить нагретые зоны - отдельные тепловыделяющие объемы, занимаемые блоками и ограниченные условными поверхностями теплообмена, соответствующими габаритным размерам блока.

2. Исходные данные для расчета теплового режима шкафа включают:

мощности, рассеиваемые смонтированными в шкафу блоками, или тепловыделения нагретых зон ($Q_1, Q_2, \ldots, Q_n$, Вт);

общая рассеиваемая мощность ($Q_0 = \sum_{i=1}^{n} Q_i$, Вт);

размеры сечения корпуса шкафа, поперечного направления движения воздуха (L_1 , L_2 , м);

размер корпуса шкафа в направлении движения воздуха (L_3 , м);

габаритные размеры отдельных нагретых зон по ширине, глубине и высоте (B_{1i} , B_{2i} , B_{3i} , м);

расстояние в направлении движения воздуха от входного сечения до места расположения нагретой зоны (ℓ_1 , ℓ_2 , ... , ℓ_n , м);

интервал температур охлаждающего воздуха на входе в шкаф, ($T_{вх}$, K);

интервал рабочих температур отдельных блоков ($T_{мин\,i} \div T_{макс\,i}$).

3. Определение потребного расхода охлаждающего воздуха выполняется следующим образом:

3.1. На основании технических условий, паспортов, справочных данных на отдельные элементы, руководствуясь соображениями, изложенными в п.1.3, задаются температурой условной поверхности каждой нагретой зоны, обеспечивающей нормальное функционирование блоков, ($T_{бi}$) и ожидаемой температурой воздуха на входе в шкаф ($T_{вх}$). Используя материалы исходных данных выполняют вычисления следующих величин.

3.2. Перегрев поверхности каждой нагретой зоны относительно температуры охлаждающего воздуха на входе в шкаф

$$\Delta T_{бi} = T_{бi} - T_{вх}.$$

3.3. Условная поверхность и объем каждой нагретой зоны

$$S_{бi} = 2\left[B_{1i}\,B_{2i} + (B_{1i} + B_{2i})\,B_{3i}\right];$$

$$V_{бi} = B_{1i}\,B_{2i}\,B_{3i}.$$

3.4. Коэффициент заполнения объема шкафа электронной аппаратурой

$$K_з = \frac{\sum_{i=1}^{n} V_{бi}}{L_1 L_2 L_3}.$$

3.5. Плотность теплового потока по нагретым зонам

$$q_i = \frac{Q_i}{S_{бi}}.$$

3.6. Условная поверхность общей (по шкафу) нагретой области

$$S_0 = 2\left[L_1 L_2 + (L_1 + L_2) L_3 K_3\right] .$$

3.7. Удельный тепловой поток общей нагретой области

$$q_0 = \frac{Q_0}{S_0} .$$

3.8. Перегрев общей нагретой области относительно каждой нагретой зоны

$$T_{0i} = \frac{\Delta T_{\delta i}}{\left(0{,}75 + 0{,}25\,\frac{q_i}{q_0}\right)\left(\frac{\ell_i}{L_3} + 0{,}5\right)} .$$

Но поскольку нагретая область шкафа общая для всех нагретых зон, ее перегрев по отношению к температуре охлаждающего воздуха должен иметь одно значение. В качестве последнего принимается перегрев относительно зоны, для которой это значение минимально, т.е.

$$\Delta T_0 = \Delta T_{0i}(\text{мин}) .$$

3.9. Расчетные коэффициенты, зависящие от геометрии и компоновки

$$m_2 = (L_1 L_2)^{-0{,}406} ;$$

$$m_3 = L_3^{-1{,}056} ;$$

$$m_4 = K_3^{-0{,}42}\left(1 - K_3^{2/3}\right)^{0{,}5} .$$

Их произведение с множителем 10^{-3} обозначим через K_2:

$$K_2 = 10^{-3} m_2 m_3 m_4 .$$

3.10. Расход охлаждающего воздуха

$$G = \left[\frac{K_2 + \sqrt{K_2^2 + 2 \cdot 10^{-3} \Delta T_0 / Q_0}}{2 \Delta T_0 / Q_0} \right]^2 .$$

4. Расчет и уточнение теплового режима шкафа:

4.1. На основании полученного расхода охлаждающего воздуха вычисляют режимные параметры нагретых зон и шкафа в целом.

4.2. Средний перегрев и средняя температура охлаждающего воздуха в шкафу:

$$\Delta \bar{T}_в = 5 \cdot 10^{-4} \frac{Q_0}{G};$$
$$\bar{T}_в = \Delta \bar{T}_в + T_{вх} .$$

4.3. Температура воздуха на выходе из шкафа

$$T_{вых} = 2 \Delta \bar{T}_в + T_{вх} .$$

4.4. Перегрев условной поверхности каждой нагретой зоны

$$\Delta T_{\delta i} = \Delta T_0 (0{,}75 + 0{,}25 \frac{q_i}{q_0}) \cdot (\frac{\ell_i}{L_3} + 0{,}5).$$

4.5. Температура условной поверхности нагретой зоны

$$T_{\delta i} = \Delta T_{\delta i} + T_{\beta x} .$$

4.6. Температура воздуха, окружающего нагретую зону

$$T_{ci} = T_{\beta x} + \Delta \bar{T}_{\beta} (0{,}75 + 0{,}25 \frac{q_i}{q_0}) (\frac{\ell_i}{L_3} + 0{,}5).$$

4.7. Расчетные показатели сопоставляют с параметрами по п.3.I, при необходимости в исходные данные вносят коррективы с последующими повторениями поверочного расчета.

5. Компоновка блоков в шкафу:

Параметры теплового режима шкафа и отдельных блоков могут быть изменены при изменении компоновочных решений.

Так, снижение расхода охлаждающего воздуха может быть достигнуто за счет оптимизации размещения блоков относительно друг друга внутри шкафа с последующим повторением расчета потребного расхода воздуха и теплового режима шкафа. При этом следует руководствоваться тем, что блоки с более низкой рассеиваемой мощностью и более низкой допустимой температурой окружающей среды лучше размещать ниже других блоков.

6. Обоснование способа подачи охлаждающего воздуха:

6.I. При необходимости после завершения компоновки блоков, расчетов требуемого теплового режима шкафа и определения расхода охлаждающего воздуха делается оценка количества воздуха G_E , которое может быть обеспечено при естественной циркуляции внутри шкафа за счет разности плотностей входящего и уходящего воздуха.

$$G_E = 1560\, F_{отв}\, \mu \sqrt{L_3 \frac{T_{вых} - T_{вх}}{T_{вх}\, T_{вых}\, (T_{вх} + T_{вых})}},$$

где $F_{отв}$ - площадь отверстий для пропуска охлаждающего воздуха, $м^2$;

μ - коэффициент расхода отверстий.

При оценке G_E сделаны следующие допущения:

суммарные площади впускных (нижних) и выпускных (верхних) отверстий равны;

коэффициенты расхода нижних и верхних отверстий равны;

плотность воздуха принята при давлении 760 мм рт.ст.

Перепад давления отнесен к расстоянию между геометрическими центрами суммарных площадей впускных и выпускных отверстий.

6.2. Естественное охлаждение шкафа может быть обеспечено при условии $G_E > G$.

Повышение естественной воздухоподачи возможно за счет увеличения $F_{отв}$, но не более площади условного свободного сечения шкафа, равного $F_y = L_1 L_2 (1 - К_3^{2/3})$ $м^2$, а также за счет увеличения геометрического напора (высота выхлопного воздуховода, см. рис.1,*б*), в противном случае требуется принудительное воздушное охлаждение.

gost.e-ecolog.ru