

С. П. ПАНФИЛОВА, к. т. н. А. И. ВЛАСОВ,  
В. Н. ГРИДНЕВ, А. С. ЧЕРВИНСКИЙ

Россия, г. Москва, МГТУ им. Н. Э. Баумана

Дата поступления в редакцию  
01.03—14.09 2007 г.

Оппонент к. т. н. Ю. Е. НИКОЛАЕНКО  
(Минпромполитики Украины, г. Киев)

## БЕСКОНТАКТНЫЙ ТЕПЛОВОЙ КОНТРОЛЬ ЭЛЕКТРОННО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СРЕДСТВ

*Применимость бесконтактного теплового контроля для изделий электронной промышленности и его достоинства подтверждены экспериментально. Описаны технические средства контроля, основные функции программного обеспечения.*

Бесконтактный тепловой метод контроля является эффективным видом неразрушающего контроля, однако во многих областях применение его является сложным с методической точки зрения. Сложности обусловлены в основном физической природой самого метода, поэтому его применение в какой-либо области требует учета физических особенностей объекта контроля, важных для получения достоверных результатов.

Целью данной статьи является анализ применимости бесконтактного теплового метода в области электронно-вычислительных средств, определение его места среди других методов контроля тепловых полей, выявление особенностей его применения в этой области и оценка уровня развития технических средств метода.

Бесконтактный тепловой контроль — это метод дистанционной регистрации, визуализации и анализа тепловых полей объектов на основе их инфракрасного излучения. Объект контроля, имеющий определенную температуру, коэффициент излучения и отражения и находящийся в окружении других объектов, излучает тепловую энергию, которую регистрирует система построения изображения в ИК-диапазоне — тепловизор. Для успешного применения данного вида контроля необходимо решить проблемы паразитной засветки объекта излучением тел, в окружении которых находится контролируемый объект, проблему определения коэффициента излучения самого объекта, а также выявить степень влияния искажений, вносимых самой системой регистрации ИК-излучения.

Тепловой режим электронно-вычислительных средств (ЭВС) является одним из определяющих факторов их работоспособности. Большинство физико-химических процессов, связанных с возникновением отказов, являются термически активируемыми, т. е. могут протекать только при определенном уровне тепловой энергии, причем интенсивность этих про-

цессов возрастает при нагревании компонента. Тепловая энергия во многих случаях играет решающую роль в изменении свойств и характеристик компонентов, в процессах их старения и разрушения.

С другой стороны, тепловое поле, отличное от нормального, сигнализирует о различных дефектах, которые могут привести к отказу устройства, но не могут быть выявлены обычными способами (например, визуально или с помощью специального электрического стенда). Так, при анализе теплового поля электронного узла или блока по определенным температурным аномалиям может быть выявлено неправильное подключение элемента в схеме, некачественный монтаж, неудачное размещение элементов на плате или электронных ячеек в блоке. Например, на **рис. 1** приведена термограмма блока питания мони-



Рис. 1. Тепловое поле блока питания монитора медицинского оборудования, где в верхней части на вертикально установленной плате стабилизатора выделен перегревающийся компонент. На **рис. 2** приведена термограмма двух одинаковых ячеек автомобильной охранной сигнализации. Как видно, на правой ячейке имеет место перегрев компонента.

По тепловому полю многослойной печатной платы можно выявить утонение и коррозионный износ проводников, некачественную металлизацию, отслоения проводников.

Анализируя тепловые поля изделий в области микроэлектроники, можно выявлять дефекты  $p-n$ -переходов (поверхностная деградация, электромиграция,

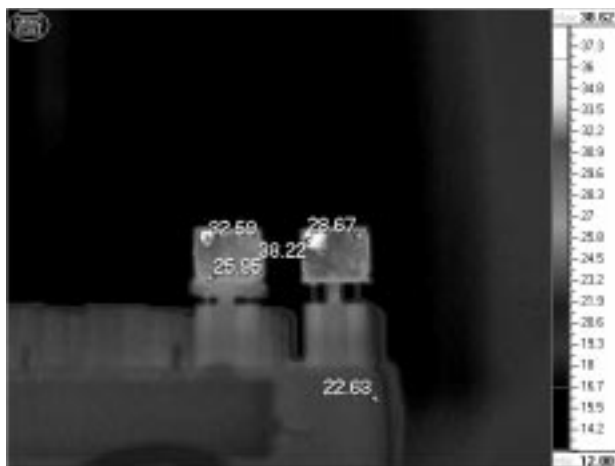


Рис. 2. Тепловое поле ячеек автомобильной охранной сигнализации

межметаллические соединения, «шнурование» тока, мезоплазма), неравномерность плотности тока, газовые пузыри между кристаллом и основанием, дефекты теплоотвода и диффузионной сварки, повреждения кристалла, обрыв проводов, короткие замыкания и др. По тепловым полям можно контролировать качество высокотемпературных пленочных покрытий — отслоения от подложки, неравномерность толщины [1], качество сварки выводов интегральных схем с контактными площадками печатных плат.

Важную роль играет тепловой контроль и на стадии разработки устройств: визуализация теплового поля позволяет выявить недостатки в конструкции устройства и внести своевременные корректировки, оценить эффективность системы охлаждения и т. д.

#### Особенности теплового контроля в электронной промышленности

Для контроля тепловых полей электронно-вычислительных средств используются контактные датчики (например термопара), бесконтактные средства регистрации инфракрасного (ИК) излучения (например ИК-датчики).

Преимущества бесконтактного метода теплового контроля (ТК) очевидны. Этот метод позволяет оценить тепловое поле электронного узла в целом, т. е. измерения осуществляются в большом количестве точек с пространственным разрешением, ограниченным только волновым пределом. ИК-датчики, расположенные в непосредственной близости от исследуемого объекта, не контактируют напрямую с исследуемой ячейкой, поэтому не влияют на температурные или электрические характеристики объекта и не искажают картину происходящих изменений.

Метод основан на регистрации излучения, поэтому позволяет исследовать объекты, имеющие размер порядка длины волны рабочего диапазона ИК-приемника, т. е. достигать микрометров, в то время как для контактных датчиков этот размер в настоящее время составляет, как правило, 1 мм.

Однако контактные датчики не полностью вытеснены тепловизорами из производства и экспериментальных исследований. Кроме того, часто контакт-

ный и бесконтактный методы дополняют друг друга, когда применение бесконтактного метода затруднено. Например, в случае, когда некоторые части конструкции труднодоступны для тепловизионной камеры, на них монтируются термопары.

Однако при всех перечисленных преимуществах бесконтактного теплового контроля следует учитывать особенности применения этого метода в электронной промышленности. Основной проблемой здесь является сложность самого объекта контроля. Обычно электронное изделие изготовлено из множества материалов с разными коэффициентами излучения, причем плотность компоновки в них очень велика, что обуславливает усиление эффекта взаимоотражений внутри объекта контроля. В микроэлектронике размеры производимых изделий значительно уменьшились, что также усложняет контроль. Кроме того, организация самой процедуры контроля включает в себя моделирование условий работы ячейки. Существенной методической проблемой является то, что многие ячейки характеризуются малыми температурными сигналами.

Рассмотрим некоторые проблемы более подробно.

#### Выравнивание коэффициента излучения

Проблема идентификации излучательной способности компонентов при тепловом контроле электронно-вычислительных средств стоит особенно остро и в большинстве случаев является основной при разработке методики контроля. Коэффициент излучения материалов изделий может варьироваться от 0,3 до 0,9 в пределах одной электронной ячейки. Кроме того, ввиду возрастающей плотности упаковки возрастает влияние эффекта взаимоотражения, когда компоненты из материалов с высокой отражательной способностью вносят изменения в регистрируемое тепловизором излучение соседних компонентов.

Для уменьшения негативного влияния коэффициента излучения на результаты теплового контроля производители электронно-вычислительных средств используют два основных подхода.

Первый подход заключается в физическом выравнивании коэффициента излучения в пределах всего контролируемого изделия. Так, в компании IBM для выравнивания излучательной способности применяли покрытие из белого порошкообразного оксида алюминия, причем чувствительность теплового контроля была такова, что позволяла обнаруживать повреждение отдельного штырькового вывода 28-контактной интегральной схемы [1]. Другим примером служит ведомство воздушных сил США: при контроле электронных ячеек для исключения влияния отражательной способности металлических поверхностей компонентов используется однородное покрытие специальным составом, который наносится равномерным слоем и легко удаляется после проведения эксперимента [2].

Второй подход заключается в применении возможностей программного обеспечения теплового контроля. В пределах контролируемого изделия составляют карту распределения значений коэффициента

излучения, для чего осуществляют предварительный нагрев изделия (например печатной платы) без нагрузки в боксе до заданной температуры (40—50°С). Затем снимают тепловое поле изделия в рабочем режиме и преобразуют его в карту истинных температур с учетом измеренных пиксельных значений коэффициента излучения. Мировой лидер в производстве термографического оборудования — фирма FLIR использует для этой цели программное обеспечение EQUAL [1, 3].

Кроме того, чрезвычайно важно обеспечить условия контроля, при которых максимально исключается влияние излучения от окружающих предметов и персонала. Для этого вводятся специальные оградительные конструкции или контролируемое изделие помещается в специальный бокс.

#### **Моделирование условий работы контролируемых ячеек**

Для получения достоверных результатов необходима предварительная разработка методики контроля с учетом условий работы контролируемого устройства. С этой целью проводится моделирование условий реальной работы устройства с учетом обеспечения реальных условий охлаждения и давления, затем подбираются такие условия нагружения, которые обеспечивают экстремальный тепловой режим.

Наиболее часто приходится сталкиваться с невозможностью проводить контроль тепловизором через крышку корпуса устройства. При удалении крышки могут нарушиться условия охлаждения и давления, что приведет к получению недостоверных данных. Для решения этой задачи удаляют крышку корпуса и закрывают его материалом, прозрачным для ИК-излучения. Таким материалом может быть, например, прозрачная бытовая пленка.

Что касается подбора тестов и условий нагружения ячеек, то они должны быть определены разработчиком устройства или экспертом.

#### **Учет особенностей функционирования электронно-вычислительных средств**

При проведении контроля электронных устройств следует учитывать множество факторов.

Во-первых, для того чтобы можно было идентифицировать некоторые неисправности, должна быть предусмотрена возможность многократного проведения одного и того же теста, а также возможность регулирования времени нагружения устройства.

Во-вторых, необходимо доскональное знание работы устройства и, желательно, исторические данные о его функционировании и отказах для разработки необходимой последовательности тестов. Не всегда нагружение устройства приводит к возникновению критической тепловой картины — иногда требуется строгая последовательность определенных режимов.

В-третьих, тесты должны выбираться с учетом особенностей регистрации тепловых полей тепловизором. Если в устройстве есть элементы, сильно выделяющие тепло, то их тепловое поле может маски-

ровать поле каких-либо критических элементов, расположенных рядом. Например, большое количество тепла, выделяемое реле, не указывает на его неисправность, зато может маскировать тепло, выделяемое неисправной микросхемой, расположенной рядом. Необходимо подобрать такие тесты, которые, например, исключают работу реле, но включают микросхему.

В-четвертых, в случаях когда необходимо не только обнаружить неисправность, но и определить ее причину, следует прибегать к опыту разработчиков и экспертов, чтобы сделать корректные выводы на основе результатов теплового контроля. Например, если на термограмме отчетливо виден перегрев конденсатора или резистора, то опытный разработчик или эксперт скорее всего сделает вывод о том, что причиной неисправности устройства является микросхема, которая задает неправильный режим работы для конденсатора или резистора. Конденсатор или резистор в экстремальном тепловом режиме скорее указывают на неисправности в схеме, чем на собственную неисправность.

Чаще всего при поиске неисправностей рекомендуют следующую последовательность проверки компонентов: микросхемы, транзисторы, диоды, резисторы, конденсаторы [2].

Использование эталонных устройств при тепловом контроле электронно-вычислительных средств на производстве позволяет автоматизировать процедуру контроля и свести к минимуму участие в нем оператора. Термограммы контролируемых изделий просто сравниваются с термограммой заведомо исправного устройства, а несоответствие термограмм указывает на предполагаемую неисправность. Например, на рис. 2 приведена термограмма одинаковых ячеек переклювателя автомобильной охранной сигнализации, слева — эталонной ячейки, справа — контролируемой. Видно, что контролируемая ячейка может быть неисправна, т. к. ее тепловое поле не соответствует тепловому полю эталонной ячейки.

Значительно повысить вероятность обнаружения неисправностей может создание эталонной термограммы, которая получается путем сбора максимальных значений температуры из термограмм заведомо исправных устройств. При этом важным моментом является статистическая обработка термограмм для большого количества устройств.

#### **Технические средства теплового контроля**

Аппаратным средством построения изображения в ИК-диапазоне является тепловизор. Исследование пространственных распределений температуры по одной или двум координатам требует сканирования поверхности объекта, которое осуществляют либо оптико-механическим, либо электронным способом.

В оптико-механических устройствах отклонение угла зрения производят с помощью колеблющихся или вращающихся оптических элементов (призм и зеркал). Визуализация теплового поля объекта с высоким геометрическим разрешением требует формирования многострочных кадров, поэтому при ис-

пользовании единичных (или в виде линеек) приемников отдается предпочтение квантовому механизму реакции на инфракрасное излучение, т. к. быстродействие фотонных приемников составляет около 1 мкс. Из-за технических трудностей создания быстродействующих высокоинформативных оптико-механических сканирующих систем сканирующие тепловизоры работают в малокадровом режиме, т. е. в основном для наблюдения за неподвижными объектами.

Все фотонные приемники (InSb, CdHgTe и др.) для снижения фундаментальных шумов и достижения требуемой пороговой чувствительности должны охлаждаться до криогенных температур (например, жидким азотом — до 77 К). Использование микрокомпрессорных или термоэлектрических систем ( $T=160...190$  К) соответственно ухудшает эти параметры. Системы охлаждения резко снижают автономность оборудования из-за необходимости возобновления запаса хладагента (криогенные тепловизоры) или из-за высокого энергопотребления (термоэлектрические системы). Тепловизоры, требующие охлаждения, сравнительно дороги, особенно тепловизоры с низкотемпературными термоэлектрическими элементами. К достоинствам же охлаждаемых тепловизоров следует отнести высокое температурное разрешение (до  $0,01^\circ\text{C}$ ) и возможность непосредственно измерения абсолютной температуры объекта.

Принцип электронного сканирования был реализован в матричных фотодетекторах нового поколения, разработанных в конце XX века. Этот тип фотоприемников называют матрицами, размещаемыми в фокальной плоскости объектива (Focal Plane Array — FPA). Основными преимуществами таких систем являются отсутствие движущихся механических частей и одновременное визирование сцены всеми чувствительными площадками. Последнее преимущество позволяет увеличить время экспозиции каждой чувствительной площадки (т. е. уменьшить шум) и обеспечить одновременное наблюдение быстроменяющихся тепловых событий.

Современные матрицы используют как фотонные, так и тепловые ИК-приемники. Наиболее доступными по цене являются показывающие и измерительные тепловизоры, работающие на неохлаждаемых пироэлектрических и микроболометрических двухмерных приемниках теплового излучения. В зависимости от интенсивности теплового излучения в пироэлектрических приемниках изменяется уровень поляризации каждого элемента, в болометрических — внутреннее сопротивление. Для специального применения (когда требуется высокая частота смены термоизображений, повышенное температурное разрешение или спектральная селективность) разработаны тепловизоры на охлаждаемых матрицах. Наиболее распространены матрицы на основе силицида платины (PtSi), антимонида индия (InSb), тройных соединений (HgCdTe) и так называемых квив-материалов (QWIP), в частности арсенида галлия (GaAs).

Лидерами в производстве тепловизионной техники являются Швеция, Великобритания, Франция, Германия,

США, Япония. Среди ведущих производителей оборудования для теплового контроля в первую очередь следует назвать компанию FLIR Systems (США — Швеция). В ряду других крупных и зарекомендовавших себя на мировом рынке производителей тепловизионной техники стоят такие компании как CEDIP Infrared Systems (Франция, [www.cedip-infrared.com](http://www.cedip-infrared.com)), Raytek UK (Великобритания, [www.raytek.com](http://www.raytek.com)), IRISYS (Великобритания, [www.irisys.co.uk](http://www.irisys.co.uk)), NEC Sanei (Япония, [www.metrum.co.uk](http://www.metrum.co.uk)), Thermoteknix Systems Ltd (интернациональная компания, [www.thermoteknix.com](http://www.thermoteknix.com)), Land Infrared (интернациональная компания, [www.landinst.com](http://www.landinst.com)), а также российские компании НИИИИ МНПО «Спектр» ([spektr6.ru](http://spektr6.ru)) и ИРТИС ([irtis.ru](http://irtis.ru)).

К основным характеристикам тепловизоров относятся: рабочий спектральный диапазон, геометрическая разрешающая способность, частота смены изображений, температурное разрешение (эквивалентная шуму разность температур), минимальная разрешаемая разность температур, динамический диапазон сигнала.

Рабочий спектральный диапазон тепловизоров (3—5 или 8—13 мкм) выбирается по таким важным критериям как коэффициенты излучения объектов контроля, прозрачность атмосферы, мощность излучения объектов, тепловой контраст, характеристики приемников излучения. Подробно влияние этих факторов на выбор спектрального диапазона описано в [4].

Геометрическая разрешающая способность изображения в матричных тепловизорах при правильно подобранной оптике соответствует числу отдельных элементов в матрице. Например, распространенный формат микроболометрических матриц  $320 \times 240$  соответствует полю зрения  $24 \times 18^\circ$ .

Частота смены изображений определяется полным временем, в течение которого анализируют поле зрения. Например, если выходной сигнал каждого матричного элемента сканируют в течение  $1/30$  с, то соответствующая частота смены изображений будет 30 Гц. Последовательности ИК-изображений накапливают в аналоговой или цифровой форме. Аналоговый сигнал на выходе обычно представляется в одном из популярных форматов — PAL, NTSC или SECAM.

Эквивалентная шуму разность температур (температурное разрешение) является важной энергетической характеристикой тепловизоров, которую определяют как температурный сигнал, эквивалентный уровню собственного шума фотоприемника. Величину температурного разрешения определяют как изменение температуры, которому соответствует отношение сигнал/шум, равное единице, например,  $0,07^\circ\text{C}$  при температуре эталонного излучателя  $30^\circ\text{C}$  (в паспортных данных тепловизоров температуру эталонного излучателя часто опускают).

Минимальную разрешаемую разность температур определяют по эталонному излучателю (мире), который образован набором полос определенной толщины и температуры и рассматривается оператором в течение неопределенного времени. Таким образом,

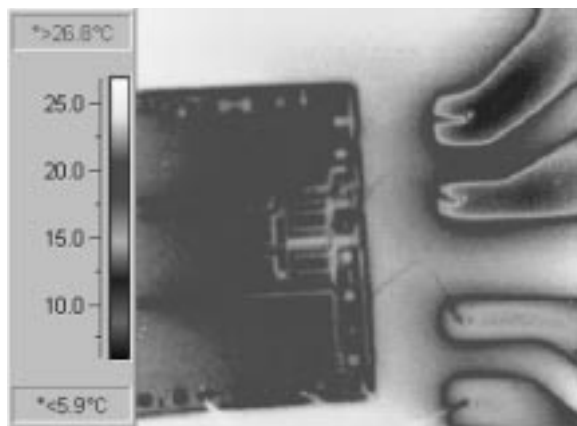


Рис. 3. Изображение микросхемы, полученное с помощью тепловизора ThermoCAM фирмы FLIR и показывающее проводники размером 7 мкм [3]

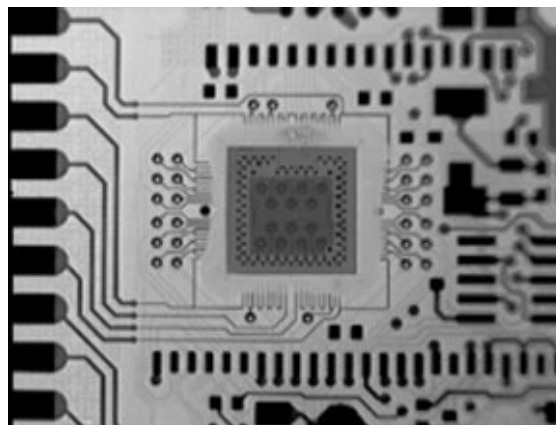


Рис. 4. ИК-камера в сочетании с микроскопом становится ИК-микроскопом, способным исследовать объекты размером 5 мкм [3]

этот параметр отражает как пространственное, так и температурное разрешение тепловизора.

Динамический диапазон электронного устройства характеризует диапазон амплитуд сигналов между максимальным и минимальным значениями, которые передаются без искажений. Обычно динамический диапазон выражают в децибелах.

Кроме того, в паспортных данных тепловизоров обычно указывают регистрируемый температурный диапазон, а также характеристики поставляемой с тепловизором оптики. Как отмечалось выше, тепловизоры обычно работают в одном из ИК-диапазонов, поэтому в качестве характеристики часто указывают также и рабочий спектральный диапазон.

При выборе тепловизора для контроля электронно-вычислительных средств следует учитывать конкретную область применения прибора. Чем меньше объект исследования или детали объекта, подлежащие исследованию, тем большей геометрической разрешающей способностью и большим температурным разрешением должен обладать тепловизор. Для исследования печатных плат или ячеек в общем случае подойдет тепловизор для исследований или для проведения неразрушающего контроля, например, тепловизор фирмы FLIR Systems из серии S («S Series — Research & Development»). Геометрическая разрешающая способность такого тепловизора обычно составляет 640×480, а температурное разрешение — 0,06°C при 30°C.

Для диагностирования изделий микроэлектроники (например, интегральных микросхем) необходимо выбирать тепловизор с большей геометрической разрешающей способностью и большим температурным разрешением. Это специальные модели тепловизоров с геометрической разрешающей способностью 1024×1024. Температурное разрешение таких тепловизоров может составлять 0,01°C, что позволяет визуализировать тепловое поле интегральной микросхемы. Специальные объективы позволяют добиться приемлемого увеличения объектов с размерами вплоть до 25 мкм и визуализировать их тепловые поля.

Однако в каждом конкретном случае следует учитывать индивидуальные параметры исследуемых образцов. В зависимости от рабочей температуры исследуемого образца следует определить регистрируемый температурный диапазон, кроме того, могут быть важны условия эксплуатации, интерфейс взаимодействия с компьютером. В случае когда необходимо регистрировать изменение теплового поля, важным параметром является частота смены изображений.

Для исследования объектов, сопоставимых по размерам с объектами микроэлектроники, существуют специальные модели тепловизоров. Например, фирма FLIR Systems предлагает ряд тепловизоров «High-end R&D Infrared Cameras» с повышенными температурным разрешением и геометрической разрешающей способностью. Кроме того, есть возможность подбирать объективы с необходимым коэффициентом увеличения (вплоть до комбинации ИК-камер с микроскопами) и исследовать объекты с размерами 7 мкм и более (рис. 3, 4).

#### Программные средства анализа результатов теплового контроля

Как уже неоднократно упоминалось, при использовании тепловизионных средств особое внимание уделяют поставляемому программному обеспечению, т. к. оно является мощным средством, предоставляющим дополнительные возможности для анализа результатов теплового контроля. Часто программное обеспечение составляет целый многофункциональный комплекс, который позволяет выполнять все необходимые действия для получения, анализа, хранения данных о тепловых полях (рис. 5).

К стандартным функциям программного обеспечения, поставляемого с тепловизором, относятся средства захвата видео- и дополнительной информации (например, значения температуры или коэффициента излучения в некоторых заранее определенных точках). Интерфейс взаимодействия с компьютером может быть как собственным для конкретного производителя, так и стандартным для захвата видеoinформации. Например, для операционной системы

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ

Windows таким интерфейсом является DirectShow, при этом для передачи дополнительной информации чаще всего используют порт RS-232 или USB. Данные передают в заранее определенном и специфицированном формате. Наличие спецификаций на интерфейс взаимодействия прибора с компьютером может быть важным в случае, когда планируется разработ-

ка собственных средств обработки и анализа изображений.

Программное обеспечение обычно обладает также функциями обработки изображений: уменьшения шумов, увеличения резкости, коррекции контраста и яркости, видеоизменения гистограмм и др. К наиболее важным функциям программного обеспечения

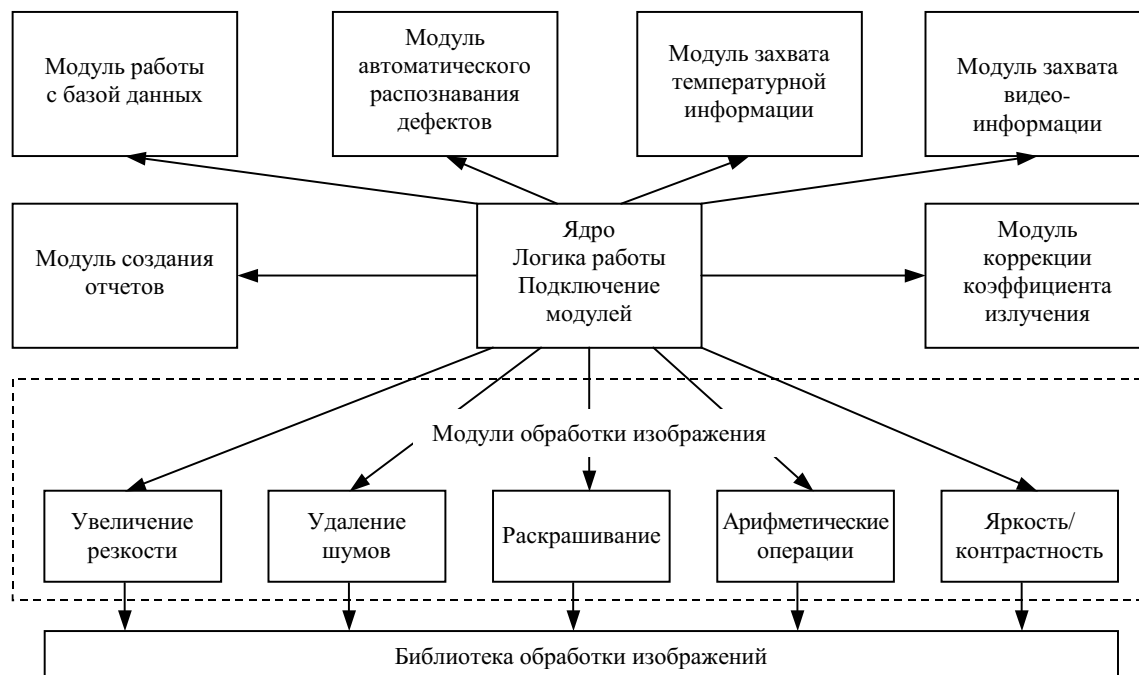


Рис. 5. Структурная схема программного комплекса системы теплового контроля

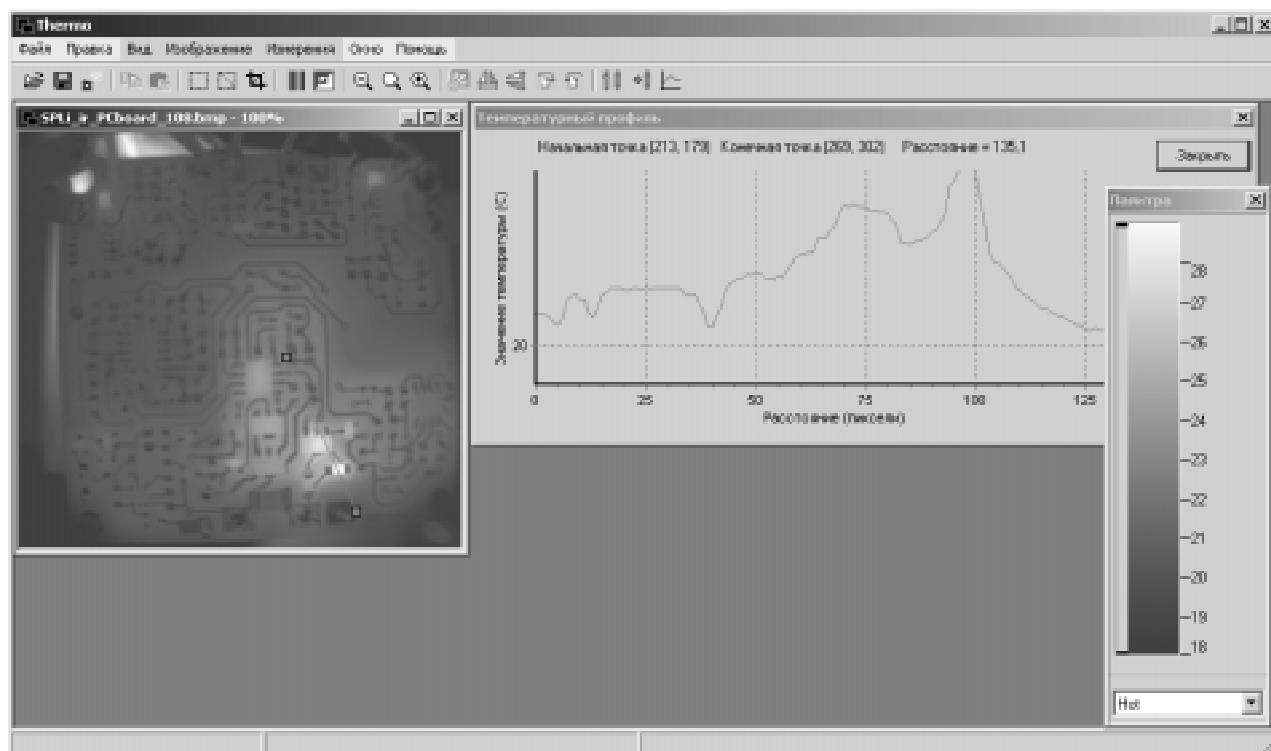


Рис. 6. Окно программы Thermo (разработка кафедры ИУ4 МГТУ им. Н. Э. Баумана) с температурным профилем, построенным для критичного участка печатной платы

относится возможность проведения температурного анализа. Помимо возможности измерения температуры в произвольной точке, обычно обеспечивается функция построения изотерм, определения критических значений температуры и их нанесения в виде флагов или изотерм на изображение. Кроме того, часто программное обеспечение выполняет функцию построения температурного профиля вдоль линии, соединяющей две точки на термограмме. Температурный профиль представляет собой график, на котором по оси ординат отложено расстояние от начальной точки, а по оси абсцисс — соответствующее этой точке термограммы значение температуры (рис. 6).

Некоторые программы выполняют функцию записи последовательности термограмм, что позволяет просматривать изменение теплового поля в динамике: строить графики изменения температуры в точке, получать изменение температурного профиля во времени.

Любое программное обеспечение позволяет раскрашивать термограммы в псевдоцвета, что облегчает восприятие температурной информации.

Некоторые производители телевизионной техники поставляют программное обеспечение, которое позволяет более точно измерять температуру за счет более точного вычисления коэффициента излучения, что в контексте задачи теплового контроля электронно-вычислительных средств является предпочтительным. В качестве отдельной программы обычно поставляется также средство автоматического построения отчетов о проведенном исследовании или тесте.

#### Исследования кафедры ИУ4

Кафедра ИУ4 («Проектирование и технология производства электронно-вычислительных средств») МГТУ им. Н. Э. Баумана проводит собственные исследования в области применения теплового контроля для регистрации температурных полей электронно-вычислительных средств.

Здесь важнейшей проблемой является создание методики эксперимента и анализа результатов, однако не менее важен подбор оборудования в комплексе с программным обеспечением. В качестве примера приведем используемый на кафедре стенд теплового контроля, аппаратной основой которого является охлаждаемый термограф российской фирмы ИРТИС (модель ИРТИС2000), позволяющий измерять абсолютные значения температуры и обладающий чувствительностью 0,05°C при 30°C. Термограф имеет сетевой интерфейс взаимодействия с компьютером, на котором установлено программное обеспечение, поставляемое производителем термографа, или специализированный программный продукт, разрабатываемый кафедрой ИУ4. Структурная схема комплекса с карманным персональным компьютером (КПК) для сканирования представлена на рис. 7.

Методика проведения теплового контроля может разрабатываться на основе заранее проведенных расчетов тепловых полей с помощью специализированного программного обеспечения, например, MCS.Nastran, после чего определяются критерии оценки. Однако

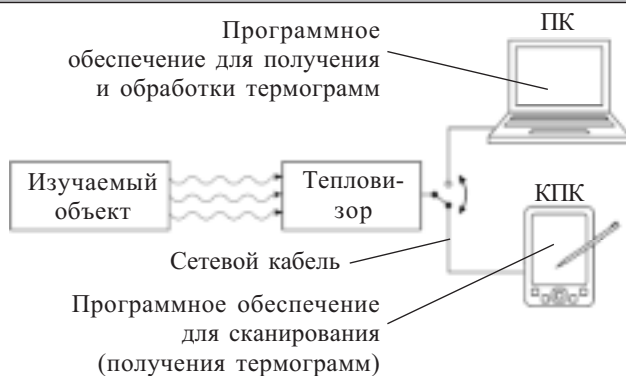


Рис 7. Схема стенда теплового контроля

этот путь применяется редко. Гораздо чаще используется сравнение с эталоном, когда в ходе экспериментов накапливается база данных термограмм заведомо исправных ячеек.

При определении потенциальных дефектов конструкции электронного узла используются простые указания, требующие обязательной экспертной оценки оператора, проводящего испытания. Некоторые выводы температурного анализа могут быть основаны на прошлом опыте, другие могут быть основаны на ожиданиях надежности и знании типов компонентов. В качестве примера можно привести военный стандарт США 217-F и стандарт Bellcore, использующиеся для предсказания типов отказов под воздействием электрического и теплового напряжения компонентов. Эти документы дают хорошую точку отсчета для анализа термограмм электронных ячеек и могут использоваться при разработке собственных методик.

Приведем методику проведения теплового контроля источника питания [5], которую можно применять как часть процесса контроля качества приборов при производстве и разработке электронных устройств.

1. Выявить все компоненты с температурой, достигающей 50°C при рабочей температуре 23°C.

2. Проанализировать давление и воздушные потоки в области компонентов, температура которых превышает 50°C, для определения корректности измерений.

3. Проанализировать температуру печатной платы. (Например, печатные платы из материала FR-4 (Flame Resistant 4) не должны иметь температуру более 105°C при наихудших условиях испытаний.)

4. При наличии компонентов, особенных с точки зрения температурного режима (например, мощных резисторов), убедиться, что они корректно смонтированы на плату (с теплоизолирующей прокладкой или с зазором).

5. Убедиться, что температура компонентов, имеющих в своем составе магнитные материалы, не выходит из допустимого для этого класса компонентов диапазона и по меньшей мере на 10°C ниже, чем должна быть при наихудших условиях эксплуатации.

6. Проверить, не превышает ли ожидаемых значений температура компонентов, монтируемых на поверхность. Например, повышение температуры ке-

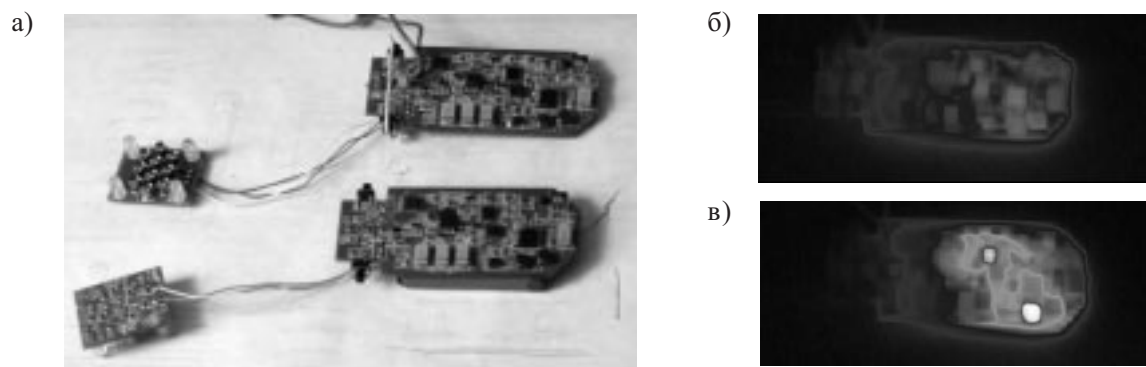


Рис. 8. Тепловое поле ячеек управления фонарем:

*а* — управляющие фонарем ячейки; *б* — тепловое поле нормально функционирующей ячейки; *в* — тепловое поле дефектной ячейки (некачественное травление платы, перегрев транзистора и микросхемы стабилизатора)

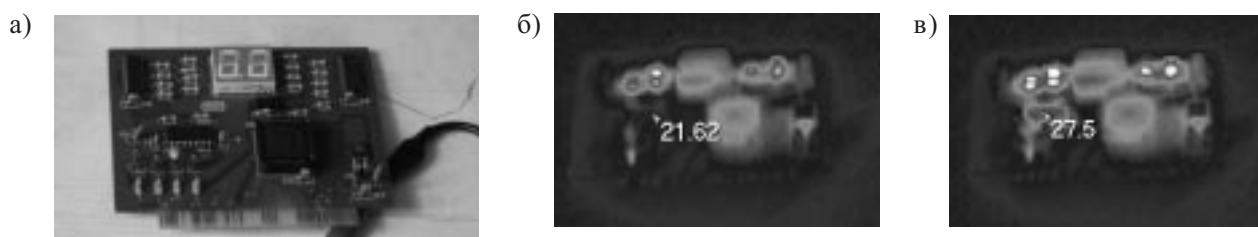


Рис. 9. Тепловое поле ячеек для ремонта компьютеров:

*а* — ячейки устройства ремонта компьютеров; *б* — тепловое поле исправной ячейки; *в* — тепловое поле ячейки с неисправной микросхемой

рамических конденсаторов на 30°C и более должно насторожить.

7. Убедиться, что электролитические конденсаторы не нагреваются экстремально высокими пульсирующими составляющими постоянного тока или расположенными рядом греющимися компонентами.

8. Вычислить температуру *p-n*-перехода полупроводниковых устройств (полевые транзисторы, диоды) по методике, приведенной в документации на полупроводниковый прибор. Убедиться, что температура *p-n*-перехода не превышает установленного максимально возможного значения. (Для большинства полупроводниковых приборов рекомендуется, чтобы температура перехода не превышала 110°C при работе в наихудших условиях.)

Примеры результатов исследований приведены на рис. 8, 9. Эксперимент демонстрирует легкость обнаружения неисправных компонентов, особенно микросхем, поиск которых традиционными средствами может быть достаточно трудоемким.

#### Выводы

Показана возможность применения теплового метода контроля для диагностики электронно-вычислительных средств, рассмотрены его преимущества — бесконтактность и высокая скорость обнаружения дефектов, особенности его применения в электронной промышленности и пути их учета в методике контроля. В частности, рассмотрена острая

проблема выравнивания коэффициента излучения, проблема моделирования естественных условий работы устройства.

Приведены рекомендации по выбору технических средств контроля, позволяющие повысить достоверность получаемых результатов. С помощью анализа особенностей бесконтактного теплового метода возможна разработка методики контроля конкретных устройств на промышленных предприятиях.

Применимость бесконтактного теплового контроля ЭВС и его достоинства подтверждены экспериментальными исследованиями, проведенными на кафедре «Проектирование и технология производства электронных средств».

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Неразрушающий контроль. В 7 т. Т. 5. Тепловой контроль / Под ред. В. В. Клюева. — М.: Машиностроение, 2004.
2. Allred L. G. Guidelines for successful implementation of infrared thermography for repairing electronic circuit cards // AUTOTEST-CON'96, Test Technology and Commercialization. Conference Record. — 1996. — P. 410—417.
3. Сайт фирмы FLIR Systems [Электронный ресурс] — Электронные текстовые, графические данные — <http://flirthermography.com>
4. Госсорг Ж. Инфракрасная термография. Основы, техника, применение. — М.: Мир, 1988.
5. Fishbun R. J. Infrared thermography for electronic assembly design verification. — IBM Power Technology and Qualification, 2000.