

УДК 53.083

В. Н. Дианов, Т. А. Гевондян

Московский государственный индустриальный университет

ВОПРОСЫ АППАРАТУРНОЙ БЕССБОЙНОСТИ МАГНИТОЛЕВИТАЦИОННЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Дата поступления 30.07.2015

Решение о публикации 01.08.2015

Дата публикации 21.10.2015

Аннотация: Рассмотрены вопросы построения бессбойной электронной аппаратуры на основе обнаружения и регистрации скрытых дефектов как предвестников сбоев. Предложены методы применения оригинальных контактных и бесконтактных датчиков сбоев. Приведены результаты экспериментальных исследований предложенных методов и средств.

Ключевые слова: предвестники сбоев, сбои, скрытые дефекты, бесконтактные и контактные датчики сбоев, аппаратурная бессбойность.

V. N. Dianov, T. A. Gevondyan

Moscow state industrial University

QUESTIONS HARDWARE BASSBOOST MAGNETO-LEVITATION VEHICLES

Abstract: One of the hallmarks of the magneto-levitation transport are a big, life cycle and safety. The concept of security and life-cycle are important parameters: the probability of failure, failure rate, reliability, time to return to a safe status. Improving the reliability and security of modern rolling stock is possible through the improvement of railway automatics and telemechanics. Operated system monitoring and diagnostics of rolling stock consisting of a complex stationary, airborne and mobile systems, solve the problems of the prevention of failures and accelerated deterioration, maintain the technical characteristics of the equipment at a predetermined level and providing an assigned resource. The transition to a more technically complex objects – magneto-levitation vehicles – requires additional development funds to improve reliability, including the detection and diagnosis of failure States and conditions of intermittent failures – failures. The reliability of the control and diagnostic systems have many times exceed the reliability of the rolling equipment and perform the following main functions:

- settings of sensors and measurement channels the parameters for a specific object;
- identification of the elements of the object, registration of extreme deviations, their localization and signaling of limit deviations of parameters;
- formation of a database state changes of elements, determination of residual life of components and of the facility as a whole.

Keywords: precursors of failures, failures, latent defects, non-contact and contact sensors failures, hardware bassboost.

Введение

Как известно, одними из отличительных черт магнитолевитационного транспорта являются большой «жизненный цикл» и безопасность [1]. В понятие безопасности и «жизненного цикла» как категории надежности входят такие важные параметры, как вероятность безотказной работы, интенсивность отказов, безотказность, время возврата к безопасному состоянию. Повышение надежности и безопасности функционирования современного подвижного состава возможно благодаря совершенствованию средств железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ). Внедренные в эксплуатацию системы контроля и диагностики подвижного состава, состоящие из комплекса стационарных, бортовых и мобильных комплексов, решают задачи предупреждения отказов и ускоренного износа, поддержания технических характеристик оборудования на заданном уровне и обеспечения назначенного ресурса. Переход к технически более сложным объектам – магнитолевитационным транспортным средствам [2] – потребует, на наш взгляд, дополнительной разработки средств повышения безотказности, в том числе обнаружения и диагностики предотказных состояний и состояний перемежающихся отказов – сбоев. Надежность контрольно-диагностических систем должна многократно превосходить надежность оборудования подвижного состава и выполнять следующие основные функции:

- настройку датчиков и каналов измерений на параметры конкретного объекта;
- определение состояния элементов объекта, регистрацию предельных отклонений, их локализацию и сигнализацию о предельных отклонениях параметров;
- формирование баз данных изменения состояния элементов, определение остаточного ресурса элементов и объекта в целом.

1. Анализ существующих методов диагностики электронной аппаратуры

С учетом современных тенденций развития контрольно-диагностические системы разделяют по выполнению производственно-технических, технологических, программно-аппаратных функций и по принципам измерения параметров. Наиболее сложными и информативными являются встроенные средства диагностики, подключаемые к действующим агрегатам для контроля состояния подвижного состава. Они обеспечивают предрейсовый и оперативный контроль состояния агрегатов с отображением информации и предупреждением о предельных режимах в эксплуатации, регистрацию отклонений параметров; обнаружение и регистрацию отказов, выдачу рекомендаций по оперативному выходу из аварийной ситуации.

Одной из актуальных проблем при внедрении микропроцессорных и микроэлектронных систем ЖАТ является их защита от грозовых и коммутационных перенапряжений, а также от воздействия тягового электропривода, импульсных систем управления. Новые принципы и технологии создания помехозащитных систем должны удовлетворять требованиям международных стандартов, инвариантных в отношении низкого качества электроэнергии систем электроснабжения, внешних воздействий в результате грозовых и коммутационных перенапряжений. Разработки в области грозозащиты технических средств ЖАТ направлены на построение многокаскадных систем защиты, в частности для решения задач электромагнитной совместимости аппаратуры.

Важное место при эксплуатации аппаратуры приобретает системный анализ. Для сбора информации об отказах технических средств на основе данных графиков при эксплуатации разработана комплексная автоматизированная система учета, контроля, устранения отказов технических средств и анализа их надежности. В рамках дальнейшего повышения надежности и качества электронной аппаратуры (ЭА) предлагается диагностировать скрытые дефекты в ней, на основе этого выявлять сбои, являющиеся предвестниками отказов, и, тем самым, создавать предпосылки для построения бессбойной аппаратуры [3, 4].

Современная ЖАТ представляет собой сложный объект и содержит в своем составе совокупность различных вычислительных устройств (процессоров, ЭВМ), исполнительных механизмов (в первую очередь, электрических) по обработке команд вычислительных устройств, а также датчиков. Значительную часть современного оборудования (до 50 % и выше) составляет контрольно-диагностическое оборудование (различные аппаратно-программные средства, в том числе и встраиваемые в рабочую аппаратуру), обеспечивающее отказобезопасность [5].

2. Бессбойность – путь создания высоконадежной аппаратуры

Диагностические технологии направлены на своевременное распознавание предаварийных ситуаций, недопущение опасного для техники и человека развития событий, что требует нового уровня интеллектуальных средств контроля и диагностики с использованием встроенных процессоров, персональных и мини-ЭВМ, разработки большого ряда программ, алгоритмов тестового и функционального диагностирования.

Одной из характеристик надежности является безотказность – свойство объекта непрерывно сохранять работоспособность в течение некоторого времени. В понятие безотказности входит и понятие сбоя как самоустраняемого отказа (согласно ГОСТ Р 27.002-89. Надежность в технике. Основные поня-

тия. Термины и определения. – Введен 01.01.2011. – М., Технический комитет по стандартизации ТК 119 «Надежность в технике», 32 с.). Следовательно, проведение активной диагностики сбоев посредством регистрации их источников через фиксацию их промежуточного состояния («предсбоя») и различных информативных параметров позволяет вывести понятие сбоя в самостоятельную категорию – «бессбойность», то есть способность функционального узла продолжать выполнение требуемой функции в присутствии сбоев [6, 7]. Учитывая, что понятие «качество» оперирует с такими понятиями, как «явные дефекты» и «неявные дефекты», можно установить связь между сбоями и скрытыми дефектами [8].

Таким образом, существующие основные свойства надежности технических систем целесообразно дополнить новым свойством – «бессбойностью». Регистрируя параметры сбоев через показания датчиков сбоев и измерительные средства, получаем возможность устранять источники сбоев и, следовательно, влиять на параметры функционирования технической системы (рис. 1).

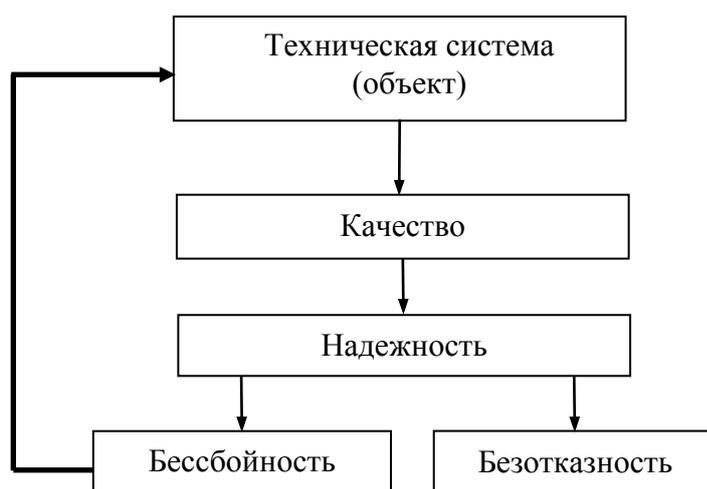


Рис. 1. Новое свойство технических систем – «бессбойность» и ее связь с существующей структурой (толстые линии)

Увеличение надежности технических систем возможно за счет обнаружения скрытых дефектов и электромагнитных помех посредством введения контактных и бесконтактных датчиков сбоев (КДС и БДС соответственно) и использования новых информативных признаков сбоев с соответствующей алгоритмической обработкой информации (сигналов). Основным источником скрытых дефектов в ЭА являются соединители и соединения, а предвестником отказов, например, в космической аппаратуре, – активные элементы в виде транзисторов, микросхем [9].

3. Соединители как основной источник скрытых дефектов

Для соединителей разных конструкций характерна сложность физических процессов, приводящих к источникам сбоев: загрязнения, вносимые при изготовлении; особенности поведения материалов, составляющих соединители; несвоевременная и неудовлетворительная чистка контактов; недостаточная защищенность от внешних воздействий.

Известны методы контроля соединителей, которые предполагают входной и эксплуатационный контроль по одному параметру соединителя – электрическому сопротивлению замкнутых и разомкнутых контактов или их совокупности. Общий недостаток этих видов контроля – функциональная ограниченность, не позволяющая проводить контроль соединителей, находящихся в предельных режимах, то есть на границе устойчивого работоспособного состояния. Вместе с тем необходимо отметить важность контроля по данному параметру, поскольку по мере того, как в результате совершенствования ЭА снижаются рабочие напряжения и токи, режим нормального функционирования ЭА становится все более критичным к сопротивлению электрического контакта соединителей. Отметим, что даже относительно небольшие изменения сопротивления могут быть причиной сбоев и отказов. Следует добавить, что причиной сбоев, вызывающих многочисленные ошибки в системе, могут быть и небольшие изменения сопротивления электрического соединения на всем пути следования сигналов. Дестабилизирующим и стабилизирующим факторами, влияющими на величину электрического сопротивления соединителей, являются разъедание поверхностей контактов соединителей и их смазка. При этом сопротивление электрического контакта соединителей зависит как от степени разъедания контактов, так и от тока, протекающего через них, а также от процедуры измерения сопротивления контакта. Эффект разъедания контактов в соединителях ЭА привлекает внимание по той причине, что золоченые контакты, препятствующие их разрушению, имеют высокую цену. Недостаток данных методов контроля заключается также и в том, что значительную погрешность при этом (особенно при непосредственном наблюдении процессов образования сбоев в аппаратуре) может вносить и сама измерительная аппаратура, например при установке печатной платы в качающийся соединитель.

К недостаткам методов измерения и контроля сопротивления контактов следует отнести и малый объем получаемой информации, недостаточный для определения статистической характеристики сопротивления, а также тот факт, что при контроле в статическом режиме сопротивление зависит от случайной точки покоя внутри точки (зоны) расчленения. Более глубоко природу и свойства сопротивления контактов можно изучить, измеряя быстро меняющиеся случайные его отклонения во время повторяющихся операций, поскольку сопротивление контактов зависит от динами-

ческих процессов, например от скачков напряжения и действия сил трения. Оборудование для такого вида контроля характеризуется быстроедействием порядка десяти наносекунд, что не всегда бывает достаточным для наблюдения явлений сбоя.

Контроль соединителей можно вести по другому параметру или одновременно по нескольким параметрам. Общим недостатком данных видов контроля является низкая достоверность из-за невозможности определения высокочастотных параметров соединителей.

Существуют способы контроля сбоев, возникающих в аппаратуре из-за скрытых дефектов в работе соединителей, позволяющие фиксировать сбои по вторичным признакам и выявлять их в блоках, электрически расположенных за соединителями. Общий недостаток таких способов заключается в невозможности установления причины сбоя или его местонахождения в устройствах, а также сложность аппаратной реализации.

Другие виды контроля соединителей заключаются в проверке их параметров в режимах короткого замыкания или холостого хода, то есть обрыва, что соответствует выключенному состоянию. Недостаток способов – низкая достоверность контроля, не позволяющая выявлять или прогнозировать наступление сбойных ситуаций, которые могут возникать на протяжении всего срока службы соединителей.

Задачу предотвращения сбоев в соединителях частично решают контроль контактного сопротивления при испытании контактов на износостойчивость, оценка качества механически скрепленных контактных соединений, а также способы приемки и испытаний.

Одним из важнейших параметров, характеризующих качество соединителей, является контактное нажатие F_k . В свою очередь, контактное нажатие для каждого соединителя является переменной величиной в течение всего его срока службы. Перечислим факторы, от которых зависит значение этого параметра:

1. Коэффициент c , учитывающий способ, чистоту обработки и состояние поверхности контактных элементов (для грубых поверхностей $c = 3$, для чистых – $c = 1$).

2. НВ – число поверхностной твердости по Бринеллю.

3. Коэффициент b , зависящий от фактора деформации, вида и формы зоны контактирования (на практике $b = 0,33 \dots 2,0$).

4. ρ – приведенное удельное сопротивление материалов, из которых выполнены контакты, причем $\rho = \rho_1 + \rho_2$, где ρ_1, ρ_2 – удельные электрические сопротивления материалов контактов.

5. R_n – переходное сопротивление контакта.

6. Коэффициент $k_1 = 1,5 \dots 3,0$, учитывающий износ материала контактных пар (чем больше износ, тем больше k_1).

7. Коэффициент $k_2 = 1,1 \dots 1,3$, характеризующий предельные отклонения размеров, назначаемые на детали конструкции соединителя (чем больше размеры контактных элементов и меньше их предельные отклонения, тем меньше k_2).

8. Коэффициент $k_3 = 1,2 \dots 1,3$, учитывающий статическую и динамическую нестабильность переходного сопротивления R_n (чем больше указанная нестабильность, тем больше k_3).

9. Коэффициент $k_4 = 1,0 \dots 5,0$, определяющий частоту тока, протекающего в коммутируемой электрической цепи (возрастает с ростом частоты).

10. Коэффициент k_5 , учитывающий изменение жесткости материала контактных элементов от их рабочей температуры (чем больше изменение температуры, тем больше k_5).

Из приведенного перечня факторов видно, что их число, во-первых, достаточно велико, а во-вторых, в силу разных причин они имеют достаточно большой разброс значений. На практике это приводит к тому, что отклонения контактного нажатия за пределы допусков являются причиной скрытых дефектов в соединителях, то есть дефектов, не обнаруживаемых при контроле известными методами. Из данного перечня также следует, что наиболее полным информативным параметром, определяющим качество соединителей, является контактное нажатие. Однако контроль по этому нажатию желателен, но трудно осуществим на практике.

Анализ существующих методов контроля соединителей позволяет сделать два принципиально важных вывода:

1. Контактные методы контроля имеют существенный недостаток, обусловленный влиянием многочисленных факторов на соединитель, снижающий достоверность его контроля в сбойном режиме.

2. Контроль сбойных режимов должен вестись по интегральным (обобщенным) информативным параметрам, то есть по параметрам, однозначно характеризующим состояние сбоя.

Проведенный ранее теоретический анализ поведения соединителей в режиме сбоя создает предпосылки для разработки методов бесконтактного и радиоизмерительного контроля и диагностики сбоев в электрических цепях ЭА [4, 5]. В этой связи необходимо отметить, что существующие методы бесконтактных измерений параметров не позволяют выявлять режимы сбоев соединителей и соединений по ряду причин. К ним относятся: низкая точность измерений вследствие промежуточных операций по усилению и преобразованию сигналов, невысокий порог чувствительности, не позволяющий проводить измерения параметров соединителя в промежуточном (между «включено» и «выключено») диапазоне изменений параметров, а также невысокая достоверность измерений из-за значительного влияния помех и, как следствие, невысокого отношения сигнал/шум. Полученные результаты позволяют, с другой стороны, предложить методы

измерений, свободные от указанных недостатков и основанные на следующих предположениях. Во-первых, соединитель в режиме сбоя представляется в виде симметричного электрического вибратора или излучателя в области высоких и сверхвысоких частот. Во-вторых, данный соединитель должен возбуждаться генератором соответствующих частот. В-третьих, излучаемая мощность должна быть достаточной для надежного измерения и регистрации существующей измерительной базой.

4. Экспериментальные исследования

Используя известное соотношение между длительностью фронта импульсного сигнала τ_{ϕ} и граничной частотой $f_{гр}$ его амплитудного спектра $\tau_{\phi} = 0,35/f_{гр}$, а также тот факт, что в современных элементах ЭА длительность импульсных фронтов составляет единицы наносекунд, получаем, что для моделирования процессов в указанных системах достаточно использовать генераторы высокочастотных колебаний в диапазоне частот до 300 МГц. Тогда, допуская существование зазора в соединителе в режиме сбоя за счет микровыступов, шероховатостей и микрозазоров в результате движения микрочастиц, получаем, что контактная пара соединителя в режиме сбоя образует симметричный электрический вибратор, который возбуждается генератором высокой частоты.

Под действием напряжения генератора на составляющих контактной пары соединителя как на плечах вибратора возникает продольный ток, который является источником электромагнитных волн, распространяемых поперечно в окружающее соединитель пространство. Данная поперечная относительно контактной пары соединителя волна может быть зафиксирована серийно выпускаемыми приборами (например, селективным микровольтметром). Проведенные испытания полностью подтвердили данные предположения и позволили использовать в качестве информативного параметра изменение фазы синусоидального сигнала [4].

Другой подход к решению проблемы бесконтактной регистрации режима сбоя соединителей заключается в следующем. Исходя из принципа взаимности для передающих и приемных антенн, можно заключить, что соединитель или соединение, находящиеся в режиме излучения, могут работать и в режиме приема (рис. 2а).

На рис. 2б показан тестируемый участок контролируемой системы (например, ЭВМ), включающий передающую БИС или СБИС (передатчик), приемную БИС или СБИС (приемник) и линию связи с соединителем в режиме сбоя. Передаваемая соединителем 1 электромагнитная мощность поступает на соединитель 2, находящийся в режиме сбоя, а затем на высокочастотный регистратор (например, осциллограф). Примеры регистрации сбойных режимов при тестировании показаны на рис. 3.

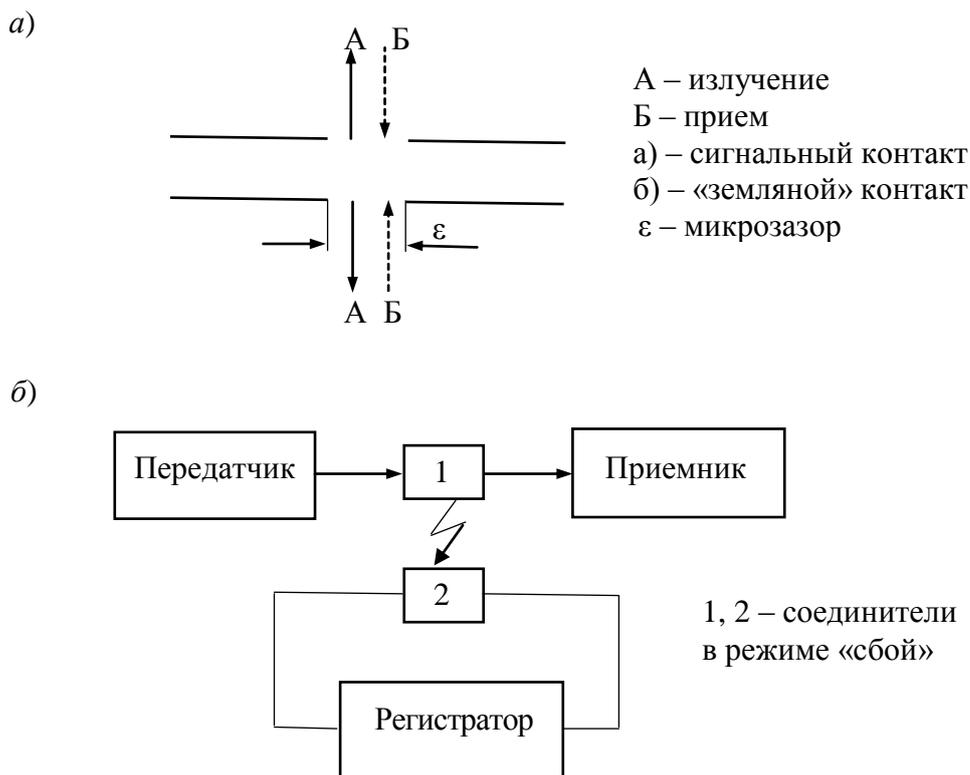


Рис. 2. Использование соединителя в режиме «сбой» в качестве излучающей и приемной антенны (а) при тестировании электрической цепи (б)

На рис. 3а показано тестирование соединения, имеющего режим сбоя во включенном состоянии, а на рис. 3б – в выключенном состоянии. Кривая 1 на рис. 3а соответствуют режиму сбоя во включенном состоянии соединения-излучателя, а на рис. 3б – в его выключенном состоянии. Кривая 2 на рис. 3а, соответствуют режиму сбоя во включенном состоянии соединения-приемника, а на рис. 3б – в его выключенном состоянии.

Расстояние между соединителями 1 и 2 (рис. 2б) изменялось от единиц миллиметра до 40–50 см. В частности, кривые на рис. 3а получены для расстояния между соединителями 10–12 мм, на рис. 3б – 25–27 см. Соединители 2 (рис. 2б) в обоих случаях выбирались со сбоями в режиме «включено» в целях получения максимальной чувствительности при приеме сигналов.

Из рассмотрения рис. 3а видно, что режим сбоя в режиме «включено» имеет несколько резонансных максимумов на частотах 4, 15 и 45 МГц.

Частичное превышение напряжений на кривой 2 в областях от 6 до 12 МГц и от 33 до 48 МГц можно объяснить большей добротностью колебательных контуров сбойного соединителя 2. Аналогично объясняется поведение кривой 2 на рис. 3б в области частот до 30 МГц, от 54 до 75 МГц и от 76 до 95 МГц.

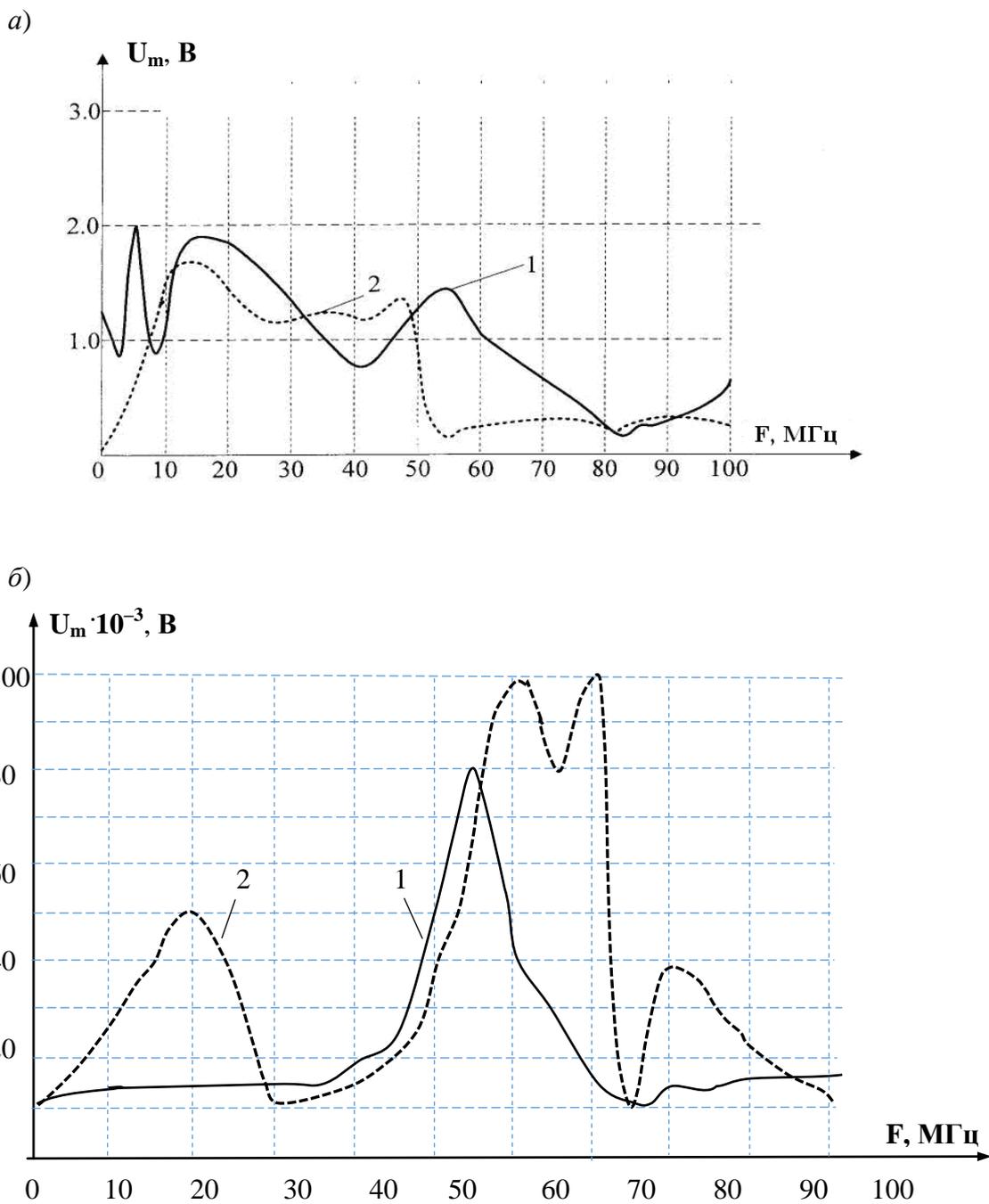


Рис. 3. Бесконтактное тестирование сбоя в режиме «включено» (а) и «выключено» (б)
(1 – излучатель, 2 – приемник)

Широкий диапазон как генерируемых, так и принимаемых частот в сбойных режимах позволяет сделать вывод о достоверности регистрации данных режимов описанными методами, а с другой стороны, позволяет выполнять аппаратуру для регистрации портативной. Об этом свидетельствуют также характеристики соединителей в режимах «включено» и «выключено» в области частот до 300 МГц.

Дополнительно отметим, что схема для обнаружения сбоев, представленная на рис. 2б, может быть использована и для обнаружения скрытых дефектов соединителей (и соединений) в процессе входного контроля соединителей или участков электрической цепи с предполагаемыми режимами сбоя. В качестве передатчика при этом используется генератор синусоидальных сигналов, в качестве приемника – высокочастотный осциллограф. При этом для обнаружения скрытых дефектов соединителей обеспечивается плавное колебание вилки относительно розетки (или наоборот) с дискретностью шага перемещений до десятков и единиц микрометров по ранее изложенной методике [4].

Экспериментальное исследование соединителей (РППМ 27-90) в диапазоне частот до 300 МГц показало, что наряду с резонансом на частоте 30 МГц имеется резонанс на частоте 230 МГц примерно с той же амплитудой напряжения. В режиме выключенного состояния в указанном диапазоне частот (300 МГц) на частотах 250 и 290 МГц амплитуда сбойного сигнала даже превышает аналогичный параметр на частотах 30 и 150 МГц. Режим сбоя соединения в указанном диапазоне частот имеет четыре резонансных максимума, что облегчает регистрацию данного режима типовой радиоизмерительной аппаратурой (при необходимости).

Исследования в диапазоне частот до 4 ГГц проводились на контактных дорожках печатных плат, включая многослойные [4].

В случае необходимости выявить дефекты в работающей цепи, представляющей собой параллельный многоразрядный интерфейс, предлагается следующий алгоритм идентификации сбойной шины (рис. 4, 5).

Применение приемника (соединителя в режиме сбоя) в качестве датчика позволяет выполнить аппаратуру для регистрации портативной, дешевой, надежной и простой в эксплуатации [4].

Последовательно на каждый разряд шины подается последовательность единиц с одновременной подачей нулей на остальные разряды шины. Фиксация режима сбоя осуществляется бесконтактно по описанной выше методике с регистрацией номера тестируемого на данный момент канала. В качестве информативного параметра при этом используется резонансная частота сбойного соединения.

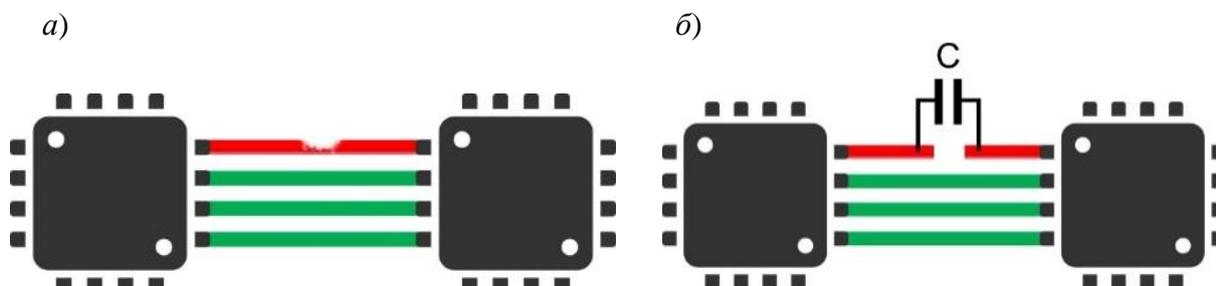


Рис. 4. Дефект линии связи (а) и его электрический аналог (б)

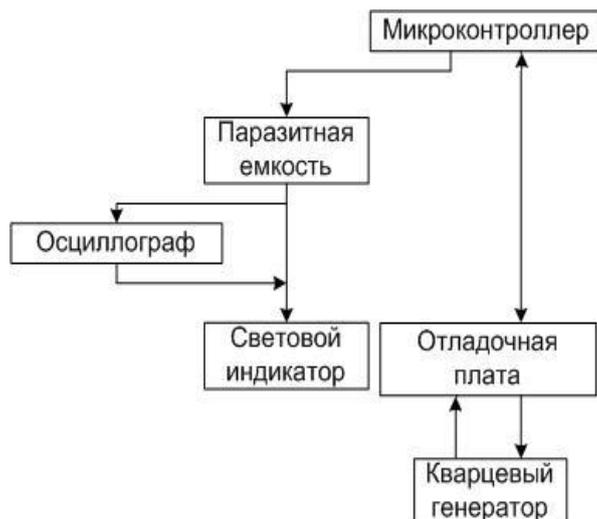


Рис. 5. Блок-схема экспериментального стенда по обнаружению сбоя

Фрагмент экспериментального стенда по моделированию и регистрации сбоев показан на рис. 6. Особенности загорания светодиодов характеризует разный уровень сигналов при сбойных режимах. При моделировании использовались емкости 5, 10, 15, 20 пФ.

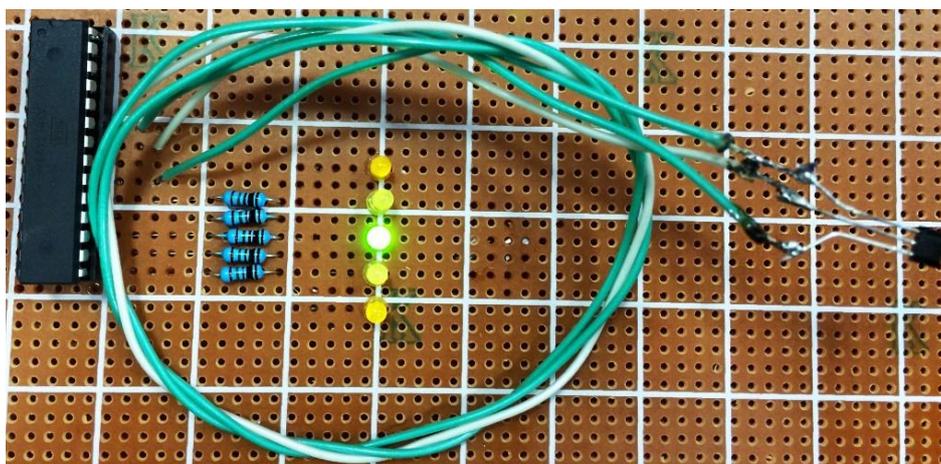


Рис. 6. Фрагмент экспериментального стенда

Регистрация сбойных режимов осуществлялась посредством высокочастотного (до 2 ГГц) осциллографа (рис. 7).

Полученный выше результат по обнаружению сбоев в процессе входного контроля предлагается использовать при разработке и модернизации аппаратуры для проверки ЭА на электромагнитную совместимость. Для этого на этапе входного контроля из состава аппаратуры необходимо исключить соединители и соединения, имеющие режим сбоя. В дальнейшем, в процессе эксплуатации аппаратуры, при появлении сбоев в ее рабо-

те за счет выхода на сбойные режимы соединителей и соединений (данные факты фиксируются встроенными в аппаратуру датчиками сбоев) следует считать данную аппаратуру электромагнитно не совместимой, если имеющиеся в ней сбои представляют собой сбои в режиме «включено», то есть сбои в области «короткого замыкания» соединителей.

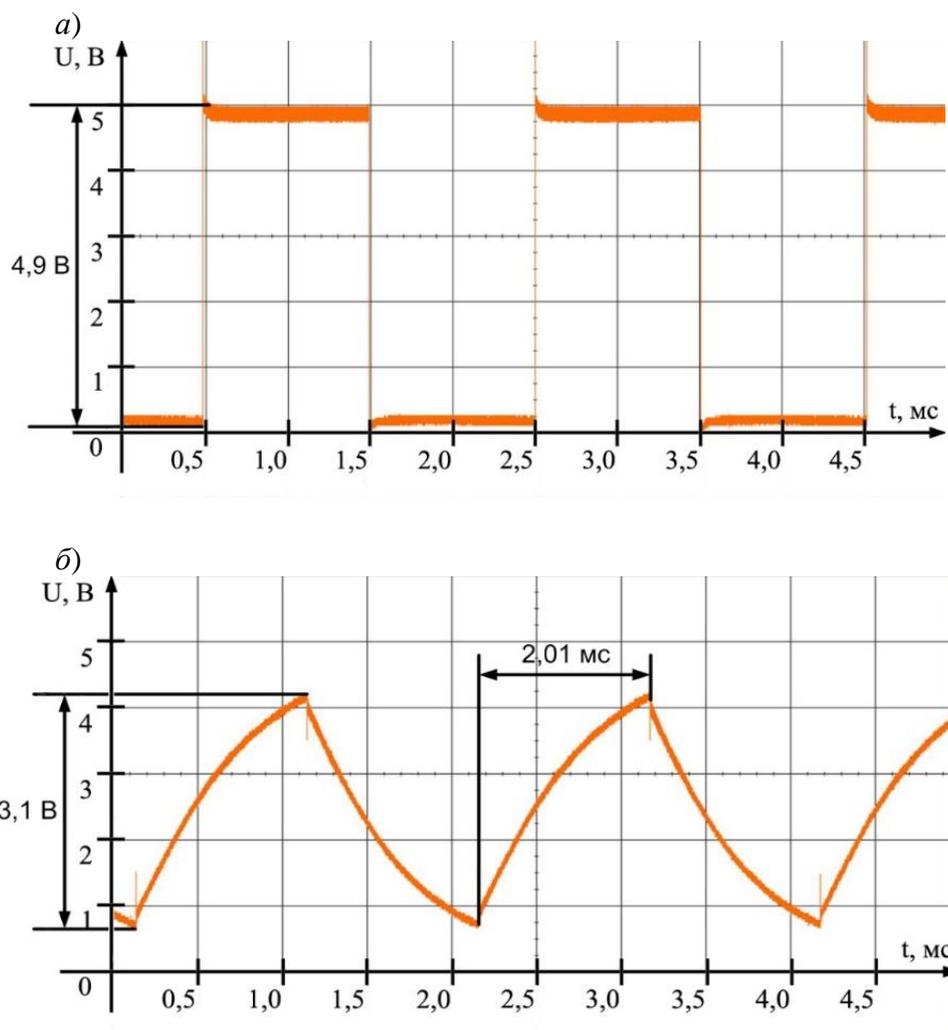


Рис. 7. Осциллограммы скрытых дефектов в аппаратуре:
 а – линия связи без скрытого дефекта;
 б – линия связи при наличии скрытого дефекта

Данное предложение обусловлено тем, что при сбое в режимах «включено» источник излучения сигнала сбоя (в данном случае соединитель в режиме сбоя) имеет сигнал излучения на некоторых частотах (рис. 3), больший входного сигнала, что может привести к превышению уровня излучаемых допустимых помех. Для реализации данной задачи в электронную систему технического устройства дополнительно включают КДС и БДС, установленные соответственно на линиях связи (интерфейсных шинах) с соединителями

и в непосредственной близости (до 1–2 см) от элемента (линии связи, интерфейсной шины) или узла (соединителя) электрической цепи.

При этом в качестве источников сбоев обнаруживаются соединители (разъемы), интерфейсные шины, шины управления, заземления и электропитания, внутренние и внешние электромагнитные помехи, а также (посредством анализа рисков сбоя) активные элементы в виде транзисторов, микросхем [5, 10]. В данном датчике электрических сигналов (сбоев) для настройки режимов использованы механизм фиксации (пружинная пара), а в качестве приемника излучений контактная пара. Важными преимуществами указанных датчиков перед широко распространенными датчиками Холла являются широкий (до 4 ГГц) диапазон работы, отсутствие источников питания, простота построения. Также предлагаются алгоритмы обработки сигналов с указанных датчиков сбоев как при автономной, так и при компьютерной обработке.

Заключение

1. Выдвинута концепция аппаратурной бессбойности построения и применения элементов, узлов, блоков и систем магнитолевитационных транспортных средств («аппаратурная бессбойность»).

2. Предложена диагностика скрытых дефектов как предвестников сбоев в электронной аппаратуре.

3. Аппаратурная бессбойность подтверждена экспериментальными исследованиями элементов ЭА.

4. Рекомендуются понятие «аппаратурная бессбойность» ввести в соответствующие разделы ГОСТов, ОСТов, ТУ и т. д. по железнодорожной автоматике.

Библиографический список

1. Антонов Ю. Ф. Магнитолевитационная транспортная технология / Ю. Ф. Антонов, А. А. Зайцев. – М. : Физматлит. – 2014. – 476 с.

2. W. LI, Y. Xue, Y. Zhnag. Development status and future planning of China railway high-speed. – P. 48–65.

3. Дианов В. Н. Свойство пассивных элементов радиоэлектронной аппаратуры увеличивать количество считываемой информации о системе под воздействием электрических колебаний. Научное открытие в области теории надежности, теории безопасности (диплом 47-S) / В. Н. Дианов, Н. А. Северцев, Ю. Г. Евтушенко // Научные открытия 2012. Сборник кратких описаний научных открытий, научных идей. Издание РАЕН, декабрь 2011. – С. 44–46.

4. Дианов В. Н. Физические основы обнаружения скрытых дефектов в электронной аппаратуре / В. Н. Дианов, Т. А. Гевондян. – Пенза : ИП Соколов А. Ю. – 2015. – 252 с.
5. ISA 84.01 – 96.
6. IEC 61508.
7. Patent USA N 6336065, IPC G 06F 11/25. 2003.
8. Дианов В. Н. Особенности обнаружения скрытых дефектов в комбинационных схемах магнитолевитационных транспортных систем. Труды 2-й Международной конференции «Магнитолевитационные транспортные системы и технологии» (MTST'14). Санкт-Петербург, Петербургский государственный университет путей сообщения, 17–20 июня 2014 г., с. 284–287.
9. Данилин Н. С. Управление жизненным циклом космического аппарата на основе информации о предвестниках отказов / Н. С. Данилин, Н. П. Колесников // Сетевой электронный журнал «Системотехника», № 8, 2010.
10. Воробьев Н. В. Методы анализа комбинационных схем на риск сбоя / Ship News. – 1997, № 12.

References

1. Antonov Y. F., Zaitsev A. A. *Magnitolevitacionnaya transportnaya tekhnologiya* [Magneto-levitation transportation technology]. Moscow, 2014. 476 p.
2. LI W., Y X., Y Z. Development status and future planning of China railway high-speed *Trudy 2-j Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii "Magnitolevitacionnye transportnye sistemy i tekhnologii" MTST'14* (Proc. of the 2nd Int. Conf. "Magnetic levitation transport systems and technologies" MTST'14). Kirov, 2014, pp. 48–65.
3. Dianov V. N., Severtsev N. A., Evtushenko Y. G. *Nauchnye otkrytiya 2012. Sbornik kratkih opisaniy nauchnyh otkrytij, nauchnyh idej RAEN – Collection of brief descriptions of scientific discoveries, scientific ideas AREA*, 12/2011, pp. 44–46.
4. Dianov V. N., Ghevondyan T. A. *Fizicheskie osnovy obnaruzheniya skrytyh defektov v ehlektronnoj apparature* [Physical principles of the detection of hidden defects in electronic equipment]. Penza, 2015. 252 p.
5. ISA 84.01 – 96.
6. IEC 61508.
7. Patent USA N 6336065, IPC G 06F 11/25. 2003.
8. Dianov V. N. Osobennosti obnaruzheniya skrytyh defektov v kombinacionnyh skhemah magnitolevitacionnyh transportnyh sistem [Especially the detection of hidden defects in combination-tion schemes magneto-levitation transport systems] *Trudy 2-j Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii "Magnit-*

olevitationnyye transportnyye sistemy i tekhnologii” MTST’14 (Proceedings of the 2nd International Conference "Magnetic levitation transport systems and technologies" MTST’14). Kirov, 2014, pp. 284–287.

9. Danilin N. With, Kolesnikov N. P. *Setevoj ehlektronnyj zhurnal “Sistemotekhnika”* – Network electronic magazine “systems Engineering”, 2010, no. 8.

10. Vorobiev N.V. *Ship News*, 1997, no. 12.

Сведения об авторах:

ДИАНОВ Вячеслав Николаевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры МГИУ, E-mail: vyasheslav-dianov@yandex.ru

ГЕВОНДЯН Тамара Акоповна, кандидат физико-математических наук, преподаватель кафедры общепрофессиональных дисциплин Пензенского артиллерийского инженерного института (филиал ВАМТО, г. Санкт-Петербург), E-mail: toma_ra1@mail.ru

Information about authors:

DIANOV Vyacheslav N., Doctor of Engineering, professor, professor of MGIU chair, E-mail: vyasheslav-dianov@yandex.ru

GEVONDYAN Tamara A., candidate of physical and mathematical sciences, teacher of chair of all-professional disciplines of the Penza artillery engineering institute (VAMTO branch, St. Petersburg), E-mail: toma_ra1@mail.ru