

УДК 621.317.3 : 621.384.3 : 621.391.82

Л. А. КОРИНЕВСКИЙ, И. Ф. ПЕТРОВ

(Киев)

**О МЕТОДАХ БЕСКОНТАКТНОГО КОНТРОЛЯ
И ДИАГНОСТИКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ
РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ***

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БЕСКОНТАКТНЫХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ
ДЛЯ ЛОКАЛИЗАЦИИ ОТКАЗОВ**

Требования, предъявляемые к современным сложным радиоэлектронным комплексам в отношении времени локализации отказов и глубины контроля, заставляют во многих случаях применять специальные системы автоматического контроля. Эти системы осуществляют контроль многих сотен, а в некоторых случаях и тысяч параметров. В качестве сигналов состояния в основном используются напряжения постоянного, переменного или импульсного токов, которые получаются в результате преобразования физических параметров объекта контроля. Как правило, эти сигналы выводятся на разъемы блоков и далее после предварительного уплотнения или без уплотнения на вход информационно-логического автомата контроля, где осуществляется сравнение полученных сигналов с эталонными, хранящимися в памяти автомата, логическая обработка результатов контроля, индикация и регистрация состояния объекта.

При реализации рассмотренной выше классической схемы съема и обработки контрольной информации приходится сталкиваться с рядом серьезных трудностей. Одной из основных проблем является вывод на разъемы блоков контрольных сигналов в количестве, не уступающем числу рабочих сигналов, а во многих случаях и превосходящем его. При этом приходится применять меры для уменьшения обратной реакции огромного количества измерительных цепей на рабочие. Несмотря на все технические ухищрения, такие схемы съема информации получаются недостаточно надежными и, что самое главное, ухудшают надежность объекта контроля. Известные системы автоматического контроля осуществляют локализацию отказа в лучшем случае до блока (кассеты) или крупного функционального узла. Более детальная локализация отказа до съемного элемента осуществляется, как правило,

* Более подробный обзор по технической диагностике и соответствующая библиография опубликованы ранее («Автометрия», 1965, № 1), поэтому во избежание повторения редакция сочла возможным в этом номере ограничиться рассмотрением некоторых специальных вопросов диагностики.

вручную с использованием серийных или специализированных измерительных приборов. Для поиска неисправности производится последовательно опрос контрольных точек и анализ полученной информации. Нахождение требуемой контрольной точки в блоке и подключение к ней соответствующего измерительного прибора, а в некоторых случаях изъятие подозреваемого элемента и замена его заведомо исправным являются весьма трудоемкими операциями, оказывающими существенное влияние на быстродействие системы поиска неисправностей.

Попытки автоматизировать процесс поиска отказавшего элемента в блоке успеха не имели в основном из-за трудностей съема информации практически с каждого элемента схемы. Эти трудности как в автоматических системах доблочного поиска, так и в неавтоматических системах поиска отказавшего элемента могли бы в известной степени быть преодолены при использовании методов бесконтактного контроля.

Одним из наиболее простых и очевидных принципов, на котором может быть построена система бесконтактного контроля, является использование промежуточного преобразования сигналов состояния в электромагнитное излучение с последующим приемом и обратным преобразованием к виду, удобному для обработки. Для этой цели непосредственно в контрольных точках можно расположить соответствующие устройства, преобразующие имеющиеся в этих точках напряжения — постоянные, переменные или импульсные — в электромагнитное излучение.

Признаками, по которым может быть произведена идентификация контрольных точек, являются несущая частота излучаемого сигнала и координаты точки в пространстве. Информация же о величине и характере сигнала может быть передана путем соответствующей модуляции несущей частоты. При выборе рабочего диапазона длин волн, на котором осуществляется бесконтактный съем информации, приходится учитывать несколько факторов.

Первый из них — это возможность реализации в габаритах контролируемых блоков приемной и передающих антенн, удовлетворяющих поставленным требованиям, и особенно необходимости совмещения передающих антенн с каждым преобразователем.

Второй фактор — возможность реализации преобразователей достаточно простых, малогабаритных и надежных для того, чтобы можно было решить разместить многие десятки таких преобразователей в каждом блоке. При этом необходимо, чтобы преобразователь не нуждался в питании (от посторонних источников). Желательно также, чтобы к. п. д. преобразователя был достаточно высок.

Третий фактор связан с решением вопросов электромагнитной совместимости рабочих и контрольных устройств, а четвертый — с конструкцией объектов контроля, определяющей возможности взаимного расположения преобразователей — излучателей и приемных датчиков, чувствительных к контрольным сигналам.

Проведенный анализ и имеющиеся в литературе данные показывают, что в большинстве случаев целесообразно преобразовывать контрольные сигналы в электромагнитное излучение инфракрасной, видимой и ультрафиолетовой областей. В качестве преобразователей в инфракрасное излучение можно использовать диоды из GaAs. Для преобразования контрольных сигналов в видимый свет могут найти применение лазерные диоды. Здесь же в блоке на небольшом расстоянии от преобразователей должны располагаться приемные элементы, чувствительные к инфракрасному излучению, видимому или ультрафиолетовому, в зависимости от того, какой преобразователь они обслужи-

вают. С выхода приемных детекторов, осуществляющих обратное преобразование инфракрасного и видимого излучений в напряжение постоянного, переменного и импульсного тока, сигналы поступают на вход информационного логического автомата. Съем сигналов с выходов датчиков производится по классической схеме через выходные разъемы блока.

Возможен и другой путь, когда приемные детекторы размещаются вне блока, а транспортировка электромагнитных сигналов осуществляется с помощью волоконной оптики. В этом случае приходится в блоке предусматривать специальный выход для пучка волокон (дополнительный оптический разъем). И, наконец, можно представить себе блок, имеющий оптическое устройство, проектирующее изображение всех преобразователей на приемные датчики, расположенные вне блока.

Все рассмотренные выше способы реализации системы автоматического бесконтактного контроля отличаются от классических контактных схем лишь введением дополнительного звена: преобразования контрольных сигналов в электромагнитное и обратного преобразования электромагнитного излучения в контрольные сигналы удобной для обработки формы. Главным преимуществом такого вида контроля перед контактным является отсутствие обратной реакции измерительных цепей на рабочие.

Однако возможности бесконтактного контроля в общем случае не ограничиваются этим преимуществом. Дело в том, что состояние объекта контроля характеризуется, кроме определенного сочетания постоянных, переменных и импульсных напряжений в контрольных точках, еще целым рядом дополнительных признаков. Так, нормальная работа как подвижных, так и неподвижных элементов характеризуется определенным характером и уровнем шума. Гудение трансформаторов, стук поршней, звук вращающихся в подшипниках валов очень много говорят опытному оператору о состоянии аппаратуры. Прием и статистическая обработка акустических сигналов позволяют не только определить факт изменения состояния, но и указать характер и место неисправности, вызвавшей это изменение.

Анализ образа объекта не только в звуковой, но и в ультразвуковой области еще больше расширяет возможности технической диагностики. Примером применения пассивной ультразвуковой системы в технической диагностике может служить установка [1], которая, используя ультразвуковые детекторы в диапазоне 33—44 кГц, по шумам, создаваемым коронным разрядом и пробоями высокого напряжения, обнаруживает некачественные телевизионные трансформаторы. С помощью этой же установки обнаруживается нарушение изоляции (контроль утечек) и недопустимое трение в подшипниках.

Переход в область более высоких радиочастот позволяет получить дополнительную информацию о состоянии объекта диагностики. Так, расширяя диапазон принимаемых и анализируемых сигналов до области коротких волн (10—30 МГц), можно легко обнаружить переменные (неустойчивые) контакты как в монтаже, так и в радиокомпонентах объекта контроля. Однако, если сигналы в звуковой и ультразвуковой областях спектра получаются без всякой стимуляции находящегося под током объекта контроля, то для получения радишумов, как правило, приходится подвергать объект контроля вибрациям или ударам. Источником радишума является искровой разряд, возникающий при вибрациях или постукивании по монтажу, в месте переменного контакта. Для приема сигналов может использоваться широкополосный приемник. По имеющимся сведениям, такие приемники серийно выпуска-

каются фирмой Хонниуэлл и находят довольно широкое применение в системах технической диагностики. Устройство, выпускаемое этой фирмой [2], представляет собой приемник прямого усиления, состоящий из каскадов УВЧ и УНЧ. В устройстве предусмотрен выход на телефоны и измерительный прибор. Полоса пропускания приемника 22—30 МГц, коэффициент шума 4 дБ, коэффициент усиления $K=150$ дБ. В качестве приемных антенн используются: рамочная — для фиксации самого факта неисправности и щуп — для локализации отказа с точностью до элемента. Для уменьшения уровня шумов и помех от сети питание осуществляется постоянным током. Проверка блока средней сложности занимает около 2 минут, обнаружение отказавшего элемента — до 10 минут. Хотя переменный контакт в принципе можно обнаружить

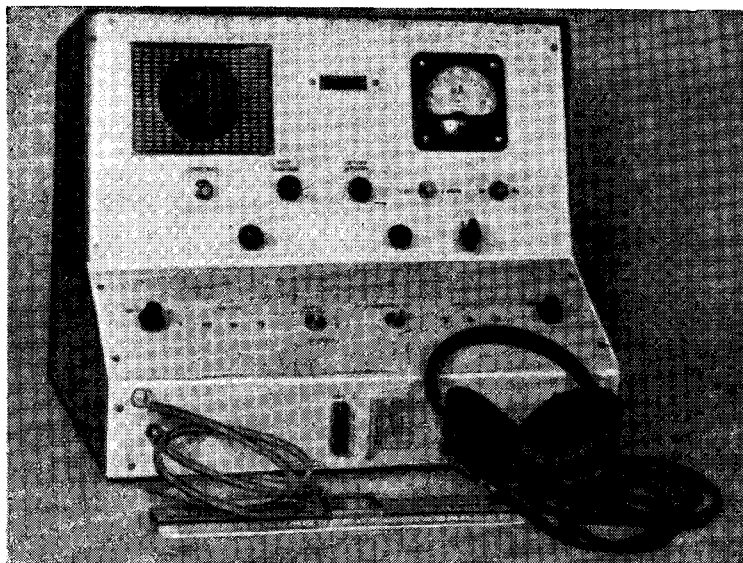


Рис. 1.

включением измерителя тока в разрыв соответствующей цепи, бесконтактный метод контроля по радишуму по сравнению с контактным методом требует гораздо меньше времени, не говоря уже о трудностях, связанных с необходимостью распайки элементов устройства для включения измерительных приборов. Особенно преимущества бесконтактного метода контроля переменных контактов по радишумам становятся ощутимыми при проверке сложных устройств.

Прибор для контроля неустойчивых контактов по уровню радишумов был разработан и изготовлен авторами. Внешний вид прибора приведен на рис. 1. Кроме контроля с помощью головных телефонов и измерительного прибора, предусмотрен контроль по динамическому громкоговорящему, и имеется устройство допускового контроля, срабатывающее и выдающее сигнал «неисправность» при превышении шумами заданного уровня. Уровень срабатывания устанавливается с помощью специального потенциометра, выведенного под шлиц на переднюю панель. В приборе предусмотрен также выход на осциллограф для проведения работ по определению места неисправности не только по интенсивности, но и по виду и характеру шумового сигнала.

Предварительные исследования говорят о принципиальной возможности проведения такого различия. Так, например, неустойчивые контакты в полупроводниковых приборах, которые нам удалось обнаружить, являлись источником специфического сигнала, заметно отличающегося от сигнала, вызванного неустойчивыми контактами в монтаже и сопротивлениях.

Опыт использования прибора при исследованиях неустойчивых контактов выявил ряд трудностей, связанных с методом контроля по радишумам. Так, выяснилось, что использование рамочной антенны, позволяющей быстро локализовать отказ с точностью до блока, затруднено из-за влияния помех со стороны вещательных и служебных станций, работающих в диапазоне 10—15 м. Для того чтобы эффективно использовать рамочную антенну для обнаружения неустойчивых контактов, необходимо работать в экранированной камере. Разработанный нами зонд позволяет обойтись без экранированной камеры, но дает заметный сигнал только в непосредственной близости от неустойчивого контакта. Это очень удобно для детальной локализации отказа, но увеличивает время, необходимое для установления факта отказа в блоке.

Исследования спектра радишумов при неустойчивых контактах в различных элементах показали, что спектр радишума не ограничивается полосой 20—30 Мгц. Как и следовало ожидать, радишум, источником которого фактически является искровой разряд, распределен приблизительно равномерно в диапазоне 20—60 Мгц и имеет достаточную спектральную плотность в значительно более широком диапазоне. Максимумы спектральной плотности шума, различные для разных видов неустойчивых контактов, по-видимому, определяются полостью, в которой происходит искровой разряд.

Следующим участком электромагнитного спектра, позволяющим существенно расширить наши знания о состоянии объекта контроля, оказалась инфракрасная область. Дело в том, что электрический ток, протекающий через элементы цепи, всегда частично преобразуется в электромагнитное излучение инфракрасного диапазона. Это излучение, как известно, бывает двух видов — тепловое некогерентное излучение, зависящее от температуры детали и эмиссионной характеристики ее поверхности, и излучение, связанное с рекомбинацией пар электронов с дырками. Рекомбинационное инфракрасное излучение пропорционально току, протекающему через полупроводник. Обычно оно лежит в диапазоне 1—6 мк [3], в то время как тепловое излучение при наиболее распространенных температурах радиодеталей занимает участок 7—10 мк.

Следует подчеркнуть, что, так же как и акустические шумы, инфракрасное излучение является признаком состояния объекта контроля, проявляющимся без специального стимулирования. Фактически каждый элемент устройства совмещает в себе рабочие функции с функциями контрольного преобразователя. Каждый элемент схемы дает информацию о своем состоянии в виде электромагнитного излучения в инфракрасной области. Причем, если в пассивных элементах, таких, как сопротивление, инфракрасное излучение является интегральной характеристикой протекающего через сопротивление тока, выявляемой через мощность рассеивания, то инфракрасное излучение полупроводников может нести информацию даже о величине каждого импульса протекающего через них тока. В качестве чувствительных приемных устройств можно использовать промышленные телевизионные установки, снабженные дополнительно электронно-оптическими преобразователями в инфракрасной области. Полученное на экране электронно-луче-

вой трубки изображение является образом объекта контроля в инфракрасной области. Этот образ в отличие от характеристики объекта, та сравнением полученной фотографии с фотографиями, соответствующими различным отказам. Эти фотографии могут быть получены как в результате облучения в процессе эксплуатации, так и путем создания искусственных неисправностей. В настоящее время для получения инфракрасного образа объекта используют инфракрасные радиометры со сканированием. Такие радиометры серийно выпускаются как в нашей стране, так и за рубежом.

При записи выходного сигнала инфракрасного радиометра на самописец по оси абсцисс откладывается координата точки, опрашиваемой в известный момент времени, а по оси ординат уровень инфракрасного излучения — величина тока, протекающего через эту точку (вернее — ее температура). Типичный вид такого графика приведен на рис. 2, а. На рис. 2, б дается вид платы с элементами и указывается линия, по которой осуществляется сканирование. Жирной линией отмечен уровень инфракрасной радиации, соответствующей исправному состоянию объекта контроля.

Процесс локализации отказа сводится к сравнению полученного уровня радиации с эталонным. Этот процесс может быть автоматизирован, если сигнал инфракрасного радиометра ввести в информационно-логическую машину, которая будет осуществлять сравнение текущего уровня с имеющимися в ее памяти эталонными значениями.

В любом случае как телевизионный метод, так и метод, использующий инфракрасные радиометры с механическим сканированием, является относительно сложным. Поэтому маловероятно, чтобы они смогли уже сегодня найти широкое применение во встроенных системах автоматического контроля. Использование же указанных методов при локализации неисправности с точностью до элемента, т. е. после того как автоматической системой найден неисправный блок или узел, сулит большие выгоды.

Обычные контактные методы отыскания неисправного элемента, основанные на измерении токов, напряжений и сопротивлений в характерных точках, как правило, требуют замены или отсоединения тех деталей, которые предполагаются поврежденными. В устройствах, подобных платам вычислительных машин, содержащих сотни и даже тысячи деталей, обнаружение неисправности может потребовать многих часов. Между тем инфракрасный образ такой платы может быть получен за несколько минут, а процесс сравнения полученного изображения с эталонным легко может быть автоматизирован. Таким образом, поиск неисправностей по уровню инфракрасного излучения рабочих деталей обеспечивает большее быстроедействие по сравнению с известными контактными методами. Достоинством этого метода является также и то, что для его реализации не требуется встраивания специальных контрольных элементов и практически исключается обратная реакция измерительных цепей на рабочие.

Наиболее полно преимущества метода контроля по инфракрасному изображению проявляются при проверке интегральных и микросхем, где известные контактные методы практически неприменимы, если тре-

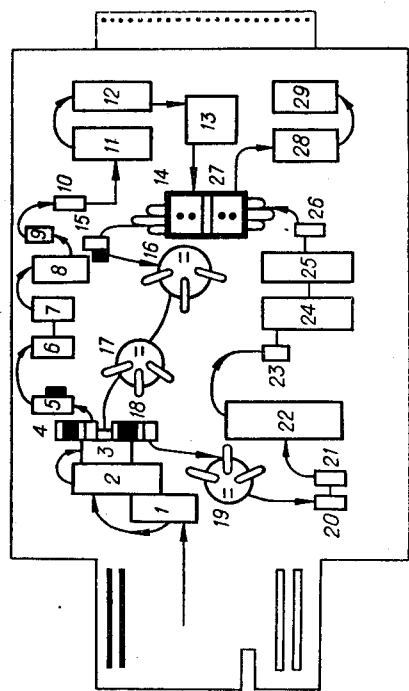
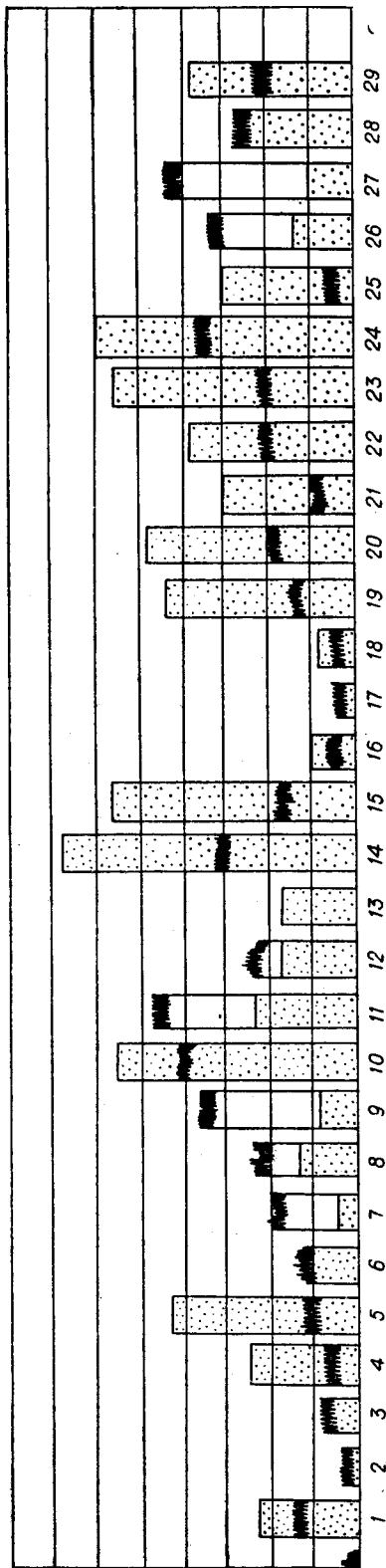


Рис. 2.

5

буется достаточно точно локализовать отказ. Сочетание микроскопа с инфракрасным радиометром позволяет решить задачу получения инфракрасного образа интегральных и микросхем. В литературе, например в [4], приводятся описания таких установок.

Метод контроля с использованием инфракрасного образа находит все более широкое применение главным образом потому, что информация о состоянии элементов выдается нам как бы «бесплатно». В каждой детали совмещены рабочие функции с функциями генератора инфракрасного излучения, несущего необходимую информацию.

Жесткое излучение, сопровождающее работу высоковольтных ламп, ультрафиолетовый или видимый свет в некоторых случаях также могут служить источниками «бесплатной» информации.

Естественно, что если существуют и другие признаки состояния, то их использование может дать дополнительную информацию о поведении объекта контроля и еще больше расширить объем наших знаний, необходимых для диагностики технического состояния объекта.

ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БЕСКОНТАКТНЫХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТА КОНТРОЛЯ

Отдавая должное возможностям использования некоторых вторичных признаков состояния для ускорения и упрощения процесса локализации отказов, следует остановиться на второй, не менее важной стороне этого вопроса — возможности использования информации, носителями которой являются эти признаки, для прогнозирования состояния объекта контроля.

Дело заключается в том, что чаще всего отказ того или иного элемента вызывается наличием определенных производственных или иных дефектов элемента, таких, как чужеродные включения, микротрещины, недостаточно хорошие контакты и т. п. Эти дефекты имеют место в элементе задолго до наступления отказа и являются причиной того, что в условиях определенных механических, климатических, электрических и других видов перегрузок, возникающих иногда случайным образом, ослабленные этими скрытыми дефектами элементы отказывают. Своевременное обнаружение таких скрытых дефектов позволило бы изъять «подозрительные» элементы и тем самым уменьшить число отказов аппаратуры.

Очень часто имеющиеся скрытые дефекты в работающем элементе не вызывают изменения его основных параметров. Поэтому широко используемые методы контроля по величине падения напряжения между электродами элементов и величине тока, протекающего через электроды, не позволяют обнаружить индивидуальных различий между элементами, вызванных указанными выше дефектами. Эти дефекты составляют, так сказать, тонкую структуру элемента, и для ее распознавания, очевидно, нужно использовать другие признаки и явления.

Работы, проведенные в течение последних нескольких лет, показали, что в качестве таких тонких признаков можно использовать образ элемента в инфракрасной области. Первые зарубежные публикации о возможности использования образа элемента в инфракрасной области для обнаружения скрытых дефектов появились в начале 60-х годов.

Отличаются ли инфракрасные характеристики элементов, одинаковых с точки зрения других методов контроля в такой степени, чтобы это можно было заметить, проверялось на ряде элементов. Исследова-

нию подвергались в основном различные типы сопротивлений и транзисторов, признанных годными при проверке обычными методами. Несмотря на то, что подбирались элементы, характеристики которых, полученные по известным методикам, были практически одинаковыми, в инфракрасной области обнаруживались существенные индивидуальные различия. В частности, при проведении испытаний на надежность в первую очередь отказывали элементы, уровень инфракрасной радиации которых отличался от среднего уровня, характерного для большинства проверенных элементов.

По имеющимся данным [5—7], исключение из состава аппаратуры элементов с уровнем инфракрасной радиации, отличным от среднего, позволило бы избежать от 10 до 36% всех отказов.

Еще больше информации о состоянии элемента, чем его интегральная инфракрасная характеристика, может дать исследование распределения уровня инфракрасной радиации вдоль поверхности детали. Такая характеристика дает возможность определить неоднородности в структуре элемента, вызывающие появление отдельных точек и участков с повышенным или пониженным уровнем радиации (отступление от монотонности). При испытаниях на надежность прежде всего отказывали элементы с несимметричным инфракрасным профилем [5]. Эффективность такой методики также проверялась путем введения искусственных дефектов в сопротивления [8]. При этом наблюдалось нарушение монотонности профильной характеристики.

Интересно отметить, что методы контроля и прогнозирования по образу объекта контроля в инфракрасной области применимы не только к радиоэлектронным элементам, но и к механическим узлам. С их помощью можно выявить такие дефекты, как местные перегревы в двигателях, плохие соединения, микротрещины и т. п. Если эти элементы сами не являются источниками инфракрасной радиации, контроль осуществляется путем создания теплового потока через исследуемую деталь.

Инфракрасные характеристики объекта являются далеко не единственными признаками, раскрывающими тонкую структуру элементов и позволяющими прогнозировать их состояние без контакта измерительной аппаратуры с объектом контроля. Так, в [9] указывается, что результаты проверки эффективности обнаружения скрытых дефектов по уровню радишумов на 10 000 конденсаторов и 20 000 диодов показали, что интенсивность отказов элементов с повышенным уровнем шума (таких оказалось 1%) превышает интенсивность отказов элементов со средним уровнем шума в 3—5 раз, что дает принципиальную возможность уменьшить общее число отказов за счет изъятия из объектов контроля элементов с повышенным уровнем шума.

Еще больший эффект можно получить, анализируя не только уровень, но и характер радишума. Сочетание метода прогнозирования состояния объектов контроля по их образам как в области радишумов, так и в инфракрасной области может оказать существенную помощь делу повышения надежности.

Основное достоинство этих методов — возможность получения большого объема информации без контакта измерительной аппаратуры с объектом контроля и без необходимости изъятия отдельных элементов для проверки. Это существенно упрощает процесс проверки и позволяет проводить ее не только при входном контроле элементов, но и при испытаниях уже собранных блоков в заводских условиях и, что особенно важно, в полевых условиях при проведении различного рода периодических проверок и регламентных работ.

ременных и импульсных напряжений являются недостаточными для обеспечения современных требований по безотказности и ремонтпригодности. Существенный эффект в этой области может быть достигнут за счет дополнения традиционных методов контроля бесконтактными методами контроля по вторичным признакам, несущим информацию не только о выходных параметрах элементов, но и о наличии у них скрытых дефектов.

Предварительные данные говорят о возможности использования для этой цели изучения элементов объектов контроля в инфракрасной области, в областях радишумов, акустической и ультразвуковой.

Возможности и методы использования этих признаков заслуживают пристального внимания, и их тщательное изучение является, по нашему мнению, экономически целесообразным.

ЛИТЕРАТУРА

1. Установка для обработки шумящих компонент. Новые изделия.— Электроника, 1966, № 7.
2. Приемник для контроля неисправностей. Обзорение электронной техники.— Электроника, 1965, № 20.
3. R. Vangetti. Infrared: a New Approach for Higher Reliability.— IEEE Tr. on Aerospace, 1963, v. AS-1, p. 2, № 2.
4. R. Yoder. Thermography Infrared Photography.— EDN, 1965, May.
5. Lewin T. Baker. Chening out the Big Systems.— Space/Aerounautics, 1963, v. 40, № 1.
6. Philip J. Klass. Use of Infrared Testing Techniques Grows.— Aviation Week, 1964, Space Technology, 1962, v. 77, № 23.
7. Philip J. Klass. Component Failures Predicted by Infrared.— Aviation Week and v. 80, № 18.
8. Н. А. Бекешко, П. К. Ошепков. Инфракрасный метод обнаружения скрытых дефектов в сопротивлениях.— Дефектоскопия, 1965, № 5.
9. Philip J. Klass. R. F. Probe Finds Intermittent Connections.— Aviation Week and Space Technology, 1965, v. 83, № 14.

*Поступила в редакцию
14 февраля 1967 г.,
окончательный вариант —
27 апреля 1967 г.*