

УДК 621.396.69

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-2-44-56>

## НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

## Метод вибродиагностики технического состояния конструкций электронных средств

С.М. Лышов, С.У. Увайсов<sup>®</sup>, В.В. Черноверская,  
Ф.Л.К. Хань

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

<sup>®</sup> Автор для переписки, e-mail: [uvaysov@yandex.ru](mailto:uvaysov@yandex.ru)

**Резюме.** Рассмотрен метод вибродиагностики бортовых электронных средств, основанный на анализе резонансных частот. Представлен алгоритм диагностирования механических дефектов исследуемых блоков и узлов. Приведена структура комплекса программных средств автоматизации диагностирования и результаты реализации предложенного метода. Основная цель исследования – повышение достоверности идентификации конструктивных дефектов бортовых электронных средств. С этой целью разработана диагностическая модель конструкции устройства, позволяющая учесть разброс параметров электронного средства, как для исправного состояния, так и для состояния с дефектом. Переход от анализа амплитуд АЧХ к резонансным частотам, характеризующим физико-механические параметры конструкции, обусловлен большей стабильностью и меньшей погрешностью измерения этой характеристики. Для оценки допустимых отклонений резонансных частот от номинальных значений осуществлено имитационное статистическое моделирование с применением метода Монте-Карло. Повысить достоверность результатов физического эксперимента удалось за счет определения наилучшей, в плане получаемого отклика, точки размещения акселерометра. В статье представлена структура и описание алгоритма ее поиска. Приведены результаты апробации рассматриваемого метода на примере печатного узла делителя напряжения блока контроля летательного аппарата. В САПР *SolidWorks* смоделировано исправное состояние электронного средства, для которого были определены четыре резонансные частоты, а также состояние с дефектом в виде отрыва крепления. Анализ результатов показал смещение трех значений резонансных частот относительно значений, соответствующих исправному состоянию. Проведенная серия из 10 испытаний выявила дефект во всех 10 случаях (с допустимой погрешностью результата исследования). Это свидетельствует о высокой степени достоверности полученных данных, адекватности диагностической модели и корректности примененных алгоритмов.

**Ключевые слова:** вибрационное диагностирование, математическое моделирование, метод Монте-Карло, радиоэлектронное средство, резонансная частота, амплитудно-частотная характеристика, разброс резонансных частот

• Поступила: 14.07.2020 • Доработана: 31.07.2020 • Принята к опубликованию: 15.09.2020

**Для цитирования:** Лышов С.М., Увайсов С.У., Черноверская В.В., Хань Ф.Л.К. Метод вибродиагностики технического состояния конструкций электронных средств. *Российский технологический журнал*. 2021;9(2):44–56. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-2-44-56>

**Прозрачность финансовой деятельности:** Никто из авторов не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

# Method of vibration diagnostics of the technical condition of electronic equipment structures

Sergey M. Lyshov, Saygid U. Uvaysov<sup>@</sup>,  
Viktoriya V. Chernoverskaya, Pham L.Q. Han

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia  
<sup>@</sup> Corresponding author, e-mail: uvaysov@yandex.ru

**Abstract.** The article considers the method of vibration diagnostics of onboard electronic devices based on the analysis of resonant frequencies. An algorithm for diagnosing mechanical defects of the studied blocks and nodes is presented. The structure of the complex of software tools for diagnostics automation and the results of testing the proposed method are presented. The main goal of the research is to improve the accuracy of identification of design defects of on-Board electronic devices. The transition from the analysis of the frequency response to the resonant frequencies that characterize the physical and mechanical parameters of the structure is due to greater stability and lower measurement error of this characteristic. To achieve this goal, a diagnostic model of the method has been developed that allows taking into account the spread of parameters of the electronic tool, both for the serviceable state and for the state with a defect. To estimate the permissible deviations of resonant frequencies from the nominal values, statistical simulation was performed using the Monte Carlo method. It was also possible to increase the reliability of the results of the physical experiment by determining the best position of the accelerometer in terms of the response received. The article provides a structure and description of the algorithm for searching for it. The results of approbation of the considered method on the example of the printed node of the voltage divider of the control unit of the aircraft are presented. In CAD SolidWorks, the serviceable state of the test node was modeled, for which four resonant frequencies were determined, and the state with a defect in the form of a detachment of the attachment. Analysis of the results showed a shift of three values of resonant frequencies relative to the correct state. The conducted series of 10 tests revealed the defect in all 10 cases (with the permissible error of the research result). This indicates a high degree of reliability of the data obtained, the adequacy of the diagnostic model of the method and the correctness of the applied algorithms.

**Keywords:** vibration diagnostics, mathematical modeling, Monte Carlo method, electronic means, resonant frequency, amplitude-frequency characteristic, scatter of resonant frequencies

• Submitted: 14.07.2020 • Revised: 31.07.2020 • Accepted: 15.09.2020

**For citation:** Lyshov S.M., Uvaysov S.U., Chernoverskaya V.V., Han Ph.L.Q. Method of vibration diagnostics of the technical condition of electronic equipment structures. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2021;9(2):44–56 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-2-44-56>

**Financial Disclosure:** No author has a financial or property interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

## ВВЕДЕНИЕ

Конструктивная и схмотехническая сложность современных электронных средств (ЭС) может повлечь за собой снижение показателей их надежности и появление в процессе функционирования различных дефектов и неисправностей [1]. Наиболее частыми причинами появления конструктивных дефектов являются механические воздействия, которые испытывают электронные узлы и блоки в период своей эксплуатации.

Своевременное диагностическое обследование бортовой электроники позволяет определить слабые места конструктивного решения и уменьшить количество отказов оборудования.

При проведении испытаний электронных средств из известных методов неразрушающего контроля достаточно часто применяется вибродиагностика конструктивных элементов. Многолетний опыт подобных исследований показал их эффективность и экономичность, а анализ полученных результатов

свидетельствует о высокой степени достоверности получаемых данных [2].

Рассматриваемый в данной работе метод контроля и диагностики технического состояния бортовых ЭС в качестве диагностического признака использует резонансные частоты, непосредственно связанные с физико-механическими параметрами конструкции электронного средства [3].

Экспериментально было выявлено, что резонансная частота является более стабильной характеристикой, чем амплитуда частотной характеристики, и позволяет избежать неоднозначности, возникающей при анализе АЧХ, применявшейся в предыдущих методах вибродиагностики [4]. По наличию отклонения значений измеренной резонансной частоты от частоты «идеального» ЭС можно судить о присутствии дефекта в конструкции устройства и его локализации. Задающее воздействие на объект может быть подано как извне (вибростенд), так и встроенным эмулятором механических колебаний [5]. Для оценки допустимых отклонений резонансных частот от номинальных значений проводится имитационное статистическое моделирование с применением метода Монте-Карло [6, 7].

## РАЗРАБОТКА МЕТОДА

Задачи, решаемые в процессе разработки метода диагностирования бортовых электронных средств, нацелены на обеспечение:

- контроля и диагностики механических дефектов, возникающих в процессе производства и эксплуатации ЭС;
- повышения количества выявляемых дефектов посредством оптимального размещения датчиков гармонических колебаний;
- минимизации временных затрат за счет дифференциации особенностей конструкции и режимов эксплуатации;
- требований технологий проектирования и производства ЭС;
- требований, предъявляемых к неразрушающим методам диагностирования.

Блок-схема разработанного метода представлена на рис. 1. Определение значений искомым характеристик осуществляется двумя независимыми способами: посредством проведения натурных испытаний с применением лабораторной установки и посредством проведения численного эксперимента и моделирования. Геометрическая модель ЭС (блок 3) формируется на этапе проектирования. Для повышения точности физического эксперимента, уменьшения погрешности проводимых расчетов и построения адекватной механической модели в конструкцию устройства интегрируются актуатор [8, 9]

и акселерометр (блоки 1 и 2). Ключевым моментом на данном этапе является определение точки установки акселерометра, координаты которой определяются по специально разработанному алгоритму размещения датчика.

В ходе физического эксперимента (блок 8) на ЭС подаются гармонические воздействия, генерируемые актуатором [10] или вибростендом (блок 7), а с акселерометров снимаются значения ускорений при соответствующих частотах (АЧХ) (блок 12). Затем полученные данные экспортируются в блок предварительной обработки (блок 15), результатом работы которого является нахождение значений искомым характеристик – резонансных частот  $F_j$ , характеризующих техническое состояние ЭС в текущий момент времени.

Получение результатов численного моделирования с целью дальнейшего сравнения их с результатами натурных испытаний предполагает выполнение предварительных этапов исследования, необходимых для формирования исходных данных и определения эталонных значений исследуемых характеристик.

Предварительно для исправного состояния ЭС формируется набор параметров и допусков на них  $Q$  (блок 5), т.е. создается модель исправного (образцового) ЭС. Аналогично, для каждого неисправного состояния ЭС, когда  $q_j \neq Q$ , формируется перечень дефектов (блок 4), рассчитываются наборы исследуемых параметров и создается база данных неисправностей ЭС.

На следующем этапе (блок 6) осуществляется расчет параметров ЭС методом статистических испытаний (метод Монте-Карло). Моделирование механических процессов, протекающих в БРЭС (блок 10), осуществляется с применением современных САПР *SolidWorks*, *АСОНИКА-М*, *АСОНИКА-ТМ*, *ANSYS* и реализованных в них сеточных методов исследования (метод конечных разностей и конечных элементов) (блок 11) [11, 12].

Для большей адекватности создаваемой модели в ней учитываются ограничения, накладываемые вибродатчиком, применяемым в физическом эксперименте (чувствительность, порог срабатывания). Для этого в систему моделирования добавлен фильтр по порогу чувствительности датчика (блок 9), позволяющий формировать в численном эксперименте значения параметров, соответствующие физическому эксперименту. Для расчета значений резонансных частот формируется совокупность математических моделей, которые учитывают различные виды дефектов, возникающие в ЭС [13].

Перед каждой итерацией моделирования механических процессов один из случайных наборов параметров  $q_i^k$  импортируется в программную среду

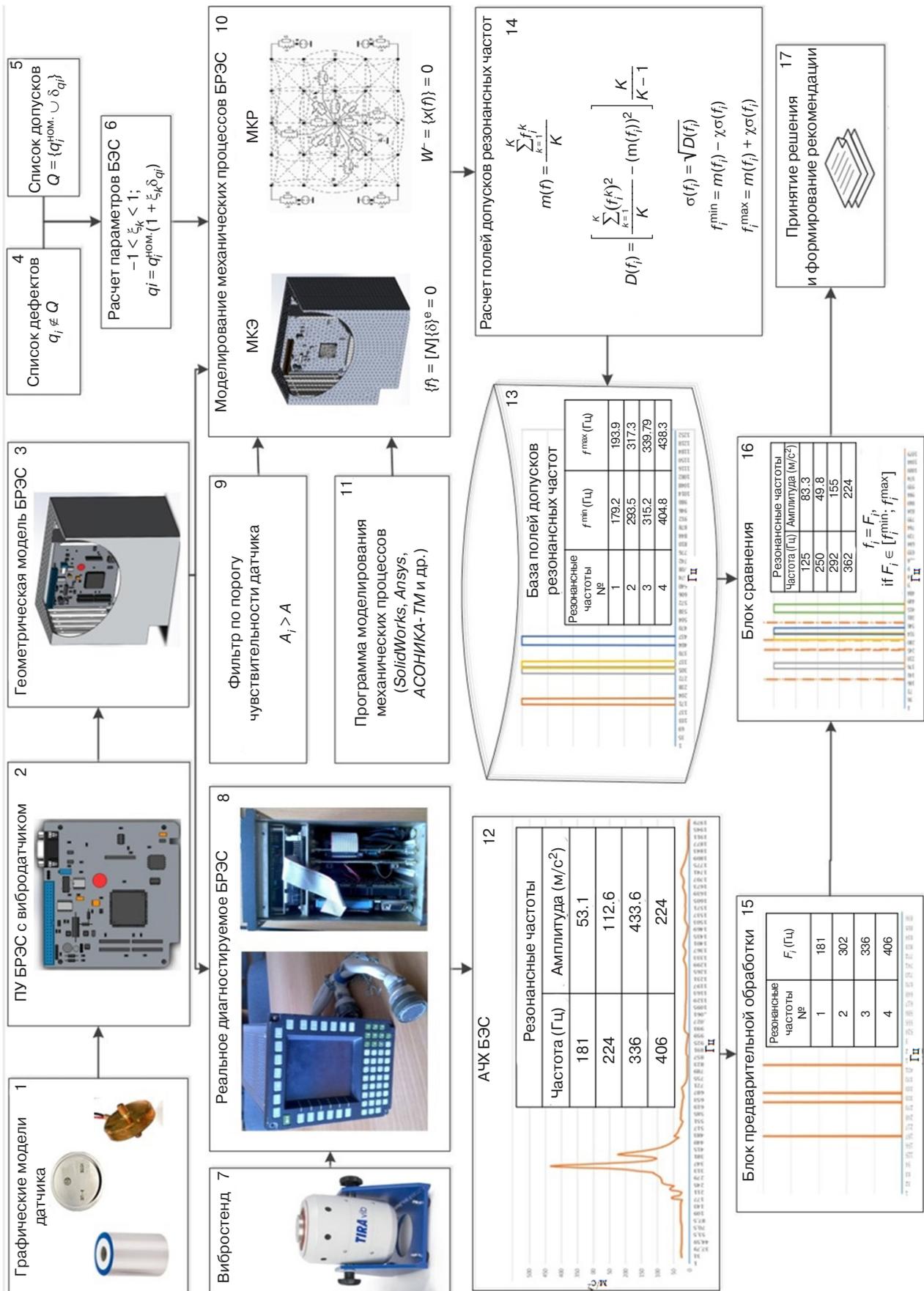


Рис. 1. Метод вибродиагностики технического состояния бортового электронного средства

выбранной САПР, где проводится расчет резонансных частот  $f_i^k$ . В результате многократного моделирования формируются наборы резонансных частот, которые учитывают геометрические и физико-механические допуски на реальные устройства.

На следующем этапе исследования, с помощью аппарата математической статистики, рассчитываются разбросы резонансных частот  $[f_i^{\min}; f_i^{\max}]$  с учетом заданной доверительной вероятности  $\chi$  (блок 14). Операция осуществляется как для исправного состояния ЭС, так и для ЭС с дефектами. Накопление и обработка информации обо всех возможных дефектах ЭС, полученных в результате численного эксперимента, позволяет сформировать базу данных резонансных частот для дальнейшего сравнительного анализа.

В блоке сравнения (блок 16) резонансные частоты, сформированные на этапе предварительной обработки, поочередно сравниваются с разбросами резонансных частот, хранящимися в базе данных, и в случае отклонения хотя бы одной частоты от допустимых значений разбросов ( $F_i \notin [f_i^{\min}; f_i^{\max}]$ )

устройство признается неисправным и производится его диагностика.

Процесс диагностики заключается в последовательном переборе полученных значений частот  $F_j$ , характеризующих дефект ЭС, и сравнении каждого из них с интервальными значениями диапазона частот для конкретного дефекта ЭС  $[f_j^{\min}; f_j^{\max}]$ .

По результатам сравнения принимается решение об исправности или неисправности электронного средства. В случае обнаружения неисправности в блоке принятия решений (блок 16), формируются рекомендации для ремонта ЭС и возвращения его в исправное состояние или по окончательной замене ЭС.

На рис. 2 представлена блок-схема алгоритма для разработанного метода диагностирования механических дефектов конструкций БРЭС.

Как показали результаты экспериментальных исследований, на точность математической модели существенное влияние оказывают не только корректно введенные исходные данные, но и наилучшее с точки зрения формируемого отклика место расположения актюатора и акселерометра. Нахождение

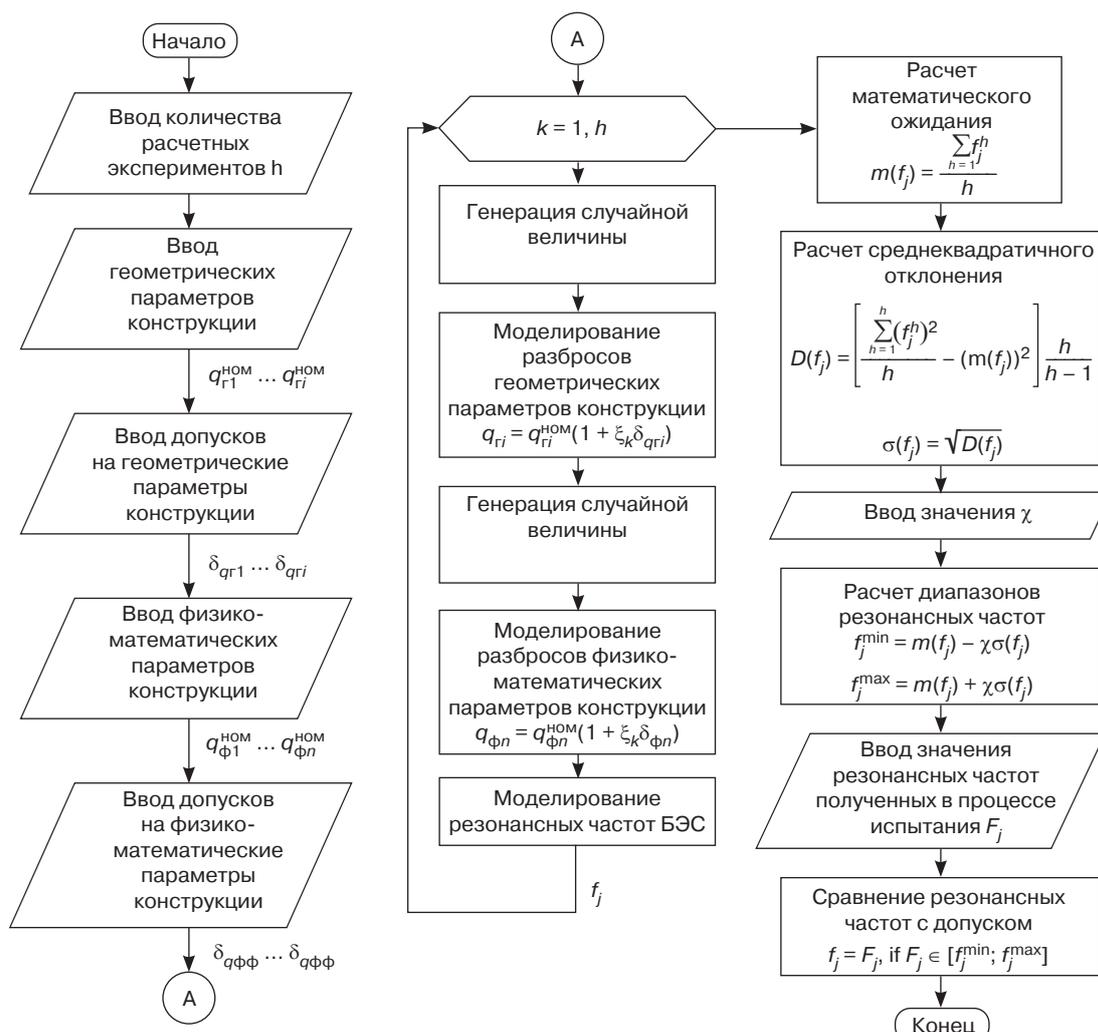


Рис. 2. Блок-схема алгоритма диагностирования механических дефектов

оптимальных координат точек расположения чувствительных элементов позволяет существенно уменьшить погрешность моделирования механических процессов и повысить достоверность диагностического обследования электронного средства.

Данная задача относится к классу поисковых оптимизационных задач и ее решение весьма трудоемко. Основными ограничивающими факторами здесь являются плотная и сложная компоновка печатных узлов (ПУ), количество свободных областей для размещения чувствительных элементов, максимальное удаление их от точек крепления ПУ, виды диагностируемых неисправностей.

На рис. 3 представлена блок-схема алгоритма определения координат точек размещения актюатора и акселерометра.

Предложенный алгоритм содержит цепь обратной связи, которая позволяет изменить точку размещения акселерометра в случае недостаточной полноты контроля.

Последовательность работы алгоритма следующая:

1. Ввод начальных координат точки размещения акселерометра с учетом вида и влияния неисправности.

2. Последовательный ввод данных о наиболее распространенных дефектах данной конструкции.
3. Ввод математической модели ЭС в программу моделирования механических характеристик.
4. Сравнение рассчитанных значений резонансных частот с характеристиками исправного блока.
5. Проверка условия выявления дефекта.
6. Изменение точки размещения акселерометра по решению оператора.

Для выбора оптимальной точки размещения датчика гармонических колебаний предварительно необходимо выполнить дискретизацию свободных областей коммутационного пространства печатного узла (не занятых ЭРИ) на элементарные ячейки (дискреты). Линейные размеры ячеек должны быть сопоставимы с габаритными размерами датчика, чтобы служить в дальнейшем посадочным местом для размещения чувствительного элемента. Как правило, в результате дискретизации получается некоторая совокупность свободных областей. Координаты их центров являются исходными данными (контрольными точками) для запуска алгоритма.

Затем начинается анализ чувствительности каждой контрольной точки. Для этого из сформированной

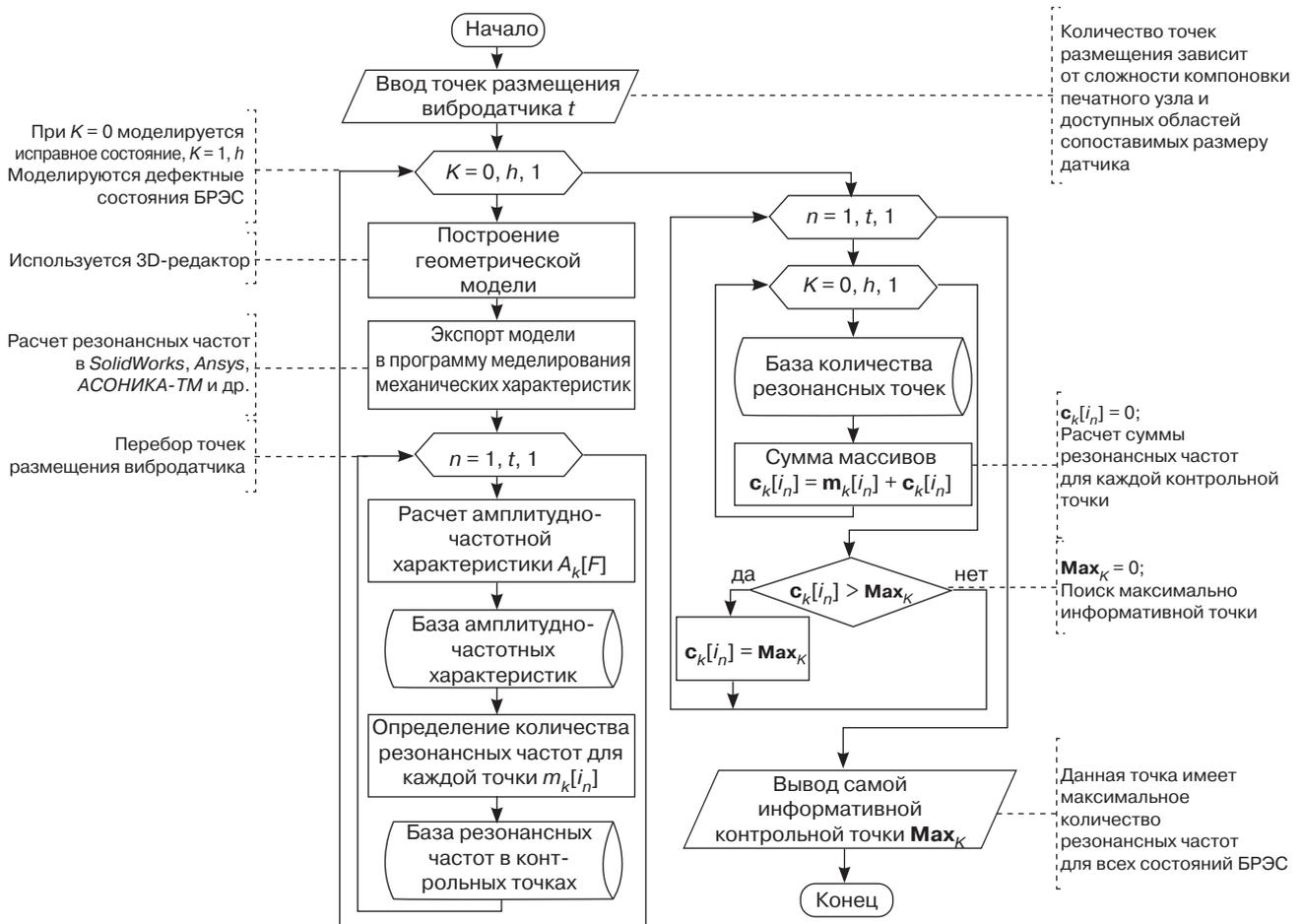


Рис. 3. Блок-схема алгоритма выбора точек размещения актюатора и акселерометра

базы неисправностей в блок моделирования последовательно загружаются наборы параметров исправного (образцового) БРЭС и БРЭС с различными дефектами конструкции. Процесс продолжается до полного перебора всех возможных состояний БРЭС (основной цикл), при этом для каждого состояния электронного средства выполняется перебор всех контрольных точек (внутренний цикл).

Каждый основной цикл завершается построением геометрической модели состояния БРЭС и импортом ее в программу моделирования механических характеристик. Здесь для каждой контрольной точки формируется АЧХ, которая сохраняется в базе данных. Затем АЧХ обрабатывается с целью выявления характерных резонансных частот и подсчета их количества.

Критерием оптимальности точки размещения чувствительного элемента является максимальное количество резонансных частот, зафиксированных в контрольной точке. Для этого, после выполнения основного и внутреннего циклов алгоритма, формируется массив данных, где для конкретного состояния БРЭС указывается количество резонансных частот, выявленных в каждой контрольной точке.

Дальнейшие циклические операции выборки и суммирования позволяют определить общее количество резонансных частот для каждой контрольной точки. На основе сравнения полученных значений определяется экстремум (максимальная сумма), который характеризует наиболее информативную контрольную точку, поскольку в ней определяется

наибольшее количество резонансных частот, выявленных для каждого состояния БРЭС. Данная точка становится посадочным местом для установки вибродатчика при проведении физических испытаний БРЭС в рамках проводимого диагностирования его технического состояния.

## РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСА ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ

Следующим этапом проводимого исследования стала разработка алгоритма функционирования комплекса программных средств (КПС) с целью автоматизации предложенного метода диагностирования электронных средств [14].

Структура комплекса программных средств представлена на рис. 4.

Исходя из особенностей моделирования механических процессов [15], протекающих в конструкциях электронных средств, и методик автоматизированного контроля их технического состояния, были сформулированы требования к функциональным возможностям КПС. Наиболее значимые из них:

- осуществление математического моделирования механических характеристик в автоматизированном режиме как для исправного состояния ЭС, так и для состояний с внесенными изменениями параметров конструкции;
- вычисление координат контрольных точек размещения чувствительных элементов;

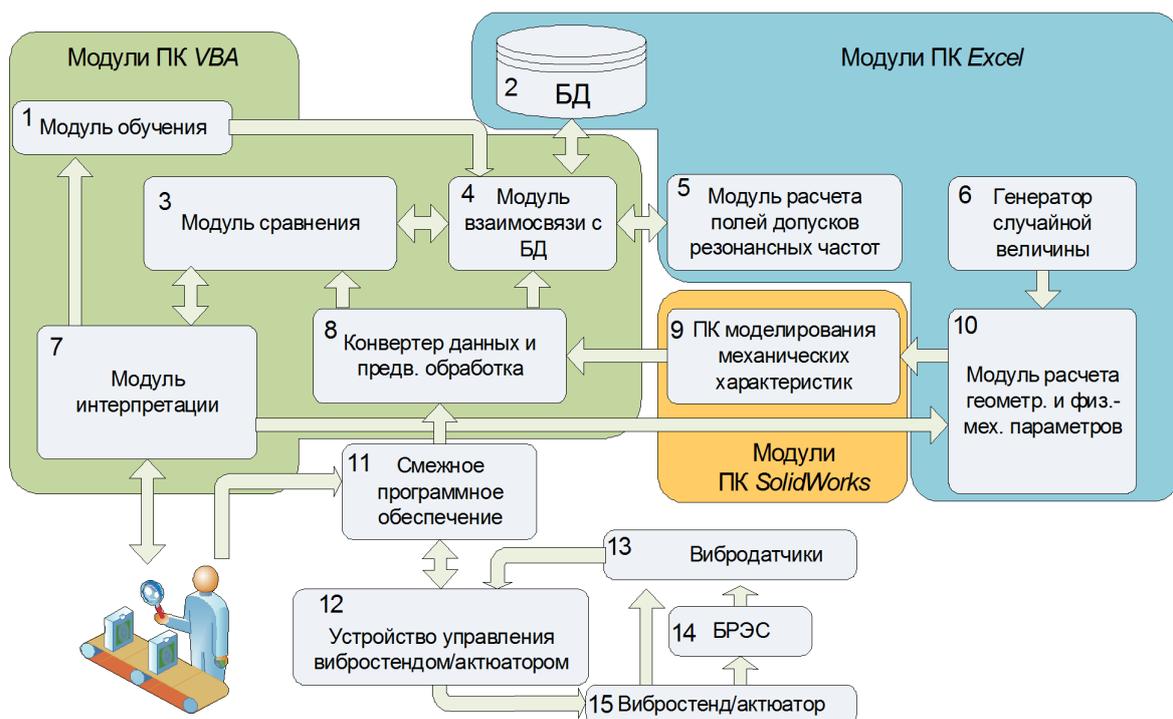


Рис. 4. Структура комплекса программных средств обработки информации на основе подсистемы *Integrity*



**Рис. 5.** Блок-схема алгоритма формирования интервалов резонансных частот с учетом внесенных дефектов

- формирование базы данных резонансных частот, полученных с учетом допусков на геометрические и физико-механические параметры устройства;
- расчет значений резонансных частот для неисправных БРЭС с учетом видов дефектов, встречающихся в конструкциях;
- сравнительный анализ результатов испытаний и «образцов», хранящихся в базе данных как для исправного состояния ЭС, так и для состояния с дефектом;
- принятие решения о техническом состоянии ЭС и, в случае необходимости, формирование рекомендаций;
- контроль ЭС на этапе эксплуатации с возможностью сохранения результатов испытаний в базе данных.

С точки зрения архитектурного решения, комплекс программных средств должен:

- иметь блочно-модульную структуру;
- быть законченным программным продуктом со сформированным функционалом;
- работать в автономном режиме;

- иметь возможность интеграции в состав специализированной САПР.

С точки зрения производительности и вычислительной мощности, временные затраты КПС, определяемые расчетными моделями, сеткой частот и объемом глобальных параметров, должны лежать в диапазоне от десятков секунд до десятков минут.

С точки зрения информационной безопасности, КПС должен обеспечить процедуру аутентификацию пользователя при подключении к БД.

В начале работы КПС осуществляется ввод исходных данных: количество расчетных экспериментов, геометрические и физико-механические параметры конструкции ЭС, допуски на параметры.

По окончании ввода данных запускается процесс моделирования, результатом которого является сформированная математическая модель ЭС, в которой учтены разбросы параметров конструкции и получены значения резонансных частот ЭС.

Далее результаты математического моделирования импортируются в модуль расчета интервалов резонансных частот, после чего происходит сравнение резонансных частот, полученных в процессе испытаний ЭС, со значениями частот для исправного состояния. В случае выхода какой-либо резонансной частоты из допустимого интервала начинается процесс диагностики.

На заключительном этапе работы КПС выполняется обработка полученных результатов, и на их основе принимается решение о техническом состоянии ЭС. На рис. 5 изображена блок-схема алгоритма формирования интервалов резонансных частот. Импорт характеристик в БД осуществляется из интерфейса подсистемы *Integrity*.

В блоке 1 осуществляется построение математической модели физических процессов ЭС.

В блоке 2 выполняется импорт модели в модуль расчетов.

В блоке 3 определяются контрольные точки модели.

В блоке 4 вводятся номинальные значения параметров модели.

В блоке 5 выполняется расчет параметров в программном комплексе математического моделирования физических процессов ЭС.

В блоке 6 осуществляется импорт рассчитанных значений характеристик и сохранение их в БД (блок 7).

В блоке 8 обновляются глобальные переменные модели в соответствии с набором параметров, полученных с помощью метода Монте-Карло, и выполняется расчет резонансных частот, который повторяется заданное количество раз.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА РАЗРАБОТАННОГО МЕТОДА

В рамках исследования проведена проверка эффективности разработанного метода диагностирования ЭС [16, 17]. В качестве объекта выбран печатный узел (ПУ) делителя напряжения блока контроля летательного аппарата, макет и модель которого приведены на рис. 6.

Электронный узел представляет собой печатную плату прямоугольной формы, выполненную из фольгированного стеклотекстолита марки FR4 толщиной 1.5 мм (толщина медного покрытия составляет 35 мкм), с размещенными на ней электрорадиоэлементами (ЭРЭ) (резисторы, конденсаторы, интерфейсные разъемы). На рис. 7 представлен график АЧХ исследуемого электронного средства.

Расчеты выполнены с применением ПО *Solid-Works Simulation*. Моделирование проводилось при

амплитуде тестового вибрационного воздействия, равной 25 м/с<sup>2</sup>.

Первичный анализ печатного узла в интервале частот [0; 2000] Гц позволил выявить шесть резонансных частот. После отсева резонансных частот, амплитуды которых не превышают значения 0.1 А входного воздействия, к рассмотрению остаются четыре резонансные частоты: 188.90 Гц, 298.78 Гц, 327.92 Гц, 418.74 Гц.

В соответствии с методом Монте-Карло проводится многократный анализ при различных значениях конструктивных параметров. В каждой реализации параметры элементов принимают случайные значения в пределах установленного допуска:

$$q_{\varepsilon i} = q_{\varepsilon i}^{\text{НОМ}} (1 + \xi_k \delta_{\varepsilon i}),$$

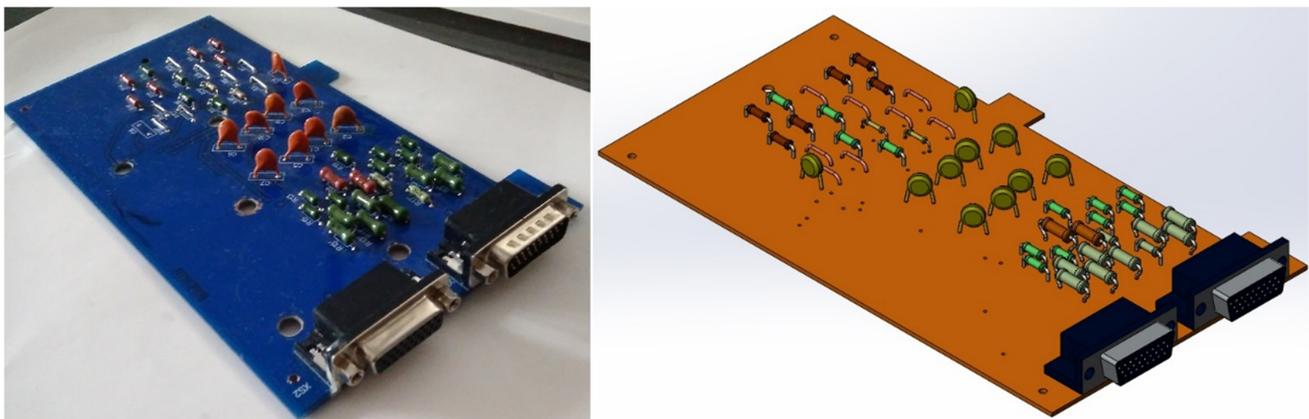


Рис. 6. Макет и модель печатного узла делителя напряжения

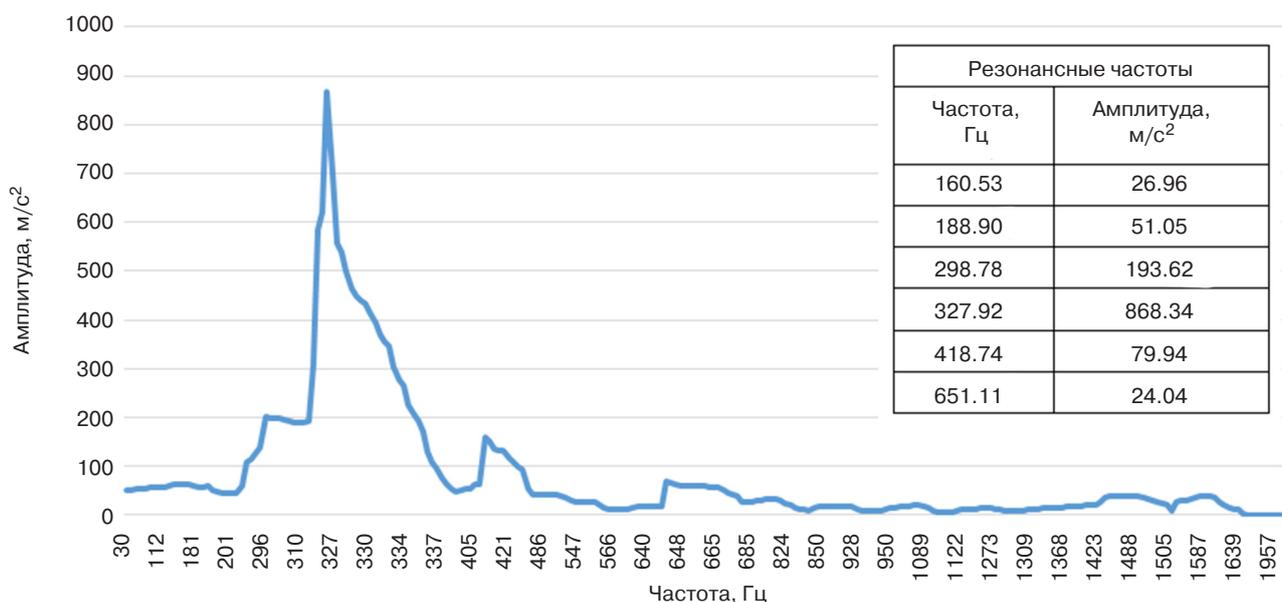


Рис. 7. АЧХ печатного узла, исследуемого ЭС (моделирование)

где  $q_{zi}$  – текущее значение  $i$ -го конструктивного параметра на  $k$ -й реализации;  $q_{zi}^{НОМ}$  – номинальное значение  $i$ -го конструктивного параметра;  $\xi_k$  – случайная величина ( $-1 < \xi_k < 1$ );  $\delta_{zi}$  – относительный допуск на  $i$ -й конструктивный параметр.

Таким образом, в результате расчетов определяется диапазон  $[f_i^{\min}, f_i^{\max}]$ , в котором может находиться значение  $i$ -й резонансной частоты.

Проведенное исследование позволило сформировать допустимые интервалы для каждого значения резонансной частоты. Эти данные приведены в табл. 1.

**Таблица 1.** Допустимые интервалы отклонения значений резонансных частот

№ резонанса	$f^{\min}$ , Гц	$f^{\max}$ , Гц
1	179.20	193.93
2	293.51	317.33
3	315.21	339.79
4	404.84	438.30

Амплитудно-частотная характеристика исследуемого печатного узла снята в ходе физических испытаний на вибростенде фирмы IMV с пьезоэлектрическим датчиком VP-15. Ее вид представлен на рис. 8, а значения резонансных частот – в табл. 2.

На графике (рис. 8) явно выражены 4 резонансные частоты, имеющие значения: 181 Гц, 302 Гц, 336 Гц, 406 Гц. Эти резонансы лежат в интервалах допустимых значений, что говорит о корректности построенной модели.

**Таблица 2.** Значения резонансных частот печатного узла, полученные в ходе физических испытаний

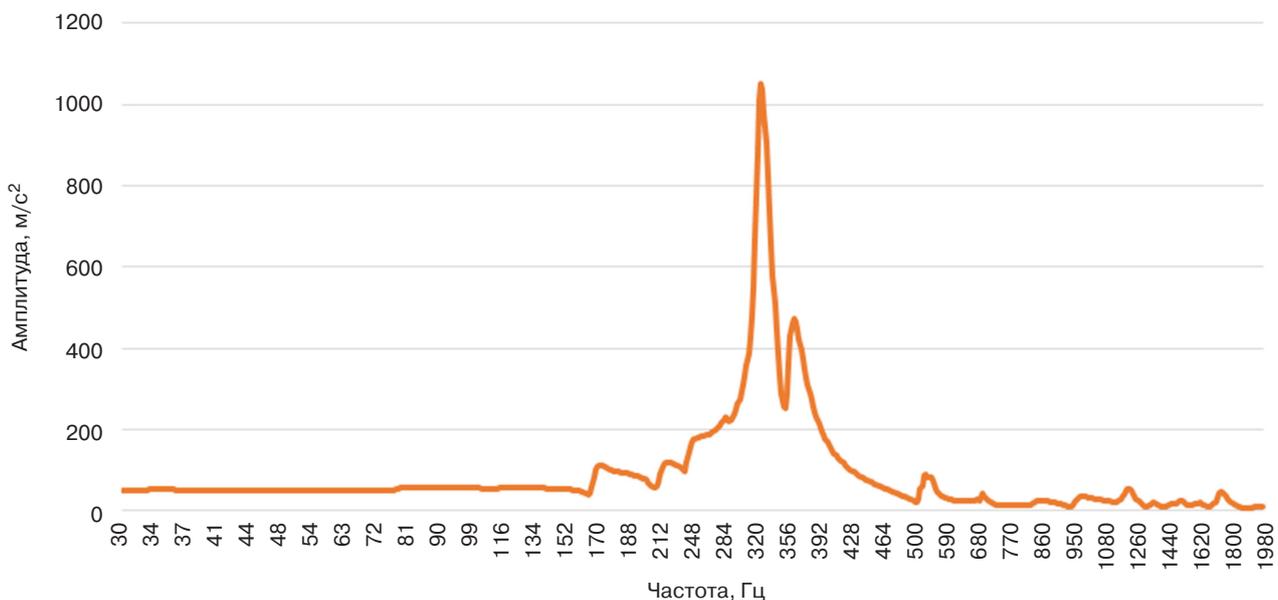
Резонансные частоты		Резонансные частоты	
Частота, Гц	Амплитуда, м/с <sup>2</sup>	Частота, Гц	Амплитуда, м/с <sup>2</sup>
181	53.06824	560	28.38914
224	60.14173	980	13.67248
254	83.23940	1320	17.98542
302	112.58300	1380	17.37603
336	433.62880	1510	14.11300
406	224.02070	1670	21.38155
478	44.64481	1730	25.87121

Для конструктивных неисправностей бортовой аппаратуры наиболее характерными являются отрыв креплений, деформация конструкции, отрыв ЭРИ, трещина печатной платы и др.

Результаты диагностического моделирования неисправности вида «отрыв крепления» приведены на рис. 9.

Анализ результатов моделирования демонстрирует смещение резонансных частот относительно имеющихся интервалов исправного состояния. Резонансные частоты  $f_1 = 125$  Гц,  $f_2 = 250$  Гц,  $f_4 = 362$  Гц выходят за граничные значения, соответствующие исправному состоянию, т.е.  $f_1 \notin [179.2; 193.9]$ ,

$f_2 \notin [293.5; 317.3]$ ,  $f_4 \notin [404.8; 438.3]$ , что говорит о наличии дефекта в исследуемом ЭС.



**Рис. 8.** АЧХ печатного узла, исследуемого ЭС (испытания)

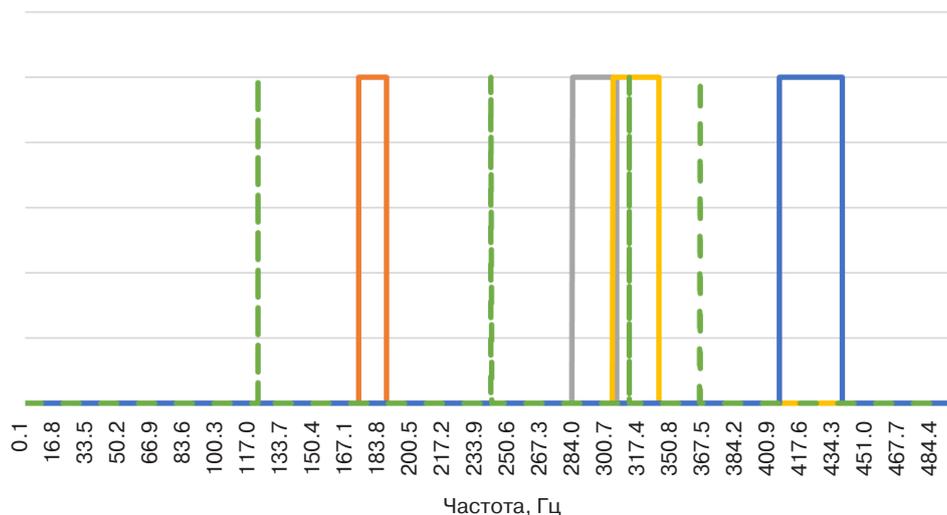


Рис. 9. Диагностическое моделирование ПУ исследуемого ЭС (отрыв крепления)

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования разработан метод вибродиагностики технического состояния БРЭС и алгоритм диагностирования механических дефектов. В рамках метода созданы математические модели для исправного (образцового) состояния электронного средства и состояний с различными дефектами конструкций. Предложен новый подход, основанный на анализе резонансных частот исследуемого электронного узла, вместо анализа АЧХ. Для этого разработан алгоритм формирования допустимых диапазонов резонансных частот. Выполнена проверка работоспособности предложенного метода на основе моделирования неисправного состояния БРЭС с дефектом в виде отрыва

крепления. С учетом погрешности измерений была получена экспериментальная АЧХ. Разработанный метод позволил определить вид дефекта в каждом из 10 экспериментов, проведенным на физической установке (с заданной погрешностью).

Таким образом, результаты исследования позволяют сделать вывод о возможности применения метода диагностирования конструктивных неисправностей электронного узла посредством вибрационных воздействий, о корректности разработанной диагностической модели и сопоставимости результатов физических испытаний численным экспериментам.

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

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

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Комаров А.С., Крапухин Д.В., Шульгин Е.И. *Управление техническим уровнем высокоинтегрированных электронных систем (научно-технологические проблемы и аспекты развития)*; под ред. П.П. Мальцева. М.: Техносфера; 2014. 240 с. ISBN 978-5-94836-397-4
2. Увайсов Р.И. Метод диагностирования дефектов бортовых радиотехнических устройств: дисс. канд. техн. наук. М.: МИЭМ; 2008. 157 с.
3. Donskoy D.M., Ramezani M. Separation of amplitude and frequency modulations in Vibro-Acoustic Modulation Nondestructive Testing Method. In: *Proceedings of Meetings on Acoustics*. 2018;34(1):045002. <https://doi.org/10.1121/2.0000831>
4. Lyshov S.M., Ivanov I.A., Uvaisov S.U., Chernoverskaya V.V. Vibration control of electronic means technical condition based on analysis of resonant frequencies. In: *2019 International Seminar on Electron Devices Design and Production (SED)*. Prague, Czech Republic; 2019. 4 p. <https://doi.org/10.1109/SED.2019.8798407>

### REFERENCES

1. Komarov A.S., Krapukhin D.V., Shul'gin E.I. *Upravlenie tekhnicheskim urovnem vysokointegrirovannykh elektronnykh sistem (nauchno-tehnologicheskie problemy i aspekty razvitiya) (Management of the technical level of highly integrated electronic systems (scientific and technological problems and aspects of development))*, P.P. Maltsev (Ed.). Moscow: Tekhnosfera; 2014. 240 p. (in Russ.). ISBN 978-5-94836-397-4
2. Uvaisov R.I. Metod diagnostirovaniya defektov bortovykh radiotekhnicheskikh ustroystv: Cand. Sci. Thesis. Moscow: MIEM; 2008. 157 p. (in Russ.).
3. Donskoy D.M., Ramezani M. Separation of amplitude and frequency modulations in Vibro-Acoustic Modulation Nondestructive Testing Method. In: *Proceedings of Meetings on Acoustics*. 2018;34(1):045002. <https://doi.org/10.1121/2.0000831>
4. Lyshov S.M., Ivanov I.A., Uvaisov S.U., Chernoverskaya V.V. Vibration control of electronic means technical condition based on analysis of resonant frequencies. In:

5. Тихонов А.Н., Увайсов С.У., Иванов И.А., Лышов С.М. Концепция и метод диагностирования печатных узлов с использованием встроенных эмуляторов вибрационных колебаний. *ПРИКАСПИЙСКИЙ ЖУРНАЛ: управление и высокие технологии*. 2016;4(36):144–154.
6. Лышов С.М., Иванов И.А., Увайсова А.С., Увайсова С.С. Расчет разбросов резонансных частот печатных узлов электронных средств. *Вестник кибернетики*. 2018;4(32):129–135.
7. 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. <https://doi.org/10.1121/1.5129076>
8. Zhao X., Gao H., Zhang G., Ayhan B., Yan F., Kwan C., Rose J.L. Active health monitoring of an aircraft wing with embedded piezoelectric sensor/actuator network: I. Defect detection, localization and growth monitoring. *Smart Mater. Struct.* 2007;16(4):1208. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/16/4/032>
9. Храмов А.М. Напряженно-деформированное состояние взаимодействующих элементов пьезоактюатора: дисс. канд. физ.-мат. наук. Томск: МИЭМ; 2017. 135 с.
10. Tua P., Quek S., Wang Q. Detection of cracks in plates using piezo-actuated Lamb waves. *Smart Mater. Struct.* 2004;13(4):643. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/13/4/002>
11. Воловиков В.В. Разработка методов повышения надежности радиоэлектронной аппаратуры, основанных на непрерывном комплексном моделировании физических процессов. *Надежность*. 2008;1(24):3–9.
12. Иванов И.И., Наумова Е.Н. Анализ результатов моделирования вибрационных процессов в различных САПР. *Инновационные, информационные и коммуникационные технологии*. 2018;1:476–482.
13. Кофанов Ю.Н., Шалумов А.С., Журавский В.Г., Гольдин В.В. *Математическое моделирование радиоэлектронных средств при механических воздействиях*. М.: Радио и связь; 2000. 226 с. ISBN 5-256-01539-7
14. Malpass L. *SolidWorks 2009 API – Advanced Product Development*. 2009. 246 p.
15. Иванов И.А., Сулейманов С.П., Увайсов Р.И. Программный комплекс диагностирования нарушений целостности конструкций. *Инновации в условиях развития информационно-коммуникационных технологий*. 2007;1:227–229.
16. Лышов С.М., Увайсов С.У., Черноверская В.В., Фам Лэ Куок Хань. Инженерная методика вибродиагностики конструкций бортовых радиоэлектронных средств. *Научно-технические технологии*. 2020;21(2-3):17–28. <https://doi.org/10.18127/j19998465-202002-3-03>
- 2019 *International Seminar on Electron Devices Design and Production (SED)*. Prague, Czech Republic; 2019. 4 p. <https://doi.org/10.1109/SED.2019.8798407>
5. Tikhonov A.N., Uvaisov S.U., Ivanov I.A., Lyshov S.M. Conception and method of diagnosis of printed board assembly with using of on-board emulators oscillation. *PRIKASPIISKII ZhURNAL: upravlenie i vysokie tekhnologii = CASPIAN JOURNAL: Management and High Technologies*. 2016;4(36):144–154 (in Russ.).
6. Lysov S.M., Ivanov I.A., Uvaisova A.S., Uvaisova S.S. Calculation of resonant frequencies spread of printed circuit assembly of electronic devices. *Vestnik kibernetiki = Proceedings of Cybernetics*. 2018;4(32):129–135 (in Russ.).
7. 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. <https://doi.org/10.1121/1.5129076>
8. Zhao X., Gao H., Zhang G., Ayhan B., Yan F., Kwan C., Rose J.L. Active health monitoring of an aircraft wing with embedded piezoelectric sensor/actuator network: I. Defect detection, localization and growth monitoring. *Smart Mater. Struct.* 2007;16(4):1208. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/16/4/032>
9. Khramtsov A.M. Stress-strain state of interacting elements of a piezo actuator: Cand. Sci. Thesis. Tomsk: MIEM; 2017. 135 p. (in Russ.).
10. Tua P., Quek S., Wang Q. Detection of cracks in plates using piezo-actuated Lamb waves. *Smart Mater. Struct.* 2004;13(4):643. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/13/4/002>
11. Volovikov V.V. Development of methods for improving the reliability of radio electronic equipment based on continuous complex modeling of physical processes. *Nadezhnost' = Dependability*. 2008;1(24):3–9 (in Russ.).
12. Ivanov I.I., Naumova E.N. Analysis of simulation results of vibration processes in various CAD systems. *Innovatsionnye, informatsionnye i kommunikatsionnye tekhnologii*. 2018;1:476–482 (in Russ.).
13. Kofanov Yu.N., Shalumov A.S., Zhuravskii V.G., Gol'din V.V. *Matematicheskoe modelirovanie radioelektronnykh sredstv pri mekhanicheskikh vozdeistviyakh (Mathematical modeling of radio electronic devices under mechanical influences)*. Moscow: Radio i svyaz'; 2000. 226 p. (in Russ.). ISBN 5-256-01539-7
14. Malpass L. *SolidWorks 2009 API – Advanced Product Development*. 2009. 246 p.
15. Ivanov I.A., Suleimanov S.P., Uvaisov R.I. A software complex for diagnosing structural integrity violations. *Innovatsii v usloviyakh razvitiya informatsionno-kommunikatsionnykh tekhnologii*. 2007;1:227–229 (in Russ.).
16. Lyshov S.M., Uvaisov S.U., Chernoverskaya V.V., LeQuocKhanhPham. Engineering technique for vibration diagnostics of structures on-board radio electronic means. *Naukoemkie Tekhnologii = Science Intensive Technologies*. 2020;21(2-3):17–28 (in Russ.). <https://doi.org/10.18127/j19998465-202002-3-03>

### Об авторах

**Лышов Сергей Максимович**, ассистент кафедры конструирования и производства радиоэлектронных средств Института радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: lyshov@mirea.ru.

**Увайсов Сайгид Увайсович**, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой конструирования и производства радиоэлектронных средств Института радиотехнических и телекоммуникационных систем 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, <https://orcid.org/0000-0003-1943-6819>

**Черновверская Виктория Владимировна**, к.т.н., доцент кафедры конструирования и производства радиоэлектронных средств Института радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: chernoverskaya@mirea.ru.

**Фам Лэ Куок Хань**, аспирант кафедры конструирования и производства радиоэлектронных средств Института радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: kxanhmtak45@gmail.com.

### About the authors

**Sergey M. Lyshov**, Assistant, Department of Design and Production of Radio Electronic Equipment, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: lyshov@mirea.ru.

**Saygid S. Uvaysov**, Dr. Sci. (Eng.), Head of Department of Design and Production of Radio Electronic Equipment, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: uvajsov@mirea.ru. ResearcherID H-6746-2015, Scopus Author ID 55931417100, <https://orcid.org/0000-0003-1943-6819>

**Viktoriya V. Chernoverskaya**, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Design and Production of Radio Electronic Equipment, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: chernoverskaya@mirea.ru.

**Pham Le Quoc Han**, Postgraduate Student, Department of Design and Production of Radio Electronic Equipment, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: kxanhmtak45@gmail.com.