

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 681.518

КОНЦЕПЦИЯ И МЕТОД ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ПЕЧАТНЫХ УЗЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВСТРОЕННЫХ ЭМУЛЯТОРОВ ВИБРАЦИОННЫХ КОЛЕБАНИЙ¹

Статья поступила в редакцию 17.08.2016, в окончательном варианте 24.10.2016.

Тихонов Александр Николаевич, доктор технических наук, профессор, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», 101000, Российская Федерация, г. Москва, ул. Мясницкая, 20, e-mail: atikhonov@hse.ru

Увайсов Сайгид Увайсович, доктор технических наук, профессор, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», 101000, Российская Федерация, г. Москва, ул. Мясницкая, 20, e-mail: uvaysov@yandex.ru

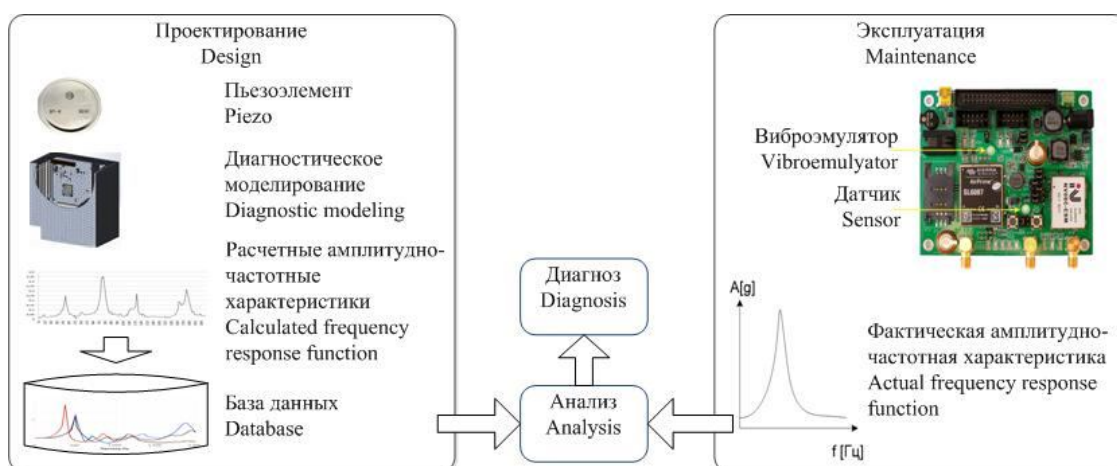
Иванов Илья Александрович, кандидат технических наук, старший преподаватель, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», 101000, Российская Федерация, г. Москва, ул. Мясницкая, 20, e-mail: ivanov_i_a@mail.ru

Лышов Сергей Максимович, аспирант, Сургутский государственный университет, 628412, Российская Федерация, г. Сургут, проспект Ленина, 1, e-mail: dmx_101@mail.ru

Обоснована актуальность решения задач вибрационного диагностирования печатных узлов. Разработан метод диагностирования механических дефектов бортовых электронных средств, основанный на новом подходе к подаче гармонических воздействий на печатные узлы или конструктивные элементы. Особенностью предложенного подхода является использование в качестве источника вибрации интегрированных на печатную плату виброэмуляторов, выполненных на основе пьезоэлементов. В соответствии с разработанным методом эффективность диагностирования обеспечивается за счет проведения на стадии проектирования математического моделирования вибрационных характеристик для различных технических состояний изделия, в т.ч. при наличии разного рода дефектов. В дальнейшем эти результаты сравниваются с получаемой диагностической информацией (экспериментальными данными по результатам вибрационных воздействий). Для количественной оценки сходства результатов в работе предложен коэффициент подобия, значение которого показывает соответствие реальной вибрационной характеристики изделия определенному дефекту. Использование виброэмуляторов позволяет осуществлять контроль электронных средств непосредственно во время эксплуатации без проведения дополнительных трудоемких работ по их демонтажу и обратному монтажу.

Ключевые слова: бортовое электронное средство, диагностирование, пьезоэлемент, вибростенд, амплитудно-частотная характеристика, механические дефекты, влияние на собственные частоты колебаний, математическое моделирование, коэффициент подобия

Графическая аннотация (Graphical annotation)



¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 14-07-00414 «Информационная система диагностического моделирования физических процессов в электронных схемах»).

CONCEPTION AND METHOD OF DIAGNOSIS OF PRINTED BOARD ASSEMBLY WITH USING OF ON-BOARD EMULATORS OF OSCILLATION

The article has been received by editorial board 17.08.2016, in the final version – 24.10.2016.

Tikhonov Aleksandr N., D.Sc. (Engineering), Professor, National Research University Higher School of Economics, 20 Myasnitskaya St., Moscow, 101000, Russian Federation, e-mail: atikhonov@hse.ru

Uvaysov Saygid U., D.Sc. (Engineering), Professor, National Research University Higher School of Economics, 20 Myasnitskaya St., Moscow, 101000, Russian Federation, e-mail: uvaysov@yandex.ru

Ivanov Ilya A., Ph.D. (Engineering), National Research University Higher School of Economics, 20 Myasnitskaya st., Moscow, 101000, Russian Federation, e-mail: ivanov_i_a@mail.ru

Lyshov Sergey M., post-graduate student, Surgut State University, 1 Lenin Ave., Surgut, 628412, Russian Federation, e-mail: dmx_101@mail.ru

In the paper has been proved the actuality of solving the problem of vibratory diagnosis of printed board assembly. Also has been developed the method of diagnosis of mechanical defects of electronic means, which is based on a new approach to give harmonious effect on the printed board assembly or construction elements. The peculiarity of the suggested approach is using as a source of vibration the vibro emulators (piezoelements), integrated on the printed board assembly. In accordance with the developed method, the effectiveness of diagnosis at the stage of design is maintained through the mathematical modeling of various technical conditions of equipment including various defects found. In the future the results will be compared with the received diagnosis information (experimental data about the vibrating influences). For the quantitative assessment of the results of work the paper offers similarity ratio. The value of similarity ratio shows compliance to the real mechanical characteristics of the fixed defect. Using of vibro emulator allows to control electronic means directly during the maintenance without carrying out of additional time-consuming works.

Keywords: electronic mean, diagnosis, piezoelements, vibration-testing machine, amplitude-frequency characteristic, mechanical defect, mathematical modeling

Введение. Для любого электронного средства на протяжении большей части жизненного цикла, начиная с момента его изготовления и заканчивая утилизацией, существует вероятность возникновения неисправностей. Они могут быть единичными и многократными (повторяющимися); приводят к внезапным или постепенным отказам. Эти неисправности могут возникать из-за производственных дефектов изделий или процессов их старения; износа изделий под действием внешних дестабилизирующих факторов. Любая неисправность может стать причиной изменения технического состояния (ТС) изделия. В связи с этим актуальной является задача своевременной локализации неисправности и ее устранения [4]. **Целью** настоящей работы является представление нового подхода к выявлению неисправностей печатных плат с установленными на них электрорадиоэлементами (ЭРЭ) на основе исследования фактических вибрационных характеристик и сравнения их с результатами математического моделирования тех же изделий – при отсутствии и наличии дефектов.

Постановка проблемы. Среди различных классов электронных средств целесообразно выделить бортовые электронные средства (БЭС). Они подвержены влиянию значительного числа внешних факторов, в т.ч. потенциально оказывающих неблагоприятное воздействие на работу аппаратуры [19]. Поэтому вопросам их контролепригодности [7, 16] следует уделять особое внимание.

Для контроля и диагностирования электронных средств путем анализа физических процессов применяются различные методы и средства: для оценки ТС по электрическим параметрам используются тестеры, мультиметры, осциллографы; для теплового контроля – тепловизоры, термомпары и пирометры; для оценки по механическим характеристикам – прочностные и вибростенды. При этом электрический и тепловой контроль может быть реализован как на этапах производства, так и во время эксплуатации – путем использования встроенных средств мониторинга изделий.

В настоящее время применение вибрационного диагностирования для БЭС возможно только при испытаниях и выходном контроле на предприятии-изготовителе, т.к. требуется наличие дорогостоящего вибростенда с сопутствующим оборудованием. При этом, как правило, процедура проверки связана с нарушением целостности объекта, т.е. контроль носит «разрушающий» характер.

Кроме того, использование вибростендов сопровождается рядом дополнительных недостатков (сложностей):

- для поддержания равномерного перемещения стола вибростенда необходимо использование дополнительного оборудования, обеспечивающего обратную связь с системой управления;
- смещение центра масс БЭС в результате неравномерного расположения конструктивных элементов приводит к появлению сложных колебательных процессов.

Можно также заметить, что дефекты конструктивных элементов БЭС, проявляющиеся в процессе активного жизненного цикла изделий, не могут быть выявлены непосредственно в процессе эксплуатации без дополнительных дорогостоящих и трудоемких процедур по их демонтажу и обратному монта-

жу. В то же время несвоевременное выявление дефектов БЭС в процессе эксплуатации может привести к катастрофическим последствиям. Таким образом, задача непрерывного контроля и диагностирования механических дефектов эксплуатируемых БЭС является актуальной.

Подход к решению проблемы. Для решения описанной выше проблемы в работе предложен уникальный способ вибрационного диагностирования [12, 16], заключающийся в использовании виброэмуляторов, интегрированных на печатный узел (ПУ) или элементы конструкции изделия. Виброэмуляторы выступают в качестве источников гармонических колебаний и датчиков для снятия амплитудно-частотных характеристик (АЧХ). Применение виброэмуляторов как источников и датчиков основано, соответственно, на использовании прямого и обратного пьезоэффектов. Диапазон вибрационных воздействий, производимых виброэмуляторами, может составлять от 50 Гц до 2 кГц. Появление дефектов в изделиях будет сопровождаться изменением спектра собственных (резонансных) частот. При этом такие изменения будут индивидуальны для каждого вида дефектов.

Структурная схема предлагаемого подхода представлена на рисунке 1.

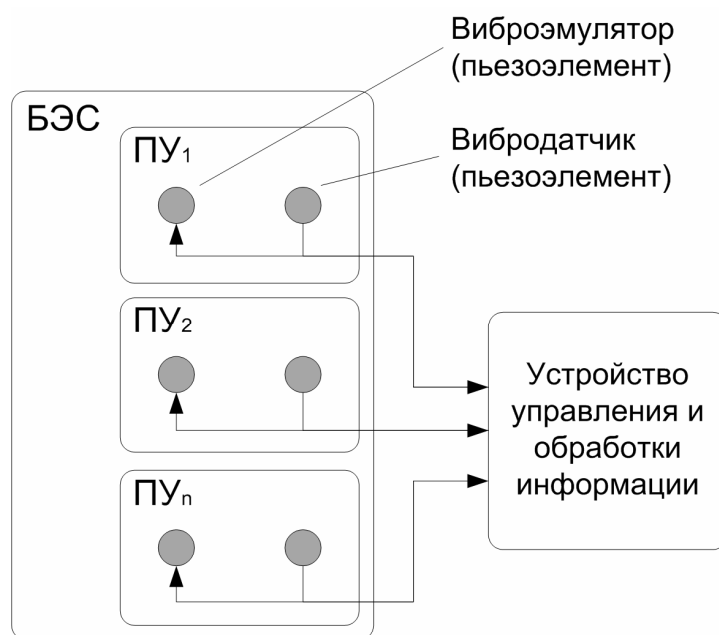


Рисунок 1 – Структурная схема подхода, использованного для вибрационного диагностирования БЭС

На рисунке 1 указано условное размещение пьезоэлементов на печатных узлах в качестве виброэмуляторов и вибродатчиков. Управление виброэмуляторами и анализ получаемых результатов осуществляются с помощью микроЭВМ или контроллера, подключаемых через стандартные интерфейсные разъемы.

Характеристика метода. На основе предложенного способа подачи гармонических колебаний был разработан метод диагностирования БЭС по вибрационным характеристикам – рис. 2. Его отличительной особенностью является использование математического моделирования для получения характеристик «исправных» и «неисправных» моделей; последующего анализа диагностической информации реальных изделий путем их сравнения с расчетными характеристиками.

С целью обеспечения приспособленности БЭС к диагностированию необходимо на стадии проектирования провести подготовительные мероприятия. Они должны включать в себя разработку компьютерной математической модели [13, 16] и диагностическое моделирование [17] (блоки 1, 2, 3 на рис. 2).

Математическая модель БЭС [3, 20] должна учитывать геометрические и физические параметры всех ЭРЭ, установленных на печатной плате в соответствии с электрической принципиальной схемой и схемой их размещения. Кроме того, в модели должны присутствовать виброэмуляторы, являющиеся неотъемлемой частью БЭС. Их необходимо монтировать на печатные платы или элементы конструкции. В случае бортовой аппаратуры стоимость виброэмуляторов обычно невысока по сравнению со стоимостью печатной платы со всеми установленными на ней ЭРЭ. Размещение на плате виброэмуляторов также не приводит к существенному увеличению веса конструкции.

Модель электронного устройства может быть разработана с использованием специализированных программных средств моделирования механических характеристик – например, SolidWorks, Асоника-ТМ, ANSYS, Nastran и др. [5, 6]. В основе этих программных комплексов заложены различные математические средства (модели) анализа механических процессов, основанные на методе конечных элементов или методе конечных разностей [9, 11, 18] (блоки 4, 5 на рис. 2). Предложенный авторами метод предусматривает возможность работы со всеми видами математических моделей.

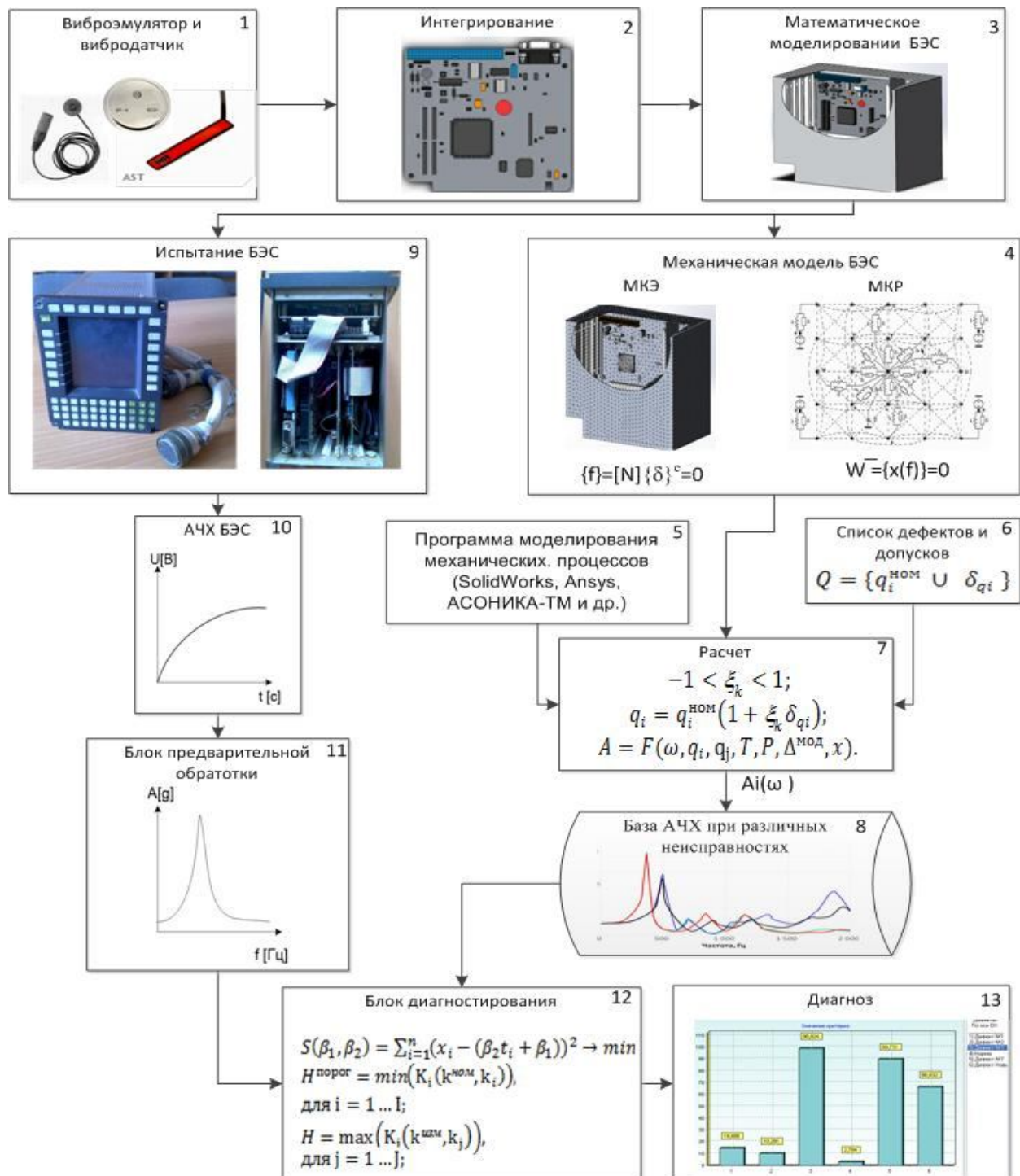


Рисунок 2 – Блок-схема предлагаемого метода диагностирования БЭС по вибрационным характеристикам

Для осуществления диагностического моделирования формируется набор характерных дефектов (блок 6 на рис. 2). Как показал проведенный ранее анализ [14, 16], наиболее распространенными механическими дефектами печатных плат с размещенными на них ЭРЭ являются следующие:

- ослабление креплений печатного узла к элементам конструкции БЭС;
- трещины в элементах конструкции (трещины печатной платы, трещины шпилек крепления и т.п.);
- деформация элементов конструкции (прогиб печатной платы, искривление шпилек крепления и т.п.);
- частичный или полный отрыв отдельных ЭРЭ от печатной платы;
- контакт ЭРЭ на печатной плате с другими элементами конструкции, что возможно в условиях высокой плотности расположения блоков БЭС и др.

На основе сформированного списка типовых дефектов и разработанной модели БЭС проводится диагностическое моделирование на ЭВМ (блок 2 на рис. 2). В результате него формируется набор АЧХ. Каждая из них соответствует определенному дефекту или совокупности дефектов.

С целью повышения эффективности диагностирования и уменьшения вероятности возникновения ошибок второго рода (неверное распознавание дефектов, которых фактически нет) АЧХ определяется путем математического моделирования механических процессов при различных значениях физических и геометрических параметров модели в пределах допусков на расположение ЭРЭ (блок 6 на рис. 2).

Для данного допускового расчета применяется имитационное моделирование, основанное на методе Монте-Карло. При этом геометрические и физико-механические параметры элементов рассчитываются по формуле:

$$q_i = q_i^{\text{НОМ}} (1 + \zeta_k \delta_{qi})$$

где q_i – текущее значение i -го параметра на k -ой реализации, $q_i^{\text{НОМ}}$ – номинальное значение i -го параметра, ζ_k – случайная величина ($-1 < \zeta_k < 1$), выдаваемая генератором случайных чисел, δ_{qi} – относительный допуск на i -ый параметр.

Набор промоделированных АЧХ формирует базу неисправностей (блок 8 на рис. 2). В нее дополнительно заносится информация о местах размещения виброэмуляторов, вибродатчиков и значения (частоты, амплитуды) тестовых сигналов.

На завершающих этапах производства БЭС в обязательном порядке проводятся различные виды испытаний и выходного контроля. При этом могут применяться вибрационные установки, уже имеющиеся на предприятии-изготовителе. При выявлении дефектов, с использованием описанной методики, они в ряде случаев могут быть устранены в заводских условиях.

Наибольшую актуальность разработанный метод приобретает на стадии эксплуатации изделий, когда использование вибростенда невозможно. Процедура диагностирования с использованием встроенных виброэмуляторов представлена в составе блок-схемы метода на рисунке 2.

Пьезоэлемент, установленный на печатный узел, под действием подаваемого переменного напряжения с заранее заданными параметрами оказывает гармонические воздействия на конструктивные элементы. С пьезодатчика (в качестве него может выступать другой виброэмулятор) после достижения установившегося режима снимается напряжение, характеризующее состояние БЭС (блок 10 на рис. 2). Полученные данные представляют собой дискретные значения амплитуд напряжений при определенной частоте. Применение методов аппроксимации позволяет сформировать АЧХ механических колебаний печатного узла (блок 11 на рис. 2). При этом характеристики приводятся к единой частотной сетке для дальнейшего анализа.

Непосредственно диагностирование осуществляется путем сравнения фактически полученной экспериментальной характеристики с каждой АЧХ из базы неисправностей (блок 12 на рис. 2). Критерием сравнения и, соответственно, критерием диагностирования (выявления дефекта) выступает максимальное значение коэффициента подобия [8]:

$$K_{f_{\text{Э}}, f_{\text{М}}} = \frac{\text{cov}(f_{\text{Э}}, f_{\text{М}})}{\sigma_{f_{\text{Э}}} \sigma_{f_{\text{М}}}},$$

где $f_{\text{Э}}$ и $f_{\text{М}}$ – АЧХ полученные экспериментально и в результате диагностического моделирования; $\text{cov}(f_{\text{Э}}, f_{\text{М}})$ – ковариация величин $f_{\text{Э}}$ и $f_{\text{М}}$; $\sigma_{f_{\text{Э}}}$ и $\sigma_{f_{\text{М}}}$ – среднеквадратичные отклонения величин $f_{\text{Э}}$ и $f_{\text{М}}$;

$$\text{cov}(f_{\text{Э}}, f_{\text{М}}) = \frac{1}{k} \sum_{k=1}^k (f_{\text{Э}k} - \mu_{f_{\text{Э}}})(f_{\text{М}k} - \mu_{f_{\text{М}}}),$$

где $\mu_{f_{\text{Э}}}$, $\mu_{f_{\text{М}}}$ – математическое ожидание величин $f_{\text{Э}}$, $f_{\text{М}}$:

$$\mu_{f_{\text{Э}}} = \left(\sum_{k=1}^k f_{\text{Э}i} \right) / k; \quad \mu_{f_{\text{М}}} = \left(\sum_{k=1}^k f_{\text{М}i} \right) / k,$$

$$\sigma_{f_{\text{Э}}} = \sqrt{D_{f_{\text{Э}}}}; \quad \sigma_{f_{\text{М}}} = \sqrt{D_{f_{\text{М}}}},$$

где $D_{f_{\text{Э}}}$, $D_{f_{\text{М}}}$ – дисперсия величин $f_{\text{Э}}$ и $f_{\text{М}}$:

$$D_{f_{\text{Э}}} = (f_{\text{Э}} - m_{f_{\text{Э}}})^2 / (k - 1);$$

$$D_{f_{\text{М}}} = (f_{\text{М}} - m_{f_{\text{М}}})^2 / (k - 1).$$

Следовательно, при максимальном значении коэффициента подобия $\max(K_{f_{\text{Э}}, f_{\text{М}}}) \rightarrow 1$ будет определен наиболее вероятный вид дефекта.

При несовпадении фактически полученной АЧХ для печатного узла ни с одной из АЧХ, хранимых в базе данных и соответствующих отсутствию дефектов или различным неисправностям, констатируется наличие нераспознанного дефекта. Для его определения необходимо проведение дополнительных исследований.

Однако в общем случае на основе набора коэффициентов подобия может быть построено распределение вероятностей между вариантами: отсутствие дефектов и различные виды дефектов. Иными словами принимаемое диагностическое решение фактически носит нечеткий характер и осуществляется в условиях некоторой неопределенности (риска). Поэтому результат диагностирования может быть представлен в виде сводной диаграммы состояния печатной платы со значениями коэффициента подобия (рис. 3) – для принятия окончательного решения специалистом.

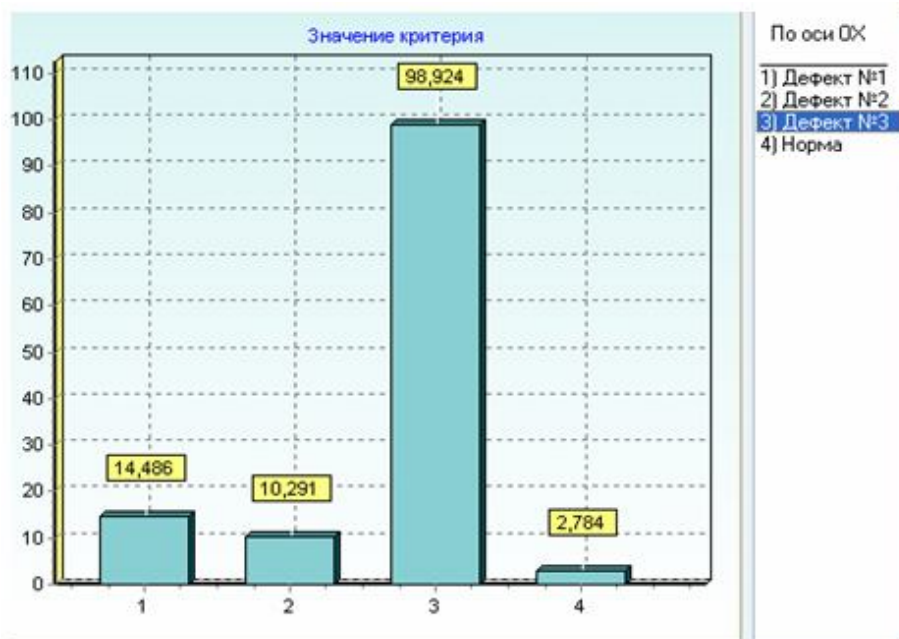


Рис. 3 – Пример диаграммы состояния со значениями коэффициента подобия (в процентах)

Отметим, что наличие пары пьезоэлементов потенциально позволяет (при наличии соответствующего коммутатора сигналов) использовать каждый из них (поочередно) в качестве пьезоэлемента и пьезодатчика. Таким образом, могут быть получены две АЧХ (вместо одной), что потенциально позволяет повысить качество распознавания дефектов.

Фактические АЧХ каждой из выпущенных единиц изделий (с уже установленными на них пьезоэлементами) могут также заноситься в специальную базу данных в качестве «исходных эталонов» – до начала эксплуатации изделий. Затем в процессе эксплуатации может индивидуально оцениваться наличие изменений АЧХ каждой единицы изделия – путем сравнения с «исходным эталоном». Особенности такого подхода: он позволяет выявлять некоторые подкритические изменения АЧХ, когда нарушения работы электрических схем еще не проявляются; не требуется проведения математического моделирования – если задача выявления вида дефекта не ставится. Такой подход может быть предпочтительным при следующих условиях: ПУ с установленными ЭРЭ изготавливаются однократно или в очень небольшом количестве экземпляров; разброс вибрационных параметров изготовленных исправных изделий одной и той же модели достаточно велик.

Экспериментальные исследования макета БЭС. Для экспериментальной проверки предложенного подхода был разработан макет БЭС (рис. 4). Он представляет собой закрепленный стальными шпильками на жестком основании печатный узел с размещенными на его поверхности ЭРЭ и пьезоэлементами (рис. 5).

В качестве виброэмулятора и вибродатчика использовался пьезоэлемент ЗП-22. Его эквивалентная электрическая схема и геометрические размеры представлены на рисунке 6. Выбранный пьезоэлемент обладает высоким сопротивлением и низкой емкостью (табл. 1) – согласно данным на lib.chipdip.ru/243/DOC000243460.pdf. Это позволяет при использовании пьезоэлемента в качестве датчика измерять только динамические характеристики и исключить влияние электромагнитных помех.

Несмотря на малые геометрические размеры виброэмулятора (рисунок 6б), его мощности достаточно для возбуждения ПУ, находящегося в блоке. Для достижения большей эффективности использования предлагаемого метода виброэмулятор, создающий колебания, необходимо располагать по возможности дальше от мест крепления ПУ.

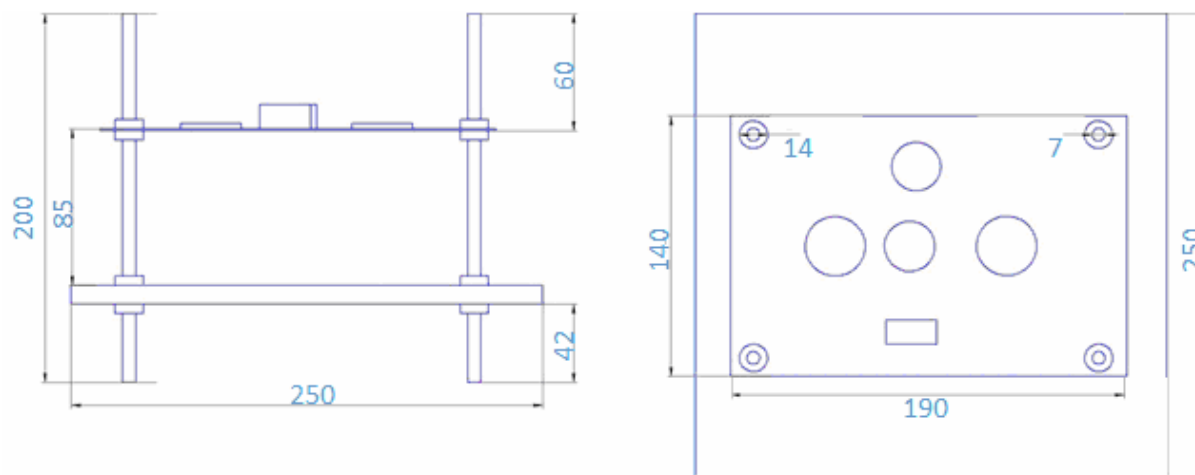


Рис. 4 – Эскиз макета БЭС (слева – вид спереди, справа – вид сверху)



Рис. 5 – Общий вид макета устройства для исследования БЭС

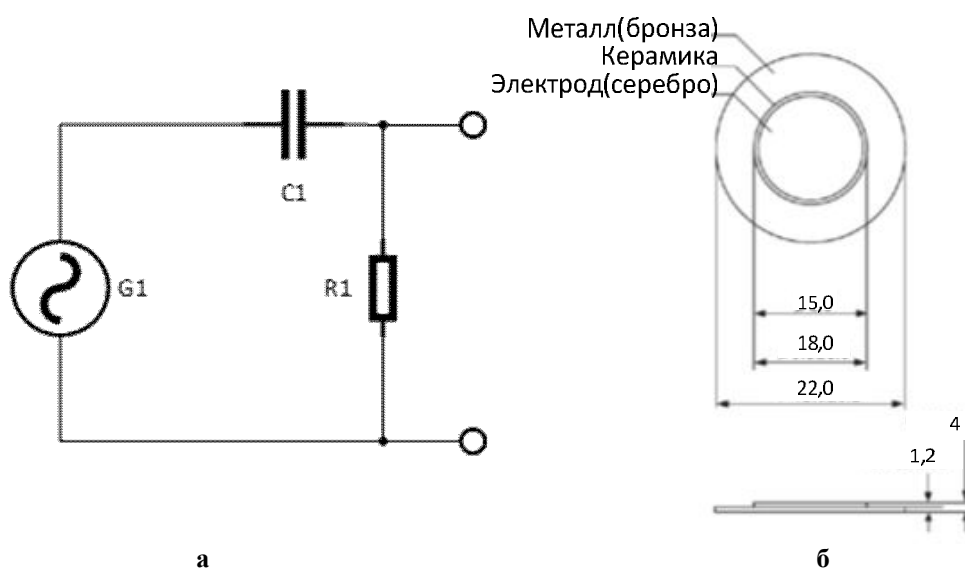


Рис. 6 – Пьезоэлемент ЗП 22: а – эквивалентная электрическая схема, б – геометрические размеры

Таблица 1 – Параметры пьезоэлемента ЗП 22

Параметр:	Значение:
Диапазон воспроизводимых частот	50–20 кГц
Напряжение питания	6 В
Диапазон рабочих температур	–30...+60 С0
Емкость	–8 нФ при 1 кГц
Резонансная частота	3.5 кГц
Импеданс	1000 Ом
Диаметр	22 мм
Высота	4 мм

На печатной плате экспериментального макета БЭС были установлены два пьезоэлемента ЗП-22 (один используется в качестве виброэмулятора, второй – в качестве вибродатчика), подстроечный резистор А-1, конденсатор БМТ-2, транзистор 2т809А (рис. 7).

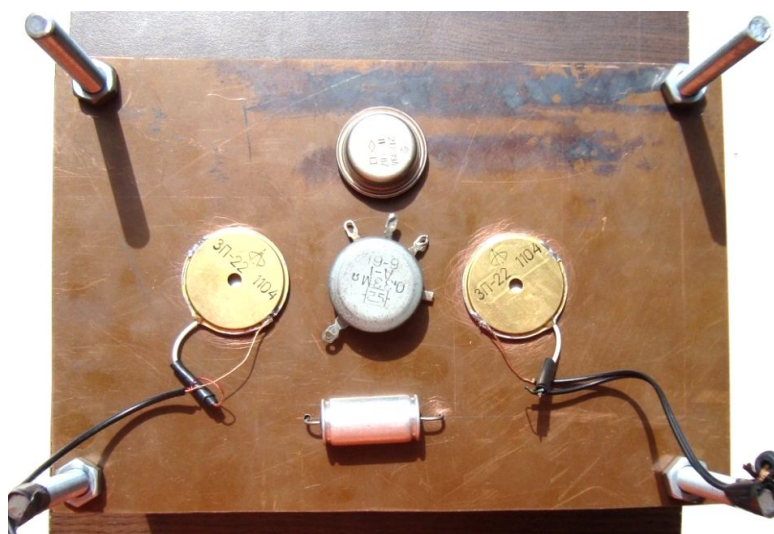


Рисунок 7 – Расположение пьезоэлементов на макете БЭС

Экспериментальные исследования макета БЭС проводились при воздействии гармонического сигнала в диапазоне от 20 до 2000 Гц. При этом моделировались дефекты в соответствии с таблицей 2.

Таблица 2 – Дефекты, моделировавшиеся на макете БЭС

Наименование дефекта	Описание дефекта	Условное изображение дефекта
Дефект А	Отсутствие резистора (или нарушение точек пайки его обоих ножек)	
Дефект Б	Отсутствие конденсатора	
Дефект В	Отсутствие транзистора	

В ходе предварительного эксперимента на макете БЭС при внесении грубых дефектов (табл. 2) были получены различимые по отношению друг к другу АЧХ (рис. 8). Они характеризуются смещенными (по отношению к случаю отсутствия дефектов) значениями резонансных частот. Поэтому результаты анализа АЧХ говорят о потенциальной возможности применения виброэмуляторов в качестве источника гармонических колебаний для диагностирования.

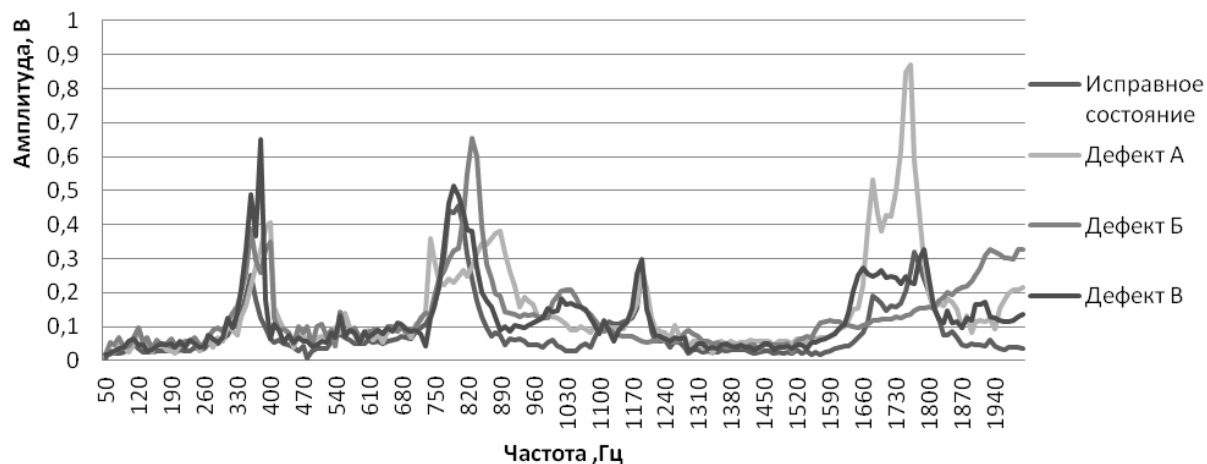


Рис. 6 – АЧХ макета БЭС

Заключение. Предложенный подход к вибрационному диагностированию дефектов на печатных узлах или элементах конструкции позволяет повысить полноту контроля БЭС при их изготовлении; надежность – за счет обеспечения периодических исследований АЧХ и оценки технического состояния. Дальнейшее развитие метода планируется в направлении проведения исследований возможности последовательного во времени использования одного и того же пьезоэлемента в качестве виброэмулятора и вибродатчика.

Список литературы

1. Аминев Д. А. Анализ принципов построения аппаратно-программного комплекса для диагностического моделирования разнородных физических процессов в радиоэлектронной аппаратуре / Д. А. Аминев, Н. Н. Кокин, С. У. Увайсов, А. Н. Тихменев // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2015. – № 3. – С. 129–141.
2. Брумштейн Ю. М. Анализ некоторых моделей группового управления рисками / Ю. М. Брумштейн, О. Н. Выборнова // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2015. – № 4. – С. 64–72.
3. Голушко Д. А. Программно-аппаратный комплекс для проведения испытаний изделий электронной техники на воздействие вибрации / Д. А. Голушко, В. А. Трусов, Н. К. Юрков, С. А. Бростилов, Т. Ю. Бростилова, И. М. Рыбаков // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2016. – № 1. – С. 151–160.
4. Затылкин А. В. Управление исследованиями моделей радиотехнических устройств на этапе проектирования / А. В. Затылкин, А. Г. Леонов, Н. К. Юрков // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2012. – № 1. – С. 138–142.
5. Иванов И. А. Информационная модель процесса проектирования контролепригодных радиоэлектронных средств / И. А. Иванов, С. У. Увайсов // Информационные технологии. – 2011. – № 12. – С. 45–47.
6. Кофанов Ю. Н. Информационные технологии проектирования радиоэлектронных средств / Ю. Н. Кофанов, А. С. Шалумов, С. У. Увайсов, С. Ю. Сотникова ; под отв. редакцией Ю. Н. Кофанова. – Москва : Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», 2013. – 392 с.
7. Кофанов Ю. Н. Комплексование физического и математического моделирования при автоматизации проектирования бортовых электронных средств / Ю. Н. Кофанов, С. Ю. Сотникова, С. У. Увайсов. – Москва : Энергоатомиздат, 2011. – 119 с.
8. Кофанов Ю. Н. Повышение точности моделирования на основе идентификации / Ю. Н. Кофанов, С. Ю. Сотникова // Инновации на основе информационных и коммуникационных технологий : материалы международной научно-практической конференции (2015) / отв. ред. И. А. Иванов; под общ. ред. С. У. Увайсов; науч. ред. А. Н. Тихонов. – Москва : Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», 2015. – С. 176–178.
9. Лышов С. М. Методика определения порогового значения критерия подобия по экспериментальным характеристикам / С. М. Лышов, И. А. Иванов, С. У. Увайсов // Надежность и качество : труды международного симпозиума. – 2013. – Т. 2. – С. 372–374.
10. Лышов С. М. Моделирование механических характеристик конструкции бортовой аппаратуры / С. М. Лышов, И. А. Иванов, С. У. Увайсов // Надежность и качество : труды международного симпозиума. – 2013. – Т. 2. – С. 379–386.

11. Лышов С. М. Развитие метода неразрушающего контроля латентных дефектов в конструкциях бортовой аппаратуры / С. М. Лышов, И. А. Иванов, С. У. Увайсов // Надежность и качество : труды международного симпозиума. – 2013. – Т. 2. – С. 374–377.
12. Матвеев С. Е. Методы системного анализа вибрационной прочности изделий / С. Е. Матвеев, Ю. Н. Кофанов, В. П. Ройзман. – Москва : Радио и связь, 2002. – 178 с.
13. Пат. 2566611 Российская Федерация. МПК G01H 1/06. Способ вибродиагностики печатных узлов / Д. А. Аминев, Е. Э. Головинов, С. М. Лышов, И. А. Иванов, С. У. Увайсов ; заявитель и патентообладатель Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации им. А.Н. Костякова. – № 2013157756/28 ; заявл. 25.12.13; опубл. 27.10.15, Бюлл. № 30.
14. Пат. 142374 Российская Федерация. МПК H04W4/00 H04B 17/00. Устройство для передачи навигационных данных по каналу GSM / Д. А. Аминев, Е. Э. Головинов, С. М. Лышов, И. А. Иванов, С. У. Увайсов ; заявитель и патентообладатель Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации, Всероссийский научно-исследовательский институт ветеринарной им. А.Н. Костякова, Российская академия сельскохозяйственных наук. – № 2013148904/08 ; заявл. 05.11.13 ; опубл. 27.06.14, Бюлл. № 18.
15. Тихонов А. Н. Повышение достоверности диагностического моделирования в информационной технологии проектирования электронных средств управления / А. Н. Тихонов, С. У. Увайсов, Ю. Н. Кофанов, С. Ю. Сотникова // Системы управления и информационные технологии. – 2014. – № 4. – С. 88–92.
16. Увайсов С. У. Обеспечение контролепригодности радиоэлектронных средств в рамках CALS-технологий / С. У. Увайсов, И. А. Иванов // Качество. Инновации. Образование. – 2011. – № 1. – С. 43–46.
17. Шалумов А. С. Моделирование механических процессов в конструкциях БЭС на основе МКР и аналитических методов : учебное пособие / А. С. Шалумов. – Ковров : Ковровская государственная технологическая академия имени В.А. Дегтерева, 2000. – 233 с.
18. Шалумов А. С. Моделирование радиоэлектронных средств с учетом внешних тепловых, механических и других воздействий с помощью системы АСОНИКА / А. С. Шалумов, В. М. Ивашко, Н. В. Малютин, Ю. Н. Кофанов, Е. Ю. Тихонова ; науч. ред. Ю. Н. Кофанов, А. С. Шалумов. – Минск : Военная академия Республика Беларусь, 2014.
19. Юрков Н. К. К проблеме моделирования риска отказа электронной аппаратуры длительного функционирования / Н. К. Юрков, И. И. Кочегаров, Д. Л. Петрянин // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2015. – № 4. – С. 220–231.
20. Kofanov Y. N. Macromodel of mechanical processes in the amortized electronic devices / Y. N. Kofanov, S. Y. Sotnikova // Research Journal of Applied Sciences. – 2015. – Vol. 10, № 2. – P. 33–39.

References

1. Aminev D. A., Kokin N. N., Uvaysov S. U., Tikhmenev A. N. Analiz printsipov postroeniya apparatno-programmnogo kompleksa dlya diagnosticheskogo modelirovaniya raznorodnykh fizicheskikh protsessov v radioelektronnoy apparature [Analysis of principles of construction of hardware and software for diagnostic modeling of heterogeneous physical processes in electronic equipment]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: Control and High Technologies], 2015, no. 3, pp. 129–141.
2. Brumshteyn Yu. M., Vybornova O. N. Analiz nekotorykh modeley gruppovogo upravleniya riskami [Analysis of some of the group risk management models]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: Control and High Technologies], 2015, no. 4, pp. 64–72.
3. Golushko D. A., Trusov V. A., Yurkov N. K., Brostilov S. A., Brostilova T. Yu., Rybakov I. M. Programmno-apparatnyy kompleks dlya provedeniya ispytaniy izdeliy elektronnoy tekhniki na vozdeystvie vibratsii [Hardware-software complex for testing of electronic articles on the effects of vibration]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: Control and High Technologies], 2016, no. 1, pp. 151–160.
4. Zatytkin A. V., Leonov A. G., Yurkov N. K. Upravlenie issledovaniyami modeley radiotekhnicheskikh ustroystv na etape proektirovaniya [Research management models of technical devices at the design stage]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: Control and High Technologies], 2012, no. 1, pp. 138–142.
5. Ivanov I. A., Uvaysov S. U. *Informatsionnaya model protsessa proektirovaniya kontroleprigodnykh radioelektronnykh sredstv* [Information model of the design process traceable electronic means]. *Informatsionnye tekhnologii* [Information Technologies], 2011, no. 12, pp. 45–47.
6. Kofanov Yu. N., Shalumov A. S., Uvaysov S. U., Sotnikova S. Yu. *Informatsionnye tekhnologii proektirovaniya radioelektronnykh sredstv* [Information technologies of radio-electronic means design], Moscow, National Research University “Higher School of Economics” Publ. House, 2013. 392 p.
7. Kofanov Yu. N., Sotnikova S. Yu., Uvaysov S. U. *Kompleksirovanie fizicheskogo i matematicheskogo modelirovaniya pri avtomatizatsii proektirovaniya bortovykh elektronnykh sredstv* [The fusion of physical and mathematical simulation to automate the design of airborne electronic means], Moscow, Energoatomizdat Publ., 2011. 119 p.
8. Kofanov Yu. N., Sotnikova S. Yu. Povyshenie tochnosti modelirovaniya na osnove identifikatsii [Improving the accuracy of modeling based on the identification]. *Innovatsii na osnove informatsionnykh i kommunikatsionnykh tekhnologiy* [Innovation on the base of information and communication technologies], Moscow, National Research University “Higher School of Economics” Publ. House, 2015, pp. 176–178.
9. Lyshov S. M., Ivanov I. A., Uvaysov S. U. Metodika opredeleniya porogovogo znacheniya kriteriya podobiya po eksperimentalnym kharakteristikam [The method of determining the threshold value of the similarity criterion on experimental characteristics]. *Nadezhnost i kachestvo : trudy mezhdunarodnogo simpoziuma* [Reliability and Quality. Proceedings of the International Symposium], 2013, vol. 2, pp. 372–374.
10. Lyshov S. M., Ivanov I. A., Uvaysov S. U. Modelirovanie mekhanicheskikh kharakteristik konstruksii bortovoy apparatury [Simulation design of on-board equipment mechanical characteristics]. *Nadezhnost i kachestvo : trudy mezhdunarodnogo simpoziuma* [Reliability and Quality. Proceedings of the International Symposium], 2013, vol. 2, pp. 379–386.

11. Lyshov S. M., Ivanov I. A., Uvaysov S. U. Razvitie metoda nerazrushayushchego kontrolya latentnykh defektov v konstruktivnykh bortovoy apparatury [Development of method of nondestructive testing of latent defects in the construction of on-board equipment]. *Nadezhnost i kachestvo : trudy mezhdunarodnogo simpoziuma* [Reliability and Quality. Proceedings of the International Symposium], 2013, vol. 2, pp. 372–374.
12. Matveev S. E., Kofanov Yu. N., Royzman V. P. *Metody sistemnogo analiza vibratsionnoy prochnosti izdeliy* [Methods of system analysis of the vibration strength of the product], Moscow, Radio i svyaz Publ., 2002. 178 p.
13. Aminev D. A., Golovinov E. E., Lyshov S. M., Ivanov I. A., Uvaysov S. U. Pat. 2566611 Russian Federation. IPC G01H 1/06. Method vibrodiagnostics assemblies. Applicant and patent holder A. N. Kostyakov All-Russian Research Institute of Hydraulic Engineering and Land Reclamation, no. 2013157756/28, announced 12/25/13; published on 10.27.15, Bull. no. 30.
14. Aminev D. A., Golovinov E. E., Lyshov S. M., Ivanov I. A., Uvaysov S. U. Pat. 142374 Russian Federation. IPC N04W4 / 00 H04B 17/00. Device for transmitting navigation data channel GSM. Applicant and patent holder State Scientific Institution All-Russian Research Institute of Hydraulic Engineering and Land Reclamation of A. N. Kostyakov All-Russian Research Institute of Veterinary, Russian Academy of Agricultural Sciences, no. 2013148904/08, announced 05.11.13, published on 06.27.14, Bull. no. 18.
15. Tikhonov A. N., Uvaysov S. U., Kofanov Yu. N., Sotnikova S. Yu. Povyshenie dostovernosti diagnosticheskogo modelirovaniya v informatsionnoy tekhnologii proektirovaniya [Reliability increase of diagnostic modeling for secondary power supply sources on the basis of the accounting of electrical and thermal processes interrelation]. *Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii* [Control Systems and Information Technology], 2014, no. 4, pp. 88–92.
16. Uvaysov S. U., Ivanov I. A. Obespechenie kontroleprigodnosti radioelektronnykh sredstv v ramkakh CALS-tekhnologii [Ensuring testability of radio electronic means within the framework of CALS-technologies]. *Kachestvo. Innovatsii. Obrazovanie* [Quality. Innovation. Education], 2011, no. 1, pp. 43–46.
17. Shalumov A. S. *Modelirovanie mekhanicheskikh protsessov v konstruktivnykh BES na osnove MKR i analiticheskikh metodov* [Simulation of mechanical processes in designs of airborne electronic aids based on the finite difference method and analytical methods], Kovrov, Kovrov State Technological Academy named after Degtyarev Publ. House, 2000. 233 p.
18. Shalumov A. S., Ivashko V. M., Malyutin N. V., Kofanov Yu. N., Tikhonova E. Yu. *Modelirovanie radioelektronnykh sredstv s uchetom vneshnikh teplovykh, mekhanicheskikh i drugikh vozdeystviy s pomoshchyu sistemy ASONIKA* [Simulation of radio-electronic means, taking into account external thermal, mechanical and other influences with the help of system ASONIKA], Minsk, Ministry of Defence of the Republic of Belarus Publ. House, 2014.
19. Yurkov N. K., Kochegarov I. I., Petryanin D. L. K probleme modelirovaniya riska otказа elektronnoy apparatury dlitelnogo funktsionirovaniya [Risk modeling problem of failure of the electronic long-term operation of equipment]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: Control and High Tehnologies], 2015, no. 4, pp. 220–231.
20. Kofanov Yu. N., Sotnikova S. Yu. Macromodel of mechanical processes in the amortized electronic devices. *Research Journal of Applied Sciences*, 2015, vol. 10, no. 2, pp. 33–39.

УДК 681.518.5

ПРОТОТИП ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ТЕМПЕРАТУР КОМПЛЕКТУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНТАКТНЫМ СПОСОБОМ¹

Статья поступила в редакцию 15.11.2016, в окончательном варианте – 29.11.2016.

Иванов Илья Александрович, кандидат технических наук, старший преподаватель, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», 101000, Российская Федерация, г. Москва, ул. Мясницкая, 20, e-mail: i.ivanov@hse.ru

Красивская Мария Игоревна, старший преподаватель, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», 101000, Российская Федерация, г. Москва, ул. Мясницкая, 20, e-mail: mkrasivskaya@hse.ru

Сафонов Сергей Николаевич, старший преподаватель, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», 101000, Российская Федерация, г. Москва, ул. Мясницкая, 20, e-mail: ssafonov@hse.ru

Увайсов Сайгид Увайсович, доктор технических наук, профессор, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», 101000, Российская Федерация, г. Москва, ул. Мясницкая, 20, e-mail: uvaysov@yandex.ru

В статье рассмотрен прототип информационно-измерительной системы, предназначенной для сбора и обработки информации о температурах комплектующих элементов, установленных на печатном узле. Прототип предназначен для контроля на предприятии-изготовителе печатных узлов, а также диагностики их неисправностей при

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 14-07-00422 «Информационно-измерительная система численного моделирования и мониторинга температурных полей электронных средств»).