

10. Шаталов А. А., Ястребков А. Б., Селезнев Б. Н. Быстродействующие алгоритмы адаптации многомерных выбеливающих фильтров // Радиотехника и электроника. – 1984. – Т. 29, № 1.
11. Ахмед Н., Йоун Д. Х. О реализации единичного нижнего треугольного преобразования // Proceedings of the IEEE. – 1979. – Т. 67, № 11. – С. 106–107.
12. Воеводин В. В., Кузнецов Ю. А. Матрицы и вычисления – М.: Наука, 1984.
13. King S. Y., VLSI array processors, Prentice Hall, 1988.
14. Efremov V. S., Solovyev A. G. Anti-Clutter Technique and Algorithms for Air Traffic Control Radars. India, International radar conference, IRSI 2001.
15. Bendersky G. P., Efremov V. S., Sverdlov B. G., Sedletsky R. M. Adaptive MTD for Air Traffic Control Radars. India, International radar conference, IRSI 2005.

Статья поступила в редакцию 25.10.2006



Вячеслав Самсонович Ефремов родился в 1945 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1969 г. Канд. техн. наук, первый заместитель генерального директора, главный инженер ОАО “Конструкторское бюро “Лианозовские радары” (ОАО “КБ “Лира”). Автор более 40 научных работ в области радиолокации и теории обнаружения сигналов на фоне помех.

V.S. Yefremov (b. 1945) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1969. Ph. D. (Eng.), 1st deputy general director – chief engineer of the stock-joint company “KB “Lira”. Author of more than 40 publications in the field of radiolocation and theory of signal detection against noise.

УДК 53.083.8

В. Н. Дианов

ДИАГНОСТИКА СБОЕВ В ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЕ

Рассмотрены новые методы активной диагностики при обнаружении и регистрации сбоев в аппаратуре – вычислительной технике, датчиках, исполнительных механизмах, оптико-электронных комплексах. Предложена совокупность информативных признаков для обнаружения и регистрации источников сбоев: соединителей, контактирующих узлов БИС и СБИС, контактных проводников печатных плат (включая многослойные), интерфейсных шин, неэкранированных одно- и многожильных проводов, шин заземления и электропитания, клемных колодок, мест паяк. Приведены результаты исследования сбоев на физических моделях элементной базы аппаратуры, в том числе с учетом электромагнитной совместимости.

Развитие элементной базы, усложнение программного обеспечения решаемых задач и ужесточение условий эксплуатации современной аппаратуры (вычислительной техники, датчиков, исполнительных

механизмов, оптико-телевизионных комплексов и др.) требуют совершенствования существующих и поиска новых подходов к повышению надежности. Особо много проблемных вопросов возникает при создании высоконадежной аппаратуры для объектов ракетной, космической и авиационной техники, в частности, при обеспечении высоких требований безотказности и долговечности в условиях воздействия сверхнизких и сверхвысоких (до сотен градусов) температур и высоких уровней нагрузок [1]. Среди перечня отказов аппаратуры самыми проблемными для контроля и диагностики следует признать перемежающиеся отказы, называемые также кратковременными, скрытыми, плавающими, самоустраняющимися или мерцающими отказами. Такие отказы приводят к сбоям в работе всего оборудования и могут привести не только к существенным материальным потерям, но и к человеческим жертвам. Под сбоем понимают самоустраняющееся нарушение нормального функционирования аппаратуры вследствие кратковременных воздействий внешних и внутренних факторов на некоторый элемент (или совокупность элементов).

В последнее время проблеме уделяется повышенное внимание. Так, например, одной из важнейших характеристик автономной системы навигации в создаваемой сегодня международной космической станции является ее устойчивость к сбоям, причем приоритетность задач обеспечения высокой надежности по параметру сбоев выше, чем приоритетность задач управления объектами, классически стоявших на первом месте [2].

На современном этапе в отечественной теории и практике исследования и изучения сбоев можно указать четыре направления, которые не только успешно развиваются, но и имеют значительный национальный приоритет. К этим направлениям относятся:

- 1) методы активной диагностики сбоев;
- 2) роль и место сбоев в методах электромагнитной совместимости;
- 3) методы интеллектуальной диагностики сбоев в современных сложных системах;
- 4) сбои в современных оптико-электронных системах.

Отметим, что при развитии направления повышения надежности аппаратуры посредством обнаружения, диагностики и регистрации источников сбоев как методов активной диагностики отечественный приоритет базируется на работах [3–12].

Методы активной диагностики сбоев. При разработке аппаратуры, имеющей в своем составе большое (до нескольких тысяч и десятков тысяч) число потенциальных источников сбоя (многоконтактные соединители, контактирующие устройства БИС и СБИС, печатные

проводники, линии связи — интерфейсные шины, шины электропитания и заземления и т.д.), ключевой проблемой кардинального повышения надежности является диагностика сбоев, что непосредственно связано с обнаружением и регистрацией источников сбоев в аппаратуре.

Анализ отечественных и зарубежных исследований по данному вопросу показал, что существуют многочисленные методы контроля, направленные не на выявление и устранение источников сбоев, а на результаты их проявления, при этом устраняется не сама причина (в данном случае источник сбоев), а ее следствие, т.е. ошибка, вызванная сбоем, оставляя тем самым потенциальную возможность существования в аппаратуре скрытых дефектов [13–15].

Перечень основных факторов, вызывающих сбои в аппаратуре, приведен на рис. 1.

В сложных системах сбой может произойти как по причинам, связанным с аппаратной частью системы, так и с программной. Процентное соотношение числа сбоев по разным типам причин зависит от назначения системы, места расположения, условий эксплуатации, соотношения аппаратной и программной составляющих, степени автоматизации и наличия терминалов, датчиков, исполнительных устройств и многих других факторов.

Многие причины сбоев могут быть устранены на этапе проектирования, а на этапе эксплуатации устраняются последствия их проявления (рис. 2).

Наиболее исследованными являются вопросы надежности программного обеспечения и аппаратуры при воздействии внешней среды. При детальном техническом задании и при правильном проектировании систем сбоев по таким причинам быть не должно.

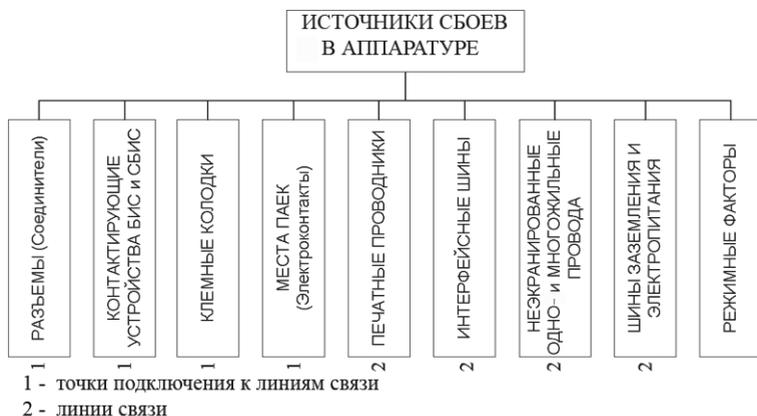


Рис. 1. Источники сбоев в аппаратуре

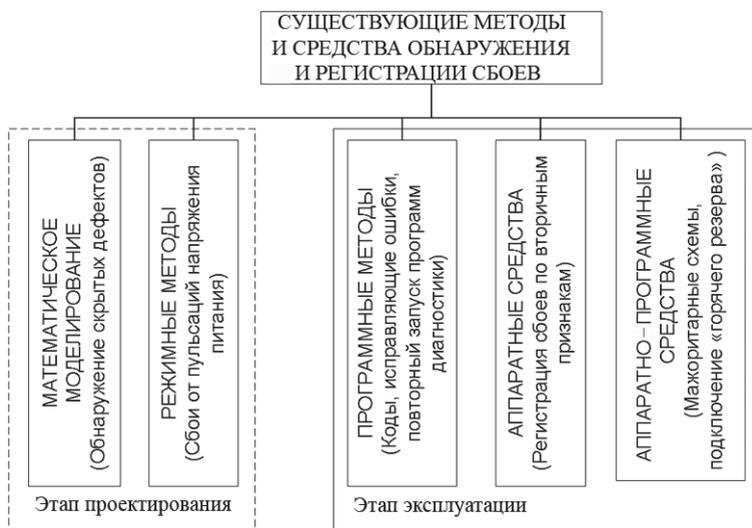


Рис. 2. Существующие методы и средства обнаружения и регистрации сбоев в аппаратуре

Возникающие сбои приводят к нарушению правильности функционирования аппаратуры из-за искажения характеристик сигнала. Особенно подвержена сбоям аппаратура дискретного действия, а также аппаратура, используемая для передачи и приема информации дискретными сигналами [16]. Экспериментальные данные свидетельствуют о том, что в дискретной аппаратуре, в том числе в микропроцессорных модулях, сбои возникают чаще, чем все остальные отказы. Один из методов ликвидации последствий сбоев — восстановление информации — требует трех и более параллельно работающих каналов. Такое резервирование весьма эффективно, однако требует большой избыточности и, как следствие, более высокой цены системы. Эффективность такой системы значительно снижается при возникновении отказа.

Для повышения устойчивости к сбоям в работе систем может быть использована также информационная избыточность. В этом случае избыточная информация предназначена как для обнаружения, так и для исправления искажений в рабочей информации. В качестве примера можно назвать использование избыточных, корректирующих кодов или многократного повторения неизбыточного кода при передаче информации. Для исправления информации от многократных сбоев требуется весьма большая информационная избыточность. Использование в системах передачи информации кодов, обнаруживающих искажения от сбоев, в сочетании с обратной связью также связано с большой избыточностью. Это характерно и для многократной передачи неизбыточного кода. Отметим, что информационная избыточность неизбежно приводит к аппаратной избыточности, что усложняет систему и снижает ее безотказность. Для ликвидации последствий сбо-

ев и повышения “сбоеустойчивости” системы необходимы сведения о состоянии аппаратной части системы, а также о качестве обработки, передачи и хранения в ней информации. Эти сведения могут быть получены только посредством контроля и регистрации сбоев в системах.

Диагностику сбоев при диагностическом контроле проводят в целях локализации места сбоя. Так, проверку целесообразно проводить после установления причины неисправности или характера отказа, если такие факты имеются. В общем случае контроль работоспособности является составной частью диагностического контроля. Почти всегда можно осуществить диагностический контроль, не имея информации о том, работоспособна система или нет. Однако для реализации диагностического контроля требуется больше времени, поэтому вначале выполняют контроль работоспособности, как более простой и требующий меньших затрат времени. Затем, если это необходимо, проводят диагностическую проверку. Локализация мест сбоя может быть проведена в двух режимах: при нормальном и “утяжеленном” режимах работы объекта контроля. Оценка состояния может проводиться как на момент контроля, так и с прогнозированием. Утяжеленный режим работы системы дает возможность выявить “сбойные” элементы, которые находятся на грани отказа, и своевременно их заменить. При этом неустойчивые сбои могут стать устойчивыми, что облегчает их обнаружение, локализацию и регистрацию. Такой режим может быть создан выбором соответствующих входных воздействий и условий работы системы. Так, например, могут быть изменены по соответствующему закону (уменьшены или увеличены) питающие напряжения. Также возможно воздействие на аппаратуру посредством различного рода имитаторов температурных, вибрационных и других факторов. Отметим, что режим контроля может быть статическим или динамическим. В последнем случае оценка состояния системы производится на основе анализа характера переходных процессов, а в первом — после завершения этих процессов.

Принципиальная особенность новой концепции резкого повышения надежности аппаратуры за счет исключения воздействия на нее сбоев состоит в том, что в отличие от всех ранее используемых подходов к решению данной проблемы обнаруживаются и регистрируются не места сбоев, а их источники. В зависимости от принципов формирования и получения информативных признаков, по совокупности которых оценивается сбойное состояние элементов аппаратуры как источников сбоев, предложены различные методы обнаружения и регистрации источников сбоев (рис. 3).

Метод электромагнитной бесконтактной регистрации источников сбоев основан на излучении резонансных частот сбойного участка



Рис. 3. Классификация методов обнаружения и регистрации источников сбоев

цепи или элемента аппаратуры и реализуется посредством приема и регистрации излучаемого сбойного сигнала. Особенность метода — его работа как на непрерывных (аналоговых), так и на дискретных (импульсных или цифровых) сигналах.

Временной метод регистрации сбоев основан на образовании задержки импульса (импульсного сигнала) при прохождении через сбойный участок, а также на изменении или образовании сдвига фазы сигнала вследствие изменения характера проводимости сбойного участка (например, активно-индуктивного на активно-емкостной). Кроме того, в ряде случаев (например, при диагностическом контроле) для регистрации сбоев целесообразно использовать метод падающей и отраженной волны, с помощью которого также можно зафиксировать сбойное состояние по виду отраженного от сбойного участка сигнала. Для отдельных видов контроля (в рабочем режиме, автоматизированного контроля) целесообразно использовать дифференциальный метод регистрации сбоев, основанный на дифференцировании проходящего через участок сбоя сигнала, реализованного в виде дифференцирующей цепи, встроенной в проверяемую аппаратуру.

Амплитудно-частотный метод регистрации сбоев основан на изменении амплитуды сигнала, проходящего через сбойный участок или элемент, а также на образовании эффекта резонанса на определенных (сбойных) частотах.

Регистрация сбоев при данном методе использует информативные признаки сбоя: амплитуду сигнала после прохождения через сбойный участок, резонансную частоту (одну или несколько), определяемую изменением физических параметров в месте сбоя (например, наличие

или отсутствие субгармонических колебаний при неустойчивых сбоях, а также при внешних низкочастотных возмущениях).

Из приведенной на рис. 3 классификации видно, что одни методы регистрации источников сбоев целесообразно использовать в системах и устройствах с аналоговой обработкой сигналов (например, амплитудно-частотные методы регистрации сбоев), другие — в цифровой аппаратуре (например, временные методы регистрации сбоев). Метод электромагнитной регистрации излучения наиболее эффективен при диагностике источников сбоев в смешанной аппаратуре, т.е. в аппаратуре, имеющей в своем составе как непрерывную, так и дискретную части. В зависимости от структуры и особенностей построения аппаратуры целесообразно использовать те или иные методы диагностики.

Анализ уровня развития современной аппаратуры показывает, что наибольшую актуальность приобретает проблема применения высоконадежных соединений, число которых в данных системах может достигать нескольких тысяч. Опыт эксплуатации современного электронного оборудования показал, что его непрерывной работе мешают сбои или сбойные явления, источником которых являются многочисленные соединения разных типов. Несмотря на последние достижения в области разработки, производства и монтажа, контроль при производстве плат и модулей не в состоянии выявить все дефектные и предрасположенные к дефекту соединения. Столь низкий процент локализованных в процессе производства сбоев логично объяснить существованием в элементах, в частности в механических соединениях, местах пайки, электромеханических реле, различных контактирующих устройствах, включая и металлизированные дорожки печатных плат скрытых дефектов систем, не выявляемых существующими методами контроля. Кроме того, на качество механического контактирования элементов влияют интенсивность внешних воздействий, их длительность и условия эксплуатации.

В настоящей статье описан способ обнаружения сбоев в аппаратуре, образуемых вследствие неконтактных явлений в местах паяк и механических соединений.

При эксплуатации сбои проявляются по-разному.

Классический случай сбоя вызван, например, механическим контактированием, в частности в соединителях. После кратковременного пребывания в зоне отказа, параметр возвращается к нормальному значению. В некоторых случаях несанкционированное изменение параметра не приводит к критическому изменению параметров соединителя, которые находятся вблизи границ допустимых значений, не

переходя их. В некоторых случаях сбой предшествует отказу и приводит к невозврату параметров в допустимую (граничную) зону.

Новый предлагаемый подход в диагностике и локализации источников сбоев позволяет задействовать такой информативный параметр соединения, как амплитудно-частотная характеристика (АЧХ). Кроме того, данный способ можно использовать для испытания систем на электромагнитную совместимость.

Роль и место сбоев в методах электромагнитной совместимости. С точки зрения проблем электромагнитной совместимости (ЭМС) аппаратуры важно отметить, что сбой представляет собой кратковременное невыполнение требований по электромагнитной изоляции от внешних источников (помех), которые ведут к сбоям (рис. 4, *а*).

С другой стороны, внутреннее состояние аппаратуры может само быть источником электромагнитных помех (рис 4, *б*). Другими словами, между электромагнитными помехами и сбоями существует тесная взаимная связь (рис. 4, *в*).

Рассмотрим проблему ЭМС при сбоях на примере многослойных (в частном случае, однослойных) печатных плат [17, 18]. Одна из причин сбоев в проводниках многослойной печатной платы — это частичное нарушение контакта проводника с контактными площадками внутренних слоев. Известным способом оценки качества электрических соединений является анализ моделей, характеризующих линию связи, в частности, соединяющую БИС между собой, по заданным параметрам омического сопротивления R и полученным параметрам паразитных индуктивности L и емкости C [19]. В состав таких моделей входят: передатчик — генератор импульсов, приемник — блок высокочастотных логических схем, соединенный с генератором через линию связи. Анализ таких моделей проводится временным методом. Однако

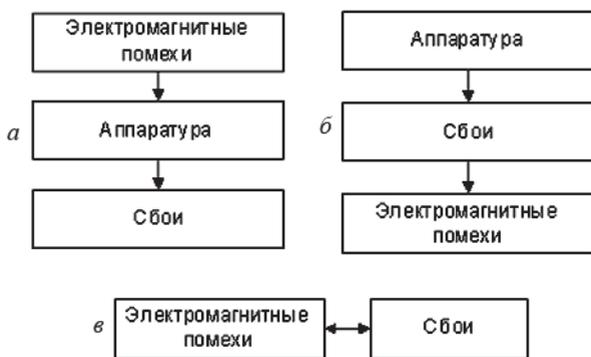


Рис. 4. Электромагнитная связь сбоев и помех:

а — помеха как источник сбоев; *б* — сбой как источник электромагнитных помех; *в* — двунаправленная связь между электромагнитной помехой и сбоем

представляется проблематичным использование данного метода для обнаружения и фиксации сбоев в линиях связи по двум причинам. Первая из них заключается в малых диапазонах изменения параметров режима “сбой”; поэтому изменения, вносимые, например, за счет ослабления контакта в линиях связи, соизмеримы с изменениями сопротивлений, вызванных допустимыми изменениями геометрии печатных элементов вследствие нестабильности технологических процессов. Вторая причина заключается во вносимой погрешности средств тестирования при контактировании с диагностируемыми элементами.

Под сбоем или сбойным состоянием электрического соединения печатной платы (линии связи или соединителя) будем понимать промежуточное состояние соединения между двумя другими предельными состояниями. Одно из них — отказное состояние — соответствует обрыву линии связи или состоянию выключенного соединителя с параметром омического сопротивления, равным бесконечности ($R = \infty$), а паразитными индуктивностью (L) и емкостью (C), равными нулю ($L, C = 0$). Другое устойчивое состояние соответствует исправному состоянию линии связи или состоянию выключенного соединителя с параметром омического сопротивления меньше номинально допустимого ($R < R_{\text{ном}}$) и с индуктивным параметром паразитной реактивности. Тогда третье (сбойное) состояние характеризуется промежуточным значением омической составляющей и емкостным характером паразитной реактивности. Это состояние соответствует, например, микрообрыву, микротрещине или микрозазору печатного проводника. Элементарные модели трех состояний показаны на рис. 5.

Экспериментальная проверка такой модели выполнялась на электрическом соединителе посредством искусственного изнашивания его контактов. Фиксация трех режимов (см. рис. 5) рефлектометрическим методом путем подачи на испытуемый соединитель импульсов в пикосекундном диапазоне осуществлялась по полученным рефлектограммам неоднородностей на соединителе. Данные кривые приведены на рис. 6, где обозначено: 1 и 2 — отраженный импульс при включенном и выключенном состояниях; 3 — то же при сбое; t — время; $A_{\text{и}}$ — амплитуда отраженного импульса при выключенном ($A_{\text{и. вык}}$) и при включенном ($A_{\text{и. вкл}}$) состояниях.

Другая упрощенная модель соединения может быть принята в виде электрической схемы замещения с параллельно включенными элементами R , L и C . Упрощение в данном случае заключается в использовании диэлектриков с очень малой проводимостью. Поверхность контактной пары соединителей всегда в той или иной степени шероховата, обеспечивая тем самым электрический контакт не по всей поверхности соединителя, а только в отдельных его точках или микровыступках.

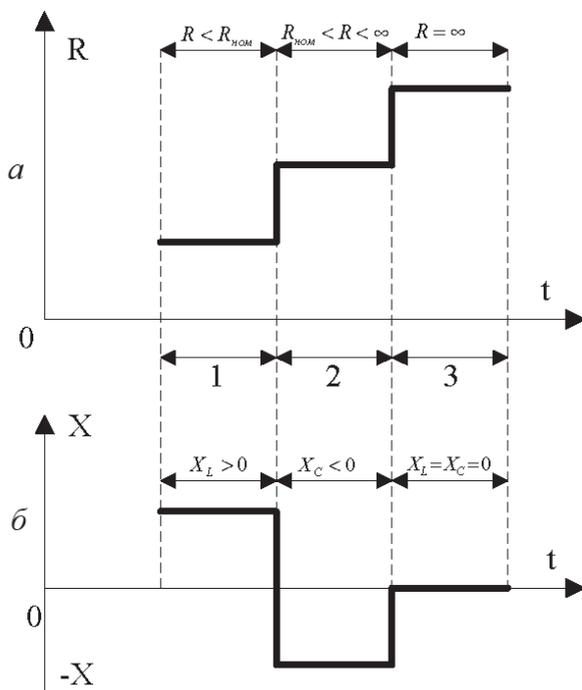


Рис. 5. Модель соединителя в трех состояниях:
 1 — включенное; 2 — сбойное; 3 — выключенное

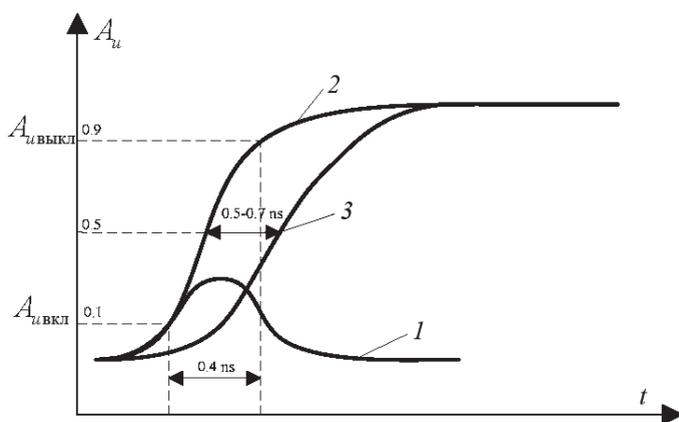


Рис. 6. Три состояния соединителя в наносекундном диапазоне:
 1 — включенное; 2 — выключенное; 3 — сбойное

Данное обстоятельство является причиной того, что соприкасающиеся точки имеют разные значения R , L и C .

Параллельное соединение элементов R , L и C образует параллельный колебательный контур с потерями. В общем случае таких контуров будет n .

На рис. 7 обозначено: Z_B — волновое сопротивление соединительного кабеля; Z_H — сопротивление нагрузки; R_i, L_i, C_i ($i = 1, 2 \dots, n$) —

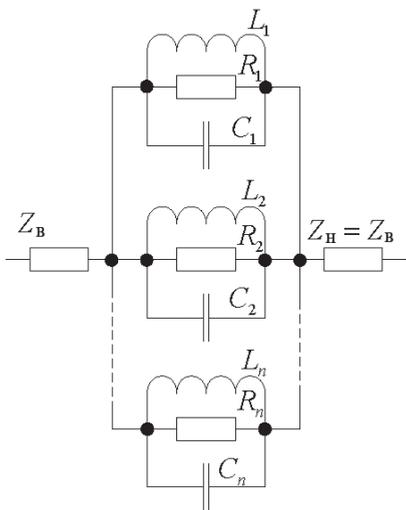


Рис. 7. Модель соединителя как совокупность n резонансных контуров

генератором соответствующих частот. В-третьих, излучаемая в режиме “сбой” мощность должна быть достаточной для надежной бесконтактной фиксации данного режима.

Таким образом, на составляющих контактной пары соединителя или на микрозоре контактного проводника, как на плечах вибратора (рис. 8) под действием напряжения генератора (на рис. 8 не показан) возникает продольный ток, который является источником электромагнитных волн, распространяемых поперечно в окружающее сбойный элемент пространство.

Соединитель или контактный проводник можно рассматривать как излучающую антенну или как передатчик электромагнитной энергии (см. рис. 8, режим *A*). Исходя из принципа взаимности передающих и приемных антенн, можно заключить, что сбойный элемент, находящийся в режиме излучения, может работать и в режиме приема (см. рис. 8, режим *B*).

На рис. 9 схематически изображен тестируемый участок печатной платы, включающий передатчик, приемник и линию связи с соединителем в режиме “сбой”. Передаваемая электромагнитная мощность соединителя (печатного проводника) I поступает на соединитель (печатный проводник) 2, также (например, искусственно) находящийся в режиме “сбой”, после чего поступает на высокочастотный регистратор (например, осциллограф).

Пример регистрации режима “сбой” соединителя типа РППМ 27, применяемого в отечественной суперЭВМ серии “Эльбрус”, при тестировании показан на рис. 10. Кривая I на указанном рисунке — это

совокупности дискретных значений сопротивления, индуктивности и емкости в процессе деградации соединителя соответственно. Однако, когда диагностика сбоев во временной области невозможна, можно использовать другой информативный параметр — резонансную частоту. Рассматриваемый метод основан на следующих предположениях. Во-первых, соединитель или контактный проводник печатной платы в режиме “сбой” представляется в виде симметричного электрического вибратора или излучателя в области высоких и сверхвысоких частот. Во-вторых, данный элемент должен возбуждаться гене-

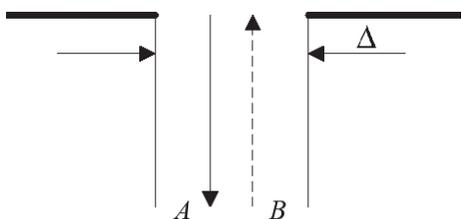


Рис. 8. Соединитель в сбойном состоянии (микрозазор “ Δ ”) в режиме излучения (A) и в режиме приема (B) электромагнитных колебаний

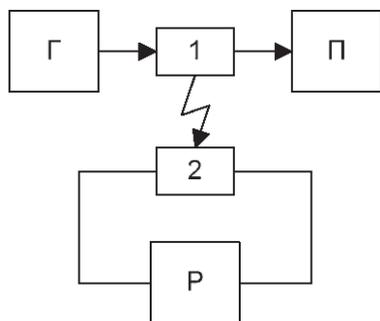


Рис. 9. Регистрация режима “сбой” соединителя:

Г — генератор, П — приемник, Р — резистор; 1, 2 — соединитель или линия связи в сбойном состоянии

тестируемое соединение (в качестве приемника выбран один из каналов осциллографа), кривая 2 — регистрируемые (на втором канале осциллографа) датчиком-соединителем (проводником) в режиме “сбой” (см. рис. 9) частоты, излучаемые элементом 1 (см. рис. 9) в режиме “сбой”.

Из рис. 10 видно, что сбой соединителя имеет несколько резонансных максимумов на частотах 4, 15, 55 МГц. Более подробно экспериментальные исследования данного режима приведены в работе [3].

Тенденция к образованию “сбойных” резонансных частот наблюдается и при повышении рабочего диапазона частот. Широкий диапазон как генерируемых, так и принимаемых частот в режиме “сбой” позволяет сделать вывод о надежности регистрации данного режима описанными методами, а также позволяет выполнять аппаратуру для регистрации портативной.

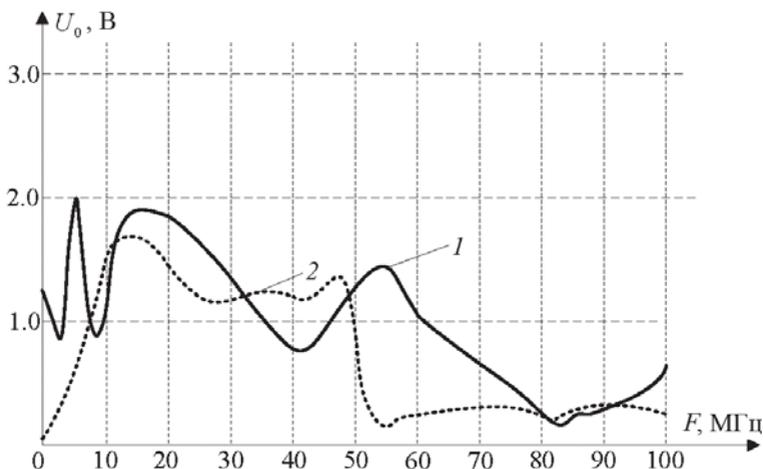


Рис. 10. Соединитель-излучатель (кривая 1) и соединитель-приемник (кривая 2) в режиме “сбой”

Далее приведены результаты диагностики сбоев печатных плат с использованием высокочастотной (до 4 ГГц) аппаратуры (панорамный измеритель ослабления, печатные платы, в том числе и многослойные печатные платы (МПП)), а также датчиков для бесконтактного обнаружения сбоев. В качестве объекта исследования была использована МПП процессора суперЭВМ (разработчик НИИ “Квант”, г. Москва, научный руководитель академик РАН В.К. Левин).

На первом этапе определяется информационный параметр печатных проводников при наличии в них скрытых дефектов, ведущих к сбоям (частичные нарушения геометрии “дорожек”, наличие на них микрозазоров, микротрещин и т.п.). Выявлено, что таким информативным параметром является электромагнитное излучение в диапазоне частот от 2 до 4 ГГц. На втором этапе определялись характеристики датчика бесконтактного обнаружения сбоев в том же диапазоне частот. Схема экспериментальной установки для диагностики сбоев приведена на рис. 11.

Импульсы с периодически изменяющейся частотой в диапазоне от 2 до 4 ГГц подаются через рефлектометрические головки падающей (ГРПВ) и отраженной (ГРОВ) волн на индикаторный блок (ИБ) прибора-генератора качающей частоты (ГКЧ). После настройки канала “ГКЧ–ГРПВ–ГРОВ–ИБ”, заключающейся в минимизации потерь до уровня $0 \pm 0,1$ дБ в указанном тракте между ГРПВ и ГРОВ, последовательно включаются эталонная и исследуемые “дорожки” печатных плат. При этом информация снимается с индикаторного блока визуально. В результате испытаний печатных плат были получены следующие результаты.

Ослабление сигнала на эталонной дорожке по амплитуде не превышает уровня -20 дБ (рис. 12). Ослабление сигнала при наличии сбоев в дорожках однослойных печатных плат сбоев было зафиксировано по амплитуде в следующих пределах: в диапазоне частот 2...3,7 ГГц: минимальный уровень -12 дБ; средний уровень -14 дБ; максимальный уровень -19 дБ.

На рис. 13 приведены результаты испытаний МПП на наличие в них сбоев. Расположение кривых, соответствующих эталонной (без

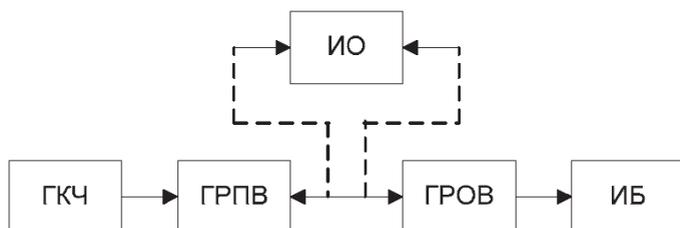


Рис. 11. Схема экспериментальной установки для диагностики сбоев печатных плат

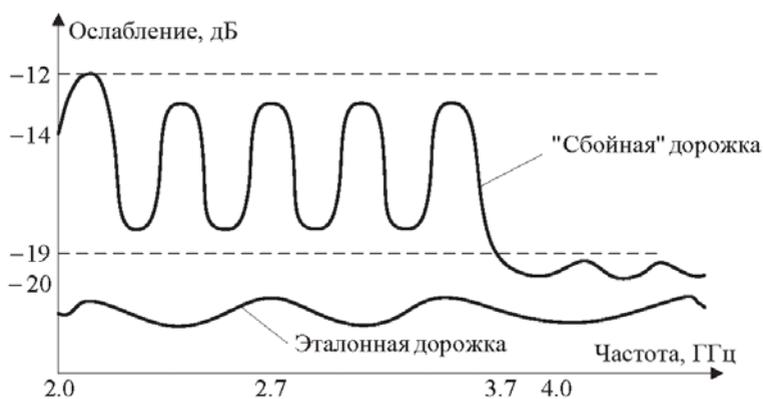


Рис. 12. Характеристики эталонной и "сбойной" дорожек однослойных печатных плат

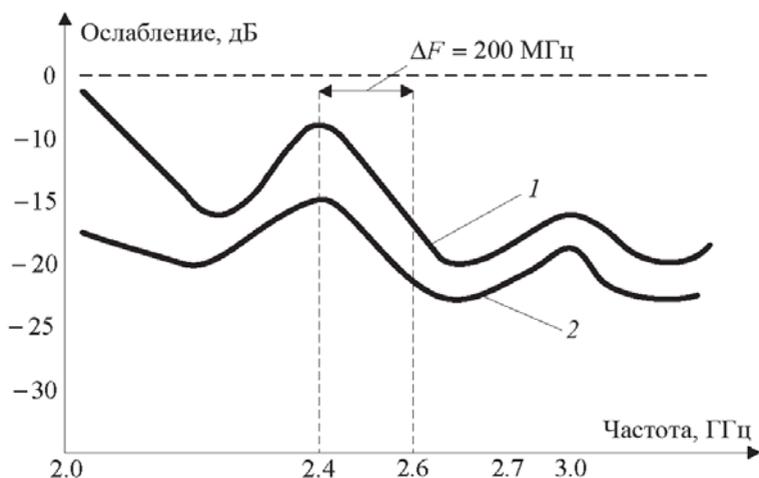


Рис. 13. Характеристики дорожек многослойных печатных плат:
1 – сбойной, 2 – эталонной

сбоя) и дефектной (сбойной) дорожкам, аналогично расположению кривых (см. рис. 12) однослойной печатной платы, т.е. "сбойная дорожка" (кривая 1, см. рис. 13) имеет меньшее ослабление сигнала. Ослабление сигнала на эталонной дорожке (кривая 2) не превышает при этом уровня -15 дБ (на частоте $F = 2,400 \text{ ГГц}$). Ослабление сигнала сбойной дорожки колеблется в пределах от -10 дБ (на частоте $F = 2,100 \text{ ГГц}$) до -20 дБ (на частоте $F = 3,700 \text{ ГГц}$). При этом диапазон частот, соответствующий максимальному превышению сигналов сбойной дорожки над эталонной, составляет величину порядка $100 \dots 200 \text{ МГц}$.

Проведенные испытания бесконтактного датчика сбоев (построенного по принципу пассивной резонансной антенны) по схеме, приведенной на рис. 11, как испытуемого объекта (ИО) показали, что его



Рис. 14. Реакция бесконтактного датчика сбоев на эталонную (точка 1) и “сбойные” (точки 2–5) дорожки МПП

амплитудно-частотная характеристика в исследуемом диапазоне частот соответствует характеристике дорожки, что объясняется “сбойным” характером его построения.

Реакция датчика сбоев на четырех дефектных дорожках и одной эталонной представлена на рис. 14. При этом в схему эксперимента (см. рис. 8) были внесены следующие изменения: вход контактной дорожки (через высокочастотный разъем) оставался подключенным к выходу блока ГРПВ, а выход ее отключался от входа ГРОВ. Таким образом, контактная дорожка превращалась в элемент открытой (нагрузка равна бесконечности) излучающей антенны. В свою очередь, выход датчика сбоев подключался к входу блока ГРОВ, а на его вход бесконтактно (на расстоянии ~ 1 см) поступал сигнал излучения с испытуемых дорожек. Как видно из рис. 14, разница сигналов с эталонной и дефектной дорожек колеблется в пределах от 3 до 11 дБ, что позволяет уверенно говорить о возможности использования указанного датчика для регистрации скрытых дефектов не только в однослойных, но и в многослойных печатных платах. Таким образом, полученные по рассмотренному методу активной диагностики сбоев в печатных платах результаты позволяют учитывать требования к скрытым дефектам по электромагнитной совместимости.

Сбои в оптико-электронной аппаратуре. В 2005 г. Государственная премия (“Русский Нобель”) была присуждена за разработку, внедрение и успешную эксплуатацию первого в мире оптико-электронного комплекса “Окно” (главный конструктор В.И. Колинько), предназначенного для наблюдения за ближним и дальним космосом в оптическом диапазоне волн. В настоящее время комплекс “Окно” находится на вооружении Космических войск России. В данном комплексе с участием автора была решена задача обнаружения и контроля сбойного состояния передающей телевизионной камеры, входящей в

состав комплекса, фиксирующей положение космических объектов (в первую очередь спутников) с последующей передачей данных в ЭВМ без вывода комплекса из режима функционирования [20]. При этом в отличие от стандартной тест-таблицы формировался специальный тест-контроль, представляющий собой группы штрихов, расположенных по краям проектора, и через полупрозрачное зеркало проецируемый на мишень передающей телевизионной трубки.

Другим способом обнаружения и регистрации сбоев в оптическом диапазоне длин волн по информативному признаку “световой сигнал”, разработанным с участием автора, является способ контроля частичного обрыва кварцевой нити в процессе ее выработки [21]. Способ позволяет фиксировать частичный обрыв волокон (например, из ста волокон, одновременно участвующих в технологическом процессе формирования волокна, диагностировать обрыв двух-трех волокон), характеризующийся как сбой.

Дальнейшее развитие методов и средств обнаружения сбоев в оптическом диапазоне длин волн связано с применением кодо-импульсных модуляторов в целях повышения надежности и помехозащищенности аппаратуры [22, 23]. Если в работе [22] использование кодо-импульсных модуляторов в оптическом диапазоне волн направлено для надежного измерения и контроля положения объектов малого размера, то в работе [23] использование кодо-импульсных модуляторов направлено на повышение надежности (в частности, увеличение помехозащищенности аппаратуры) при обнаружении сбойных участков металлизированных контактных проводников (“дорожек”) печатных плат. При этом под сбойным состоянием проводника подразумеваются незначительные (в пределах норм ТУ) отклонения его оптических параметров (микроразоры, микротрещины, локальные утончения или утолщения ширины “дорожки” и т.д.).

Однако в более общем случае источником таких сбоев могут выступать не только контролируемые объекты (в данном случае поверхности печатных плат), но и сама оптико-электронная аппаратура в процессе приема и обработки информации с первичных источников (датчиков), как уже было показано [20]. Таким образом, задача заключается в исследовании явлений сбоя в общем виде в оптическом диапазоне волн как с учетом сбойности (или нечеткости приема информации) объекта, так и с учетом сбойного состояния самой принимающей аппаратуры. Моделирование явлений сбоя базируется на применении, с одной стороны, кодо-импульсных модуляторов, а с другой — современных вычислительных возможностей аппаратуры.

Основное назначение кодо-импульсных модуляторов — преобразование освещенности $E(X, Y)$ в пространстве изображений в такую

последовательность потока $\Phi(a_1t, a_2t, \dots, a_nt)$ на их выходе, в параметрах a_1, a_2, \dots, a_n которого содержалась бы информация о положении сбойного участка в поле оптического кодо-импульсного модулятора (КИМ). При непрерывной модуляции поток $\Phi(t)$ на выходе КИМ описывается гармонической функцией

$$\Phi(t) = \Phi_0 + \Phi_m \sin(\omega t + \varphi). \quad (1)$$

Информация о координатах изображения содержится в параметрах гармонического сигнала: в амплитуде Φ_m , частоте ω и фазе φ . В случае, если модуляция светового потока производится с несущей частотой ω_0 , поток описывается гармонической функцией

$$\Phi(t) = \Phi_0 + \Phi_n \sin(\omega_0 t), \quad (2)$$

где Φ_n — амплитуда модуляции потока на несущей частоте ω_0 . Тогда полезная информация о положении контролируемого объекта содержится в глубине модуляции амплитуды Φ_n и частоты ω_0 , а также фазе модуляции огибающей этих параметров. Постоянная составляющая Φ_0 никакой полезной информации о положении контролируемого объекта не несет и в дальнейшем не учитывается.

При амплитудной модуляции гармонического сигнала с несущей частотой модулированный сигнал (без постоянной составляющей) имеет вид

$$\Phi(t) = \Phi_n [1 + mV(t)] \sin(\omega_0 t), \quad (3)$$

где $m \leq 1$ — относительная глубина модуляции; Φ_n — абсолютная глубина модуляции амплитуды несущей частоты; $V(t)$ — модулирующая функция, связанная однозначно с положением контролируемого объекта и удовлетворяющая условию $|V(t)| \leq 1$.

В случае, если моделирующая функция изменяется по гармоническому закону

$$V(t) = \sin(\Omega_m t + \varphi), \quad (4)$$

где $\Omega_m \ll \omega_0$ — частота модуляции несущей частоты, переменная составляющая потока на выходе модулятора описывается следующей функцией:

$$\begin{aligned} \Phi(t) = \Phi_n [1 + m \sin(\Omega_m t + \varphi)] \sin \omega_0 t = \Phi_n \sin \omega_0 t + \\ + 0,5m\Phi_n \{ \cos [(\omega_0 - \Omega_m)t - \varphi] - \cos [(\omega_0 + \Omega_m)t + \varphi] \}. \end{aligned} \quad (5)$$

Как видно из уравнения (5), спектр амплитудно-модулированного сигнала с несущей частотой содержит три гармоники: на несущей частоте ω_0 с амплитудой Φ_n и на боковых частотах $\omega_0 - \Omega_m$; $\omega_0 + \Omega_m$ с амплитудами $0,5m\Phi_n$. Полезная информация о положении объекта

будет содержаться в амплитуде $\Phi_M = m\Phi_H$ и в фазе φ огибающей модулирующего сигнала.

В случае, если модулирующая функция $V(t)$ имеет вид

$$V(t) = \cos(\Omega_m t + \varphi), \quad (6)$$

то

$$\Phi(t) = \Phi_H \sin \omega_0 t + \beta \sin(\Omega_m t + \varphi), \quad (7)$$

где $\beta = \omega_0/\Omega_m$ — индекс частотной модуляции. Преобразуя последнее выражение, получаем

$$\Phi(t) = \Phi_H \{ \sin \omega_0 t \cos [\beta \sin(\Omega_m t + \varphi)] + \cos \omega_0 t \sin [\beta \sin(\Omega_m t + \varphi)] \}. \quad (8)$$

Если $\beta \ll 1$, то можно считать, что $\cos[\beta \sin(\Omega_m t + \varphi)] \approx 1$; $\sin[\beta \sin(\Omega_m t + \varphi)] \approx \beta \sin(\Omega_m t + \varphi)$.

Следовательно

$$\begin{aligned} \Phi(t) = \Phi_H [\sin \omega_0 t + \beta \cos \omega_0 t \sin(\Omega_m t + \varphi)] = \Phi_H \sin \omega_0 t + \\ + 0,5\Phi_H \beta \{ \sin [(\omega_0 + \Omega_m)t + \varphi] - \sin [(\omega_0 - \Omega_m)t - \varphi] \}. \end{aligned} \quad (9)$$

Поэтому при малых индексах частотной модуляции спектр непрерывного сигнала, частота которого промодулирована по гармоническому закону так же, как и при амплитудной модуляции, состоит из суммы трех гармонических сигналов: на несущей частоте ω_0 с амплитудой Φ_H и на двух комбинационных частотах $\omega_0 - \Omega_m$ и $\omega_0 + \Omega_m$ с амплитудами β , $\Phi_H/2$. Полезная информация о местоположении объекта сбой содержится, как следует из выражения (9), в параметрах β , $\Phi_H/2$ и φ .

При импульсной модуляции поток $\Phi(t)$ представляет собой последовательность импульсов, форма которых определяется видом модулятора. При периодической последовательности импульсов (как это и бывает на практике) последовательность может быть разложена в ряд Фурье и представлена любой из следующих форм:

$$\begin{aligned} \Phi(t) = \frac{\Phi_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos k\omega_1 t + b_k \sin k\omega_1 t) = \\ = \frac{\Phi_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} \Phi_k \cos(k\omega_1 t + \psi_k) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \Phi_k e^{-j\psi_k} e^{j\omega_1 t}, \end{aligned} \quad (10)$$

где

$$\Phi_0 = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} \Phi(t) dt; \quad a_k = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} \Phi(t) \cos k\omega_1 t dt;$$

$$b_k = \int_{-T/2}^{T/2} \Phi(t) \sin k\omega_1 t dt; \quad \Phi_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}; \quad \psi_k = \operatorname{arctg} \frac{b_k}{a_k};$$

T – период; $\omega_1 = \frac{2\pi}{T}$ – круговая частота первой гармоники, определяемая составляющей с наибольшим периодом.

Спектр Фурье этого ряда представляет собой сумму гармонических составляющих:

$$\Phi(j\omega) = \pi \sum_{k=-\infty}^{\infty} \Phi_k e^{j\psi_k} \delta(\omega - k\omega_1). \quad (11)$$

Поскольку $|e^{j\psi_k}| = 1$, то амплитудный спектр

$$A(\omega) = \pi \sum_{k=-\infty}^{\infty} \Phi_k \delta(\omega - k\omega_1).$$

Форма огибающей спектра амплитуд определяется формой одиночного импульса, а расстояние вдоль оси частот между отдельными гармониками равно частоте ω_1 составляющей с наибольшим периодом.

Информация о координатах контролируемого объекта содержится в любых двух параметрах, характеризующих импульсный процесс: в величине амплитуды импульсов, их длительности, частоте или периоде следования, в фазе, а также в некоторой кодовой комбинации последовательности импульсов. Амплитудно-частотные характеристики для случая четырех кодовых комбинаций из двух импульсов на периоде, состоящем из восьми длительностей импульсов, приведены на рис. 15. При этом коду № 1 соответствует два импульса подряд на периоде, коду № 2 – импульс–пауза–импульс, коду № 3 – импульс–две паузы–импульс, коду № 4 – импульс–три паузы–импульс.

Для контроля и диагностики сбоев в оптическом диапазоне частот предлагается следующий подход. Состояние контролируемого объекта при сбое представляем в виде последовательности исправных и сбойных состояний (рис. 16). На данном рисунке исправному состоянию объекта соответствует состояние “С”, равное единице. Сбойному состоянию соответствует значение “С”, равное нулю. Совокупность на данном рисунке нулей и единиц может быть различной как по продолжительности, так и по взаимному положению. В этом случае сигнальный спектр (см. рис. 16) будет иметь либо дискретный, либо непрерывный вид, а контроль состояния системы сводится к контролю временных меток t_1, t_2, \dots, t_i , т.е. коды системы.

Вероятность искажения кода сигнала $\rho_{\text{ким}}$ определяется отношением

$$\rho_{\text{ким}} = h_0 l \sqrt{N_0 f_k}, \quad (12)$$

где h_0 — амплитуда одиночного импульса в коде; N_0 — спектральная плотность белого шума; величина f_k определяется отношением

$$f_k = q f_c. \quad (13)$$

Здесь f_c — ширина полосы частот модулирующей функции (полезного сигнала); q — количество импульсов, необходимых для кодирования каждого уровня. В частности, если сигнал имеет m уровней и двоичный код представления, то $q = \log_2 m$.

Из последних двух формул видно, что помехоустойчивость сигналов с кодо-импульсной модуляцией снижается с уменьшением величин f_c и f_k . Поэтому для уменьшения вероятности искажения контролируемого кода (см. рис. 16) целесообразно контролировать фронты и спады импульсного кода в моменты t_1, t_2, \dots, t_i , что соответствует в идеальном случае контролируемому спектру, равному бесконечности.

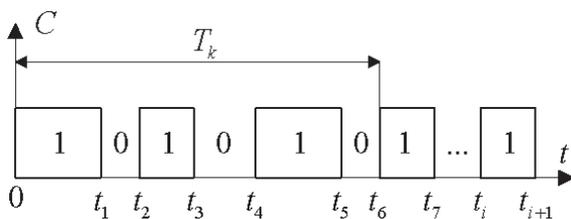


Рис. 16. Циклограмма работы системы в виде кода ($C = 1$ — исправно, $C = 0$ — сбой, T_k — период кода)

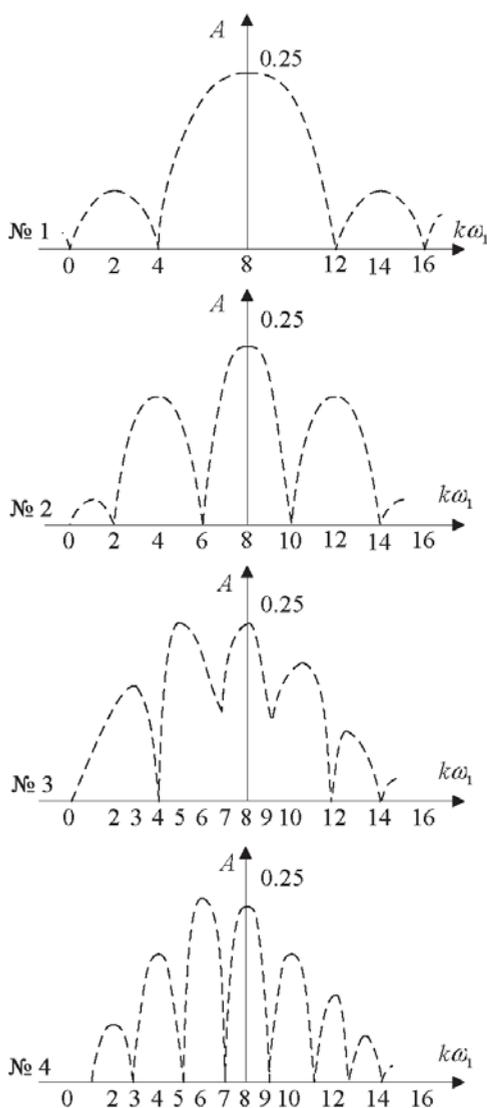


Рис. 15. Амплитудно-частотные характеристики кодированных комбинаций из двух импульсов на периоде $8T$

Описанные фрагменты оптического контроля с использованием кодо-импульсной модуляции сигналов были использованы, помимо упомянутых устройств, для контроля работы передающей телевизионной камеры [20] и при разработке способов оптического контроля обрыва кварцевой стеклонити в процессе ее выработки [21], а также при оптическом контроле печатных плат [24].

Для контроля сбоев печатных плат ключевой задачей является повышение чувствительности (“разрядности”) кодо-импульсного модулятора. В качестве примера повышения чувствительности при кодо-импульсной модуляции сигналов рассмотрим случай построения модулятора с экспоненциальной функцией изменения освещенности контролируемой поверхности с показателем экспоненты β_1 . Сравнение отражательных свойств объекта проводилось с широтно-импульсными модуляторами с аналогичным, т.е. экспоненциальным характером изменения освещенности. При широтно-импульсной модуляции освещенности объекта управление процессом контроля осуществлялось путем изменения числа импульсов световых потоков за определенный интервал (период) времени, а при кодо-импульсной модуляции — дополнительно и путем изменения вида кода (см. рис. 16). Нетрудно видеть, что управляющий сигнал при кодо-импульсной модуляции и заданных параметрах относительной освещенности τ и периоде повторения световых импульсных последовательностей T_k будет иметь несколько вариантов в зависимости от взаимного расположения световых импульсов внутри периода сигнала. Для реальных модуляторов величина показателя β_1 , может колебаться в широких пределах. Необходимо найти диапазон значений β_1 , при которых характеристика отражательной способности модулятора вместе с объектом будет иметь вид, аналогичный широтно-импульсному модулятору, но с большей чувствительностью (рис. 17). Значение β_1 , при котором получается наибольшая плавность характеристики модулятора по отражательной

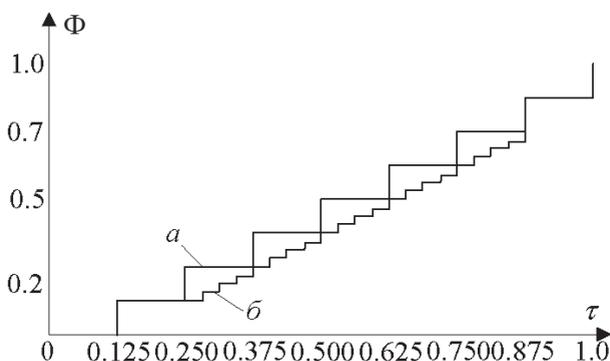


Рис. 17. Световой поток при широтно-импульсной (а) и кодо-импульсной (б) модуляции

способности, будем считать наилучшим с точки зрения чувствительности модулятора. Выбор значений β_1 для различных вариантов 8-разрядного кода, а также для вариантов широтно-импульсной модуляции при одинаковых значениях относительной освещенности τ проводился с точностью 0,1. Диапазоны выбранных значений параметра β_1 для кодо-импульсной и широтно-импульсной модуляции приведены в табл. 1, из которой видно, что наилучшим по плавности отражательной характеристики значением β_1 для всего диапазона изменения значений τ следует считать значение $\beta_1 = 2,1$.

Таблица 1

Диапазоны оптимальных по освещенности значений β_1

τ	0,250	0,375	0,500	0,625	0,750
β_1	1,7–2,1	2,1–2,3	2,1–2,8	2,1–2,9	2,1–3,1

Полученные результаты позволяют вести проектирование аппаратуры (оптико-электронных систем, оптических датчиков, оптических линий связи и т.д.) с повышенными требованиями к надежности (в части обнаружения и регистрации сбоев).

Сбои в датчиках и исполнительных механизмах. Широко известные, т.е. используемые в течение десятков лет, и ставшие уже классическими — это методы повышения надежности сложной современной аппаратуры с применением различных кодов [25–27]. К этим кодам, не потерявшим своей актуальности до наших дней, следует отнести коды Хемминга, Боуза–Чоудхури–Хоквингема, Рида–Соломона и др. Данные коды способны обнаруживать ошибки (как одиночные, так и многократные), определять места их проявления и исправлять в цифровой информации. Тем не менее, всем им присущ ряд недостатков, основными из которых являются следующие: 1) их “пассивность”, заключающаяся в том, что они “работают” с отказами, т.е. с установленными неисправностями, и невозможность “работать” по сбоям (самоустранимым отказам); 2) непригодность (или функциональная ограниченность) при диагностике датчиков и исполнительных механизмов.

С этой точки зрения более универсальным и лишенным указанных недостатков является код Вьюшкова–Дианова, названный по фамилиям авторов, впервые предложивших его для решения задач прямого цифрового управления объектами [28]. Основная идея — “цифровизировать” объект (в данном случае исполнительный механизм) и управлять им от цифровой машины, минуя цифро-аналоговый преобразователь. Разработанная теория, основой которой явилось совместное

рассмотрение преобразования сигналов как в частотной, так и во временной областях, позволила не только универсализировать управление от цифровой ЭВМ с любым числом разрядов, начиная с восьми (при меньшем числе цифровое или кодовое управление вырождается в число-импульсное или широтно-импульсное), но и оптимизировать его с точки зрения электрической нагрузки исполнительного механизма [29]. В частности, предложенный метод управления исполнительными механизмами, названный кодо-импульсным управлением, оказался эффективным как при управлении исполнительными двигателями малой (десятки и сотни ватт) мощности (летательные аппараты), так и большой (тысячи киловатт) мощности (блужинги, прокатные станы). Имеет место и другой важный параметр универсализации — тактовые частоты работающих ЭВМ (от низких частот до десятков и сотен мегагерц) и частоты питающих напряжений нагрузки (от нулевых и низких, 50-герцовых частот до 400 и 1000 Гц). Характерен и тот факт, что данный метод обработки сигналов предложила в конце 80-х годов прошлого столетия одна из ведущих зарубежных фирм в области вычислительной и контрольно-диагностической аппаратуры — Хьюлетт-Паккард — и использовала его при построении сигнальных анализаторов [30, 31].

В общем виде код ЭВМ, “привязанный” к нагрузке, представляет совокупность единиц (импульсов) и нулей (отсутствие импульсов) и может иметь форму [32]

$$\underbrace{111\dots 1}_{k_1} \underbrace{000\dots 0}_{k_2} \underbrace{111\dots 1}_{k_3} \dots \underbrace{111\dots 1}_{k_{i+1}} \dots \underbrace{000\dots 0}_{k_m},$$

причем $\sum_{i=1}^m k_i = N$, где N — разрядность ЭВМ.

Данный код, “привязанный” к питающим импульсам напряжения, приведен на рис. 18: к синусоидальным (а), к прямоугольным (б).

На этом рисунке наличие элементарного импульса длительностью T ($T = 1/F$, где F — тактовая частота процессора) соответствует логической “1”, его отсутствие — логическому “0”. Период повторения кода (в данном случае кодовой последовательности) обозначен T_c . В случаях, когда в качестве исполнительного механизма рассматривается двигатель переменного тока, в качестве элементарного импульса выбирается единичный синусоидальный импульс частотой питающей сети нагрузки (например, 50 Гц).

В качестве исполнительных механизмов рассмотрим объекты, которые описываются уравнениями первого порядка (в общем случае с постоянными времени: T_1 — импульс, T_2 — пауза), что позволяет, с одной стороны, определить и оценить эффективность такого вида

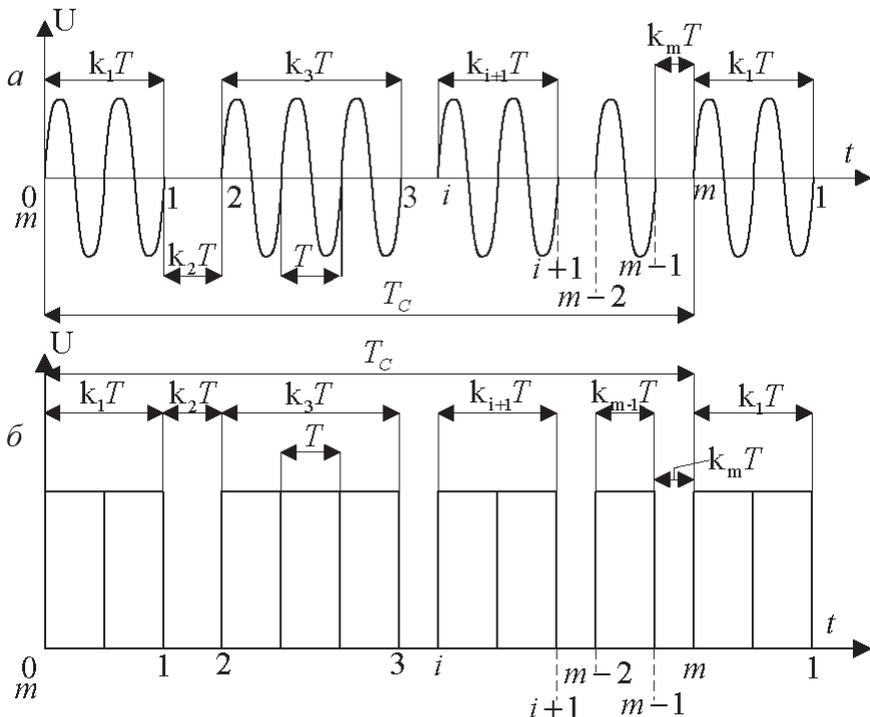


Рис. 18. Напряжение в виде кода, “привязанное” к коду ЭВМ, и поступающее в исполнительный механизм:

a — синусоидальное, *б* — прямоугольное

кода для диагностики сбоев, а с другой, несмотря на принятые допущения, в целом ряде случаев достаточным, поскольку значительное число исполнительных механизмов можно описать уравнениями первого порядка. Рассмотрим случай (для наглядности самый простой), когда число разрядов ЭВМ равно восьми (например, процессор К580). Возможные варианты 8-разрядного кода представим в табл. 2, для удобства сгруппировав их по постоянным значениям относительной длительности τ , причем, согласно рис. 18,

$$\tau = \frac{(k_1 + k_3 + \dots + k_{i+1} + \dots + k_{m-1}) \times T}{T_c}.$$

Запишем уравнения изменения обобщенного параметра ν нагрузки (исполнительного механизма) во время действия на него импульса и последующей паузы. При этом в качестве исполнительного механизма может быть выбран электрический двигатель (переменного или постоянного тока), обмотка электромагнита (в общем случае с разными постоянными времени во время действия импульса и паузы), электрическая емкость с разными постоянными времени (в общем случае) заряда и разряда и т.д.

Возможные варианты 8-разрядного кода

$\tau = 0,250$			
№ кода	1	2	3
Код	10100000	10010000	10001000
$\tau = 0,375$			
№ кода	4	5	6
Код	11010000	11001000	11000100
№ кода	7	8	—
Код	10101000	10100100	
$\tau = 0,500$			
№ кода	9	10	11
Код	11101000	11100100	11011000
№ кода	12	13	14
Код	11001100	11010100	11010010
№ кода	15	16	—
Код	11001010	10101010	
$\tau = 0,625$			
№ кода	17	18	19
Код	11110100	11110010	11101100
№ кода	20	21	22
Код	11100110	11011010	11101010
$\tau = 0,750$			
№ кода	23	24	25
Код	11111010	11110110	11101110

Во время действия импульса параметр ν изменяется в соответствии с уравнением

$$T_1 \frac{d\nu}{\nu t} + \nu = \nu_y, \quad (14)$$

во время паузы — в соответствии с уравнением

$$T_2 \frac{d\nu}{\nu t} + \nu = -\nu_y. \quad (15)$$

Решая данные уравнения относительно ν , получим кривые изменения обобщенного параметра во время действия импульса и паузы соответственно:

$$\nu = \nu_y - (\nu_y - \nu_n) e^{-\frac{t}{T_1}}, \quad (16)$$

$$\nu = \nu'_n e^{-\frac{t}{T_2}} - \nu'_y \left(1 - e^{-\frac{t}{T_2}}\right). \quad (17)$$

В этих уравнениях ν_n (ν'_n) — значения ν в начале импульса (паузы); ν_y (ν'_y) — установившиеся значения при импульсе (паузе); t — время, отсчитываемое от начала действия импульса (паузы).

Тогда значения параметра ν по участкам импульсов и пауз в соответствии с рис. 18 определяются следующей системой уравнений:

$$\nu = \nu_y - (\nu_y - \nu_m) \cdot e^{-\frac{t}{T_1}}, \quad 0 \leq t \leq k_1 \cdot T;$$

$$\nu = \nu_1 \cdot e^{-\frac{t-k_1 \cdot T}{T_2}} - \nu_y \cdot \left(1 - e^{-\frac{t-k_1 \cdot T}{T_2}}\right), \quad k_1 \cdot T \leq t \leq (k_1 + k_2)T;$$

$$\nu = \nu_y - (\nu_y - \nu_1) \exp\left\{-\frac{t - \sum_{l=1}^i k_e \cdot T}{T_1}\right\}, \quad \sum_{l=1}^i k_e \cdot T \leq t \leq \sum_{l=1}^{i+1} k_e \cdot T;$$

$$\nu = \nu_{i+1} \cdot \exp\left\{-\frac{t - \sum_{l=1}^{i+1} k_e \cdot T}{T_2}\right\} - \nu'_y \cdot \left(1 - \exp\left\{-\frac{t - \sum_{l=1}^{i+1} k_e \cdot T}{T_2}\right\}\right),$$

$$\sum_{l=1}^{i+1} k_e \cdot T \leq t \leq \sum_{l=1}^{i+2} k_e \cdot T;$$

$$\nu = \nu_y - (\nu_y - \nu_{m-2}) \cdot \exp\left\{-\frac{t - \sum_{l=1}^{m-2} k_e \cdot T}{T_1}\right\},$$

$$\sum_{l=1}^{m-2} k_e \cdot T \leq t \leq \sum_{l=1}^{m-1} k_e \cdot T;$$

$$\nu = \nu_{m-1} \cdot \exp\left\{-\frac{t - \sum_{l=1}^{m-1} k_e \cdot T}{T_2}\right\} - \nu'_y \cdot \left(1 - \exp\left\{-\frac{t - \sum_{l=1}^{m-1} k_e \cdot T}{T_2}\right\}\right),$$

$$\sum_{l=1}^{m-1} k_e \cdot T \leq t \leq \sum_{l=1}^m k_e \cdot T.$$

(18)

В системе уравнений (18) $\nu_1, \nu_i, \nu_{i+1}, \nu_{m-1}, \nu_{m-2}, \nu_m$ — значения параметра на концах участков 1, $i, (i+1), (m-1), (m-2), m$, причем конец участка “ m ” предыдущего периода совпадает с началом участка “1” последующего периода (основная идея метода припасовывания).

Значения параметра ν на концах соответствующих участков определяются следующими выражениями:

$$\nu_1 = \nu_y - (\nu_y - \nu_m) \cdot e^{-\frac{k_1 \cdot T}{T_1}}, \quad t = k_1 \cdot T;$$

$$\nu_2 = \nu_1 \cdot e^{-\frac{k_2 \cdot T}{T_2}} - \nu'_y \cdot \left(1 - e^{-\frac{k_2 \cdot T}{T_2}}\right), \quad t = (k_1 + k_2) \cdot T;$$

$$\begin{aligned}
\nu_{i+1} &= \nu_y - (\nu_y - \nu_i) \cdot e^{-\frac{k_{i+1} \cdot T}{T_1}}, & t &= \sum_{l=1}^{i+1} k_e \cdot T; \\
\nu_{i+2} &= \nu_{i+1} \cdot e^{-\frac{k_{i+2} \cdot T}{T_2}} - \nu'_y \cdot \left(1 - e^{-\frac{k_{i+2} \cdot T}{T_2}}\right), & t &= \sum_{l=1}^{i+2} k_e \cdot T; \\
\nu_{m-1} &= \nu_y - (\nu_y - \nu_{m-2}) \cdot e^{-\frac{k_{m-2} \cdot T}{T_1}}, & t &= \sum_{l=1}^{m-1} k_e \cdot T; \\
\nu'_m &= \nu_{m-1} \cdot e^{-\frac{k_m \cdot T}{T_2}} - \nu'_y \cdot \left(1 - e^{-\frac{k_m \cdot T}{T_2}}\right), & t &= \sum_{l=1}^m k_1 \cdot T. \quad (19)
\end{aligned}$$

В последнем уравнении системы (19) значение параметра ν в конце участка “ m ” обозначается ν'_m в отличие от его значения ν_m в конце участка “ m ” предыдущего периода (см. первое уравнение системы).

Подставляя во второе уравнение системы (19) значение параметра ν_1 из первого уравнения той же системы, в третье — значение параметра ν_2 из второго и так далее, получим уравнения параметра ν в граничных точках “импульс–пауза” и “пауза–импульс”.

Опуская промежуточные выкладки, для среднего значения параметра ν_{cp} за период T_c можно получить выражение:

$$\begin{aligned}
\nu_{cp} &= \frac{1}{\beta_1 \cdot \sum_{l=1}^m k_e} \left\{ \sum_{l=0}^{\frac{1}{2} \cdot (m-2)} [k_{2 \cdot l+1} \cdot \beta_1 \cdot \nu_1 - (\nu_y - \nu_{2l})(1 - e^{-k_{2l+1} \cdot \beta_2})] \right\} + \\
&+ \frac{1}{\beta_2 \cdot \sum_{l=1}^m k_1} \left\{ \sum_{l=1}^{\frac{1}{2} m} [(\nu_{2l-1} + \nu'_y) \cdot (1 - e^{-k_{2l} \cdot \beta_2}) - k_{2l} \cdot \beta_2 \nu'_y] \right\}, \quad (20)
\end{aligned}$$

где $\beta_1 = \frac{T}{T_1}$, $\beta_2 = \frac{T}{T_2}$.

Для выбранной разрядности кода (8 разрядов) и соотношения $\beta_1 = T/T_1 = 2$, 1 и $T_1 = 0,5T_2$ (доказательство выбора значения β_1 опускается) построен график зависимости изменения относительного напряжения в нагрузке (U_n/U) в функции 8-разрядных кодов (см. рис. 19), из которого видно, что при постоянных значениях τ и β_1 между соседними значениями τ_i и τ_{i+1} имеется совокупность промежуточных значений (от одного до трех), по которым можно судить о сбойном состоянии объекта (как за счет искаженной цифровой информации, например, задержки, сдвига импульса или действия

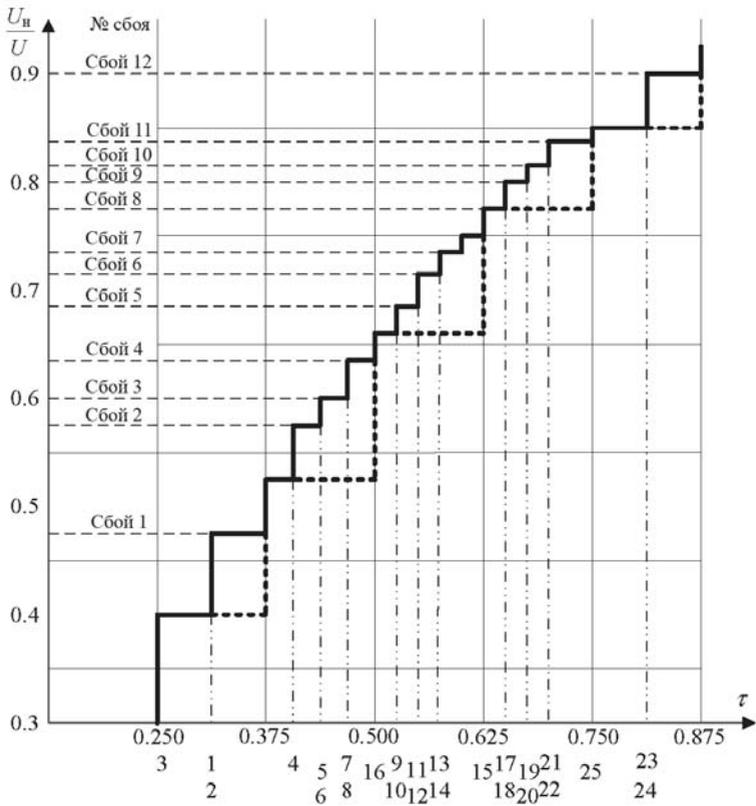


Рис. 19. Оцифровка выходной характеристики по сбоям в функции кода

помехи, так и за счет сбоев самого объекта). В табл. 3 приведены обнаруживаемые сбои в функции кода.

Логично предположить, что с увеличением разрядности ЭВМ точность оцифровки сбойных состояний будет возрастать, что позволит с большей достоверностью фиксировать большее количество сбоев в объекте при прочих равных условиях.

Предлагаемый метод для интеллектуальной диагностики сбоев датчиков и исполнительных механизмов заключается в том, что сбойные состояния определяются по образованию резонансных частот в датчиках и исполнительных механизмах и наличию повышенного (более

Таблица 3
Обнаруживаемые сбои в функции кода

№ кода	№ сбоя
1, 2	1
4	2
5, 6	3
7, 8	4
9, 10	5
11, 12	6
13, 14	7
15	8
17, 18	9
19, 20	10
21, 22	11
23, 24	12

чем в 2–4 раза) электромагнитного излучения, дополнительному сдвигу фронтов импульсных сигналов, смене фазы гармонических сигналов, проходящих через датчики и исполнительные механизмы, наличию субгармонических колебаний, изменению амплитудно-частотных характеристик, изменению соотношения падающей и отраженной волны, появлению эффекта дифференцирования сигналов [33, 34].

Из всех рассмотренных перспективных направлений развития вопросов изучения и исследования сбоев в современных системах автоматики особо хотелось бы отметить направление разработки сбоеустойчивой аппаратуры для космических аппаратов. В частности, одним из важнейших дополнительных требований к бортовой вычислительной технике является необходимость разработки повышенных мер защиты от сбоев во время выполнения ею рабочей программы [35]. При этом необходимо учитывать различные условия возникновения сбоев во время полета (в первую очередь, виды орбит, радиационные условия). В частности, наиболее подвержена сбоям аппаратура космических аппаратов, вращающихся по высокоэллиптическим орбитам.

Вместе с тем, следует отметить, что, наряду с исследованием сбоев в активных элементах аппаратуры (например, СБИС динамической памяти), недостаточно уделяется внимания “пассивной” части аппаратуры (линиям связи, контактирующим устройствам, контактными площадкам, проводникам печатных плат и т.д.). При этом следует иметь в виду, что если для активных элементов аппаратуры первопричиной сбоев зачастую является радиация (например, высокоэнергетичные частицы химических элементов), то для пассивных элементов первопричиной сбоев может выступать вибрация (например, в длительных космических полетах).

Выводы. 1. Рассмотрены и предложены методы активной диагностики сбоев аппаратуры, позволяющие обнаруживать и регистрировать источники сбоев по совокупности новых информативных признаков.

2. Методы интеллектуальной диагностики сбоев позволяют фиксировать скрытые дефекты датчиков и исполнительных механизмов как в функции сбойности кода ЭВМ, так и в параметрах самих объектов.

3. Для выполнения требований электромагнитной совместимости аппаратуры предложены методы и средства (бесконтактные датчики сбоев) обнаружения и регистрации сбоев в диапазоне рабочих частот до 4 ГГц.

4. Предложены методы и средства обнаружения и регистрации сбоев в оптико-электронных системах по информативному признаку “освещенность” и с использованием кодо-импульсных модуляторов.

5. Для разработки аппаратуры космических аппаратов, устойчивой к сбоям, необходимо применять комплексный подход, заключающийся в исследовании обрабатывания сбоев как в активных, так и пассивных ее частях.

Данная работа поддерживается грантом Московского государственного индустриального университета по разделу: “Надежность: контроль, диагностика, сбои. Новые методы” (код проекта 01.05.06).

Автор выражает благодарность академику РАН В.К. Левину за помощь и поддержку в развитии данного направления работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреев А.И., Баяков А.В. Проблемные вопросы создания высоконадежной радиоэлектронной аппаратуры для ракетной, космической и авиационной техники, вытекающие из требований комплекса государственных стандартов “Мороз-6” // Междунар. науч.-техн. конф. “Системные проблемы качества, математического моделирования, информационных, электронных и лазерных технологий”. – Москва–Сочи, 2001. – Ч. 1. – С. 45–47.
2. Бодин А.Б., Дутов Е.Н., Почукаев В.Н. Задачи автономной системы навигации. Космонавтика и ракетостроение. – Королев, М.О., 2000. – С. 35-40.
3. Дианов В. Н. Радиоизмерительные методы в задачах обнаружения сбоев в ЭВМ // Вопросы радиоэлектроники. Серия ЭВТ. – 1992. – Вып. 6. – 13 с.
4. Дианов В. Н. Бесконтактный контроль и диагностика соединителей высокопроизводительных вычислительных систем // Вопросы радиоэлектроники. Серия ЭВТ. – 1992. – Вып. 6. – 9 с.
5. Дианов В. Н. Моделирование явлений сбоя в соединителях высокопроизводительных вычислительных систем // Электронное моделирование. – 1993. – № 1. – С. 6.
6. Дианов В. Н. Способ контроля электрических соединителей. Патент РФ № 2001413, 1993, Б.И. – № 37. – 6 с.
7. Дианов В. Н. Способ обнаружения скрытых дефектов соединителей. Патент РФ № 2003126, 1993, Б.И. – № 42. – 9 с.
8. Дианов В. Н. Способ бесконтактного контроля электрических соединений. Патент РФ № 2003993, 1993, Б.И. – № 43. – 5 с.
9. Дианов В. Н. Способ контроля электрических соединителей. Патент РФ № 2050555. 1995, Б.И. – № 35. – 10 с.
10. Дианов В. Н. Метод анализа и синтеза РЭА, устойчивой к сбоям // Надежность и контроль качества. – 1994. – № 11. – 6 с.
11. Дианов В. Н. Сбои в технических системах. – М.: Машиностроение, 1999.
12. Дианов В. Н. Методы и средства обнаружения и регистрации источников сбоев в системах и устройствах с кодо-импульсной модуляцией сигналов. Автореф. дис. . . . д-ра техн. наук. – М.: МГИУ, 2002.
13. Хольм Р. Электрические контакты. – М.: Изд-во ИЛ, 1961.
14. Левин А. П. Контакты электрических соединителей радиоэлектронной аппаратуры. (Расчет и конструирование). – М.: Сов. радио, 1972.
15. Кечиев Л. Н. Расчет и конструирование многослойных печатных плат. – М.: МИЭМ, 1983.
16. Хетагуров Я. А., Руднев Ю. П. Повышение надежности цифровых устройств методами избыточного кодирования. – М.: Энергия, 1974.

17. Князев А. Д. и др. Конструирование радиоэлектронной и электронно-вычислительной аппаратуры с учетом электромагнитной совместимости. – М.: Радио и связь, 1989.
18. 2006 IEEE. Dianov V. N. Active Diagnostics of the Failures in Printed – Circuit – Boards. Moscow State Industrial University, Russia. EMC – Zurich in Singapore 2006. 17 th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility, 27 February–3 March 2006, Singapore, Suntec International Convention & Exhibition Centre, pp. 194–197.
19. Rainal A. T. Performance Limits of Electrical Interconnections to a High-Speed Chip. “IEEE Trans. Compar. Hybrids and Manuf Technol.”, 1988, 11, № 3, pp. 260–266.
20. Шабельницкий К. А., Дианов В. Н., Чернов В. С., Раев Б. К. Устройство для контроля работы передающей телевизионной камеры. А.С. СС-СР № 621129. МПК H04 № 7/02. БИ. – № 31, 1978.
21. Давыдов Э. Н., Кисляков В. Е., Дианов В. Н., Хазанов В. Е. Способ контроля обрыва кварцевой нити в процессе ее выработки. АС СССР № 808391. МПК СОЗВ 37/07. БИ. – № 8. – 1980.
22. Порфирьев Л. Ф. Теория оптико-электронных приборов и систем. – Л.: Машиностроение, 1980.
23. Дианов В. Н. Использование кодо-импульсных модуляторов для контроля качества печатных плат // Вопросы радиоэлектроники. Серия “Электронно-вычислительная техника”. – 1994. – Вып. 2. – С. 155–164.
24. Дианов В. Н. Повышение достоверности контроля печатных плат // Тез. докл. VI Всесоюз. конф. “Проблемы метрологического обеспечения систем обработки измерительной информации”. 1987. С. 222–223.
25. Контроль функционирования больших систем / Под ред. Г.П. Шибанова. – М.: Машиностроение, 1977. – 360 с.
26. Соловьев Ю. А. Системы спутниковой навигации. – М.: ЭКО-ТРЕНДЗ, 2000. – 270 с.
27. Патент РФ № 2251814. МПК 7 H04 L 1/20 от 10.05.2005. БИ. – № 13.
28. Вьюшков Ю. А., Дианов В. Н. Асинхронный электропривод с широтно-импульсным управлением. А.С. СССР № 365789. БИ. – № 6. – 1973.
29. Дианов В. Н. Исследование кодо-импульсного управления исполнительными асинхронными двухфазными двигателями. Автореф. дис... канд. техн. наук. – М.: МАИ, 1973.
30. Horneff Wilfried, Hewlett Packard. Die Frequenz-Zeit-Ebene–Eine neue Dimension. Elektron. – Technol. Elektron–Anwend., Elektron–Market. 1989, № 9, P. 44–46.
31. Реферативный журнал “Автоматика и вычислительная техника”, 1989, № 12, “ВИНИТИ”. Horneff Wilfried, Hewlett Packard (Новая техника анализа сигналов). Die Frequenz-Zeit-Ebene Eine neue Dimension Elektron–Technol., Electron–Anwend., Elektron–Market. 1989, № 9, с. 44–46, Нем. DB ISSN 0174-7452.
32. Плюшкин К. В., Саркисов А. А., Власов Д. В., Дианов В. Н. Применение кода Вьюшкова-Дианова для интеллектуальной диагностики сбоев исполнительных механизмов // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2005. – № 2. – С. 42–45.
33. Саркисов А. А., Власов Д. В., Дианов В. Н. Интеллектуальная диагностика сбоев автомобильных датчиков // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2004. – № 3–4. – С. 46–52.
34. Дианов В. Н., Саркисов А. А., Власов Д. В. Способ и устройство для интеллектуальной диагностики сбоев автомобильных датчиков. Заявка на изобретение № 2004105785/09 от 27.02.2004. МПК G05B 23/00. Решение о выдаче патента на изобретение ФГУ ФИПС от 01 августа 2006 г.

35. Г о б ч а н с к и й О. П., К у з н е ц о в Н. В. Устойчивость IBM PC совместимых контроллеров к радиационным сбоям на орбитах космических аппаратов // Современные технологии автоматизации. – 2005. – № 3. – С. 46–51.

Статья поступила в редакцию 25.04.2006

Вячеслав Николаевич Дианов родился в 1940 г., окончил в 1964 г. Рязанский радиотехнический институт (в н.в. Рязанская государственная радиотехническая академия). Д-р техн. наук, профессор Московского государственного индустриального университета. Автор 180 работ в области элементов и устройств автоматики и вычислительной техники (управление, контроль, диагностика).

V.N. Dianov (b. 1940) graduated from the Ryazansky Radio-Technical Institute in 1964, now Ryazansky State Radio-Technical Academy. D. Sc. (Eng.), professor of Moscow State Industrial University. Author of 180 publications in the field of elements and devices of automatics and computer facilities (management, control, diagnostics).



“ВЕСТНИК МОСКОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА имени Н.Э. БАУМАНА”

Журнал “Вестник МГТУ имени Н.Э. Баумана” в соответствии с постановлением Высшей аттестационной комиссии Федерального агентства по образованию Российской Федерации включен в перечень периодических и научно-технических изданий, в которых рекомендуется публикация основных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора наук.

Главный редактор журнала “Вестник МГТУ имени Н.Э. Баумана” — ректор МГТУ имени Н.Э. Баумана, чл.-кор. РАН, д-р техн. наук, профессор И.Б. Федоров.

Журнал издается в трех сериях: “Приборостроение”, “Машиностроение”, “Естественные науки” с периодичностью 12 номеров в год. Подписку на журнал “Вестник МГТУ имени Н.Э. Баумана” можно оформить через ОАО “Агентство “Роспечать”.

Подписывайтесь и публикуйтесь!

Подписка по каталогу “Газеты, журналы” ОАО “Агентство “Роспечать”

Индекс	Наименование серии	Объем выпуска	Подписная цена (руб.)	
		Полугодие	3 мес.	6 мес.
72781	“Машиностроение”	2	250	500
72783	“Приборостроение”	2	250	500
79982	“Естественные науки”	2	250	500

Адрес редакции журнала: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5.

Тел.: (495) 263-62-60; 263-60-45. Факс: (495) 261-45-97.

E-mail: press@bmmstu.ru