

Роботизированные комплексы и системы.
Технологии дистанционного зондирования неразрушающего контроля
Multiple robots (robotic centers) and systems. Remote sensing and non-destructive testing

УДК 621.396.6

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2026-14-3-43-59>

EDN EKRNQE



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Локализация дефектов конструкций печатных узлов методом вибродиагностики

С.У. Увайсов, А.В. Долматов[@], Т.Х. Во,
Д.Х. Нгуен, С.Х. Фам, Р.М. Увайсов

МИРЭА – Российский технологический университет», Москва, 119454 Россия

[@] Автор для переписки, e-mail: dolmatov@mirea.ru

• Поступила: 14.05.2025 • Доработана: 30.12.2025 • Принята к опубликованию: 24.03.2026

Резюме

Цели. В процессе производства и эксплуатации печатных узлов (ПУ), устанавливаемых в блоках радиоэлектронных средств (РЭС), могут возникать конструктивные дефекты, обусловленные технологическими погрешностями или воздействием внешних эксплуатационных факторов. Наибольшую опасность представляют латентные дефекты, которые невозможно выявить после изготовления ПУ, но которые способны привести к отказам в процессе эксплуатации. Современные ПУ характеризуются высокой плотностью компоновки электрорадиоэлементов и, как правило, размещаются в герметичных блоках, что существенно затрудняет применение традиционных методов контроля. Целью работы является повышение достоверности выявления и классификации латентных дефектов конструкций ПУ в герметичных блоках по механическим амплитудно-частотным характеристикам (АЧХ) с использованием глубокой нейронной сети.

Методы. Предложен метод вибродиагностики, основанный на численном моделировании механических процессов, экспериментальных вибрационных испытаниях и применении искусственной нейронной сети для классификации технического состояния. Диагностирование осуществляется путем анализа механических АЧХ, полученных с помощью акселерометра, установленного на корпусе блока, и их сравнения с базой расчетных АЧХ, сформированной для различных технических состояний ПУ.

Результаты. Для экспериментальной проверки метода изготовлен макет ПУ внутри блока, в конструкцию которого вносились различные дефекты, и сформирована база расчетных механических АЧХ для исправного и неисправных состояний. После получения экспериментальных АЧХ выполнено их сравнение с расчетными данными, и с использованием глубокой нейронной сети определены виды внесенных дефектов.

Выводы. Разработанный метод вибродиагностики ПУ позволяет с высокой точностью выявлять и классифицировать латентные дефекты, возникающие в РЭС в процессе производства и эксплуатации, и повышает достоверность оценки технического состояния ПУ.

Ключевые слова: диагностирование, вибрационные воздействия, радиоэлектронное средство, печатный узел, DNN

Для цитирования: Увайсов С.У., Долматов А.В., Во Т.Х., Нгуен Д.Х., Фам С.Х., Увайсов Р.М. Локализация дефектов конструкций печатных узлов методом вибродиагностики. *Russian Technological Journal*. 2026;14(3):43–59. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2026-14-3-43-59>, <https://www.elibrary.ru/EKRNQE>

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Localization of structural defects of printed circuit board assembly by vibration diagnostics

Saygid U. Uvaysov, Aleksey V. Dolmatov[@], Vo The Hai,
Nguyen Duc Hai, Pham Xuan Hanh, Ruslan M. Uvaysov

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

[@] Corresponding author, e-mail: dolmatov@mirea.ru

• Submitted: 14.05.2025 • Revised: 30.12.2025 • Accepted: 24.03.2026

Abstract

Objectives. Structural defects may arise during the production and operation of printed circuit board assemblies (PCBAs) installed in radio-electronic assemblies (REAs) due to manufacturing imperfections or the influence of external factors. Of particular concern are latent defects that cannot be detected after the PCBA has been manufactured and which may lead to failures during operation. The typical installation in sealed enclosures of modern PCBAs, which are characterized by a high density of electronic components, significantly complicates the use of conventional inspection and diagnostic methods. This study aims to improve the reliability of detecting and classifying latent defects in PCBAs in sealed blocks based on their mechanical amplitude-frequency characteristics (AFCs) using a deep neural network.

Methods. The paper proposes a vibration diagnostics method based on the numerical modeling of mechanical processes, experimental vibration testing, and the application of an artificial neural network for technical condition classification. Diagnostics involves analyzing the obtained mechanical AFCs using an accelerometer mounted on the enclosure and comparing them with a database of calculated AFCs generated for various technical states of the PCBA.

Results. To verify the proposed method experimentally, a PCBA mock-up was fabricated and installed inside an enclosure with various structural defects introduced into its design. A database of calculated mechanical AFCs was formed for both healthy and faulty states. After obtaining experimental AFCs, they were compared with the calculated data, and the introduced defects were identified using a deep neural network.

Conclusions. The developed vibration diagnostics method enables the highly accurate detection and classification of latent defects arising in radio-electronic equipment during production and operation. This improves the reliability of technical condition assessment of PCBAs.

Keywords: diagnostics, vibrational loading, radio-electronic equipment, PCBA, DNN

For citation: Uvaysov S.U., Dolmatov A.V., Vo T.H., Nguyen D.H., Pham X.H., Uvaysov R.M. Localization of structural defects of printed circuit board assembly by vibration diagnostics. *Russian Technological Journal*. 2026;14(3):43–59. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2026-14-3-43-59>, <https://www.elibrary.ru/EKRNQE>

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

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Система диагностирования включает в себя объект контроля, средства и методы определения технического состояния. Под средствами понимается комплекс аппаратных и программных средств для измерения и анализа диагностической информации от объекта контроля на всех этапах его жизненного цикла. В зависимости от взаимодействия между объектом и средством диагностирования различают функциональные и испытательные методы. Функциональные методы применяются для диагностирования объекта в его рабочем режиме, и информацию о техническом состоянии объекта получают с помощью датчиков. В этом случае средства диагностирования не оказывают влияние на объект. При использовании испытательных методов на вход объекта подается сигнал или группа сигналов для возбуждения процессов, информирующих о его техническом состоянии [1].

Метод диагностирования технического состояния конструкций радиоэлектронных средств (РЭС), выполненных в виде блоков с печатными узлами (ПУ), на основе анализа механических амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) при вибрационных воздействиях находит широкое использование в технической диагностике [2–4]. Дефекты в конструкции устройства приводят к изменению значений резонансных частот по сравнению со значениями резонансных частот в исправном состоянии [5]. На основе анализа этих характеристик можно разработать метод диагностирования конструкций ПУ для выявления и классификации дефектов устройств в процессе производства и эксплуатации, не нарушая их структуру.

В рамках данной работы авторами рассматриваются вопросы разработки метода неразрушающей диагностики, в т.ч. построение моделей и алгоритмов процесса автоматического обнаружения и выявления типов латентных дефектов в конструкции ПУ, влияющих на механические АЧХ конструкции блока. В исследовании не учитываются отказы, вызванные отклонениями электрических параметров электрорадиоэлементов (ЭРЭ). С целью повышения достоверности разработанного метода применяется процесс механического моделирования объекта исследования с учетом разбросов технологических параметров конструкции.

1. МЕТОД ДИАГНОСТИРОВАНИЯ КОНСТРУКЦИЙ ПУ ПРИ ВИБРАЦИОННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Большинство дефектов конструкции ПУ, возникающих в процессе производства и эксплуатации, вызваны воздействиями механического характера (удары, гармонические вибрации, акустические

шумы). Наиболее распространенными из них являются следующие: отсутствие или деформация ЭРЭ, образование трещины в конструкции, ослабление крепежа ПУ, неоднородность структуры материала печатной платы и т.д. Однако эти дефекты, которые проявляются в процессе эксплуатации оборудования, невозможно выявлять непосредственно при использовании устройства по назначению существующими методами [6], поскольку их применение, как правило, требует выключения аппаратуры и нарушения целостности конструкции блока, в котором установлен ПУ, что нежелательно для герметичных блоков.

Указанные дефекты могут возникать на этапе производства блоков, на котором определяется исходное качество оборудования, или в процессе эксплуатации. Для обнаружения и определения типа латентных дефектов предлагается использовать метод диагностирования, основанный на сравнении экспериментально полученной АЧХ на внешней поверхности блоков в определенной контрольной точке с набором расчетных АЧХ в этой же контрольной точке для различных видов технического состояния конструкции ПУ [7]. По результатам сравнения АЧХ делается вывод о техническом состоянии устройства. Использование данного метода позволит сократить трудозатраты, продолжительность диагностирования и снизить экономические расходы на контроль и диагностику конструкции ПУ [8, 9].

С помощью современных средств моделирования и распознавания АЧХ можно с высокой степенью достоверности выявить связь между типом дефекта и диагностическим признаком. Для сбора диагностической информации и последующего ее анализа необходимо провести ряд мероприятий:

- преобразование физических явлений в диагностические сигналы (путем измерения значения АЧХ с помощью акселерометра);
- сбор характеристик этого сигнала и их анализ (путем моделирования различных технических состояний);
- сравнение результатов анализа со значениями, определенными в технической документации;
- использование алгоритма искусственного интеллекта для принятия решений о техническом состоянии.

Структурная схема разработанного метода приведена на рис. 1.

Для диагностирования технического состояния конструкции ПУ необходимо на основании конструкторской документации (блок 1) разработать модель устройства, позволяющую проводить анализ механических процессов (блок 2). При этом модель конструкции блока с ПУ должна достоверно описывать геометрическую структуру, физико-механические

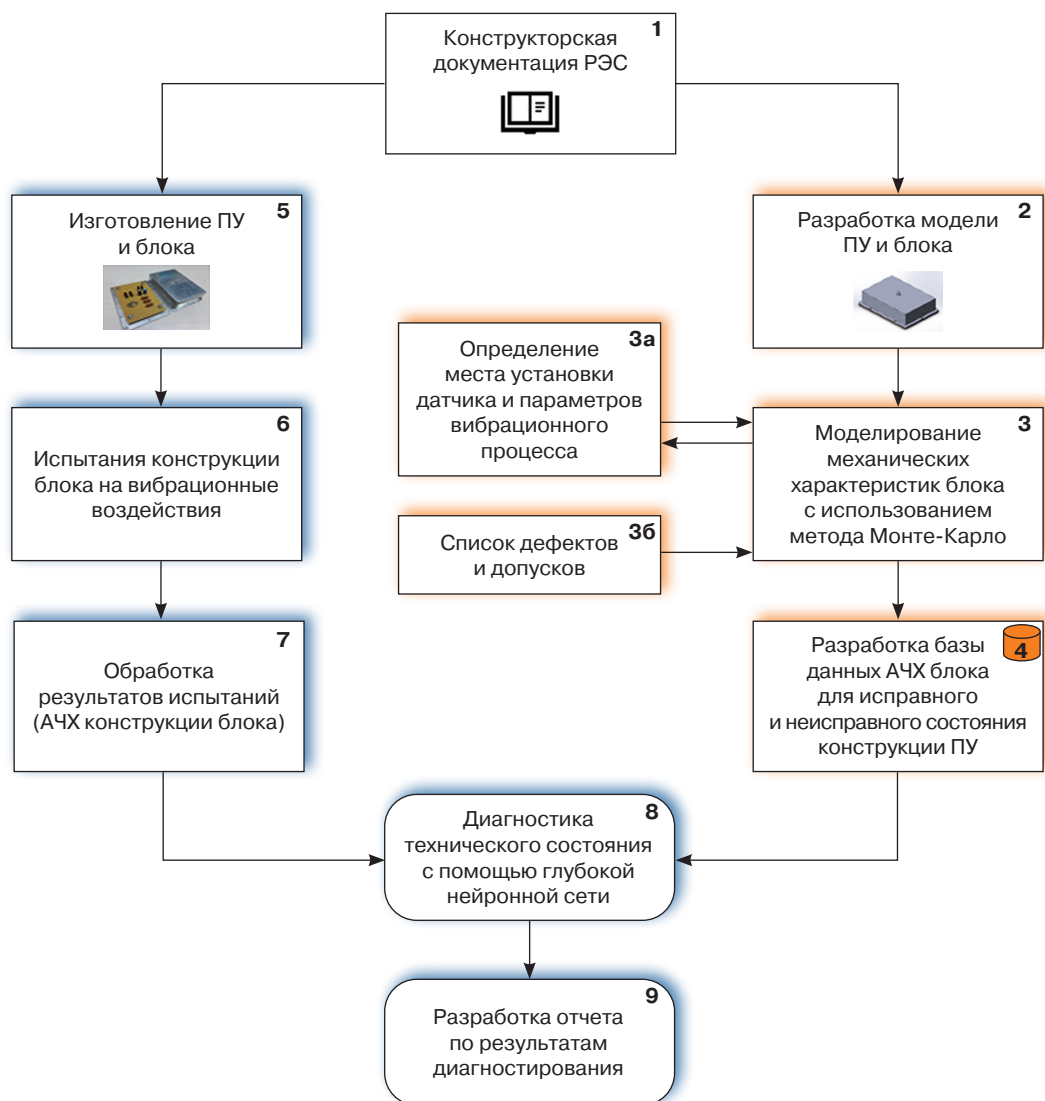


Рис. 1. Метод вибродиагностики ПУ

параметры материалов, механические характеристики каждого ЭРЭ моделируемого ПУ, т.е. модель должна быть адекватной и соответствовать данным, указанным в конструкторской документации на изделие.

Для моделирования механических процессов в блоке может использоваться любая система автоматизированного проектирования, позволяющая получать АЧХ в заданных точках устройства при вибрационных механических воздействиях. В данном методе используется программное средство *Solidworks*¹.

Полученная в результате расчета механических процессов АЧХ блока зависит от выбора контрольной точки для расчета данной АЧХ, параметров воздействующей механической вибрации (амплитуда, частота гармонической вибрации) (блок 3а).

Положение контрольной точки для получения АЧХ выбирается исходя из наибольшей амплитуды колебаний (центральное положение на крышке корпуса блока). Амплитуда гармонических колебаний при диагностировании должна быть не более значения амплитуды колебаний $A_{\max \text{ теор}}$, при которой возникают механические разрушения конструкции блока и ПУ, и в то же время не менее значения $A_{\min \text{ прак}}$, которое может быть зафиксировано датчиком. Следовательно, минимальное $A_{\min \text{ эффект}}$ и максимальное $A_{\max \text{ эффект}}$ значения амплитуды гармонических колебаний в контрольной точке должны удовлетворять условию²:

$$[A_{\min \text{ эффект}}; A_{\max \text{ эффект}}] \in [A_{\min \text{ прак}}; A_{\max \text{ теор}}].$$

² Лыу Нгок Тиен. *Акустико-эмиссионный метод контроля многослойных печатных плат радиоэлектронных устройств*: дис. ... к.т.н., М.: 2024, 169 с. [Lu Ngoc Tien. *Acoustic Emission Method of Control of Multilayer Printed Circuit Boards of Radio-Electronic Devices*: Cand. Sci. Thesis (Eng.). Moscow: 2024.]

¹ <https://www.solidworks.com/ru>. Дата обращения 23.03.2026. / Accessed March 23, 2026. (In Russ.).

Чтобы получить информацию о механических характеристиках конструкции блока для различных технических состояний ПУ необходимо провести моделирование механических процессов в исправном состоянии ПУ и при наличии различных дефектов. Перечень возможных дефектов составляется в блоке 3б. Стоит отметить, что чем больше возможных дефектов будет учтено в процессе моделирования, тем точнее будут результаты процесса диагностирования технического состояния устройства.

Физико-механические параметры γ_i реальных конструкций ПУ, как правило, имеют некоторый разброс, обычно в пределах 3–10%. Для того, чтобы учесть это, применяется статистическое моделирование методом Монте-Карло (блок 3) [10]. Результатом анализа является совокупность АЧХ, рассчитанных для случайных значений физико-механических параметров конструкции ПУ в пределах допустимых диапазонов. При этом распределение значений параметров описывается нормальной функцией распределения:

$$f(\gamma_i) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\gamma_i - \mu)^2}{2\sigma^2}\right),$$

где $f(\gamma_i)$ – плотность вероятности распределения физико-механического параметра γ_i ; μ – математическое ожидание (номинальное значение) параметра, σ – среднеквадратическое отклонение параметра.

В k -й реализации метода Монте-Карло i -й физико-механический параметр определяется по формуле:

$$\gamma_i = \gamma_i^{\text{ном}}(1 + \xi_k \delta_i),$$

где γ_i – текущее значение i -го параметра на k -й реализации метода Монте-Карло, $\gamma_i^{\text{ном}}$ – номинальное значение i -го физико-механического параметра, δ_i – относительный допуск на i -й физико-механический параметр, $\xi_k \sim N(-1, 1)$ – случайная величина со стандартным нормальным распределением [11, 12].

Разработка базы данных расчетных АЧХ (блок 4) для различных технических состояний конструкции ПУ осуществляется с помощью программы *Microsoft Excel*. База данных используется для сравнения с АЧХ, полученными в результате натурных испытаний, и принятия окончательного решения о техническом состоянии ПУ.

Для определения технического состояния ПУ в процессе производства или эксплуатации у изготовленных в соответствии с конструкторской документацией устройств (блок 5) проводится экспериментальное снятие механических АЧХ с использованием вибростенда (блок 6). При испытаниях датчик, с помощью которого получают данные об АЧХ, должен быть установлен в той же контрольной точке,

в которой были получены расчетные АЧХ в процессе моделирования. В настоящем исследовании в качестве датчика вибрации используется модель VP-32 (IMV Corporation, Япония), представляющая собой пьезоэлектрический акселерометр с выходом в виде электрического заряда. Данный датчик обладает высокой чувствительностью, широким диапазоном рабочих частот (до 10 кГц) и высокой устойчивостью к ударным нагрузкам, что делает его подходящим для анализа вибраций в условиях интенсивных механических воздействий. Его основным элементом является кварцевый кристалл, который преобразует виброускорение в пропорциональное электрическое напряжение. Чувствительность датчика выражается в пКл/г, где пКл – пикокулон, г – ускорение свободного падения, м/с². Диапазон измерений располагается в линейной области частотной характеристики датчика [13].

Экспериментально полученная механическая АЧХ конструкции блока преобразуется (блок 7) в таблицу данных, содержащую две составляющие: значения амплитуды и частоты, и затем сравнивается с механическими АЧХ, хранящимися в базе данных (блок 4), для обнаружения и определения вида дефектов с помощью искусственной нейронной сети (блок 8). При этом используется метод глубокой нейронной сети (deep neural network, DNN). По результатам сравнения экспериментальной и расчетных механических АЧХ формируется отчет о техническом состоянии ПУ (блок 9).

2. ПОЛУЧЕНИЕ РАСЧЕТНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ АЧХ

Моделирование механических процессов в конструкции блока с ПУ при воздействии вибрационных механических нагрузок является важной частью описанного метода и во многом определяет точность результатов диагностирования. Моделирование проводится для различных видов технического состояния устройства. Чем больше будет рассмотрено различных видов технического состояния конструкции ПУ, тем точнее будет окончательный вывод по результатам диагностирования.

При диагностировании конструкции ПУ определяется перечень возможных латентных дефектов и проводится моделирование механических характеристик устройства (получение расчетной АЧХ в контрольной точке блока), соответствующих каждому из указанных в перечне дефектов. Затем снимается экспериментальная АЧХ на реальном образце устройства и выявляется возможный дефект путем сравнения экспериментальной АЧХ с расчетными АЧХ для каждого вида технического состояния. Результат сравнения будет свидетельствовать о том,

что ПУ находится в исправном состоянии или имеет неисправность³.

Для определения перечня выявляемых дефектов в конструкции ПУ разработан алгоритм, схема которого показана на рис. 2.

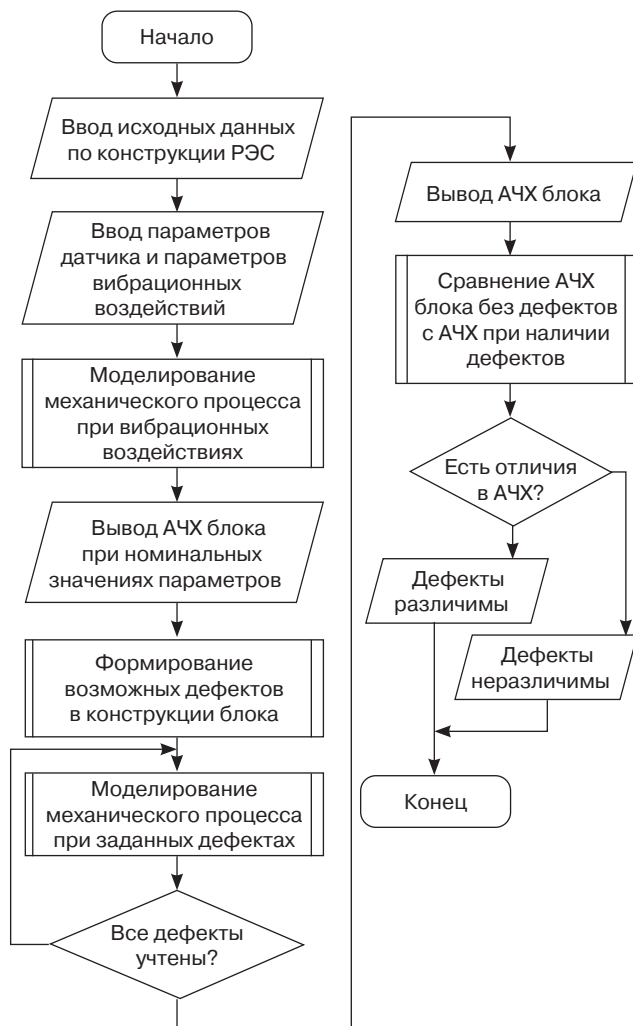


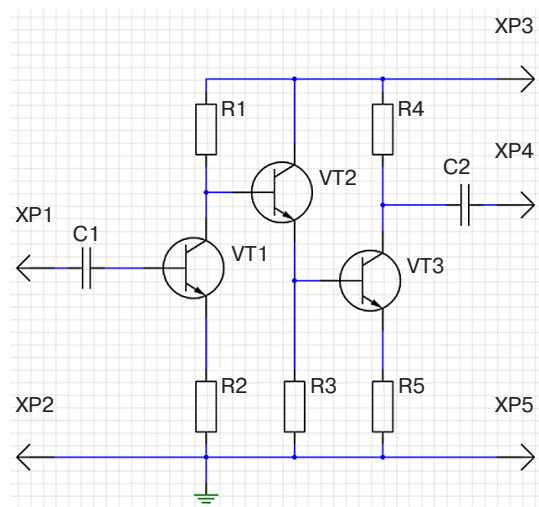
Рис. 2. Алгоритм определения перечня возможных дефектов

С помощью данного алгоритма можно определить возможность выявления того или иного дефекта в конструкции ПУ по анализу АЧХ и на основании этого принять решение о включении рассматриваемого дефекта в перечень выявляемых дефектов (блок 3б на рис. 1).

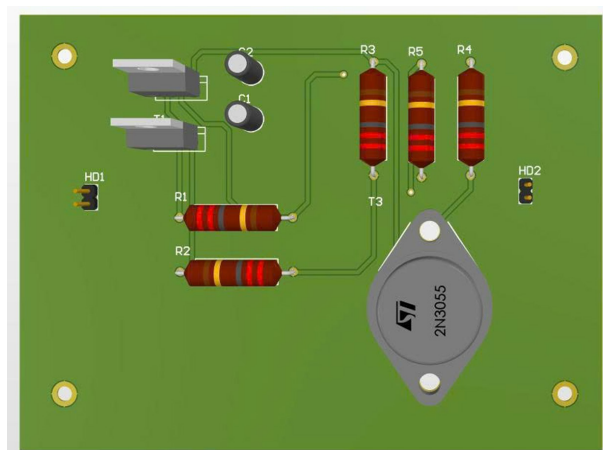
Расчет механических характеристик при вибрационных воздействиях проводится с помощью пакета анализа механических процессов *Solidworks Simulation*. Рассчитываются резонансные частоты конструкции блока при входном воздействии в виде гармонической вибрации в диапазоне частот от 0 до 2000 Гц.

³ Malpass L. *SolidWorks 2009 API – Advanced Product Development*. 2009, 246 p.

В качестве объекта для проведения исследований взят усилитель мощности, электрическая схема и модель конструкции ПУ которого изображены на рис. 3. Модель конструкции исследуемого макета блока с ПУ показана на рис. 4. Исследуемый ПУ представляет собой макет, имитирующий распределение системы масс ЭРЭ на печатной плате и предназначен исключительно для проведения данного исследования путем вибромеханических испытаний конструкции данного устройства. При этом в модели не учитываются электрические параметры ЭРЭ, поскольку в данном исследовании проводится анализ не электрических характеристик устройства, а механических характеристик и динамического отклика конструкции.



(а)



(б)

Рис. 3. Электрическая схема (а) и модель конструкции ПУ (б) исследуемого объекта. Обозначения элементов схемы соответствуют обозначениям, принятым в ГОСТ 2.710-81⁴

⁴ ГОСТ 2.710-81. Межгосударственный стандарт. Единая система конструкторской документации. Обозначения буквенно-цифровые в электрических схемах. М.: Издательство стандартов; 1985. [GOST 2.710-81. Interstate Standard. Unified system for design documentation. Alpha-numerical designations in electrical diagrams. Moscow: Izd. Standartov; 1985 (in Russ.).]

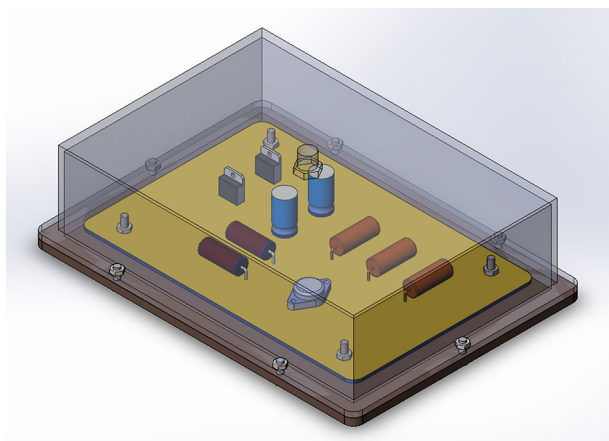


Рис. 4. Модель конструкции блока с ПУ

Полученная с помощью моделирования механическая АЧХ исследуемого макета в исправном состоянии (рис. 5) имеет резонансные частоты $f_1 = 878.1$ Гц, $f_2 = 1089.5$ Гц, $f_3 = 1405.7$ Гц.

В случаях, когда исследуемый макет содержит один из дефектов, значение резонансных частот устройства изменяются соответствующим образом:

- Дефект А – отсутствие ЭРЭ (рис. 6):

$$f_1 = 878.3 \text{ Гц}, f_2 = 1092.6 \text{ Гц}, f_3 = 1409.5 \text{ Гц};$$

- Дефект Б – ослабление крепежа ПУ (рис. 7):

$$f_1 = 878.2 \text{ Гц}, f_2 = 1090.6 \text{ Гц}, f_3 = 1428.8 \text{ Гц};$$

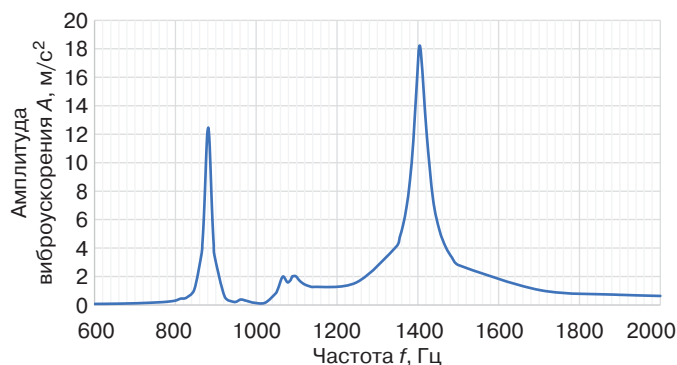


Рис. 5. АЧХ исследуемого макета в исправном состоянии

- Дефект В – деформация ЭРЭ (рис. 8):

$$f_1 = 878.1 \text{ Гц}, f_2 = 1091.5 \text{ Гц}, f_3 = 1403.6 \text{ Гц};$$

- Дефект Г – нарушения компоновки и размещения ЭРЭ на печатной плате (рис. 9):

$$f_1 = 878.4 \text{ Гц}, f_2 = 1090.2 \text{ Гц}, f_3 = 1424.2 \text{ Гц};$$

- Дефект Д – установка ЭРЭ, не соответствующего конструкторской документации (рис. 10):

$$f_1 = 878.4 \text{ Гц}, f_2 = 1069.5 \text{ Гц}, f_3 = 1478.2 \text{ Гц};$$

- Дефект Е – неоднородность структуры материала печатной платы (рис. 11):

$$f_1 = 842.4 \text{ Гц}, f_2 = 878.4 \text{ Гц}, f_3 = 951.5 \text{ Гц}.$$

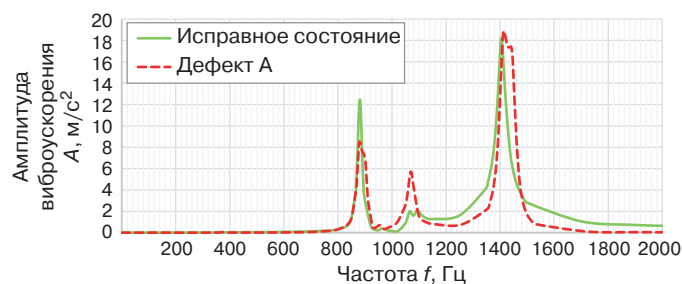


Рис. 6. АЧХ исследуемого макета с дефектом А

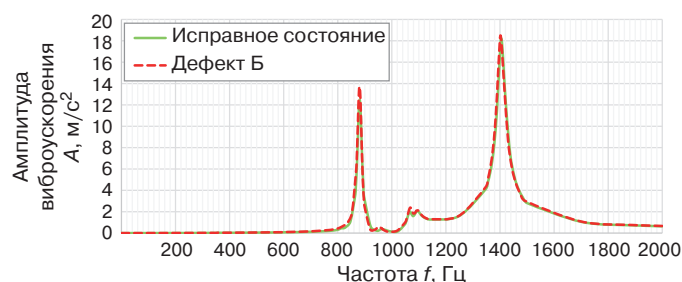
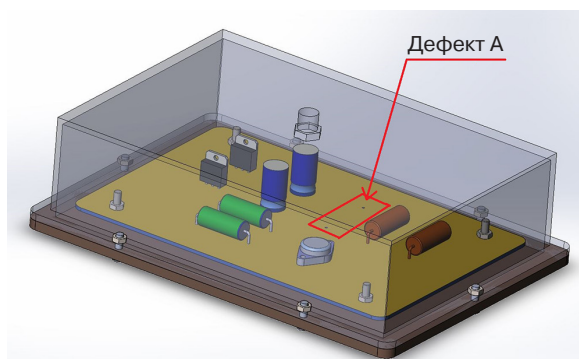
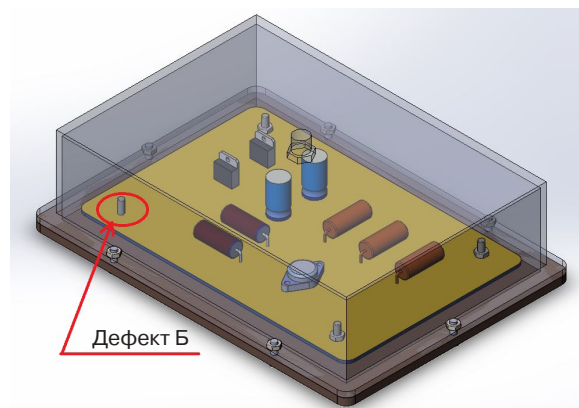


Рис. 7. АЧХ исследуемого макета с дефектом Б



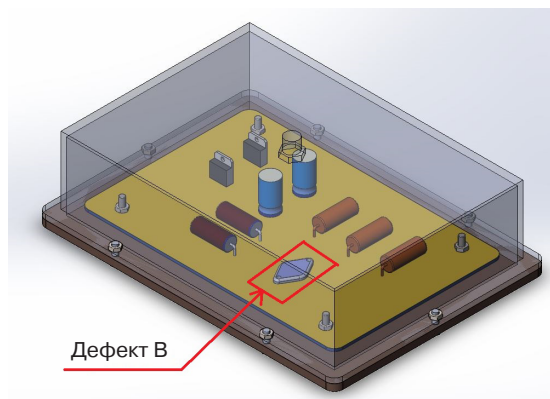
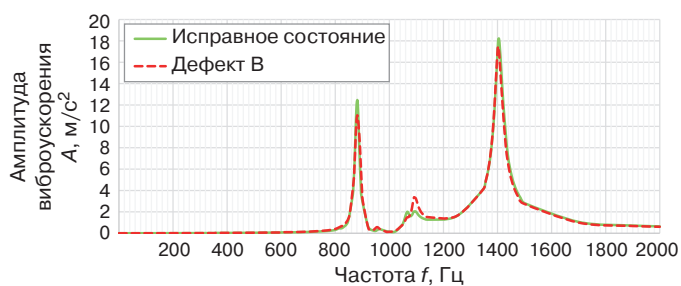


Рис. 8. АЧХ исследуемого макета с дефектом В

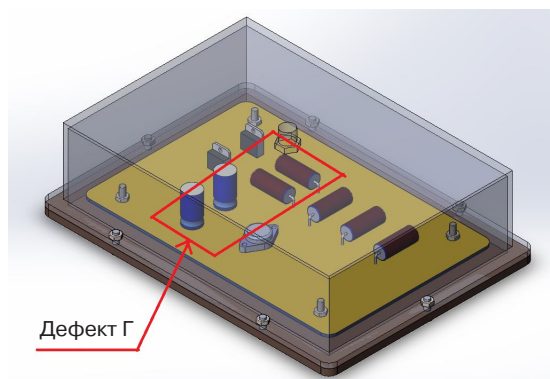
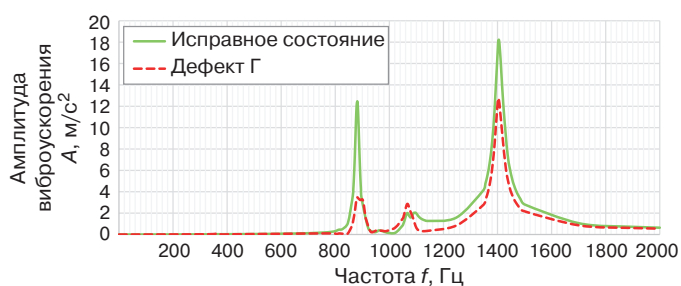


Рис. 9. АЧХ исследуемого макета с дефектом Г

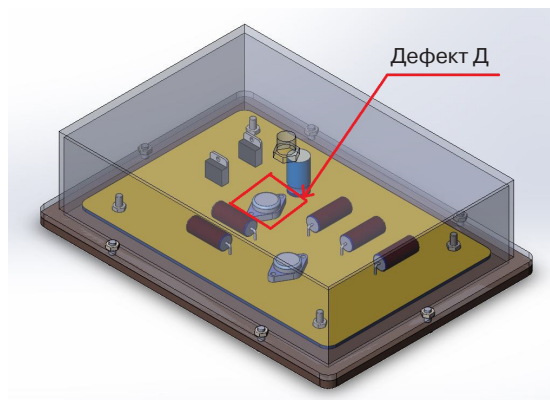


Рис. 10. АЧХ исследуемого макета с дефектом Д

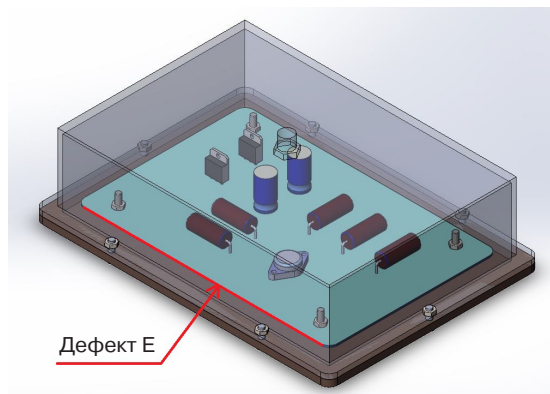
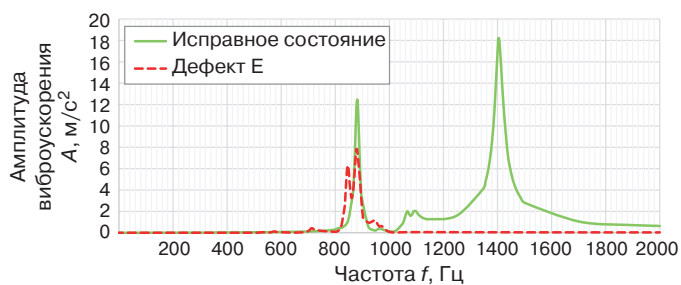


Рис. 11. АЧХ исследуемого макета с дефектом Е

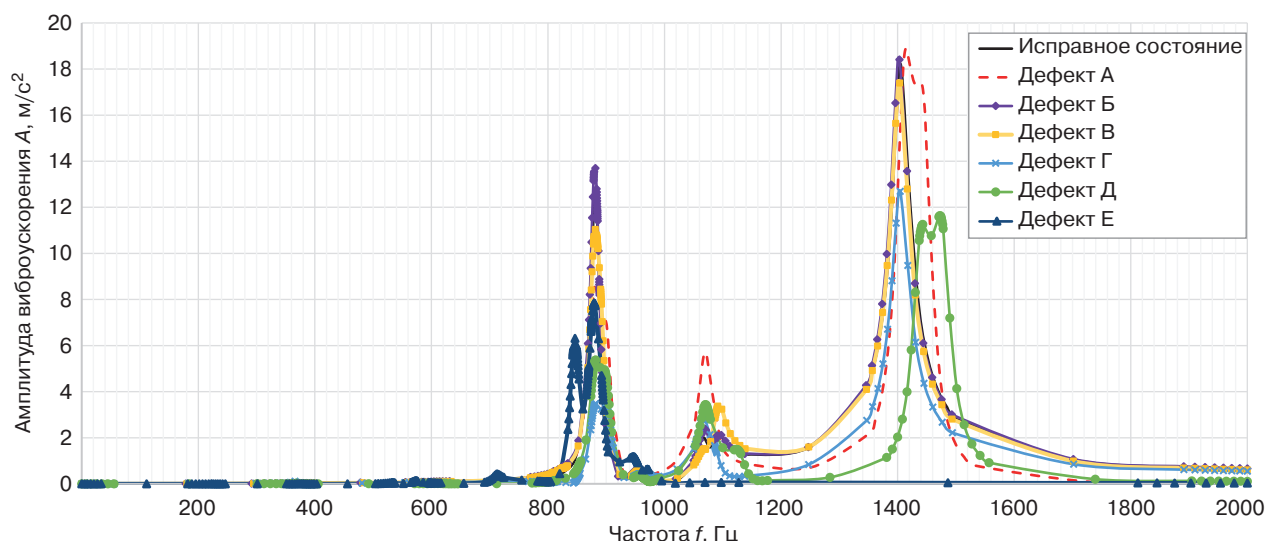


Рис. 12. Совокупность АЧХ исследуемого макета с различными дефектами

Таблица. Значения частоты и амплитуды виброускорения для различных технических состояний конструкции ПУ в процессе моделирования

Исправное состояние		Дефект А		Дефект Б		Дефект В		Дефект Г		Дефект Д		Дефект Е	
Частота, Гц	Амплитуда, м/с²	Частота, Гц	Амплитуда, м/с²	Частота, Гц	Амплитуда, м/с²	Частота, Гц	Амплитуда, м/с²	Частота, Гц	Амплитуда, м/с²	Частота, Гц	Амплитуда, м/с²	Частота, Гц	Амплитуда, м/с²
$1.59 \cdot 10^{-6}$	$3.68 \cdot 10^{-19}$	$1.59 \cdot 10^{-6}$	$1.02 \cdot 10^{-20}$	$1.59 \cdot 10^{-6}$	$4.42 \cdot 10^{-19}$	$1.59 \cdot 10^{-6}$	$3.76 \cdot 10^{-19}$	$1.59 \cdot 10^{-6}$	$4.31 \cdot 10^{-19}$	$1.59 \cdot 10^{-6}$	$7.53 \cdot 10^{-20}$	$1.59 \cdot 10^{-6}$	$6.72 \cdot 10^{-20}$
9.5	$1.32 \cdot 10^{-5}$	8.1	$2.62 \cdot 10^{-7}$	7.8	$1.06 \cdot 10^{-5}$	7.9	$9.19 \cdot 10^{-6}$	8.0	$1.08 \cdot 10^{-5}$	8.0	$1.92 \cdot 10^{-6}$	4.9	$6.26 \cdot 10^{-7}$
19.1	$5.27 \cdot 10^{-5}$	16.5	$1.10 \cdot 10^{-6}$	15.9	$4.43 \cdot 10^{-5}$	16.1	$3.85 \cdot 10^{-5}$	16.3	$4.54 \cdot 10^{-5}$	16.5	$8.05 \cdot 10^{-6}$	9.9	$2.62 \cdot 10^{-6}$
28.6	0.0001	25.4	$2.60 \cdot 10^{-6}$	24.5	0.000105	24.8	$9.13 \cdot 10^{-5}$	25.1	$1.08 \cdot 10^{-4}$	25.3	$1.91 \cdot 10^{-6}$	15.3	$6.21 \cdot 10^{-6}$
.....													
1952.5	0.6712	1962.0	0.0426	1959.0	0.6948	1959.0	0.6303	1959.1	0.5700	1964.1	0.1149	1929.4	0.03589
1968.3	0.6591	1975.3	0.0414	1973.3	0.6839	1973.4	0.6202	1973.4	0.5618	1976.7	0.1127	1954.1	0.0356
1984.2	0.6476	1987.9	0.0403	1987.0	0.6741	1987.0	0.6111	1987.0	0.5550	1988.6	0.1107	1977.6	0.0354
2000	0.6368	2000	0.0393	2000	0.6652	2000	0.6028	2000	0.5478	2000	0.1090	2000	0.0352

На рис. 12 показана совокупность АЧХ для всех перечисленных выше дефектов.

Наличие любого дефекта в конструкции ПУ вызовет изменение его АЧХ блока. Поэтому выявление дефекта путем сравнения АЧХ исследуемого макета с заранее полученными АЧХ, соответствующим различным возможным дефектам в конструкции ПУ, является наиболее эффективным способом контроля и определения технического состояния ПУ [14, 15].

Для сравнения АЧХ разработана таблица значений амплитуд виброускорений конструкции блока для различных технических состояний ПУ, полученных в контрольной точке при разных значениях частот вибрационного воздействия в диапазоне от 0 Гц до 2000 Гц.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ОБНАРУЖЕНИЯ НЕИСПРАВНОСТИ ПУ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ВИБРОСТЕНДА

Получение экспериментальных АЧХ исследуемого макета в исправном состоянии ПУ и при наличии дефекта осуществляется с помощью испытательного комплекса, состоящего из вибростенда и компьютера, на котором установлено специализированное программное обеспечение для анализа сигналов. В состав комплекса входят:

- вибростенд m030/MA1 (IMV Corporation, Япония), который отвечает за создание механических гармонических колебаний с определенной амплитудой и частотой, устанавливаемыми

при проведении эксперимента. В представленном случае на объект исследований воздействует гармоническая вибрация с амплитудой виброускорения 10 м/с^2 в диапазоне частот от 0 до 2000 Гц [15];

- акселерометр – датчик типа VP-32, регистрирующий виброускорение на крышке корпуса исследуемого макета (максимальное регистрируемое ускорение 500 м/с^2 в диапазоне рабочих частот от 2 до 10000 Гц);
- персональный компьютер, который управляет вибростендом для создания гармонических колебаний, а затем сохраняет и отображает АЧХ, полученную с помощью акселерометра.

Конструкция исследуемого объекта представляет собой макет блока (рис. 13) с алюминиевым корпусом толщиной 3 мм и основанием толщиной 5 мм. На крышке корпуса блока просверлено отверстие для крепления акселерометра. Внутри корпуса находится макет печатной платы с установленными ЭРЭ, который закреплен на винтах на расстоянии 10 мм от основания.

Состав лабораторно-экспериментального комплекса для анализа механической АЧХ при вибрационном воздействии показан на рис. 14.

На рис. 15 приведены полученные при натурных испытаниях на вибрационные воздействия механические АЧХ конструкции исследуемого макета.



Рис. 13. Конструкция исследуемого макета блока



Рис. 14. Лабораторно-экспериментальный комплекс для вибродиагностики конструкции ПУ

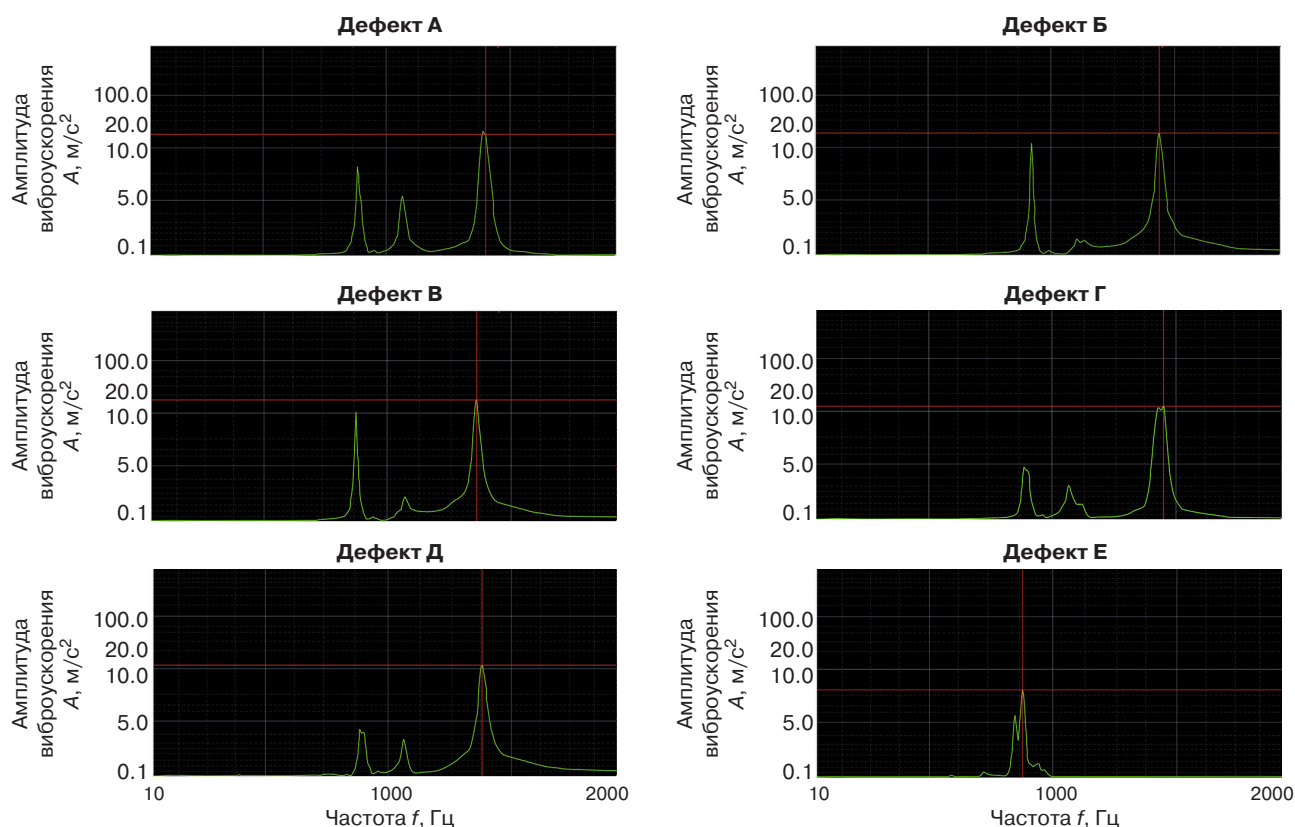


Рис. 15. Механические АЧХ конструкции макета, полученные при натурных испытаниях на вибрационные воздействия

В результате проведенных экспериментальных измерений получены механические АЧХ макета для исправного состояния ПУ и для нескольких неисправных состояний при наличии описанных ранее дефектов. В дальнейшем полученные АЧХ после их обработки в формат, пригодный для сравнения с результатами моделирования, используются для определения технического состояния исследуемого макета блока и классификации дефектов.

4. ПРИМЕНЕНИЕ ГЛУБОКОГО МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ КЛАССИФИКАЦИИ ДЕФЕКТОВ В ПУ

Глубокое машинное обучение представляет собой одно из направлений машинного обучения, основанное на применении искусственных нейронных сетей и алгоритмов, имитирующих работу человеческого мозга. Такой подход позволяет системе самостоятельно обучаться на больших массивах данных и выявлять скрытые закономерности между ними. Несмотря на то, что концепция глубокого обучения известна с 1960-х гг., широкое практическое применение она получила только с развитием вычислительных технологий и методов анализа больших данных, что позволило значительно повысить эффективность нейронных сетей [16].

Применение DNN обусловлено необходимостью распознавания сложных нелинейных зависимостей между формой и параметрами АЧХ и типом дефекта, что не реализуется в простых персептронных моделях. Выбор DNN позволил добиться устойчивой сходимости и высокой точности классификации вида технического состояния.

Deep neural network представляет собой разновидность искусственной нейронной сети, состоящей из множества взаимосвязанных слоев. Глубина сети определяется количеством скрытых слоев и сложностью ее структуры [17, 18]. Каждый слой выполняет обработку данных, передавая результаты следующему, что обеспечивает возможность решения задач высокой вычислительной сложности.

К основным компонентам DNN относятся:

- входной слой, принимающий исходные данные модели, представленные в виде двумерной числовой матрицы, содержащей значения амплитуд виброускорения и соответствующие им частоты для различных технических состояний;
- скрытый слой, выполняющий обработку данных и передачу информации между слоями;
- выходной слой, формирующий окончательное решение о состоянии блока (исправное или с определенным дефектом).

Функция активации используется для обеспечения нелинейной аппроксимации зависимостей между параметрами АЧХ и типами дефектов конструкции ПУ.

Весовые коэффициенты и смещения (bias) являются настраиваемыми параметрами сети, обеспечивающими ее адаптацию к обучающим данным.

На рис. 16 представлена структура искусственного нейрона, используемого в глубокой нейронной сети, где x_i – входные сигналы нейрона; w_{ki} – весовые коэффициенты соответствующих входов; b_k – смещение (bias); Σ – операция суммирования; u_j – линейная комбинация входов нейрона (иногда называют взвешенной суммой или сумматором), j – количество входных сигналов сети, зависящее от частотного диапазона; $\varphi(\cdot)$ – функция активации.

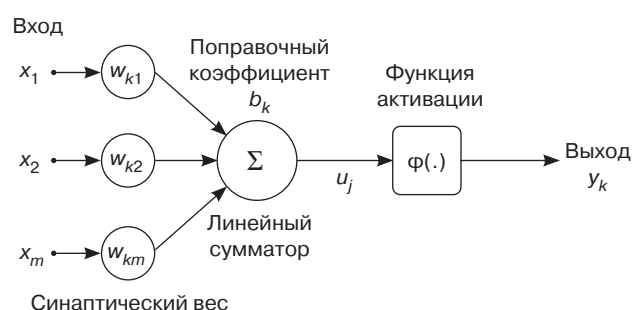


Рис. 16. Структура искусственного нейрона DNN

В рассматриваемом исследовании база данных дефектов конструкции исследуемого блока формировалась с объемом выборки $n = 1000$, что соответствует тысяче различных реализаций каждого состояния, полученных методом моделирования Монте-Карло. Количество нейронов выходного слоя равно семи, что соответствует одному исправному состоянию и шести видам потенциальных дефектов конструкции исследуемого ПУ.

Архитектура сети, реализованная в ходе моделирования, имеет следующий вид (рис. 17):

- входной слой – объединенные частоты и амплитуды;
- скрытый слой – нейроны с функцией активации ReLU (Rectified Linear Unit):

$$f(x) = \max(0, x);$$

- выходной слой – узлы с функцией активации softmax:

$$p_i = \frac{e^{z_j}}{\sum_{j=1}^7 e^{z_j}}, i = \overline{1, 7}; \quad (1)$$

где z_j – линейная комбинация входов на выходном слое; p_i – вероятность принадлежности к классу i .

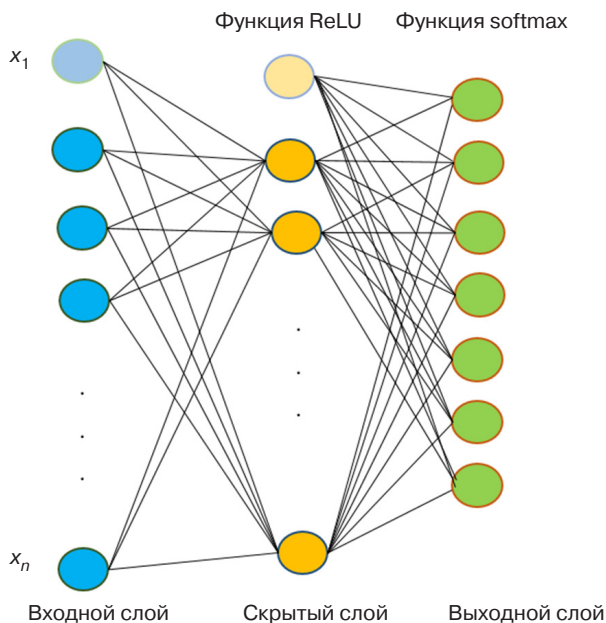


Рис. 17. Архитектура разработанной DNN-модели

Функция активации играет ключевую роль в работе нейронной сети, обеспечивая ее нелинейность и моделируя процесс передачи сигнала между нейронами.

ReLU является одной из наиболее распространенных функций активации, благодаря простоте реализации и высокой эффективности обучения. Она обладает рядом преимуществ по сравнению с функциями sigmoid и tanh:

- обеспечивает более быструю сходимость (скорость обучения в 6 раз выше, чем у tanh);
- требует меньших вычислительных затрат;
- предотвращает эффект насыщения градиента, что повышает стабильность обучения.

При использовании функции ReLU в задаче классификации дефектов скорость сходимости модели значительно возрастает, что подтверждено при обучении с числом $epoch = 10$, где $epoch$ – количество полных циклов обучения модели на всем наборе данных для обновления весов нейронов.

Для классификации технического состояния использовалась DNN, реализованная в среде Python с применением библиотеки Keras. На вход модели подавались массивы данных, представляющие АЧХ

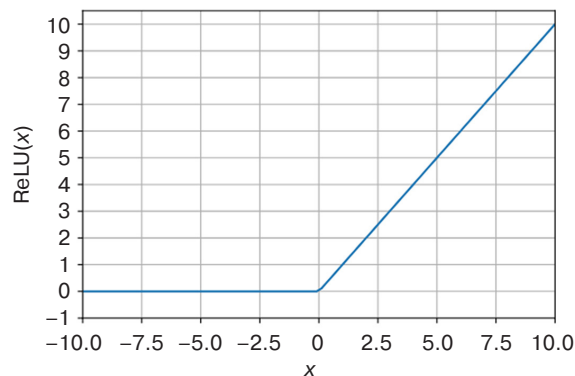


Рис. 18. График, представляющий функцию ReLU

в виде числовых пар «частота – амплитуда», сформированные по результатам моделирования и натурных испытаний. В процессе обучения использовались функция потерь кросс-энтропии и оптимизатор Adam, число эпох составило 10.

Значение точности модели (*Model Accuracy*), рассчитанное при выполнении кода DNN на языке Python, приведено на рис. 19.

По результатам обучения точность модели составила 99,57%, что свидетельствует о высокой эффективности предложенного подхода.

Полученные результаты классификации и идентификации представлены в виде гистограмм (рис. 20–25), отражающих процентное распределение вероятности выявления дефектов, рассчитанной по формуле (1).

Из полученных результатов классификации дефектов видно, что использование DNN позволяет распознавать каждый тип дефекта в конструкции ПУ с достаточно высокой вероятностью: дефект А – 93.7%, дефект Б – 47.5%, дефект В – 44.1%, дефект Г – 95.7%, дефект Д – 87.4%, дефект Е – 98.7%.

Таким образом, разработанная DNN-модель подтвердила возможность точного распознавания скрытых дефектов конструкции ПУ на основе анализа механических АЧХ блока, полученных при вибрационных испытаниях.

```

▶ loss, acc = model.evaluate(X_test, y_test)
  print("Model accuracy: {:.5.2f}%".format(100*acc))

... 22/22 _____ 1s 30ms/step - accuracy: 0.9957 - loss: 0.6735
    Model accuracy: 99.57%
  
```

Рис. 19. Скриншот результатов расчета точности модели DNN в среде Google Colab⁵

⁵ <https://colab.google/>. Дата обращения 23.03.2026. / Accessed March 23, 2026.

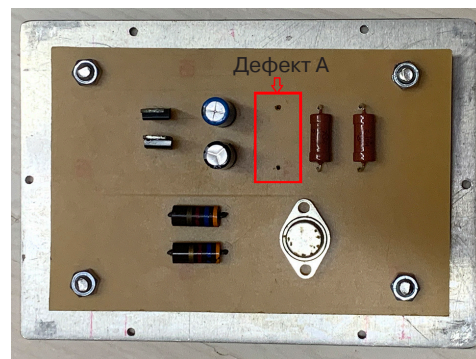
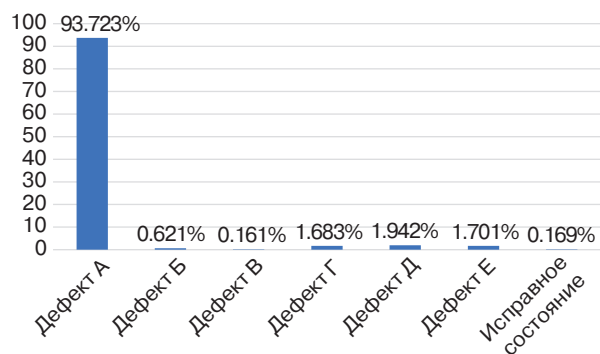


Рис. 20. Отчет о техническом состоянии исследуемого макета с дефектом А

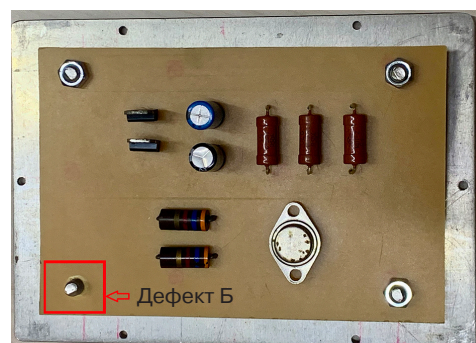
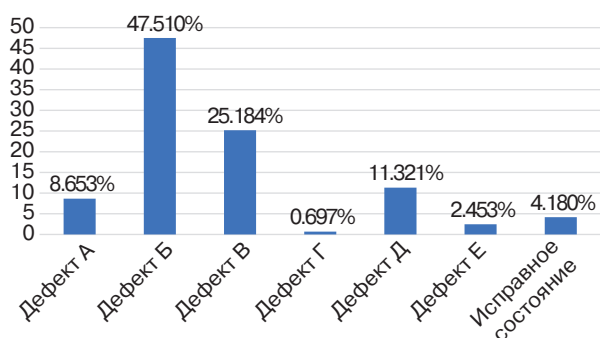


Рис. 21. Отчет о техническом состоянии исследуемого макета с дефектом Б

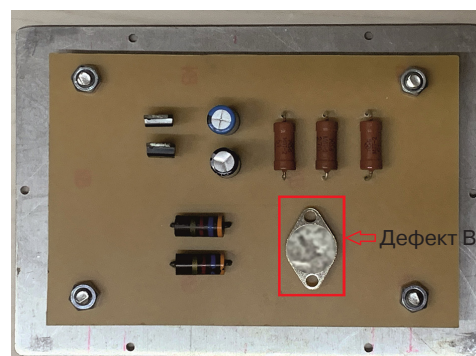
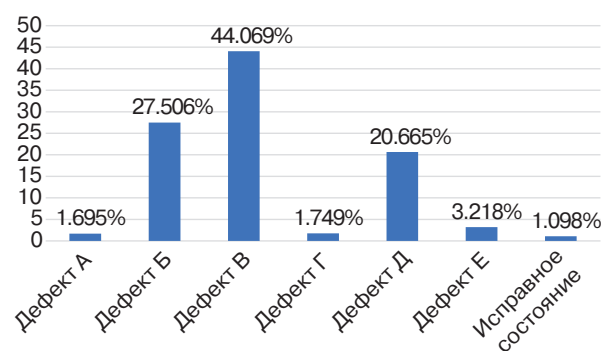


Рис. 22. Отчет о техническом состоянии исследуемого макета с дефектом В

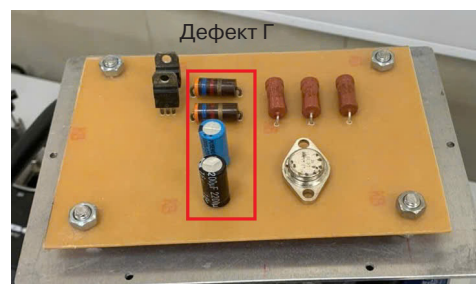
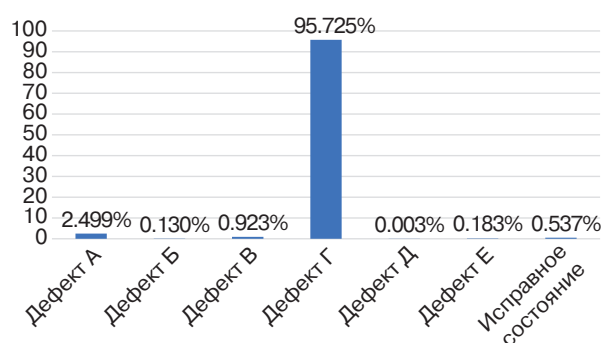


Рис. 23. Отчет о техническом состоянии исследуемого макета с дефектом Г

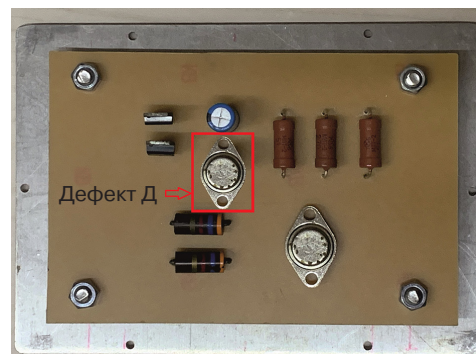
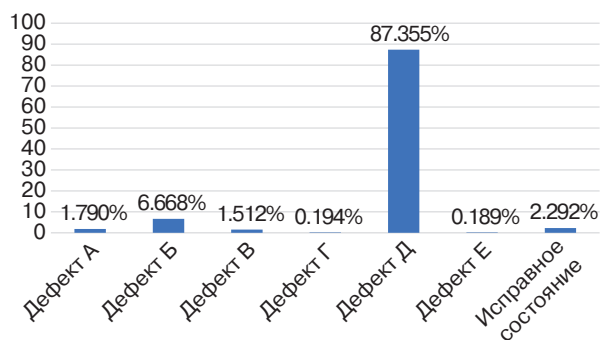


Рис. 24. Отчет о техническом состоянии исследуемого макета с дефектом Д

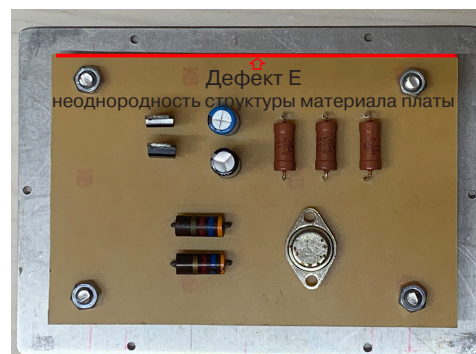
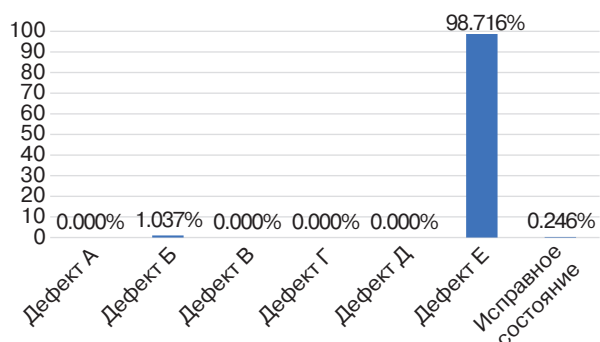


Рис. 25. Отчет о техническом состоянии исследуемого макета с дефектом Е

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенного исследования разработан и экспериментально апробирован метод вибродиагностики конструкций ПУ, основанный на анализе механических АЧХ блока и применении DNN для классификации дефектов.

Основные результаты работы заключаются в следующем:

- в ходе численных и натурных экспериментов подтверждено влияние различных конструктивных дефектов, указанных в разделе 2, на механические АЧХ конструкций блока при вибрационных воздействиях;
- разработан метод вибродиагностики ПУ, сочетающий численное моделирование механических процессов с натурными испытаниями, позволяющий с высокой точностью определять наличие и классифицировать латентный дефект в конструкции ПУ;
- реализована модель DNN, обеспечивающая точность классификации дефектов на уровне 99.6%;

- показана принципиальная возможность применения разработанного метода для диагностики ПУ на этапах производства и эксплуатации без необходимости вскрытия герметичных корпусов.

Таким образом, предложенный метод диагностирования ПУ при вибрационных воздействиях позволяет повысить эффективность процесса диагностирования за счет увеличения точности определения технического состояния. Применение численного моделирования и искусственной нейронной сети обеспечивает автоматизацию процедуры анализа механических АЧХ. Результаты, полученные в данной работе, могут быть использованы в качестве научной основы для дальнейшего развития и углубленного исследования методов вибродиагностики конструкций ПУ.

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

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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. *Russian Technological Journal*. 2024;12(2):28–38. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-2-28-38>
2. Долматов А.В., Сулейманов С.П., Увайсов Р.И. Диагностирование целостности конструкции электронной аппаратуры. *Проблемы качества, безопасности и диагностики в условиях информационного общества*. 2004;1:99–100. <https://elibrary.ru/pfgsrx>
3. Костюков А.С., Башкиров А.В., Гостев М.Ю., Демикова А.С., Пирогова Ю.А. Сравнительный анализ программных комплексов для определения механических характеристик РЭС. *Вестник Воронежского государственного технического университета*. 2020;16(4):117–126. <https://doi.org/10.25987/VSTU.2020.16.4.016>
4. 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>
5. 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>
6. Беляев А.А., Кононов Д.П., Кротов С.В. Проблемы диагностики современных тепловозных двигателей. *Бюллетень результатов научных исследований*. 2024;1:7–20. <https://doi.org/10.20295/2223-9987-2024-01-7-20>
7. Битюков В.К., Долматов А.В., Задерновский А.А., Стариковский А.И., Увайсов Р.М. Расчет допустимых отклонений виброускорений печатных узлов методом имитационного моделирования. *Russian Technological Journal*. 2023;11(6):28–38. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-6-28-38>
8. Занг В.Т., Дао А.К., Фам Л.К.Х., Нгуен В.Д., Нгуен В.Т., Увайсова А.С. Особенность применения технологии JTAG в диагностике печатных узлов. В сб.: *Инновационные, информационные и коммуникационные технологии: сборник трудов XVII Международной научно-практической конференции*. 2020. С. 427–431. <https://elibrary.ru/xpkskk>
9. Нехорошков Д.П., Юсипов М.Р., Сотникова С.Ю. Моделирование тепловых и механических процессов блока метеорологического спутника. *Инновационные, информационные и коммуникационные технологии*. 2019;1:309–313. <https://elibrary.ru/ydlitd>
10. Исабекова Т.И., Савзиханова С.Э. Моделирование надежности электронных компонентов сверхбольших интегральных схем методом Монте-Карло. *Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки*. 2025;52(3):49–60. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2025-52-3-49-60>
11. Bach Phi Duong, Jong-Myon Kim. Prognosis of remaining bearing life with vibration signals using a sequential Monte Carlo framework. *J. Acoust. Soc. Am.* 2019;146(4):EL358–EL363. <https://doi.org/10.1121/1.5129076>
12. Кашникова А.П., Беляева М.Б. Метод Монте-Карло в задачах моделирования процессов и систем. *Modern Science*. 2021;1-2:358–362. <https://elibrary.ru/ywleen>
13. Кофанов Ю.Н., Сотникова С.Ю. Повышение точности моделирования на основе идентификации. *Инновации на основе информационных и коммуникационных технологий*. 2015;1:176–178. <https://elibrary.ru/ukeyht>
14. Журавлёв А.О., Поляков А.О., Андриков Д.А. Методы вибродиагностики: от способов получения данных до их обработки современными средствами. *Вестник РУДН. Серия: Инженерные исследования*. 2024;25(4):380–396. <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2024-25-4-380-396>
15. 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>
16. Рахманов П.А., Гаррыев С.С., Реджепгелдиев С.С. Глубокое обучение и машинное обучение: ключевые отличия и влияние на современные технологии. *Вестник науки*. 2024;4(73):651–654. <https://elibrary.ru/rnvuyu>
17. Полегаев А.А., Яблоков А.Е. Нейросетевой метод технической диагностики оборудования по спектрам виброскорости и виброускорений. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2024;5:476–481. <https://www.elibrary.ru/nyfistf>
18. Клячкин В.Н., Кувайскова Ю.Е., Ломовцева Н.А. Диагностика состояния технического объекта с помощью классификации методами машинного обучения. *Программные продукты и системы*. 2021;4:572–578. <http://doi.org/10.15827/0236-235X.136.572-578>

REFERENCES

1. Uvaysov S.U., Dolmatov A.V., Vo T.H., Luu N.T., Nguyen C.D. Diagnostics of structural integrity violations of avionics during impact tests. *Russian Technological Journal*. 2024;12(2):28–38. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-2-28-38>
2. Dolmatov A.V., Suleimanov S.P., Uvaisov R.I. Diagnosing the integrity of the electronic equipment design. *Problemy kachestva, bezopasnosti i diagnostiki v usloviyakh informatsionnogo obshchestva = Problems of Quality, Safety and Diagnostics in the Information Society*. 2004;1:99–100 (in Russ.). <https://elibrary.ru/pfgsrx>
3. Kostyukov A.S., Bashkirov A.V., Gostev M.Yu., Demikhova A.S., Pirogova Yu.A. Comparative analysis of software complexes for determination of mechanical characteristics of RED. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Voronezh State Technical University*. 2020;16(4):117–126 (in Russ.). <https://doi.org/10.25987/VSTU.2020.16.4.016>
4. Shalumov 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>

5. Rezchikova 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>
6. Belyaev A.A., Kononov D.P., Krotov S.V. Problems of diagnostics of modern diesel locomotive engines. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy = Bulletin of Scientific Research Results*. 2024;1:7–20 (in Russ.). <https://doi.org/10.20295/2223-9987-2024-01-7-20>
7. Bityukov V.K., Dolmatov A.V., Zadernovsky A.A., Starikovskiy A.I., Uvaysov R.M. Calculation permissible deviations of vibration accelerations of printed circuit assemblies by simulation modeling. *Russian Technological Journal*. 2023;11(6):28–38. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-6-28-38>
8. Zang V.T., Dao An.Q., Pham L.Q.H., Nguyen V.D., Nguyen V.T., Uvaysova A.S. Feature of application of JTAG technology in diagnostics of printed units. In: *Innovative, Information and Communication Technologies: Proceedings of the 17th International Scientific and Practical Conference*. 2020. P. 427–431 (in Russ.). <https://elibrary.ru/xpksskk>
9. Nekhoroshkov D.P., Yusipov M.R., Sotnikova S.Y. Modeling of thermal and mechanical processes of the meteorological satellite unit. *Innovatsionnye, informatsionnye i kommunikatsionnye tekhnologii = Innovative, Information and Communication Technologies*. 2019;1:309–313 (in Russ.). <https://elibrary.ru/ydlitd>
10. Isabekova T.I., Savzikhanova S.E. Monte Carlo simulation of reliability of electronic components of very large-scale integrated circuits. *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Herald of Dagestan State Technical University. Technical Sciences*. 2025;52(3):49–60 (in Russ.). <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2025-52-3-49-60>
11. Bach Phi Duong, Jong-Myon Kim. Prognosis of remaining bearing life with vibration signals using a sequential Monte Carlo framework. *J. Acoust. Soc. Am.* 2019;146(4):EL358–EL363. <https://doi.org/10.1121/1.5129076>
12. 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.). <https://elibrary.ru/ywleem>
13. 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.). <https://elibrary.ru/ukehyt>
14. Zhuravlev A.O., Polyakov A.O., Andrikov D.A. Vibration Diagnostic Methods from Methods of Obtaining Data to Processing It Using Modern Means. *Vestnik Rossiiskogo universiteta družby narodov. Seriya: Inzhenernye issledovaniya = RUDN Journal of Engineering Research*. 2024;25(4):380–396 (in Russ.). <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2024-25-4-380-396>
15. 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>
16. Rakhmanov P.A., Garryev S.S., Redzhepgeldiev S.S. Deep learning and machine learning: key differences and impact on modern technologies. *Vestnik Nauki*. 2024;4(73):651–654 (in Russ.). <https://elibrary.ru/rnvyyu>
17. Poletaev A.A., Yablokov A.E. Neural network method for technical diagnostics of food equipment based on vibration acceleration and vibration velocity spectra. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = News of the Tula State University. Technical Sciences*. 2024;5:476–481 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/nyfistf>
18. Klyachkin V.N., Kuvaiskova Yu.E., Lomovtseva N.A. Diagnosing the condition of a technical object using classification machine learning classification. *Programmnye produkty i sistemy = Software & Systems*. 2021;4:572–578 (in Russ.). <http://doi.org/10.15827/0236-235X.136.572-578>

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.ttrd@gmail.com. SPIN-код РИНЦ 5210-3214, <https://orcid.org/0009-0009-7240-4374>

Нгуен Дык 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: duchai09011997@gmail.com. SPIN-код РИНЦ 5614-9517, <https://orcid.org/0009-0002-8109-9729>

Фам Суан Хань, 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: phamxuanhanhld161@gmail.com. SPIN-код РИНЦ 8103-7664, <https://orcid.org/0009-0002-6485-8404>

Увайсов Руслан Магомедович, 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: ruslan27398@yandex.ru. SPIN-код РИНЦ 5906-9978, <https://orcid.org/0000-0003-0619-649X>

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>

Vo The Hai, 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. RSCI SPIN-code 5210-3214, <https://orcid.org/0009-0009-7240-4374>

Nguyen Duc Hai, 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: duchai09011997@gmail.com. RSCI SPIN-code 5614-9517, <https://orcid.org/0009-0002-8109-9729>

Pham Xuan Hanh, 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: phamxuanhanhld161@gmail.com. RSCI SPIN-code 8103-7664, <https://orcid.org/0009-0002-6485-8404>

Ruslan M. Uvaysov, 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: ruslan27398@yandex.ru. RSCI SPIN-code 5906-9978, <https://orcid.org/0000-0003-0619-649X>