

Роботизированные комплексы и системы. Технологии дистанционного зондирования
неразрушающего контроля

Multiple robots (robotic centers) and systems. Remote sensing and non-destructive testing

УДК 621.396.69
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-2-28-38>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Диагностика нарушений целостности конструкций бортовых радиоэлектронных средств при испытаниях на ударные воздействия

С.У. Увайсов,
А.В. Долматов[@],
Т.Х. Во,
Н.Т. Лыу,
К.Д. Нгуен

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия
[@] Автор для переписки, e-mail: dolmatov@mirea.ru

Резюме

Цели. С непрерывным развитием современных технических средств в области авиации и космического приборостроения постоянно повышаются требования к точности, устойчивости и надежности электронной аппаратуры, эксплуатируемой на космических аппаратах. Блоки бортовых радиоэлектронных средств космических аппаратов (БРЭСКА) эксплуатируются в особых условиях. В случае возникновения неисправности ее устранение, как правило, оказывается невозможным. Блоки БРЭСКА представляют собой герметично закрытые конструкции, поэтому их демонтаж для оценки технического состояния затруднен. Целью исследования является повышение эффективности и достоверности выявления латентных дефектов в блоках БРЭСКА путем использования метода диагностирования при воздействии механических ударов.

Методы. На основании известных методов в работе предложен новый метод диагностирования с использованием моделирования механических процессов при ударных воздействиях на этапе проектирования блоков БРЭСКА для оценки наличия различных латентных дефектов. В исправном состоянии блоки БРЭСКА имеют амплитудно-частотные характеристики (АЧХ), отличные от АЧХ блоков БРЭСКА, имеющих различные дефекты, отражающиеся на механических характеристиках. С учетом этого разработана диагностическая модель, оценивающая техническое состояние блоков БРЭСКА без демонтажа устройств в процессе диагностирования.

Результаты. В работе проведено моделирование механических процессов в блоках БРЭСКА в исправном состоянии и при наличии различных дефектов, а также экспериментальные исследования механических характеристик в исправном и неисправном состояниях. После проведения измерений механических характеристик при воздействии ударных нагрузок полученные данные сравниваются с результатами моделирования при наличии различных дефектов. Результатом сравнения является отчет о техническом состоянии блока БРЭСКА.

Выводы. Разработанный метод диагностирования блоков БРЭСКА при ударных механических воздействиях позволяет повысить эффективность диагностирования латентных дефектов в процессе производства и эксплуатации БРЭСКА.

Ключевые слова: диагностирование, ударные механические воздействия, блок бортовых радиоэлектронных средств космических аппаратов

• Поступила: 05.05.2023 • Доработана: 31.10.2023 • Принята к опубликованию: 06.02.2024

Для цитирования: Увайсов С.У., Долматов А.В., Во Т.Х., Лыу Н.Т., Нгуен К.Д. Диагностика нарушений целостности конструкций бортовых радиоэлектронных средств при испытаниях на ударные воздействия. *Russ. Technol. J.* 2024;12(2):28–38. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-2-28-38>

Прозрачность финансовой деятельности: Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Diagnostics of structural integrity violations of avionics during impact tests

Saygid U. Uvaysov,
Aleksey V. Dolmatov[@],
The H. Vo,
Ngoc T. Luu,
Cong D. Nguyen

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia
[@] Corresponding author, e-mail: dolmatov@mirea.ru

Abstract

Objectives. With the continuous development of modern radio equipment in the field of aviation and space instrumentation, the requirements for accuracy, stability, and reliability of electronic equipment operated on spacecraft are also on the increase. Spacecraft avionic units (SAU) operate under special conditions and malfunctions, as a rule, are impossible to repair. SAU are hermetically sealed structures, making it difficult to assess their technical condition. The aim of this study is to increase the efficiency and reliability of detecting latent defects in SAU using the diagnostic method involving exposure to mechanical shocks.

Methods. Based on known methods, a new diagnostic method is proposed which simulates mechanical processes under shock effects at the design stage. The aim is to evaluate the presence of various latent defects in SAU. In a serviceable state, the amplitude-frequency characteristics (frequency response) of SAU differ from the frequency response of SAU with defects which affect mechanical characteristics. It was for this reason that the diagnostic model of evaluating the technical condition of SAU without removal of devices was developed.

Results. This work simulates the mechanical processes in SAU in a serviceable state in the presence of a variety of defect. It also involves experimental studies of mechanical characteristics in both serviceable and faulty states. After measuring the mechanical characteristics under the impact of shock loads, the data obtained is compared with simulation results in the presence of various defects. The comparison result is a report on the technical condition of SAU.

Conclusions. The method of diagnosing SAU under mechanical shock impact enhances the efficiency of diagnosing latent defects during the production and operation of SAU.

Keywords: diagnostics, mechanical shock impact, spacecraft avionic units

• Submitted: 05.05.2023 • Revised: 31.10.2023 • Accepted: 06.02.2024

For citation: Uvaysov S.U., Dolmatov A.V., Vo Th.H., Luu N.T., Nguyen C.D. Diagnostics of structural integrity violations of avionics during impact tests. *Russ. Technol. J.* 2024;12(2):28–38. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-2-28-38>

Financial disclosure: The authors have no a financial or property interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Под воздействием внешних дестабилизирующих факторов или в процессе старения происходит изменение технического состояния любого радиоэлектронного изделия [1, 2]. Неисправности блоков бортовых радиоэлектронных средств космических аппаратов (БРЭСКА) могут возникать из-за ошибок, допущенных на этапах производства или эксплуатации. Эти ошибки могут вызвать нарушение физической структуры, состава материала, нестабильность параметров изделия, и каждая из ошибок в процессе эксплуатации может привести к внезапным или постепенным отказам [3]. Статистика показывает, что на протяжении большей части своего жизненного цикла (от производства до утилизации) часть электронных устройств может иметь дефекты, в т.ч. латентные [4–6]. Поэтому обнаружение и устранение латентных дефектов играет очень важную роль в поддержании стабильности и работоспособности оборудования¹.

Целью данной работы является разработка нового метода диагностического моделирования, основанного на изучении амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) блоков БРЭСКА при ударном воздействии. Полученные результаты моделирования с информацией о техническом состоянии исследуемого оборудования будут являться исходными данными для сравнения с аналогичными изделиями при отсутствии или наличии дефектов блоков БРЭСКА.

Известно, что определение технического состояния печатных узлов или блоков радиоэлектронных средств может быть выполнено ручными методами с помощью простых устройств, таких как мультиметры, осциллографы, частотомеры. Но при необходимости проведения массовых проверок такой процесс диагностирования занимает очень длительное время и малоэффективен.

В настоящее время неразрушающие методы диагностирования широко используются на предприятиях во время испытаний в процессе выходного контроля [7, 8]. При этом метод диагностирования блоков БРЭСКА при воздействии механических ударных

нагрузок может повысить эффективность и достоверность выявления дефектов без нарушения целостности объектов [9]. Но стоит отметить и некоторые особенности, которые необходимо учесть для получения достоверного результата диагностирования:

- моделирование объектов исследования на компьютере должно проводиться с высокой точностью с точки зрения описания физической структуры, параметров конструкционных материалов, материалов электрорадиоэлементов (ЭРЭ) [10];
- поддержка заданной точности имитации ударных воздействий на вибростенде, правильное размещение акселерометра [11].

Известно, что любое электронное изделие, печатный узел или блок БРЭСКА, имеет собственные резонансные частоты^{2, 3}. В исправном техническом состоянии изделие имеет определенный собственный частотный спектр. Появление дефектов в блоке БРЭСКА будет сопровождаться изменением собственных резонансных частот. На основе этого принципа предлагается метод диагностирования при ударном воздействии на блок БРЭСКА⁴.

Стенд для проведения испытаний на ударное воздействие (рис. 1) состоит из компьютерной системы, содержащей программное обеспечение, анализирующее технические параметры исследуемого устройства. Эта система подключена к вибростенду для определения характеристик колебаний с помощью акселерометра. Ударный колебательный

² Зеленский В.А., Сухачёв К.И. *Основы конструирования, технологии и надежности радиоэлектронных средств*: учебное пособие. Самара: Самарский университет; 2020. 146 с. [Zelenskiy V.A., Sukhachev K.I. *Fundamentals of design, technology and reliability of radio electronic means*: Textbook. Samara: Samara University; 2020. 146 p. (in Russ.).]

³ Муромцев Д.Ю., Тюрин И.В., Белоусов О.А., Курносов Р.Ю. *Проектирование функциональных узлов и модулей радиоэлектронных средств*: учебное пособие для вузов. 2-е изд., стер. СПб.: Лань; 2021. 252 с. [Muromtsev D.Yu., Tyurin I.V., Belousov O.A., Kurnosov R.Yu. *Design of functional assemblies and modules of radio-electronic means*: Textbook for Universities. 2nd ed., St. Petersburg: Lan; 2021. 252 p. (in Russ.).]

⁴ Муромцев Д.Ю., Белоусов О.А., Тюрин И.В., Курносов Р.Ю. *Конструирование блоков радиоэлектронных средств*. 4-е изд., стер. СПб.: Лань; 2023. 288 с. [Muromtsev D.Yu., Belousov O.A., Tyurin I.V., Kurnosov R.Yu. *Design of REM units*. 4th ed. St. Petersburg: Lan; 2023. 288 p. (in Russ.).]

¹ Малкин В.С. *Техническая диагностика*. 2-е изд., испр. и доп. СПб.: Лань; 2022. 272 с. [Malkin V.S. *Technical diagnostics*. 2nd ed., revised and supplemented. St. Petersburg: Lan; 2013. 272 p. (in Russ.).]

эффект вибростенда, воздействующего на исследуемое устройство на одной оси в направлении вверх-вниз, регистрируется датчиком, который отправляет эту информацию на компьютер [12]. Отклик, создаваемый вибростендом, имеет определенную амплитуду и частоту, которая может составлять от 2 Гц до 10000 Гц. Форма ударного воздействия может быть задана в виде трапецевидного, пилообразного, треугольного или полусинусоидального импульса.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ БЛОКА БРЭСКА ПРИ ИСПЫТАНИЯХ НА УДАРНЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

Авторами был разработан метод диагностирования БРЭСКА при испытаниях на ударные воздействия, структурная схема которого показана на рис. 2. Общий принцип этого метода состоит в математическом моделировании характеристик блоков БРЭСКА в исправном и неисправном состоянии, в результате

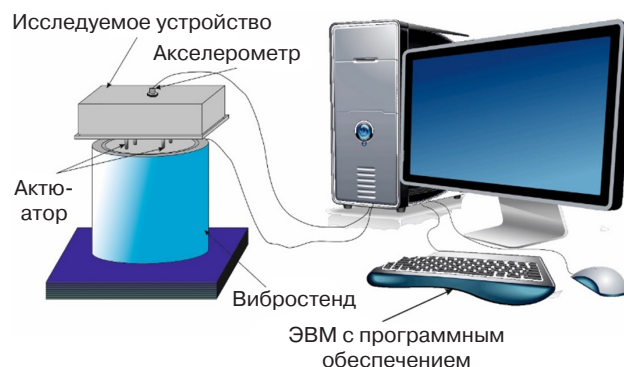


Рис. 1. Стенд испытаний на ударные воздействия блока БРЭСКА

чего информация о результатах моделирования используется для сравнения с результатами, полученными при экспериментальном снятии характеристик реального устройства [13, 14].

Диагностирование блоков БРЭСКА состоит из двух основных этапов:

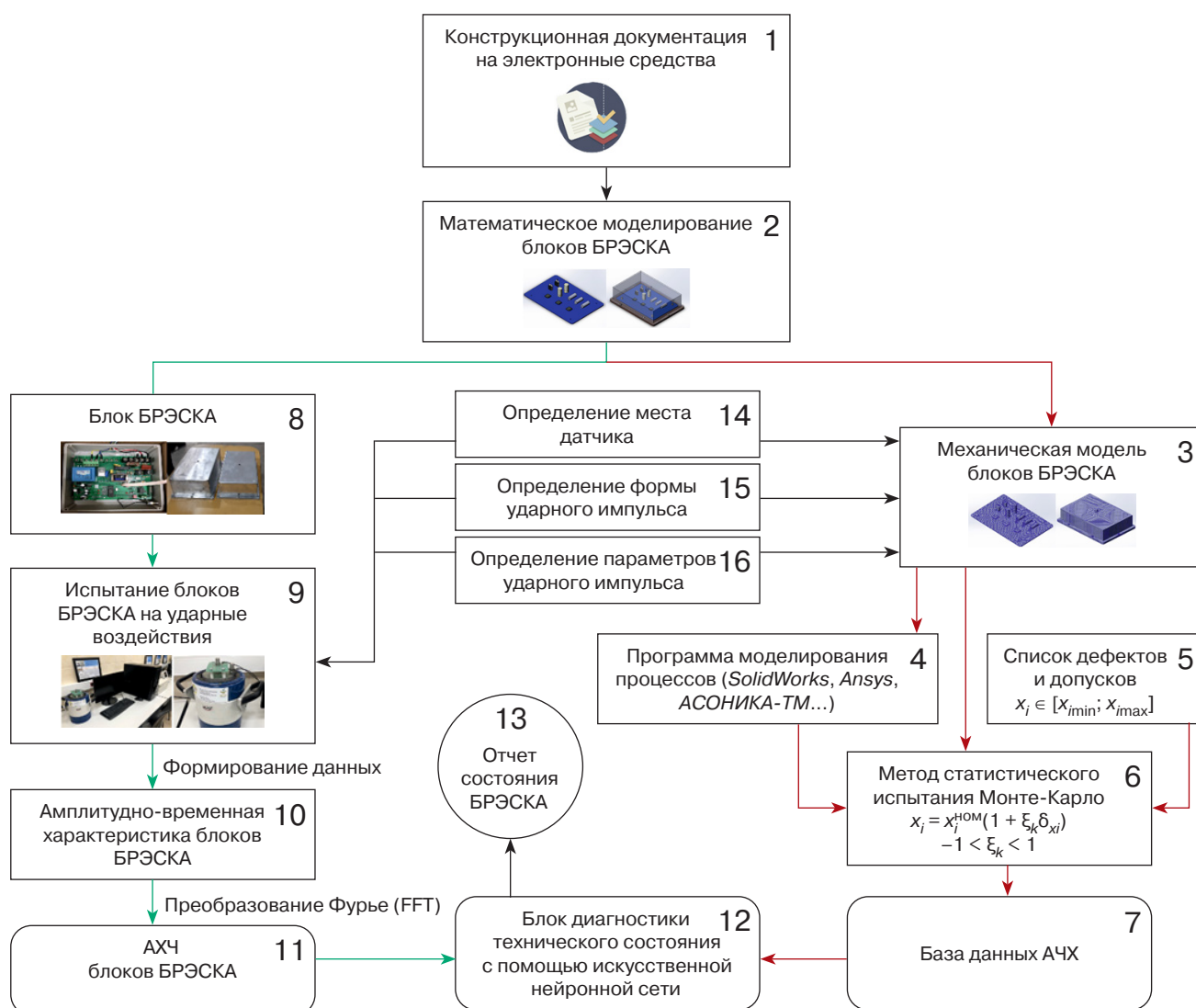


Рис. 2. Структурная схема метода диагностики блоков БРЭСКА при испытаниях на ударные воздействия. FFT (fast Fourier transform) – быстрое преобразование Фурье

1. Разработка диагностической модели на основе характеристик и параметров БРЭСКА и создание базы данных (блоки 1–7). База данных представляет собой совокупность АЧХ БРЭСКА, рассчитанных при исправном и неисправных состояниях.
2. Экспериментальные испытания реальных образцов БРЭСКА, проводимые с использованием вибростенда (блоки 8–11). Полученные данные обрабатываются и сопоставляются (блок 12) с набором данных АЧХ, после чего создается отчет о техническом состоянии БРЭСКА (блок 13).

На начальном этапе необходимо разработать математическую модель и диагностическую модель в соответствии со структурой БРЭСКА (блоки 1–3 на рис. 2). При создании математической модели необходимо обращать внимание на точность задания геометрических и физико-механических параметров конструкции и ЭРЭ, размещение ЭРЭ на печатных узлах должно соответствовать заданной принципиальной схеме. При моделировании необходимо обращать внимание на расположение акселерометра на блоке, т.к. вес датчика может оказывать влияние на механические характеристики блока БРЭСКА.

Механические процессы в блоках БРЭСКА могут быть смоделированы с использованием различных программных продуктов, обеспечивая при этом их механические свойства и физическую структуру, например, *SolidWorks*⁵, *Ansys*⁶, *Nastran*⁷, *АСОНИКА-ТМ*⁸ и др. [15]. Эти программы моделирования позволяют пользователям получать механические характеристики в конструкциях БРЭСКА с высокой точностью (блок 4 на рис. 2).

При подготовке исходных данных для моделирования механических процессов в БРЭСКА необходимо учитывать следующее:

- определение местоположения датчика для получения результата ударного воздействия на объект (амплитуда перемещения в месте установки датчика будет максимальна при собственной резонансной частоте) – блок 14;
- определение формы импульса, задаваемой в программе моделирования, которая может быть трапециевидной, треугольной, пилообразной или синусоидальной [16]. Исследования показали, что трапециевидный импульс является оптимальным выбором (блок 15);
- определение параметров импульса, включая амплитуду и длительность импульса, при которых

не разрушается физическая структура и не нарушаются характеристики БРЭСКА (блок 16). Диапазон значений амплитуды импульса должен соответствовать структуре объекта исследования. Минимальное значение амплитуды ударного импульса $A_{\min \text{ эффект}}$ не должно быть меньше значения $A_{\min \text{ практ}}$, которое может получить датчик, и в то же время максимальное значение $A_{\max \text{ эффект}}$ не должно быть больше значения экспериментальной амплитуды $A_{\min \text{ теор}}$, вызывающего разрушение естественной структуры:

$$[A_{\min \text{ эффект}}; A_{\max \text{ эффект}}] \in [A_{\min \text{ практ}}; A_{\max \text{ теор}}],$$

где $A_{\min \text{ практ}}$ – нижняя граница значений амплитуды (определяется характеристикой средства измерения); $A_{\max \text{ теор}}$ – верхняя граница значений амплитуды.

К наиболее популярным механическим дефектам БРЭСКА, рассматриваемым в работе, относятся:

- ослабление винтов печатного узла БРЭСКА;
- трещины в конструктивных элементах (трещины печатных плат и др.);
- деформация конструктивных элементов (деформация печатной платы, кривизна крепления заклепок и т.д.);
- отрыв части или всего ЭРЭ от печатной платы;
- пассивный контакт ЭРЭ на печатной плате с другими конструктивными элементами (может иметь место в условиях высокой плотности блока БРЭСКА).

Полученным результатом расчета диагностической модели механических процессов является множество АЧХ блоков БРЭСКА для заданных типовых дефектов, которые хранятся и представляются на компьютере (блок 7 на рис. 2). Каждая АЧХ соответствует определенному неисправному состоянию или его множеству дефектов.

С целью повышения эффективности диагностики и снижения вероятности возникновения ошибок (неправильное распознавание дефектов, несуществующие дефекты) [17], моделирование механических процессов проводится с учетом допусков $[x_{i\min}; x_{i\max}]$, в пределах которых изменяются значения x_i , $i = 1, n$ физико-механических и геометрических параметров элементов конструкции (блок 6 на рис. 2). При этом используется метод имитационного моделирования Монте-Карло [18]. Так, значение параметра (физико-механического или геометрического) конструкции БРЭСКА определяется по формуле:

$$x_i = x_i^{\text{НОМ}} (1 + \xi_k \delta_{xi}),$$

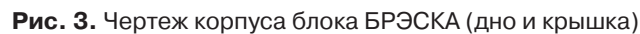
где x_i – текущее значение i -го параметра на k -й реализации; $x_i^{\text{НОМ}}$ – номинальное значение i -го параметра; ξ_k – случайная величина ($-1 < \xi_k < 1$), выдаваемая генератором случайных чисел; δ_{xi} – относительный допуск на i -й

⁵ <https://www.solidworks.com/>. Дата обращения 19.12.2023. / Accessed December 19, 2023.

⁶ <https://www.ansys.com/>. Дата обращения 19.12.2023. / Accessed December 19, 2023.

⁷ <https://www.autodesk.com/products/nastran/overview>. Дата обращения 19.12.2023. / Accessed December 19, 2023.

⁸ <https://asonika-online.ru/products/asonika-tm/> (in Russ.). Дата обращения 19.12.2023. / Accessed December 19, 2023.



Результующая характеристика представляет собой набор данных дискретных значений АЧХ, используемый для расчета перехода из временной области в частотную область через преобразование Фурье – блок 11. Формула прямого преобразования Фурье:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt,$$

Этот результат используется для сравнения с ранее созданным (блок 7) множеством АЧХ с использованием искусственной нейронной сети, применяемой к задаче поиска (ensemble learning introduced neural network), реализованной в языковой среде Python.

Результат диагностирования с применением данного метода может быть достигнут с высокой эффективностью при проведении имитационного моделирования достаточно большой базы данных дефектов, с высокой точностью задания геометрических и физико-механических параметров конструкции БРЭСКА. Кроме того, он повышает экономическую эффективность диагностирования при применении в серийном производстве.

Для апробации предложенного метода был создан экспериментальный макет блока БРЭСКА⁹. Он представляет собой закрытый корпус с размерами, указанными на рис. 3. Корпус блока изготовлен из прессованного алюминия. Элементы корпуса скреплены между собой с использованием винтовых соединений.

⁹ ГОСТ Р 52762-2007. Национальный стандарт Российской Федерации. *Методы испытаний на стойкость к механическим внешним воздействующим факторам машин, приборов и других технических изделий. Испытания на воздействие ударов по оболочке изделий*. М.: Стандартинформ; 2007. 19 с. [GOST R 52762-2007. National Standard of the Russian Federation. *Mechanical environment stability test methods for machines, instruments and other industrial products. Test methods for bumps to enclosure of products*. Moscow: Standardinform; 2007. 19 p. (in Russ.).]

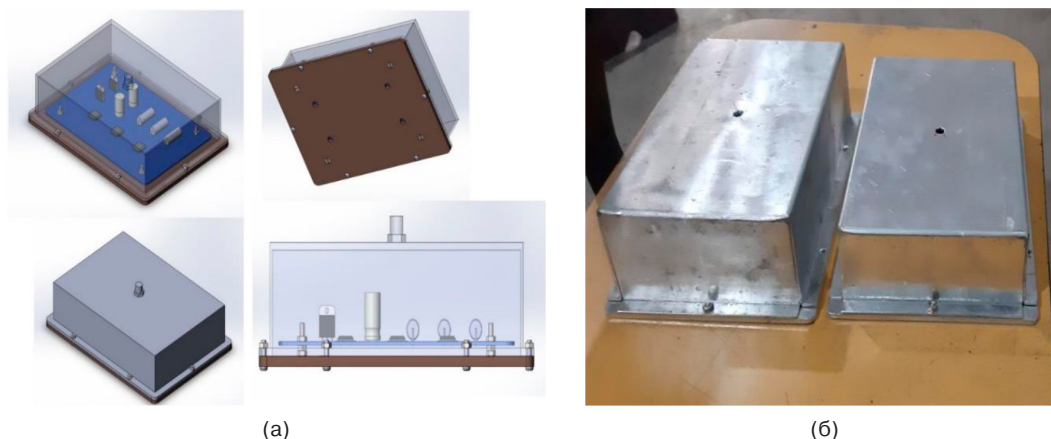


Рис. 4. Вид модели блока БРЭСКА (а) и реального образца (б)

размером 100×150 мм, размещенная на неподвижной стойке с помощью удерживающего винта (рис. 4).

Исследуемое устройство размещается на вибростенде (IMV Corporation, Япония), который подключается к компьютеру с программным обеспечением (рис. 5). Датчик, используемый для измерения механических характеристик БРЭСКА, относится к типу VP-32¹⁰.



Рис. 5. Внешний вид вибростенда

Экспериментальные исследования блока БРЭСКА проводили при трапециевидном импульсном ударе с ускорением $A = 30$ м/с², длительностью удара $T = 0.04$ с. Возможные дефекты описаны в табл. 1.

¹⁰ <https://ostec-test.ru/catalog/equipment/datchiki-vibratsii/vibropreobrazovatel-uskoreniya-vp-32/> (in Russ.). Дата обращения 19.12.2023. / Accessed December 19, 2023.

Таблица 1. Описание дефектов блоков БРЭСКА

Наименование дефектов	Описание дефектов	Изображение
Нет дефектов	Исправное состояние	
Дефект 1	Ослабление винтов печатного узла	
Дефект 2	Отсутствие резистора	
Дефект 3	Отсутствие транзистора и конденсатора	

Результаты экспериментальных измерений механических характеристик, полученные на макете БРЭСКА, представляют собой АЧХ для каждого его дефекта (рис. 6). Особенность полученных АЧХ – в том, что значения собственных резонансных частот в контрольной точке, где установлен датчик, для БРЭСКА с дефектом отличаются от значений собственных резонансных частот для БРЭСКА в исправном состоянии. Полученные результаты записываются в базу данных АЧХ для различных технических состояний БРЭСКА (табл. 2). Их можно использовать для диагностического анализа технического состояния блока БРЭСКА в будущем.

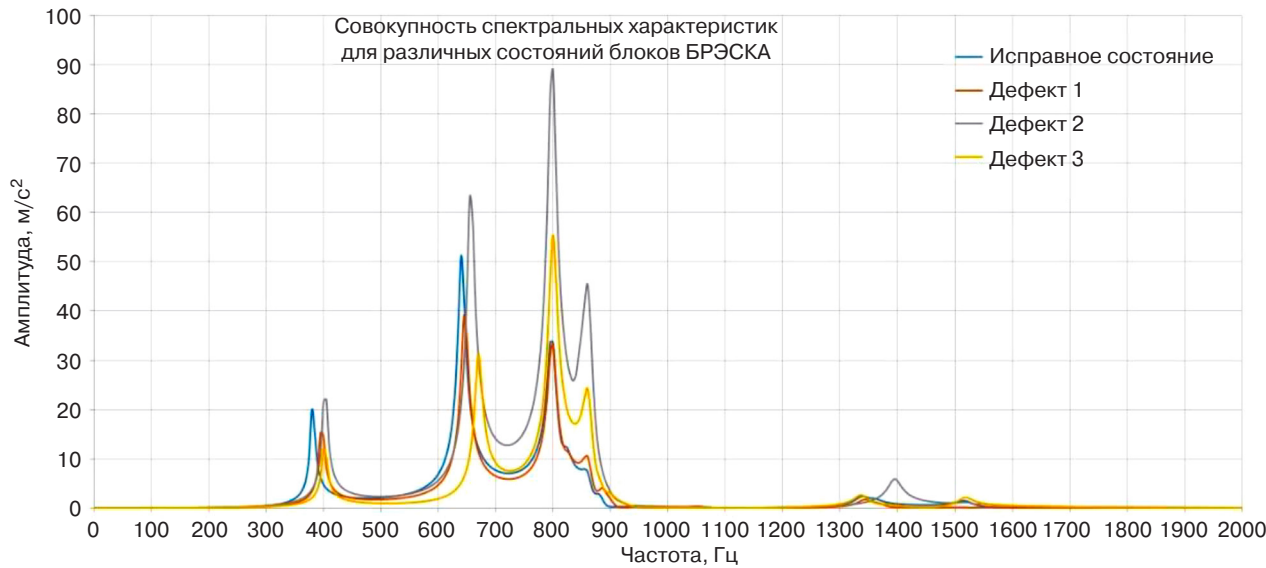


Рис. 6. Спектральные характеристики для различных состояний блоков БРЭСКА

Таблица 2. База данных для различных состояний блоков БРЭСКА

Частота, Гц	Исправное состояние	Дефект 1	Дефект 2	Дефект 3
0	0.0038	0.0024	0.0023	0.0021
5	0.0038	0.0024	0.0024	0.0022
10	0.0038	0.0024	0.0023	0.0021
15	0.0037	0.0023	0.0021	0.0020
20	0.0034	0.0022	0.0018	0.0018
25	0.0031	0.0020	0.0014	0.0014
30	0.0028	0.0017	0.0010	0.0011
.....				
1970	0.0089	0.0166	0.0770	0.0694
1975	0.0087	0.0162	0.0749	0.0675
1980	0.0085	0.0158	0.0729	0.0656
1985	0.0083	0.0153	0.0708	0.0637
1990	0.0081	0.0149	0.0688	0.0618
1995	0.0079	0.0145	0.0668	0.0600
2000	0.0077	0.0140	0.0648	0.0582

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный в данной работе метод диагностирования блоков БРЭСКА при воздействии механических ударных нагрузок позволяет эффективно проводить диагностику и обнаружение дефектов блоков БРЭСКА. Дальнейшие исследования данного вопроса будут направлены на определение всех возможных типов дефектов, которые могут выявляться

с использованием данного метода, разработку алгоритма и методики диагностирования. Результаты исследований будут внедрены в учебный процесс РТУ МИРЭА и других вузов.

Вклад авторов. Все авторы в равной степени внесли свой вклад в исследовательскую работу.

Authors' contributions. All authors equally contributed to the research work.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Брумштейн Ю.М., Выборнова О.Н. Анализ некоторых моделей группового управления рисками. *Прикаспийский журнал: Управление и высокие технологии*. 2015;4:64–72.
2. Сысуй В.А., Полканов С.А., Лысенко Ю.С. Анализ современных методов защиты бортовых радиоэлектронных устройств от внешних механических воздействий. *Труды международного симпозиума «Надежность и качество»*. 2020. Т. 2. С. 39–41.
3. Балиж К.С., Еремеев П.М., Симахина Е.А. Анализ причин сбоев и отказов при проектировании аппаратуры космического назначения. *XLV Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых – пионеров освоения космического пространства: сборник тезисов*. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана; 2021. Т. 2. С. 396–398.
4. Голушко Д.А., Трусков В.А., Юрков Н.К., Бростилов С.А., Бростилова Т.Ю., Рыбаков И.М. Программно-аппаратный комплекс для проведения испытаний изделий электронной техники на воздействие вибрации. *Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии*. 2016;1:151–160.
5. Клестов С.А. Классификация дефектов радиоэлектронной аппаратуры. *Интеллектуальные системы 4-й промышленной революции. Сборник материалов V Международного форума*. Томск. 2023. С. 52–53.
6. Романов А.М., Нелюцков М.А., Рязанов И.Н. Анализ дефектов РЭС, методов и средств их обнаружения. *Труды международного симпозиума «Надежность и качество»*. 2023. Т. 1. С. 413–414.
7. Сартаков С.С. Анализ методов и средств испытаний радиоэлектронного оборудования воздушных судов. *Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций: материалы Всероссийской научно-технической конференции*. Самара. 2020. С. 206–207.
8. Фам Л.К.Х., Дао А.К., Увайсов С.У., Черноверская В.В., Бушмелева К.И. Определение эффективного уровня одиночных ударных импульсов для выявления дефектов печатных узлов электронных средств. *Вестник Международного университета природы, общества и человека «Дубна». Серия: Естественные и инженерные науки*. 2020;3(48):46–54.
9. Нелюцков М.А., Марченко В.В., Лысенко А.В., Таньков Г.В., Рыбаков И.М. Ударные импульсы как метод испытаний радиоэлектронных средств. *Труды международного симпозиума «Надежность и качество»*. 2020. Т. 2. С. 238–240.
10. Кофанов Ю.Н., Сотникова С.Ю. Повышение точности моделирования на основе идентификации. *Инновации на основе информационных и коммуникационных технологий*. 2015;1:176–178.
11. Кондрашов Д.Е. Система поддержки принятия решений диагностики электронных средств на основе анализа ударных воздействий. *Проблемы и решения автоматизации XXI века: Материалы VI Национальной научно-практической студенческой конференции*. Сургут. 2023. С. 93–98.
12. Лышов С.М., Иванов И.А., Увайсов С.У. Методика определения порогового значения критерия подобия по экспериментальным характеристикам. *Труды Международного симпозиума «Надежность и качество»*. 2013. Т. 2. С. 372–374.
13. Бушмелева К.И., Кондрашов Д.Е., Увайсов С.У., Фам Л.К.Х. Автоматизированная система диагностики радиоэлектронных средств на основе ударных воздействий. *Инновационные, информационные и коммуникационные технологии: сборник трудов XVII Международной научно-практической конференции*. 2020. С. 384–389.
14. Кондрашов Д.Е., Бушмелева К.И., Увайсов С.У., Демченко С.К. Методика диагностики электронных средств на основе анализа ударных воздействий посредством алгоритмов машинного обучения. *Инновационные, информационные и коммуникационные технологии: сборник трудов XVIII Международной научно-практической конференции*. Сочи. 2021. Р. 190–195.
15. Шалумов А.С. АСОНИКА – российская САПР электроники в части виртуальных испытаний. *Электроника: Наука, технология, бизнес*. 2022;3:82–83. <https://doi.org/10.22184/1992-4178.2022.214.3.82.83>
16. Резчикова Е.В., Лыонг К.Л. Виброзащита бортовой электронной аппаратуры от внешних воздействий. *Контроль. Диагностика*. 2021;24(11):22–30. <https://doi.org/10.14489/td.2021.11.pp.022-030>
17. Ирзаев Г.Х. Обеспечение и оценка контролепригодности конструкции сложных радиоэлектронных средств на этапах их проектирования. *Контроль. Диагностика*. 2023;26(5):34–41. <https://doi.org/10.14489/td.2023.05.pp.034-041>
18. Кашникова А.П., Беляева М.Б. Метод Монте-Карло в задачах моделирования процессов и систем. *Modern Science*. 2021;(1–2):358–362.

REFERENCES

1. Brumsteyn Yu.M., Vybornova O.N. Analysis of some models for group risk management. *Prikaspiiskii zhurnal: Upravlenie i vysokie tekhnologii = Caspian Journal: Management and High Technologies*. 2015;4:64–72 (in Russ.).
2. Sysuev V.A., Polkanov S.A., Lysenko Yu.S. Analysis of modern methods of protection of on-board electronic devices from external mechanical influences. In: *Proceedings of the International Symposium “Reliability and Quality.”* 2020. V. 2. P. 39–41 (in Russ.).
3. Balizh K.S., Eremeev P.M., Simakhina E.A. Analysis of the causes of faults and failures for design of space equipment. In: *The 45th Academic Space Conference, Dedicated to the Memory of Academician S.P. Korolev and Other Outstanding Russian Scientists – Pioneers of Space Exploration (Korolev Academic Space Conference): collection of abstracts*. Moscow: Bauman Press; 2021. V. 2. P. 396–398 (in Russ.).

4. Golushko D.A., Trusov V.A., Yurkov N.K., Brostilov S.A., Brostilova T.Yu., Rybakov I.M. Hardware Software complex for testing electronic devices on the effect of vibration. *Prikaspiiskii zhurnal: Upravlenie i vysokie tekhnologii = Caspian Journal: Management and High Technologies*. 2016;1:151–160 (in Russ.).
5. Klestov S.A. Classification of defects in electronic equipment. In: *Intelligent Systems of the 4th Industrial Revolution: Collection of Materials of the V International Forum*. Tomsk. 2023. P. 52–53 (in Russ.).
6. Romanov A.M., Nelyutskov M.A., Ryazyapov I.N. Analysis of defects in radio-electronic devices, methods and means of their detection. In: *Proceedings of the International Symposium "Reliability and Quality."* 2023. V. 1. P. 413–414 (in Russ.).
7. Sartakov S.S. Analysis of methods and means of testing electronic equipment of aircraft. In: *Actual Problems of Radio Electronics and Telecommunications: Materials of the All-Russian Scientific and Technical Conference*. Samara; 2020. P. 206–207 (in Russ.).
8. Pham L.Q.Kh., Dao A.Q., Uvaysov S.U., Chernoverskaya V.V., Bushmeleva K.I. Determination of the effective level of single shock pulses for detecting defects in printed board assemblies of electronic devices. *Vestnik Mezhdunarodnogo universiteta prirody, obshchestva i cheloveka "Dubna." Seriya: Estestvennye i inzhenernye nauki = Bulletin of Dubna International University for Nature, Society, and Man. Series: "Natural and Engineering Sciences"*. 2020;3(48):46–54 (in Russ.).
9. Nelyutskov M.A., Marchenko V.V., Lysenko A.V., Tan'kov G.V., Rybakov I.M. Shock pulses as a test method of radio-electronic means. In: *Proceedings of the International Symposium "Reliability and Quality."* 2020. V. 2. P. 238–240 (in Russ.).
10. Kofanov Yu.N., Sotnikova S.Yu. Improving the accuracy of modeling based on identification. *Innovatsii na osnove informatsionnykh i kommunikatsionnykh tekhnologii = Innovations Based on Information and Communication Technologies*. 2015;1:176–178 (in Russ.).
11. Kondrashov D.E. Decision support system for diagnostics of electronic means based on the analysis of shock effects. In: *Problems and Solutions of Automation of the 21st Century: Materials of the Sixth National Scientific and Practical Student Conference*. Surgut. 2023. P. 93–98 (in Russ.).
12. Lyshov S.M., Ivanov I.A., Uvaysov S.U. Methodology for determining the threshold value of the similarity criterion by experimental characteristics. In: *Reliability and Quality: Proceedings of the International Symposium*. 2013. V. 2. P. 372–374 (in Russ.).
13. Bushmeleva K.I., Kondrashov D.E., Uvaysov S.U., Pham L.Q.H. Automated system of diagnostics of radio-electronic means based on shock effects. In: *Innovative, Information and Communication Technologies: Proceedings of the 17th International Scientific and Practical Conference*. 2020. P. 384–389 (in Russ.).
14. Kondrashov D.E., Bushmeleva K.I., Uvaysov S.U., Demchenko S.K. Methods of diagnostics of electronic means based on the analysis of shock effects by means of machine learning algorithms. In: *Innovative, Information and Communication technologies: Proceedings of the 18th International Scientific and Practical Conference*. Sochi. 2021. P. 190–195 (in Russ.).
15. Shalunov A.S. ASONIKA – Russian CAD electronics in terms of virtual tests. *Elektronika: Nauka, tekhnologiya, biznes = Electronics: Science, Technology, Business*. 2022;3:82–83 (in Russ.). <https://doi.org/10.22184/1992-4178.2022.214.3.82.83>
16. Rezhchikova E.V., Luong Q.L. Vibration protection of on-board electronic equipment from external influences. *Kontrol'. Diagnostika = Testing. Diagnostics*. 2021;24(11):22–30 (in Russ.). <https://doi.org/10.14489/td.2021.11.pp.022-030>
17. Irzaev G.H. Provision and evaluation of testability of the design of complex radio-electronic means/devices at the stages of their design. *Kontrol'. Diagnostika = Testing. Diagnostics*. 2023;26(5):34–41 (in Russ.). <https://doi.org/10.14489/td.2023.05.pp.034-041>
18. Kashnikova A.P., Belyaeva M.B. The Monte Carlo method in the problems of modeling processes and systems. *Modern Science*. 2021;(1–2):358–362 (in Russ.).

Об авторах

Увайсов Сайгид Увайсович, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой конструирования и производства радиоэлектронных средств, Институт радиоэлектроники и информатики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: uvajsov@mirea.ru. Scopus Author ID 55931417100, ResearcherID H-6746-2015, SPIN-код РИНЦ 3801-4816, <https://orcid.org/0000-0003-1943-6819>

Долматов Алексей Вячеславович, к.т.н., доцент, кафедра конструирования и производства радиоэлектронных средств, Институт радиоэлектроники и информатики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: dolmatov@mirea.ru. SPIN-код РИНЦ 3887-2405, <https://orcid.org/0000-0003-2969-2971>

Во Тхе Хай, аспирант, кафедра конструирования и производства радиоэлектронных средств, Институт радиоэлектроники и информатики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: thehai.trtd@gmail.com. <https://orcid.org/0009-0009-7240-4374>

Льу Нгок Тиен, аспирант, кафедра конструирования и производства радиоэлектронных средств, Институт радиоэлектроники и информатики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: alex05vn@gmail.com. <https://orcid.org/0009-0001-8779-7563>

Нгуен Конг Дык, аспирант, кафедра конструирования и производства радиоэлектронных средств, Институт радиоэлектроники и информатики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: ngcongduc9x@gmail.com. <https://orcid.org/0009-0000-9237-156X>

About the authors

Saygid U. Uvaysov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Design and Production of Radioelectronic Devices, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: uvajsov@mirea.ru. Scopus Author ID 55931417100, ResearcherID H-6746-2015, RSCI SPIN-code 3801-4816, <https://orcid.org/0000-0003-1943-6819>

Aleksey V. Dolmatov, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Design and Production of Radioelectronic Devices, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: dolmatov@mirea.ru, RSCI SPIN-code 3887-2405, <https://orcid.org/0000-0003-2969-2971>

The H. Vo, Postgraduate Student, Department of Design and Production of Radioelectronic Devices, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: thehai.ttrd@gmail.com. <https://orcid.org/0009-0009-7240-4374>

Ngoc T. Luu, Postgraduate Student, Department of Design and Production of Radioelectronic Devices, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: alex05vn@gmail.com. <https://orcid.org/0009-0001-8779-7563>

Cong D. Nguyen, Postgraduate Student, Department of Design and Production of Radioelectronic Devices, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: ngcongduc9x@gmail.com. <https://orcid.org/0009-0000-9237-156X>