

Бесконтактный тепловой контроль изделий электронной техники

Светлана Панфилова, Александр Червинский, Андрей Власов, Владимир Гриднев, кафедра «Проектирование и технология производства электронных средств» МГТУ им. Н.Э. Баумана

В статье проведен анализ применимости бесконтактной тепловой диагностики изделий электронной техники. Перечислены типичные дефекты электронных устройств, выявляемые тепловым методом контроля. Указаны преимущества данного метода контроля по сравнению с контактными средствами, рассмотрены особенности теплового контроля для изделий электронной промышленности. Описаны технические средства теплового контроля и даны рекомендации по выбору подходящей аппаратуры. Приведен пример методики проведения контроля электронных изделий, а также рассмотрены основные функции и роль программного обеспечения в контроле изделий электронной промышленности.

ВВЕДЕНИЕ

Бесконтактный тепловой метод контроля является эффективным средством диагностики электронной техники. Он успешно применяется для обнаружения проблем в конструкции на ранней стадии создания устройств, а также для выявления дефектов электронных ячеек, например, при серийном производстве. Бесконтактный тепловой метод контроля имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционным методом контроля тепловых полей, что сделало его неотъемлемой частью системы контроля качества и полезным инструментом при разработке электронных устройств.

На рисунке 1 показана возможная схема организации теплового контроля на производстве электронных изделий. Подобная система обычно включает в себя аппаратную составляющую, главной частью которой является инфракрасная камера, программную составляющую, которая позволяет проводить температурный анализ полей, зарегистрированных аппаратной частью, а также методику проведения эксперимента, которая

разрабатывается специалистами для каждого типа контролируемого прибора с учетом особенностей его конструкции и специфики производства.

ВЛИЯНИЕ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА НА НАДЕЖНОСТЬ ЭЛЕКТРОННЫХ ИЗДЕЛИЙ

Тепловой режим электронных изделий является одним из определяющих факторов их надежности. Аномальный нагрев повышает вероятность отказа электронного узла и сокращает срок службы изделия. Кроме того, измененное тепловое поле может сигнализировать о дефектах, поиск которых обычными способами (например, визуально или при помощи специального электрического стенда) может быть затруднен по ряду причин или неэффективен. Например, при анализе теплового поля узла или блока радиоэлектронной аппаратуры по определенным температурным аномалиям может быть выявлено неправильное подключение элемента в схеме, некачественный монтаж, неудачное размещение элементов на плате (см. рис. 2). В случае много-

слойной печатной платы по ее тепловому полю можно выявить проблемы утоньшения и коррозионного износа проводников, некачественную металлизацию, отслоение дорожек.

В области микроэлектроники анализ тепловых полей позволяет выявлять дефекты р-п-переходов (поверхностная деградация, электромиграция, межметаллические соединения, «шнурование» тока, мезоплазма), неравномерность плотности тока, газовые пузыри между кристаллом и основанием, дефекты теплоотвода и диффузионной сварки, повреждение кристалла, обрыв проводов, короткие замыкания и другие дефекты. Посредством анализа тепловых полей интегральных схем можно контролировать качество разварки выводов на контактные площадки печатных плат. Качество высокотемпературных пленочных покрытий (отслоения от подложки, неравномерность толщины) также можно проанализировать по конфигурации их тепловых полей.

Кроме того, важную роль играет тепловой контроль на стадии компоновки устройства: визуализация

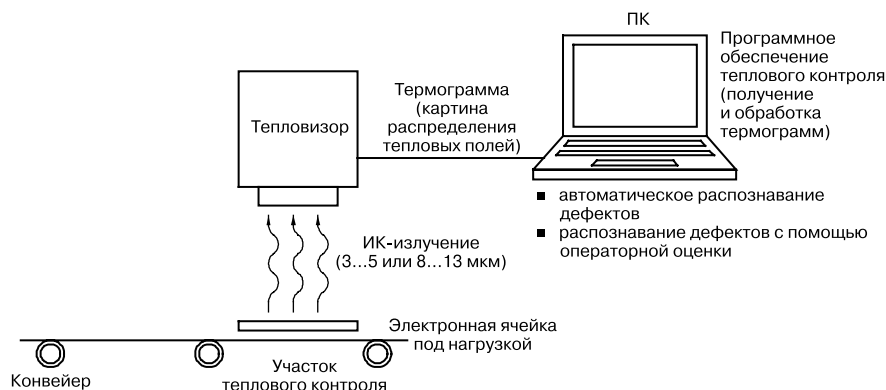


Рис. 1. Схема теплового контроля на производстве электронных ячеек

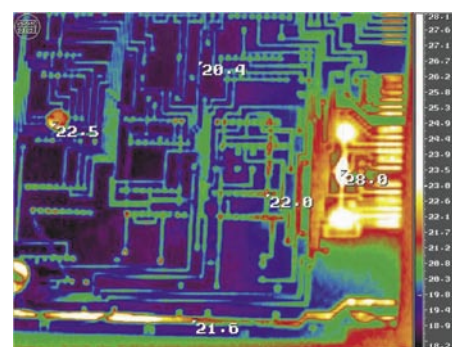


Рис. 2. Тепловое поле печатной платы, наглядно отражающее высокое переходное сопротивление паек [3]

теплового поля позволяет выявить конструктивные проблемы, оценить работу систем охлаждения и сделать выводы о приемлемости тепловых полей в разрабатываемом устройстве (см. рис. 3).

КОНТРОЛЬ ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ ЭЛЕКТРОННЫХ УЗЛОВ

Для контроля тепловых полей изделий электронной техники используются как контактные датчики (например, термопары), так и бесконтактные средства регистрации инфракрасного (ИК) излучения (например, ИК-датчики). Бесконтактный метод является более современным и, во многих случаях, более эффективным средством контроля тепловых полей электронных узлов.

Современные устройства для регистрации ИК-излучения работают в средневолновом инфракрасном диапазоне, хотя, в принципе, любой объект с температурой выше абсолютного нуля излучает тепловую энергию, которая может быть зарегистрирована ИК-датчиками. Атмосфера имеет два участка относительной прозрачности в средневолновом инфракрасном диапазоне: 2...5 и 8...13 мкм, что соответствует температурному диапазону -40...1700°C. ИК-датчики обычно работают в одном из этих диапазонов, однако бывают и устройства, работающие в обоих диапазонах: в их конструкции предусмотрены датчики для регистрации излучения обоих диапазонов (например, тепловизор фирмы ИРТИС 2200С).

Преимущества бесконтактного метода по сравнению с контактным очевидны. Бесконтактный метод теплового контроля (далее — ТК; будем употреблять это сокращение в кон-

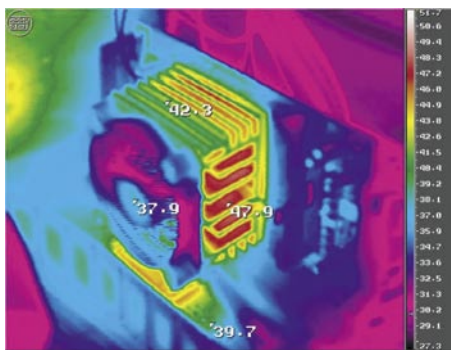


Рис. 3. Тепловое поле печатной платы с установленным радиатором, наглядно отражающее эффективность работы системы охлаждения [3]

тексте бесконтактных методов) позволяет оценить тепловое поле электронного узла в целом, так как имеется возможность одновременного измерения в большом количестве точек, с пространственным разрешением, ограниченным только волновым пределом.

Основное преимущество бесконтактного метода в том, что он относится к средствам неразрушающего контроля: ИК-датчики, расположенные в непосредственной близости от исследуемого объекта, фиксируют ИК-излучение и отсылают полученные данные компьютеру для их дальнейшего анализа. Отсутствие прямого контакта с исследуемой ячейкой не изменяет температурных и электрических характеристик исследуемого объекта, давая наиболее правдоподобную картину происходящих явлений.

Кроме того, метод бесконтактного ТК, основанный на регистрации излучения, позволяет исследовать объекты размером порядка длины волны того диапазона, в котором работает ИК-приемник (микрометры), в то время предел «разрешения» контактных датчиков — как правило, 1 мм.

Тепловой метод контроля для диагностики электронно-вычислительных средств впервые был применен компанией IBM в 1983 г. при разработке источников питания [2]. До этого измерения тепловых полей устройств проводились при помощи термопар, монтировавшихся на каждый компонент источника питания. Подобный контроль был очень трудоемким процессом, т.к. типичное устройство (например, источник питания) содержало сотни компонентов. Кроме того, монтаж термопары на компонент часто бывает затруднен из-за физических особенностей конструкции. Другие же компоненты могут быть настолько велики, что от оператора требуется немалый опыт для правильного выбора положения термопары. Иногда термопары отваливаются в процессе эксперимента, что приводит к съему некорректных результатов и ошибочным выводам.

Вследствие указанных недостатков контактного теплового метода со временем он стал применяться все реже, а в 90-х гг., с развитием тепловизионной техники, когда на смену громоздким и малочувствительным камерам пришли более компактные

и чувствительные модели тепловизоров, был почти полностью вытеснен бесконтактным методом. Контактные датчики теперь применяются лишь в том случае, когда из-за конструктивных особенностей применение бесконтактного метода затруднено.

ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛОВОГО КОНТРОЛЯ В ЭЛЕКТРОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

При всех перечисленных преимуществах бесконтактного ТК следует, однако, учитывать особенности применения этого метода в электронной промышленности. Основной проблемой при ТК электронных узлов является сложность самого объекта контроля. Обычно электронное изделие изготовлено из множества материалов с различными коэффициентами излучения, а плотность компоновки велика, что обуславливает усиление эффекта взаимоотражений внутри объекта контроля.

В области микроэлектроники следует отметить значительное уменьшение размеров производимых изделий, что также усложняет процедуру контроля. Кроме того, следует отметить проблему организации самой процедуры контроля, которая включает в себя моделирование условий работы ячейки. Также существенной методической проблемой является то, что многие ячейки характеризуются малыми температурными сигналами. Рассмотрим некоторые из проблем более подробно.

Проблема выравнивания коэффициента излучения

Исследование тепловых полей изделий радиоэлектроники, особенно микроминиатюрных, осложняется их малыми габаритами, высокой плотностью упаковки деталей и значительным разбросом коэффициента излучения. При внедрении средств ТК на предприятиях электронной промышленности с указанными проблемами справляются различными способами.

Так, для выравнивания излучательной способности фирма IBM применяла в свое время белое порошкообразное покрытие оксидом алюминия, причем чувствительность ТК была такова, что позволяла обнаруживать повреждение отдельного штырькового вывода 28-выводной интегральной схемы [1].

Фирма FLIR использует для этой цели программные средства: програм-

ма EQUAL предусматривает предварительный нагрев изделия, например, печатной платы, в боксе до температуры 40...50°C, после чего составляется карта распределения коэффициента излучения. Затем снимают тепловое поле изделия в рабочем режиме и преобразуют его в карту истинных температур с поправкой на измеренное значение коэффициента излучения в каждом пикселе. В этом случае важную роль играет программное обеспечение системы теплового контроля.

Проблема моделирования условий работы контролируемых ячеек

При моделировании условий работы устройства обычно приходится решать несколько проблем.

Первая проблема заключается в обеспечении возможности «заглянуть» тепловизором внутрь корпуса, если речь идет о корпусном приборе. Эта проблема разрешается путем удаления верхней крышки или части корпуса. При этом необходимо не изменить потоки воздуха через конструкцию при удалении крышки. В качестве примера можно привести подход фирмы IBM, которая удаляет верхнюю часть конструкции лазерным резцом, затем заглаживает поверхность, а отрезанную часть заменяет прозрачным окном [2]. При этом было обнаружено, что в большинстве случаев прозрачный диэлектрик (например, обычная бытовая пищевая пленка) достаточно хорошо подходит для бесконтактного измерения тепловых полей: материал прозрачен, может быть плотно подогнан к корпусу и не нарушает передачу ИК-излучения (см. рис. 4) [2].

Второй проблемой при моделировании естественных условий работы узла является правильная настройка приборов. Для проведения теплового контроля необходимо понимание работы систем охлаждения, противодавления, распределения потоков. Обычно поток воздуха специфицируется в кубических футах в минуту (cubic feet per minute — CFM) или в линейных футах в минуту (linear feet per minute — LFM). Однако эти цифры достаточно сложно проверить измерениями. Например, показания анемометра, измеряющего линейную скорость потока воздуха, зависят от ориентации датчика, поэтому результаты измерений могут различаться на порядок. Более точный способ — измерение падения

давления воздуха от входа узла к его выходу.

Во многих случаях для создания потоков воздуха используются вентиляторы (кулеры), а также заслонки, перераспределяющие воздушные потоки по всему объему конструкции. Для определения зависимости падения давления от напряжения, приложенного к вентилятору, следует протестировать всю подсистему воздушного охлаждения конструкции. Полученная кривая затем может быть использована для проведения тестов с установлением различных значений потока воздуха.

Следующей сложностью является определение входных напряжений и условий нагружения. Спецификации на устройство обычно определяют диапазон входных напряжений и минимальную и максимальную нагрузку для каждого выходного напряжения. При тепловом контроле узел должен проверяться в различных экстремальных условиях, которые могут возникнуть во время его работы. Для определения этих условий необходимы некоторые дополнительные исследования работы устройства.

Обычно наихудшие условия работы возникают при минимальном входном напряжении и максимальной нагрузке на выходе. Во время процедуры контроля наиболее нагруженная часть узла работает на повышенных входных токах, при этом, например, в источниках питания, выходные выпрямитель и фильтр также работают на повышенных токах. Однако в других случаях (или для некоторых элементов) наиболее тяжелый тепловой режим наблюдается при максимальном входном напряжении.

Спецификации и понимание работы устройства используются для определения того, какие температурные тесты необходимо провести. Некоторые блоки имеют больше потенциальных режимов функционирования, чем другие, и поэтому для того, чтобы гарантировать качество конструкции узла, может потребоваться множество разных тестов.

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 механическим (оптико-механическим), либо электронным способом.

В оптико-механических устройствах отклонение угла зрения производят при помощи колеблющихся или вращающихся оптических элементов (призм, зеркал). Визуализация теплового поля объекта с высоким геометрическим разрешением требует формирования многострочных кадров, поэтому при использовании единичных (или в виде линеек) приемников отдается предпочтение квантовому механизму реакции на инфракрасное излучение, так как быстродействие фотонных приемников составляет около 1 мкс.

Из-за технических трудностей создания быстродействующих высокоинформативных оптико-механических систем сканирующие тепловизоры работают в малокадровом режиме, т.е. в основном подходят для наблюдения неподвижных объектов. Все фотонные приемники (InSb, CdHgTe и др.) для снижения фундаментальных шумов и достижения требуемой пороговой чувствительности по своей природе требуют охлаждения до криогенных температур (например, жидким азотом — до 77 К). Использование микрокомпрессорных или термоэлектрических систем ($T = 160...190$ К) пропорционально ухудшает параметры приемников.

Использование охлаждения существенно снижает автономность оборудования из-за необходимости возобновления запаса хладагента (криогенные тепловизоры), или высокого энергопотребления (термоэлектрические системы). Кроме того, тепловизоры, требующие охлаждения, отличаются сравнительно высокой ценой. Особенно это относится к тепловизорам с



Рис. 4. Вид ячейки с удаленной крышкой корпуса

низкотемпературными термоэлектрическими элементами. К достоинствам же охлаждаемых тепловизоров следует отнести высокое температурное разрешение (до $0,01^{\circ}\text{C}$) и возможность непосредственного измерения абсолютной температуры объекта.

Принцип электронного сканирования был реализован в конце XX-го века в матричных фотодетекторах нового поколения. В англоязычной литературе этот тип фотоприемников называют матрицами, размещаемыми в фокальной плоскости объектива (Focal Plane Array — FPA). Основными преимуществами матричных систем тепловидения являются отсутствие движущихся механических частей и одновременное визирование сцены всеми чувствительными элементами. Последнее преимущество позволяет увеличить время экспозиции каждой чувствительной площадки, т.е. уменьшить шумы и обеспечить одновременное наблюдение быстро меняющихся тепловых событий.

В современных матрицах используются как фотонные, так и тепловые ИК-приемники. Наиболее доступными по цене являются показывающие и измерительные тепловизоры, работающие на неохлаждаемых пироэлектрических и микроболометрических двумерных приемниках теплового излучения (в зависимости от интенсивности теплового излучения в пироэлектрических изменяется уровень поляризации каждого элемента, в болометрических — внутреннее сопротивление).

Для специальных применений, где 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 квип-материалов (QWIP), в частности, арсенида галлия (GaAs).

Лидерами в производстве тепловизионной техники являются Швеция, Англия, Франция, Германия, США и Япония. Среди ведущих производителей оборудования для теплового контроля в первую очередь можно назвать компанию FLIR Systems (США-Швеция, www.flirthermography.com). Компания прошла длительный путь развития и ведет свою историю от шведской фирмы AGEMA Infrared Systems (основана в 1958 г., тогда — фирма AGA). Ее продукция — тепловизионные камеры — уже почти 50 лет работают по всему миру и используются в самых разных областях от технической диагностики и задач обеспечения безопасности до проведения научных исследований и медицинской диагностики.

Среди других крупных и зарекомендовавших себя на мировом рынке производителей тепловизионной техники можно назвать компании CEDIP Infrared Systems (Франция, www.cedip-infrared.com), Raytek UK (Великобритания, www.raytek.com), IRISYS (Великобритания, www.irisys.co.uk), NEC Sanei (Япония, www.metrum.co.uk), Thermoteknix Systems Ltd. (международная компания, www.thermoteknix.com), Land Infrared (международная компания, www.landinst.com), а также российские компании НИИИИ МНПО «Спектр» (spektr6.ru) и ИРТИС (irtis.ru).

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕПЛОВИЗОРОВ

Основными характеристиками тепловизоров являются следующие величины:

- геометрическая разрешающая способность;
- частота смены изображений;
- температурное разрешение (эквивалентная шуму разность температур);
- минимальная разрешаемая разность температур, динамический диапазон сигнала.

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

Частота смены изображений определяется полным временем, в течение которого анализируется поле зрения. Например, если выходной сигнал каждого матричного элемента сканируется в течение $1/30$ с, то частота смены изображений будет соответствовать 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°C ; в паспортных данных тепловизоров температуру эталонного излучателя часто опускают).

С помощью системы «черное тело + мира» определяют порог температурной чувствительности, неравномерность чувствительности тепловизора по полю, а также сходимости показателей тепловизора. С помощью миры с переменной целью определяют пространственное (угловое) разрешение тепловизора, а миры с крестовыми метками — угол поля зрения (см. рис. 5).

Динамический диапазон тепловизоров выражают в децибелах. Кроме того, в паспортных данных теплови-

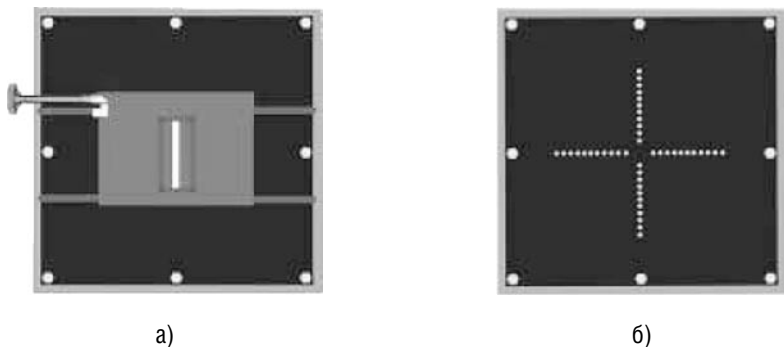


Рис. 5. а) — мира с переменной целью, б) — мира с крестовыми метками

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

При выборе тепловизора для контроля электронных узлов следует учитывать конкретную область применения прибора в электронной промышленности. Необходимо определиться с минимальными размерами исследуемых компонентов: чем меньше объект исследования или его детали, тем большая геометрическая разрешающая способность и большее температурное разрешение необходимы для тепловизора. Например, для исследования печатных плат или блоков в общем случае подойдет тепловизор, позиционируемый производителем как модель для исследований или проведения неразрушающего контроля. Геометрическая разрешающая способность такого тепловизора обычно составляет 320×240 , а температурное разрешение — $0,06^\circ\text{C}$ при 30°C . Например, тепловизоры фирмы FLIR Systems из серии S позиционируются производителем как тепловизоры для исследований и разработки (S Series — Research & Development).

Для проведения диагностики изделий микроэлектроники (например, интегральных микросхем) необходимо выбирать тепловизор с большей геометрической разрешающей способностью и температурным разрешением. Это специальные модели тепловизоров с геометрической разрешающей способностью 640×480 ; температурное разрешение таких тепловизоров может достигать $0,02^\circ\text{C}$, что позволяет визуализировать тепловое поле интегральной микросхемы. Специальные объективы позволяют добиться приемлемого увеличения объектов размером до 5 мкм и визуализировать их тепловые поля.

В каждом случае следует учитывать и индивидуальные параметры исследуемых образцов: в зависимости от рабочей температуры исследуемого образца приходится обращать внимание на регистрируемый температурный диапазон; кроме того, могут быть важны условия эксплуатации, интерфейс взаимодействия с компьютером,

а если необходимо регистрировать изменение теплового поля в динамике, важным параметром является частота смены изображений (так как она определяется полным временем, в течение которого анализируется поле зрения).

Для исследования объектов, по размерам сопоставимых с объектами микроэлектроники, выпускаются специальные модели тепловизоров. Например, у фирмы FLIR Systems существует линейка тепловизоров High-end R&D Infrared Cameras с повышенным температурным разрешением и геометрической разрешающей способностью. Предусмотрена возможность подбора объективов с необходимым увеличением, вплоть до комбинации ИК-камер с микроскопами и возможности исследовать объекты с размером от 5 мкм (см. рис. 6, 7).

МЕТОДИКА ТЕПЛООВОГО КОНТРОЛЯ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

При проведении теплового контроля электронных узлов важнейшей задачей является разработка методики эксперимента и анализа результатов. Однако не менее важной задачей является подбор оборудования в комплексе с программным обеспечением, которые позволят достичь поставленных целей. В качестве примера можно привести установку теплового контроля электронных узлов, разработанную на кафедре «Проектирование и технология электронно-вычислительных средств» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Аппаратной основой комплекса является охлаждаемый тепловизор российской фирмы ИРТИС (термограф ИРТИС2000), который позволяет измерять абсолютные значения температуры и обладает чувствительностью $0,05^\circ\text{C}$ при 30°C . Термограф имеет

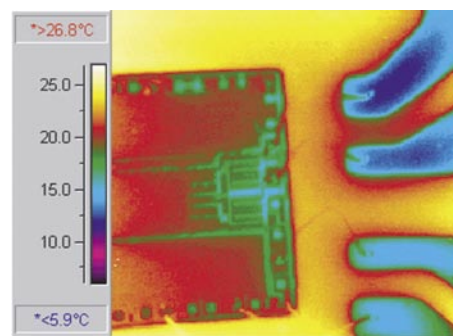


Рис. 6. Изображение микросхемы, полученное тепловизором ThermoCAM фирмы FLIR и показывающее проводники размером 7 мкм [4]

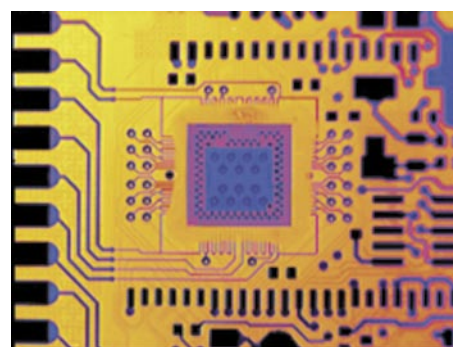


Рис. 7. ИК-камера в сочетании с микроскопом становится ИК-микроскопом, позволяющим исследовать объекты размером до 5 мкм [4]

сетевой интерфейс взаимодействия с компьютером, на котором должно быть установлено программное обеспечение, поставляемое производителем тепловизора, или специализированное программное обеспечение, разрабатываемое кафедрой «Проектирование и технология электронно-вычислительных средств». Структурная схема комплекса представлена на рисунке 8, а вид установки с карманным

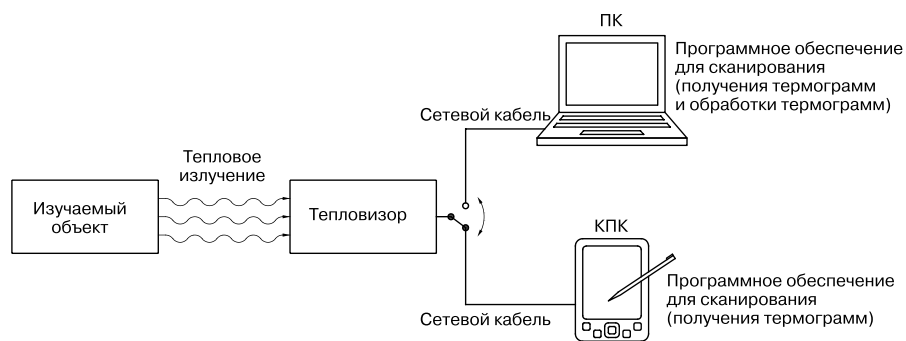


Рис. 8. Схема стенда теплового контроля



Рис. 9. Стенд для проведения теплового контроля на базе термографа ИРТИС2000

персональным компьютером показан на рисунке 9.

Методика должна вырабатываться на основе заранее проведенных расчетов тепловых полей с помощью специализированного программного обеспечения, например, Nastran. На основе рассчитанных данных вырабатываются критерии оценки. Критерии, используемые при определении потенциальных проблем в конструкции электронного узла, представляют собой простые указания, и при использовании требуют обязательной инженерной оценки оператора, проводящего испытание. Некоторые из выводов температурного анализа могут быть основаны на прошлом опыте, тогда как 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

нагружения компонентов. Эти документы дают хорошую точку отсчета для анализа термограмм электронных ячеек.

Приведем методику на примере выявления потенциальных областей проблем для источников питания [2]:

- для каждого термоэксперимента выявите все компоненты с температурами, достигающими 50°C при рабочей (комнатной) температуре 23°C;
- проанализируйте давление и воздушные потоки в области компонентов, у которых температуры превышают 50°C, для определения корректности температурных измерений;
- проанализируйте температуру печатной платы. Например, температура печатных плат из материала FR-4 (Flame Resistant 4) не должна превышать 105°C при наихудших условиях испытаний;
- если в устройстве есть компоненты с особым температурным режимом, такие как мощные резисторы, убедитесь, что они корректно смон-

тированы на плату (с теплоизолирующей прокладкой или зазором);

- проверьте, что температуры компонентов, имеющих в составе магнитные материалы, находятся в заданном диапазоне, и по меньшей мере на 10°C ниже, чем должны быть при наихудших условиях испытаний;

- осмотрите компоненты, монтируемые на поверхность, на предмет превышения ожидаемых температур. Например, повышение температуры на 30°C и более на керамических конденсаторах, возможно, требует замены на менее подверженный тепловым потерям конденсатор;

- проверьте, не нагреваются ли электролитические конденсаторы повышенными пульсирующими составляющими постоянного тока или расположенными рядом греющимися компонентами;

- для полупроводниковых устройств вычислите температуру р-п-перехода. Она может быть вычислена как:

$$T_j = T_c + P_d R_{j-c},$$

где T_j — температура р-п-перехода; T_c — измеренная температура перехода; P_d — мощность, рассеиваемая устройством; R_{j-c} — температурное сопротивление от перехода к корпусу;

- убедитесь, что температура р-п-перехода не превышает установленное максимально возможное значение. Кроме того, из соображений надежности возможно допущение отклонения от максимального значения температуры р-п-перехода. Для большинства полупроводниковых устройств рекомендуется, чтобы температура перехода не превышала 110 °C при работе при наихудших условиях.

На рисунках 10, 11 показаны результаты теплового контроля в виде термограмм с нанесенными температурными флагами в критичных с точки зрения теплового поля местах. Эксперимент проводился с помощью программно-аппаратного комплекса теплового контроля, представленного на рисунке 8, кафедрой ИУ4 «Проектирование и технология производства электронно-вычислительных средств» МГТУ им. Н. Э. Баумана в конструкторском бюро и на производстве ООО «Альтоника». Результаты анализировались в соответствии с заранее рассчитанными тепловыми полями яче-

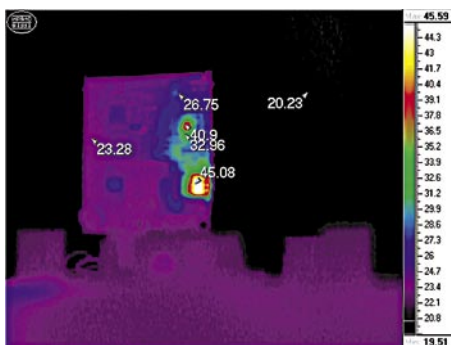


Рис. 10. Тепловое поле ячеек переключателей охранной автомобильной сигнализации, наглядно отражающее локальный перегрев микросхемы

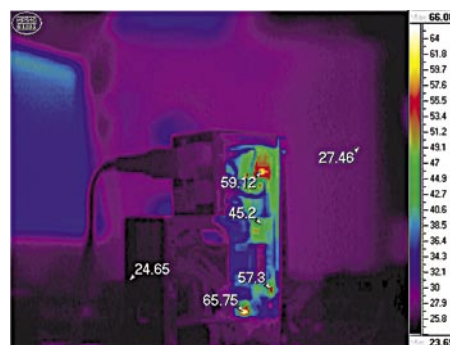


Рис. 11. Тепловое поле блока питания медицинского монитора, наглядно отражающее состояние трех критичных с точки зрения теплового режима компонентов

ек, и делались выводы о соответствии экспериментальных тепловых полей теоретическим, заранее рассчитанным.

ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА АНАЛИЗА РЕЗУЛЬТАТОВ ТЕПЛОвого КОНТРОЛЯ

Как упоминалось, отдельное внимание при использовании тепловизионных средств уделяют поставляемому программному обеспечению, так как оно является мощным средством, предоставляющим дополнительные возможности для анализа результатов теплового контроля. Часто программное обеспечение составляет целый комплекс, который обладает большим количеством функций и позволяет проводить все необходимые действия для получения, анализа, хранения данных о тепловых полях (см. рис. 12).

К стандартным функциям программного обеспечения, поставляемого с тепловизором, относятся средства захвата видео- и дополнительной информации (например, значения температур или коэффициента излучения в некоторых заранее определенных точках). Интерфейс взаимодействия с компьютером может быть как собственным для конкретного производителя, так и стандартным интерфейсом для захвата видео. Например, для операционной системы Windows таким интерфейсом является DirectShow, при этом если требуется передача дополнительной информации, то чаще всего используют порт RS-232 или USB и передают данные в заранее определенном и специфицированном формате. Наличие спецификаций на интерфейс взаимодействия прибора с компьютером может быть важным в случае, когда планируется разработка собственных средств обработки и анализа изображений.

Программное обеспечение обычно обладает также функциями обработки изображений: уменьшением шумов, увеличением резкости, коррекцией контраста и яркости, видоизменением гистограмм и другими стандартными функциями обработки изображений.

К наиболее важным функциям программного обеспечения относится возможность проведения температурного анализа. Помимо возможности измерения температуры в произвольной точке, обычно предоставляется функция построения изотерм, оп-

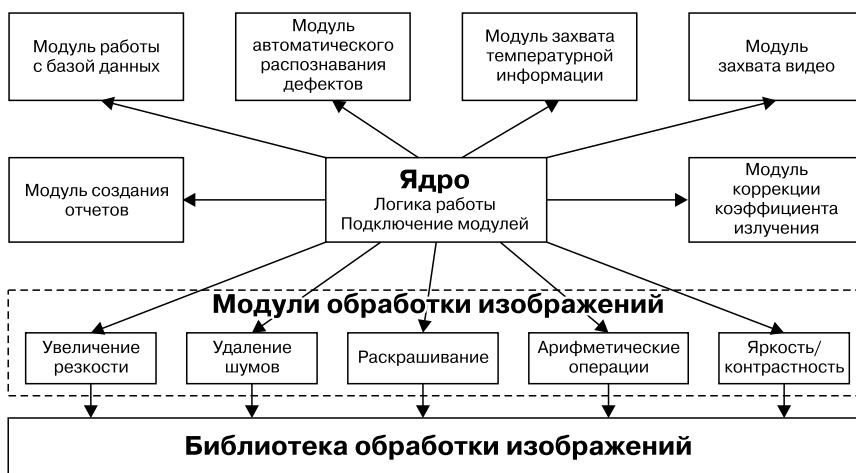


Рис. 12. Структурная схема программного комплекса системы теплового контроля

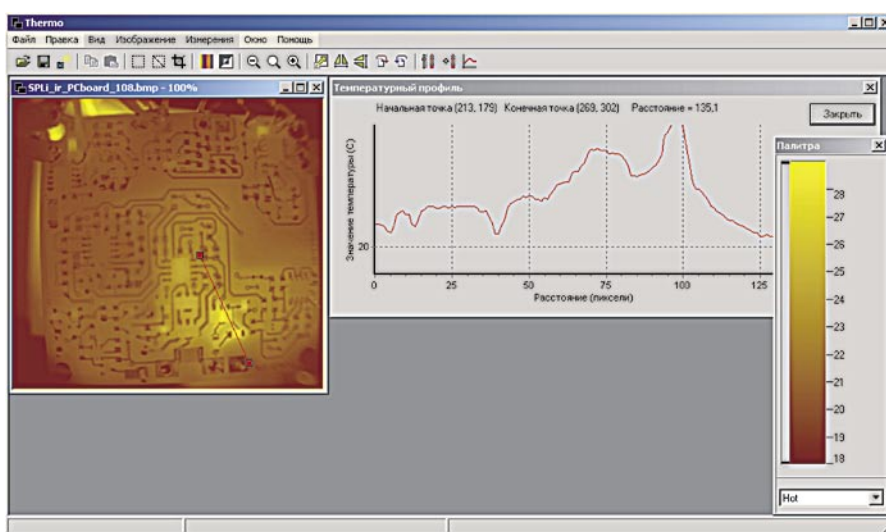


Рис. 13. Окно программы Thermo (ИУ4 МГТУ им. Н. Э. Баумана) с температурным профилем, построенным для критического участка печатной платы

ределения критических значений температуры и их нанесения в виде флагов или изотерм на изображение. Кроме того, часто программное обеспечение снабжено функцией построения температурного профиля вдоль линии, соединяемой двумя точками, — кривой, на которой отмечается значение температуры в зависимости от дистанции до начальной точки (см. рис. 13).

Некоторые программы снабжены функциями записи последовательности термограмм, что позволяет просматривать изменение теплового поля в динамике, строить графики его изменений.

Любое программное обеспечение позволяет производить раскрашивание термограммы в псевдоцвета, что облегчает восприятие температурной информации, заложенной в термограмме.

Как уже упоминалось выше, некоторые производители тепловизионной техники поставляют программное обеспечение, которое позволяет производить более точное измерение температуры за счет более точного вычисления коэффициента излучения. При тепловом контроле электронных узлов функция вычисления коэффициента излучения является предпочтительной для программного обеспечения. Также в качестве отдельной программы обычно поставляется средство автоматического построения отчетов о проведенном исследовании или тесте.

ПРИМЕРЫ ВНЕДРЕНИЯ СИСТЕМ ТЕПЛОвого КОНТРОЛЯ ЭЛЕКТРОННЫХ УЗЛОВ

Пионером внедрения теплового метода контроля в электронной промышленности стала фирма IBM. По-

сле разработки персональной ЭВМ в 1981 г. началось широкое распространение компьютеров во всех областях деятельности человека. Вычислительная мощность год от года росла, а развитие технологии позволяло достигать новых уровней интеграции и уменьшения размеров. При этом актуальными стали проблемы обеспечения теплового режима.

Бесконтактный тепловой контроль используется фирмой IBM с 1983 г. на стадии разработок и исследований для проверки конструкции источников питания и печатных плат устройств. При этом IBM пришлось решить множество проблем, связанных с контролем электронно-вычислительных средств, например упомянутую выше проблему выравнивания излучательной способности печатной платы посредством нанесения порошкообразного вещества на всю поверхность платы, а также проблему исследования блоков электронной аппаратуры, помещенных в корпус, — посредством замены крышек корпусов крышками из прозрачных материалов [2].

Первым тепловизором, который использовался в IBM, был Hughes Probeur, и он требовал в процессе работы использования аргона для охлаждения. Эта камера быстро зарекомендовала себя как полезный инструмент в обнаружении точек и областей с подозрениями на неисправность, а также стала полезным инструментом в анализе отказов. Например, можно упомянуть ее применение для обнаружения коротких замыканий в гибких кабелях первых 5 1/4"-жестких дисков. Поскольку камера не обладала достаточным разрешением, а оборудование

и сам процесс анализа были слишком громоздкими, главным продолжал оставаться метод с использованием термопар, а метод термографического анализа продолжал оставаться экспериментальным.

В 1990 г. IBM закупила камеру Inframetrics 760 с программным обеспечением ThermaGram. Разрешение камеры и возможности анализа были достаточными для идентификации экстремальных точек и температурного анализа конструкций устройств (в то время — источников питания). Преимущества использования термопар для всех компонентов были перекрыты возможностями новой камеры, а недостатки по сравнению с новым методом стали очевидны, и после нескольких проверочных испытаний было решено полностью перейти на бесконтактный тепловой контроль. Термопары стали использоваться только для тех компонентов, бесконтактный контроль которых был затруднен.

Фирма Intel также применяет тепловой метод контроля для исследования эффективности систем охлаждения своих процессоров, а также конструкции материнских плат на стадии разработки, однако методики, которые она использует, более закрытые, чем в IBM.

Среди других мировых гигантов можно назвать фирму Ericsson (Швеция), которая применяет тепловой контроль для диагностики электронных микросхем. Специалисты этой компании опубликовали отчет о том, что интегральные схемы, на корпусе которых отсутствуют локальные перегревы, имеют больший срок службы. Они также проводили более сложный

контроль внутренних дефектов микросхем, характеризующихся слабыми температурными сигналами.

Можно также привести в пример опыт компании Radio Systems Sweden (Швеция), которая оптимизировала системы мобильной телефонной связи путем термографирования электронных стоек, для которых прежний способ контроля (на ощупь) оказался неэффективным.

ВЫВОДЫ

Бесконтактный тепловой контроль с успехом применяется в электронной промышленности, как на стадии разработки устройств — для поиска дефектов конструкции, так и в серийном производстве — для выявления бракованных изделий. Бесконтактный тепловой контроль имеет ряд преимуществ по сравнению с контактным контролем (термопарами), а с развитием средств ИК-диагностики (тепловизоров) и появлением современных компактных высокочувствительных ИК-камер отлично зарекомендовал себя как высокоэффективный способ диагностики тепловых полей электронных средств.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Невразрушающий контроль. В 7 т. Т. 5. Тепловой контроль. Под ред. Клюева В.В.*//М: Машиностроение, 2004.
2. Richard J. Fishbune, «Infrared Thermography for Electronic Assembly Design Verification»//IBM Power Technology and Qualification, 2000, 7 p.
3. Сайт фирмы ИРТИС//irtis.ru.
4. Сайт фирмы FLIR Systems//flirthermography.com.
5. Сайт фирмы CEDIP//www.cedip-infrared.com.