

Роботизированные комплексы и системы. Технологии дистанционного зондирования
неразрушающего контроля

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

УДК 621.396.69
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-1-15-29>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Обнаружение дефектов в многослойной печатной плате методом акустической эмиссии

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

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

Резюме

Цели. При производстве многослойных печатных плат (МПП) в процессе ламинирования в них могут возникать дефекты в виде расслоений. Они не обнаруживаются оптическими и электрическими методами выходного контроля, но в процессе эксплуатации радиоэлектронного средства могут вызвать нарушения механического режима работы и привести к отказам. Для обнаружения таких дефектов предлагается использовать метод акустической эмиссии (АЭ), основанный на возникновении и распространении акустических волн в МПП, вызванных наличием дефектов. Целью данного исследования является изучение возможности использования метода АЭ для обнаружения дефектов МПП, возникающих, в частности, в процессе ламинирования.

Методы. Для исследования распространения акустических сигналов в МПП при наличии дефектов использовались программа моделирования механических процессов (для исследования на модели МПП) и различные образцы двухслойных печатных плат с заранее внесенными дефектами (для экспериментальных исследований). В качестве источника акустических сигналов использовался соленоид, установленный на МПП, а для приема сигналов – пьезоэлектрический датчик. Обработка данных проводилась путем сравнения сигналов АЭ, полученных для исправного образца МПП и для образцов МПП с дефектами.

Результаты. Проведено моделирование распространения акустического сигнала в МПП в исправном и неисправном (с прямоугольным дефектом в виде расслоения) состояниях, которое показало различие полученных сигналов в точке установки датчика. Также были проведены экспериментальные исследования с целью изучения применимости метода АЭ для выявления дефектов различного размера и количества.

Выводы. Исследования показали, что метод АЭ позволяет достаточно эффективно и достоверно обнаруживать наличие дефектов в МПП, возникающих в процессе ламинирования. В данном исследовании предлагается новый подход к неразрушающему контролю МПП с использованием метода АЭ, который может значительно повысить надежность МПП и эффективность процессов их производства.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, многослойная печатная плата, обнаружение дефектов, расслоение, неразрушающий контроль

• Поступила: 05.05.2023 • Доработана: 03.07.2023 • Принята к опубликованию: 12.12.2023

Для цитирования: Увайсов С.У., Лыу Н.Т., Нгуен К.Д., Во Т.Х., Долматов А.В. Обнаружение дефектов в многослойной печатной плате методом акустической эмиссии. *Russ. Technol. J.* 2024;12(1):15–29. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-1-15-29>

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Detection of defects in printed circuit boards by the acoustic emission method

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

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

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

Abstract

Objectives. Defects in the form of layering may occur during lamination in the production of multilayer printed circuit boards (MPCB). These defects cannot be detected by optical and electrical methods of output control. However, they can lead to breaches of the mechanical mode of operation and failures while running radioelectronic devices. In order to detect such defects, the acoustic emission (AE) method is proposed. This is based on the occurrence and propagation of acoustic waves in MPCBs caused by the presence of defects. The aim of this study is to investigate the possibility of using the AE method to detect defects in multilayer printed circuit boards. These defects can occur, in particular, in the lamination process.

Methods. A mechanical processes modeling program (for research on the MPCB model) and various samples of two-layer printed circuit boards with pre-introduced defects (for experimental studies) were used to study the propagation of acoustic signals in the MPCB in the presence of defects. A solenoid mounted on the MPCB was used as a source of acoustic signals, while a piezoelectric sensor was used to receive signals. Data processing was carried out by comparing AE signals obtained for a serviceable MPCB sample and for MPCB samples with defects.

Results. Simulation of the acoustic signal propagation in MPCBs in serviceable and faulty (with a rectangular defect in the form of delamination) states was carried out to show the difference in the received signals at the sensor installation point. Experimental studies were also conducted to examine the AE method applicability for detecting defects of various sizes and quantities.

Conclusions. The studies demonstrated that the AE method allows the presence of defects in MPCB occurring during the lamination process to be detected effectively and reliably. This study proposes a new approach to non-destructive testing of MPCB using the AE method. This method significantly increases the reliability of MPCBs and the efficiency of their production processes.

Keywords: acoustic emission, multilayer printed circuit board, defect detection, delamination, non-destructive testing

• Submitted: 05.05.2023 • Revised: 03.07.2023 • Accepted: 12.12.2023

For citation: Uvaysov S.U., Luu N.T., Nguyen C.D., Vo Th.H., Dolmatov A.V. Detection of defects in printed circuit boards by the acoustic emission method. *Russ. Technol. J.* 2024;12(1):15–29. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-1-15-29>

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

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Многослойные печатные платы (МПП) являются важным компонентом многих электронных устройств, и контроль их качества имеет решающее значение для обеспечения надежности и функциональности этих устройств. Одним из наиболее важных этапов производства МПП является процесс ламинирования, который включает соединение нескольких слоев диэлектрического материала, плакированного медью, для формирования многослойной платы¹. Процесс ламинирования подвержен таким дефектам, как расслоение, трещины и пустоты, которые могут ухудшить электрические и механические свойства печатной платы.

Для обнаружения дефектов МПП разработаны различные методы неразрушающего контроля, такие как рентгеновский контроль, оптическая микроскопия и ультразвуковой контроль. Однако эти методы имеют ограничения с точки зрения стоимости, времени и точности. Метод акустической эмиссии (АЭ) – это метод неразрушающего контроля, который в последние годы привлекает все большее внимание благодаря своей высокой чувствительности, возможности мониторинга в режиме реального времени и возможности бесконтактного обнаружения дефектов².

АЭ представляет собой явление, связанное с генерацией упругих волн в результате внезапного и локализованного выброса энергии внутри материала [1]. Волны АЭ могут быть захвачены и проанализированы для получения информации о местоположении, величине и типе дефекта в материале МПП. Использование метода АЭ для обнаружения дефектов в МПП исследовалось учеными и специалистами [2–4].

¹ Покровская М.В., Попова Т.А. *Материалы и элементы конструкций РЭС: учебное пособие. Часть 1: Материаловедение и конструкционные материалы.* М.: РТУ МИРЭА; 2021. 200 с. [Pokrovskaya M.V., Popova T.A. *Materials and structural elements of the REM. Textbook. Part 1: Material science and structural materials.* Moscow: RTU MIREA; 2021. 200 p. (in Russ.).]

² Носов В.В., Ямилова А.Р. *Метод акустической эмиссии: учебное пособие.* СПб.: Лань; 2022. 304 с. [Nosov V.V., Yamilova A.R. *Acoustic emission method. Textbook.* St. Petersburg: Lan; 2022. 304 p. (in Russ.).]

В данном исследовании рассматривается возможность применения метода АЭ для обнаружения дефектов, возникающих в процессе ламинирования МПП. В качестве источника для генерации сигналов АЭ используется соленоид, а в качестве датчика для захвата сигналов – пьезоэлектрическая пластина. С целью оценки эффективности метода АЭ для обнаружения дефектов осуществляется сравнение сигналов, полученных для МПП с дефектами и исправной МПП.

Целью данного исследования является разработка метода неразрушающего контроля для обнаружения дефектов в МПП, возникающих в процессе ламинирования, который может значительно повысить надежность и эффективность производства МПП. В работе исследовался вопрос, может ли метод АЭ эффективно обнаруживать дефекты в МПП, которые могут образовываться в процессе ламинирования, и если да, то каковы преимущества и ограничения этого метода по сравнению с другими существующими методами.

ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

В нескольких исследованиях изучалось использование метода АЭ для обнаружения дефектов в печатных платах. Жао и др. (2015 г.) использовали метод АЭ для обнаружения дефектов в печатных платах в процессе сверления отверстий [5]. Было обнаружено, что сигналы АЭ можно использовать для различения различных типов дефектов: неполное отверстие, заусенец и прорыв. Лиу и др. (2018 г.) разработали метод обнаружения расслоения в МПП с использованием метода АЭ [6]. Для этого был использован обрыв грифеля карандаша в качестве источника АЭ и пьезоэлектрический преобразователь в качестве датчика для обнаружения сигналов АЭ. В результате было установлено, что сигналы АЭ можно использовать для обнаружения наличия и местоположения расслоения в МПП.

В другом исследовании Чен и др. (2020 г.) изучали использование метода АЭ для обнаружения дефектов в гибких печатных платах [7]. Для этого был применен пьезоэлектрический датчик для обнаружения сигналов АЭ, генерируемых проколом иглой гибкой печатной платы. Было обнаружено,

что сигналы АЭ можно использовать для определения местоположения и серьезности дефекта и что этот метод чувствителен к дефектам размером всего 0.5 мм.

Хотя предыдущие исследования показали потенциал метода АЭ для обнаружения дефектов в печатных платах, все еще существуют проблемы с его внедрением в практику диагностирования. Одной из проблем является необходимость использования сложных алгоритмов обработки и анализа различных типов сигналов и шума [8, 9]. Еще одной проблемой является выбор и оптимизация размещения источника и датчика АЭ, что может повлиять на чувствительность и точность метода [10].

Несмотря на эти проблемы, преимущества метода АЭ для обнаружения дефектов в МПП значительны. Метод АЭ представляет собой неразрушающий и бесконтактный метод, который может выполняться в режиме реального времени без необходимости использования дорогостоящего оборудования³ [11, 12]. Сигналы АЭ могут предоставить информацию о местоположении и типе дефекта, что может помочь определить основную причину неисправного состояния и улучшить контроль качества производства МПП [13–15].

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ АКУСТИЧЕСКОГО СИГНАЛА В МПП

Исходные данные для моделирования

При проверке эффективности аналитического моделирования использовалось программное обеспечение *ABAQUS*⁴ для проведения численного анализа точности отклика пьезоэлектрического датчика в модели МПП. Пластина, моделирующая МПП, выполнена из фольгированного стеклотекстолита FR 4 (WAVGAT authorization Store, Китай) размером $0.2 \times 0.15 \times 0.0015$ м. Характеристики материала FR 4 представлены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры материала исследуемой МПП

Материал	Плотность, кг/м ³	Модуль упругости, ГПа	Коэффициент Пуассона
FR 4	1850	24	0.136

³ Сыч Т.В. Совершенствование технологии акустико-эмиссионного контроля на основе конечно-элементного анализа акустического тракта: дис. ... канд. техн. наук. М.: СГУПС; 2016. 149 с. [Syh T.V. *The perfection of the acoustic-emission control technology based on the finite-element analysis of the acoustic path*. Diss. Cand. Sci. (Eng.). Moscow: SGUPS; 2016. 149 p. (in Russ.).]

⁴ <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/abaqus/>. Дата обращения 30.08.2023. / Accessed August 30, 2023.

Для моделирования влияния дефекта на распространение сигналов АЭ необходимо переходное возбуждение. Для возбуждения АЭ-сигнала в настоящем исследовании применяется функция зависимости силы возбуждения от времени $F(t)$ (рис. 1) [15], математическое представление которой выглядит следующим образом:

$$F(t) = \begin{cases} F_{\max} (t/t_e), & t \leq t_e, \\ F_{\max} (2 - t_e/t), & t_e \leq t \leq 2t_e, \\ 0, & t \geq 2t_e, \end{cases}$$

где t_e – время достижения максимального значения силы возбуждения $F_{\max}$.

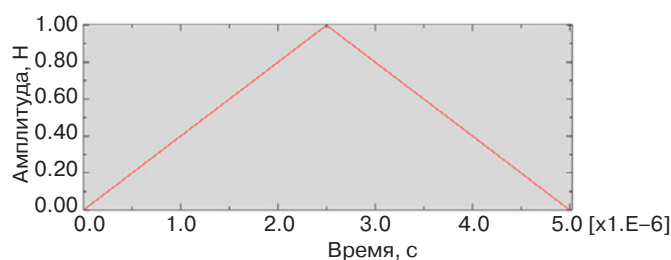


Рис. 1. Функция $F(t)$

Схематическое расположение датчика и источника АЭ, а также модель в программе *ABAQUS* показаны на рис. 2.

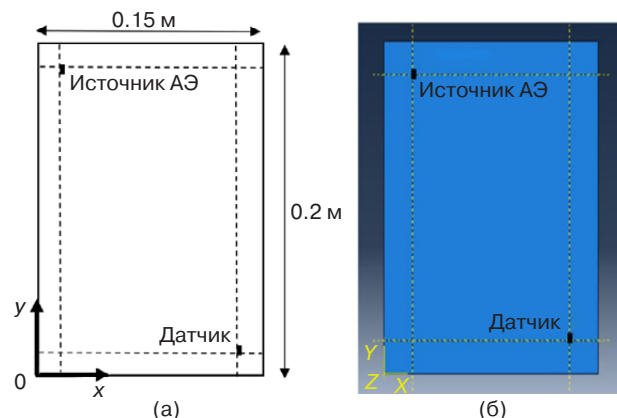
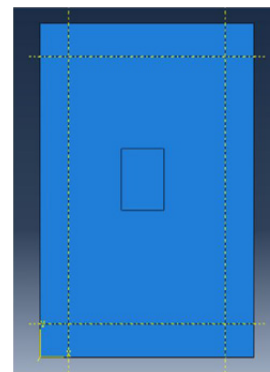


Рис. 2. Схематическое расположение датчика и источника АЭ (а) и модель в программе *ABAQUS* (б)

Для имитации наличия дефекта в виде расслоения в образце МПП в программе *ABAQUS* была создана прямоугольная область размерами 3×3.7 см. Модель МПП с прямоугольным дефектом представлена на рис. 3.

Рис. 3. Модель МПП с прямоугольным дефектом размерами 3×3.7 см



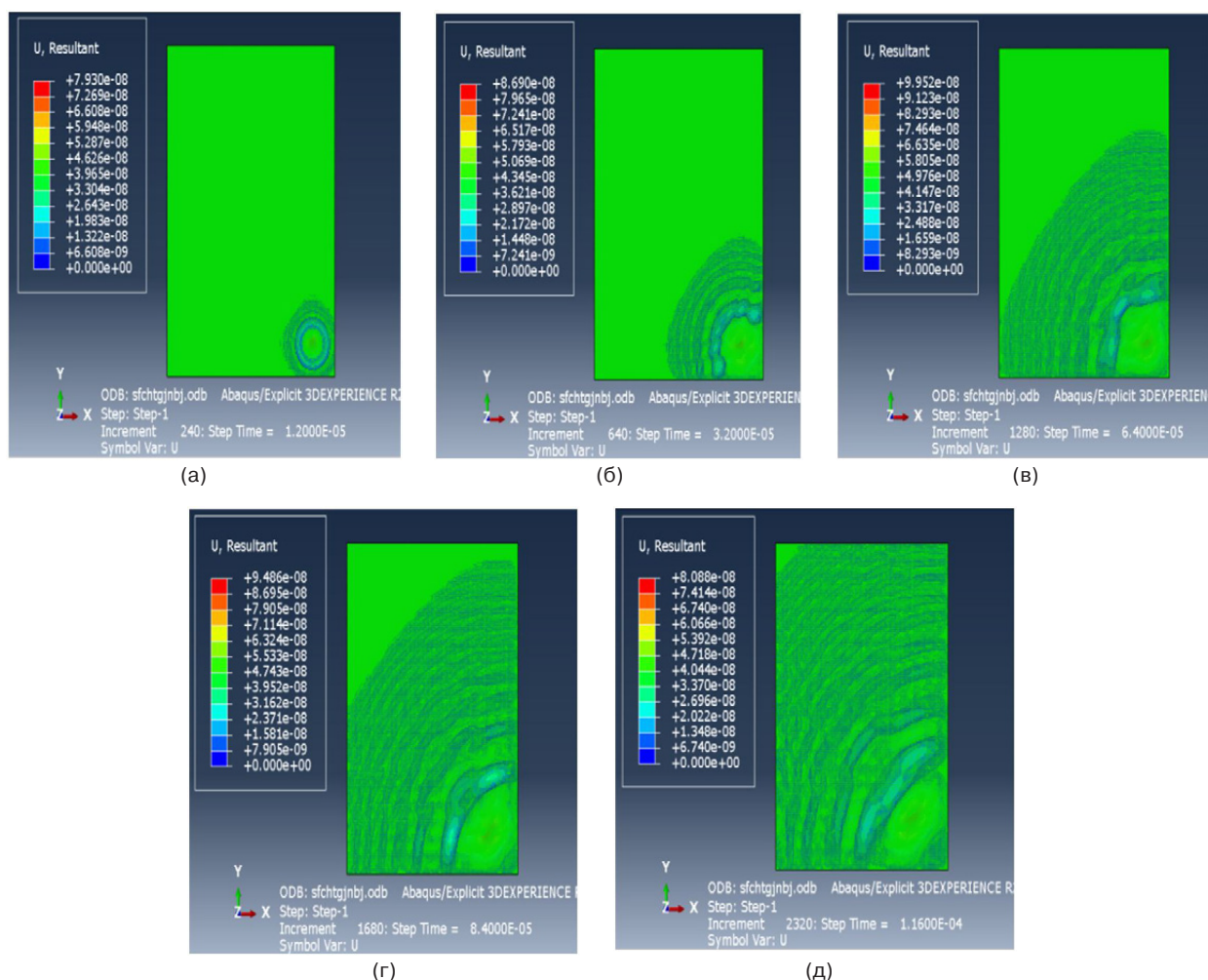


Рис. 4. Процесс распространения акустической волны в МПП при отсутствии дефекта в моменты времени: (а) 0.12 мкс, (б) 0.32 мкс, (в) 0.64 мкс, (г) 0.84 мкс, (д) 1.16 мкс

В данном моделировании было проведено исследование распространения волны и реакции пьезодатчика на сигналы АЭ, генерируемые виртуальным соленоидом, при наличии дефекта. Полученные сигналы используются для дальнейшего анализа и сравнения с сигналами, полученными от образца МПП без дефекта. Результаты эксперимента позволили оценить возможность использования данного подхода для обнаружения дефекта в МПП.

Результат моделирования

Процесс распространения акустической волны в определенные моменты времени (0.12, 0.32, 0.64, 0.84 и 1.16 мкс) в случае отсутствия дефекта в МПП представлен на рис. 4.

Сигнал датчика, получаемый при моделировании в случае отсутствия дефекта в МПП, показан на рис. 5.

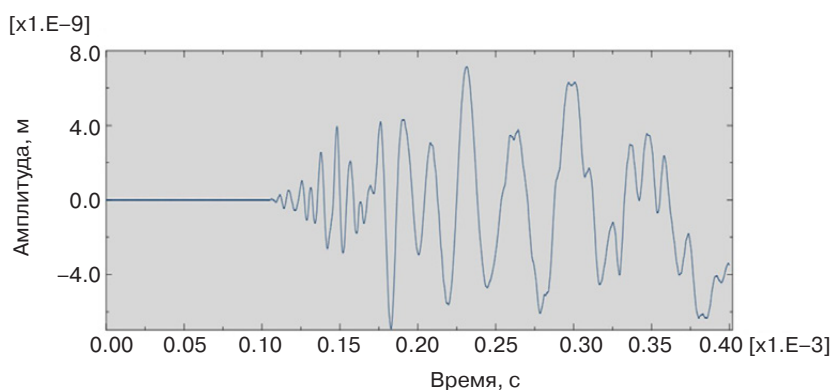


Рис. 5. Сигнал датчика в случае отсутствия дефекта в МПП

Аналогично, при наличии дефекта в МПП (дефект в виде прямоугольника 3×3.7 см), процесс распространения акустической волны по МПП в те же

моменты времени (0.12, 0.32, 0.64, 0.84 и 1.16 мкс) и сигнал датчика приведены на рис. 6 и 7 соответственно.

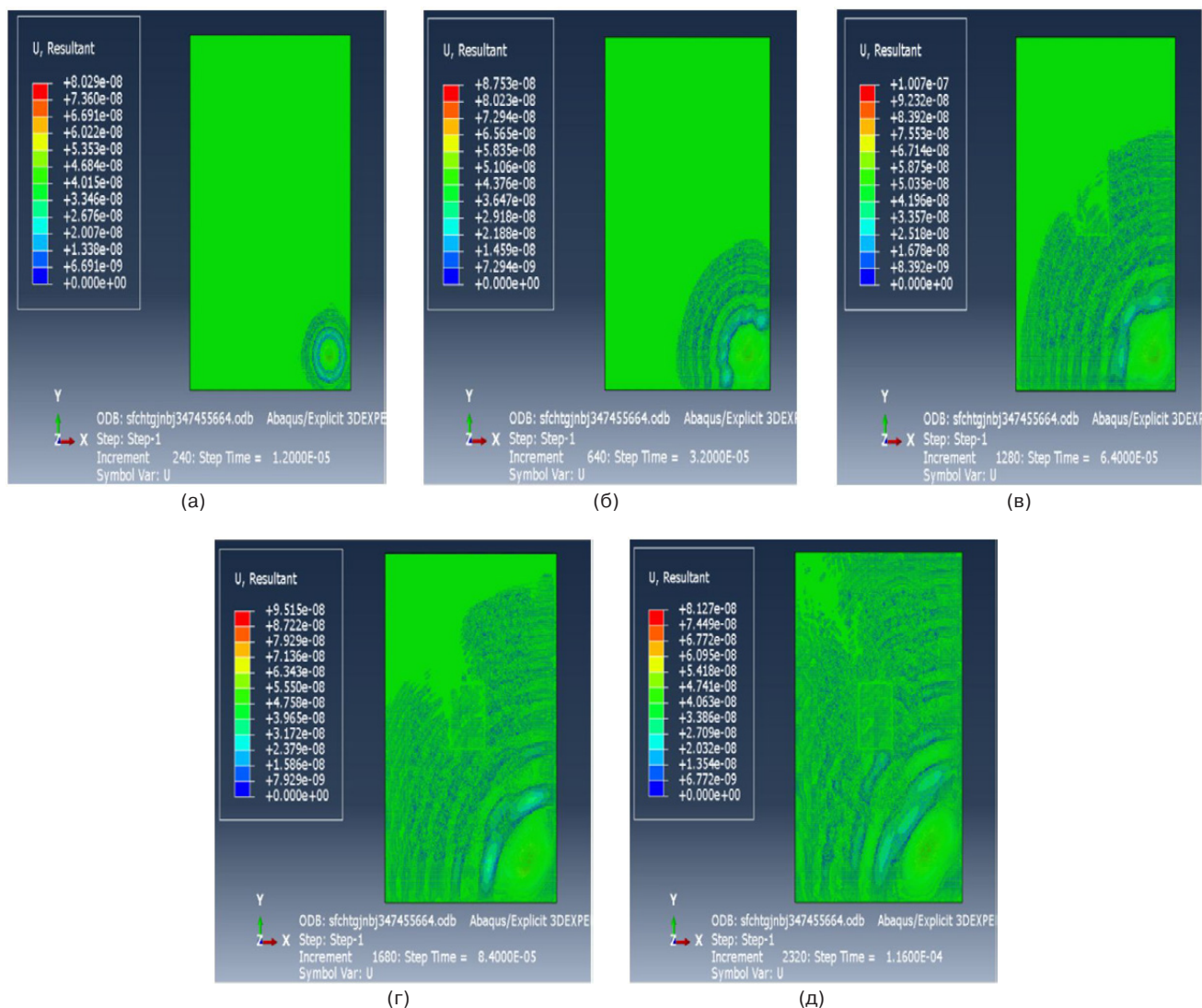


Рис. 6. Процесс распространения акустической волны в МПП при наличии дефекта 3×3.7 см в моменты времени: (а) 0.12 мкс, (б) 0.32 мкс, (в) 0.64 мкс, (г) 0.84 мкс, (д) 1.16 мкс

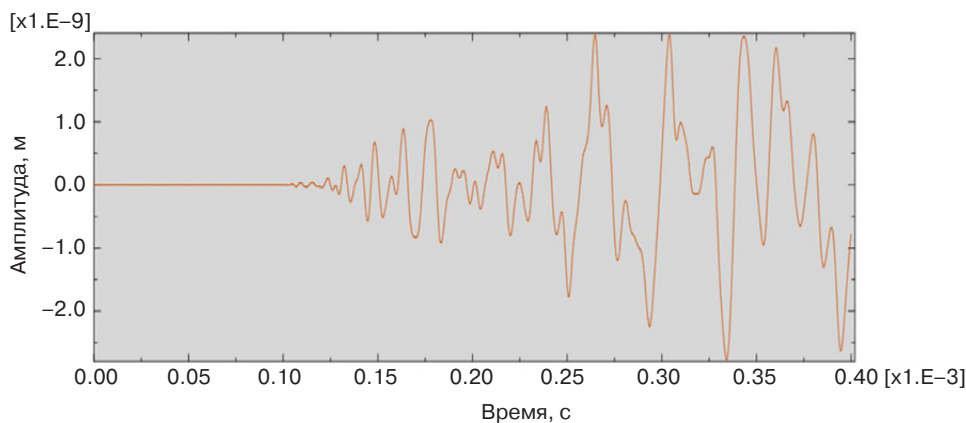


Рис. 7. Сигнал датчика при наличии дефекта в МПП

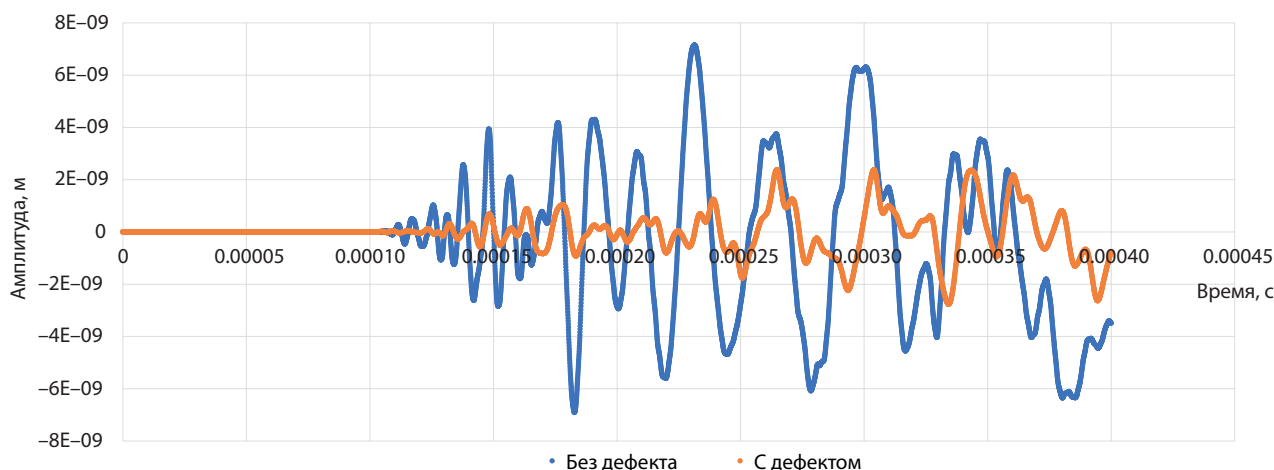


Рис. 8. Сравнение АЭ-сигналов от датчика при наличии и отсутствии дефекта в МПП

Далее было проведено сравнение сигналов от датчика для двух случаев – при отсутствии и при наличии дефекта (рис. 8).

По результатам сравнения сигналов показано, что наличие дефекта вносит искажение в процесс распространения волны, что приводит к существенным различиям (в несколько раз) амплитуды сигнала и времени прихода сигналов по сравнению со случаем без дефекта.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НА ДВУСЛОЙНОЙ ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЕ

Описание экспериментальной установки

Для проведения экспериментальных исследований была изготовлена установка (рис. 9), которая включала в себя: 1 – чип UNO R3 ATMEGA16U2 + MEGA328P для Arduino uno R3 с макетной платой и кабелем USB (IGMOPNRQ module Store, Китай); 2 – пьезоэлектрическую пластину диаметром 27 мм (KY WIN ROBOT Store, Китай); 3 – ключ питания V3 (Амперка, Россия); 4 – источник переменного тока 12 В (Teslocom, Россия); 5 – соленоид TAU-0520, настроенный на частоту 10 Гц (Амперка, Россия); 6 – двухслойную печатную плату (WAVGAT authorization Store, Китай); 7 – компьютер с программным обеспечением *Audacity*⁵, используемым для захвата и анализа акустических сигналов.

Технические характеристики датчика акустических сигналов приведены в табл. 2. Чертеж и вид датчика представлены на рис. 10.

В экспериментальном исследовании пьезоэлектрическая пластина помещается на поверхность МПП и используется для захвата звуковых волн, которые распространяются после удара соленоида

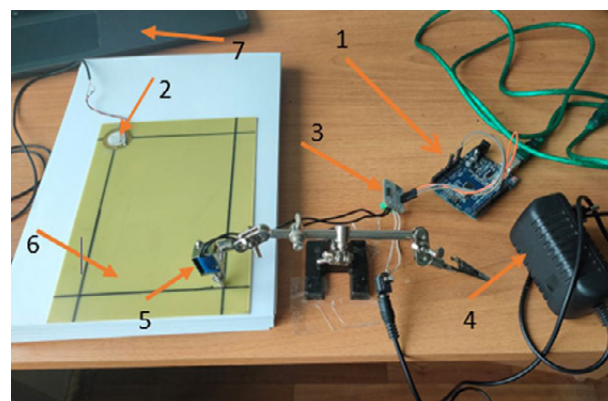


Рис. 9. Вид экспериментальной установки

Таблица 2. Параметры датчика

№ п/п	Наименование параметра	Значение параметра
1	Резонансная частота	3.5 ± 0.5 KHz
2	Резонансное сопротивление	<300 Ом
3	Статическая емкость	28000 pF $\pm 30\%$
4	Температура хранения	от -30 °C до $+70$ °C
5	Материал пластины	медь
6	Внешний диаметр D	27 ± 0.1 мм
7	Внутренний диаметр d	20 ± 0.2 мм
8	Толщина t	0.15 ± 0.05 мм
9	Толщина T	0.35 ± 0.05 мм

⁵ <https://www.audacityteam.org/>. Дата обращения 30.08.2023. / Accessed August 30, 2023.

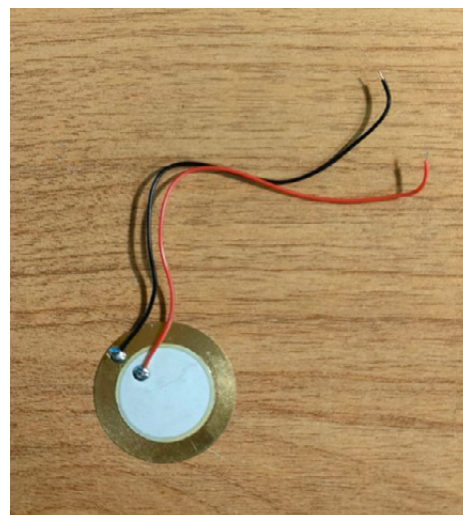
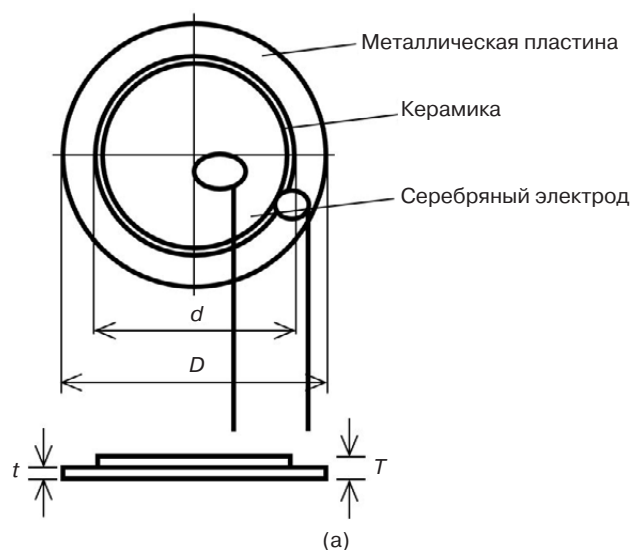


Рис. 10. Чертеж (а) и вид (б) пьезоэлектрического датчика акустических сигналов

Результаты эксперимента при отсутствии дефекта в печатной плате

Для получения и обработки сигналов применена программа *Audacity*. В этой программе используется нормализованное представление акустических сигналов в виде чисел с плавающей запятой от -1 до $+1$, где « -1 » представляет минимально возможный, а « $+1$ » – максимально возможный уровень звука. Использование представления такого типа позволяет *Audacity* точно отображать весь диапазон уровней звука, избегая при этом потенциальной потери точности, которая может возникнуть при представлении на основе целых чисел. Кроме того, это

упрощает выполнение математических операций над аудиосигналами, таких как микширование и обработка, поскольку все сигналы представлены в едином масштабе.

Сначала экспериментальные исследования были проведены на двуслойной печатной плате без дефектов. Соленоидом были сгенерированы три механических удара по печатной плате (с промежутком между ударами 3 с), а пьезоэлектрическим датчиком зафиксированы акустические сигналы (рис. 11). Сравнение полученных сигналов показано на рис. 12. Обнаружено, что сигналы, полученные после трех ударов, были одинаковыми, что указывает на однородность материала печатной платы.

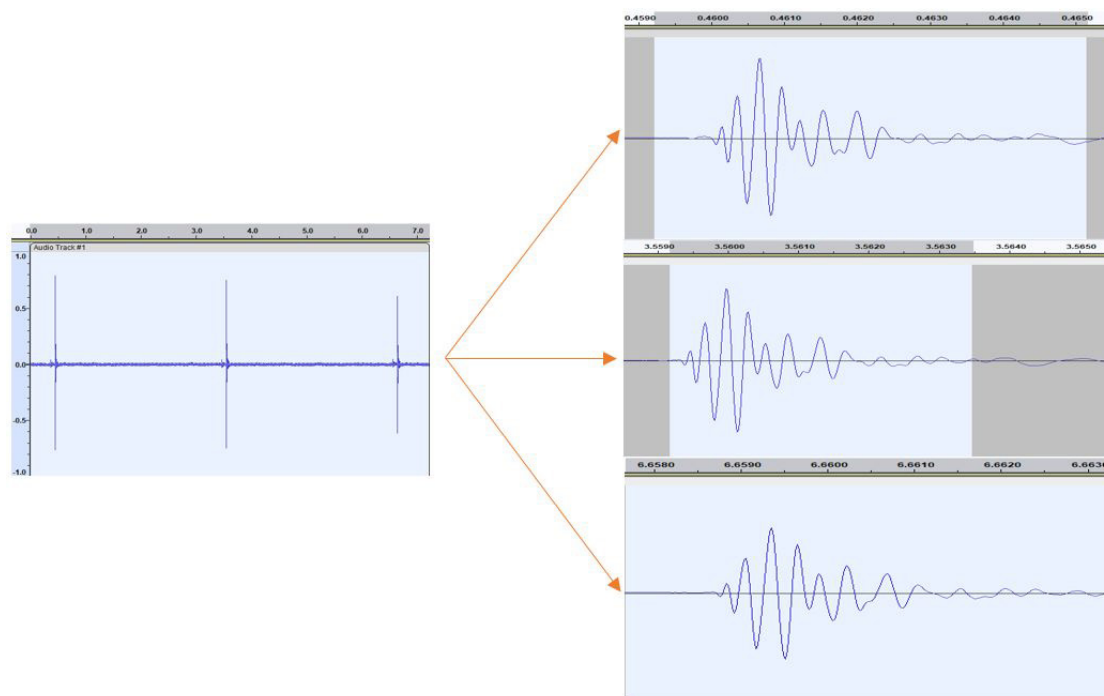


Рис. 11. Получаемый сигнал от датчика после 3 ударов в случае отсутствия дефекта

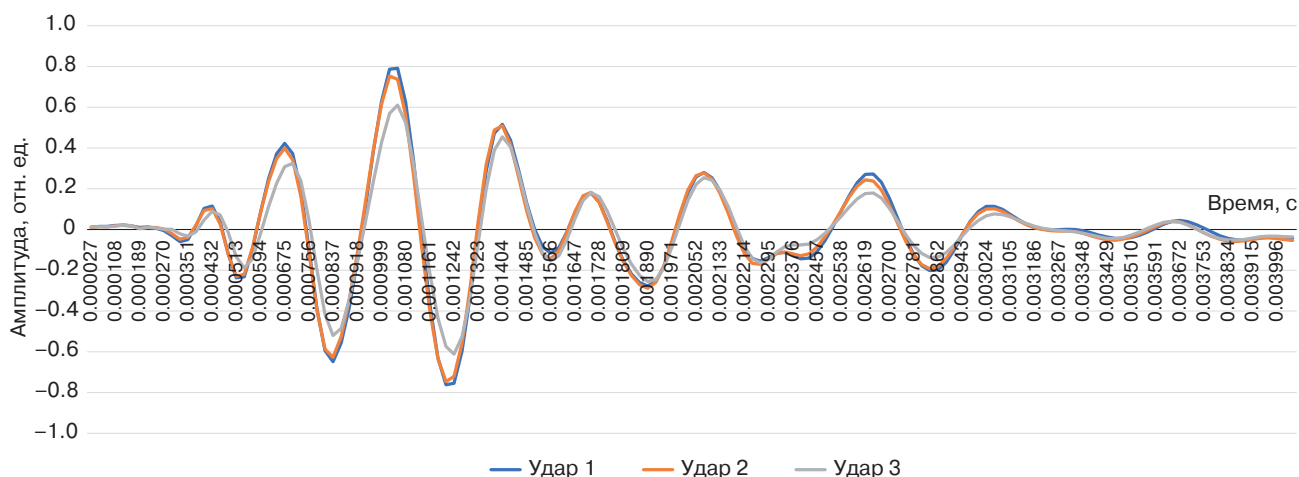


Рис. 12. Сравнение сигналов на датчике при 3 ударах соленоида по печатной плате без дефекта

Результаты эксперимента при наличии дефекта в печатной плате

Далее проведены эксперименты на плате с прямоугольным дефектом размером 3×3.7 см, представленной на рис. 13. Аналогично фиксировались три механических удара соленоидом по печатной плате (рис. 14), после чего было проведено сравнение полученных сигналов с сигналом, полученным при отсутствии дефекта.

Обнаружение наличия дефекта осуществлялось путем сравнения полученных результатов с результатом при отсутствии дефекта. Результат сравнения показан на рис. 15.

По результатам сравнения видно, что наблюдаются значительные различия в сигналах при наличии и отсутствии дефекта. Это свидетельствует

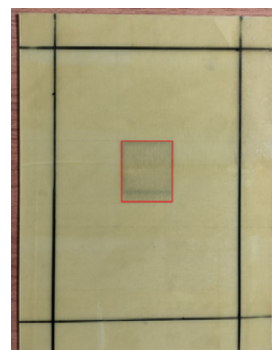


Рис. 13. Печатная плата с прямоугольным дефектом 3×3.7 см (дефект отмечен красной рамкой)

о том, что дефект существенно влияет на процесс распространения акустической волны и принимаемые датчиком акустические сигналы.

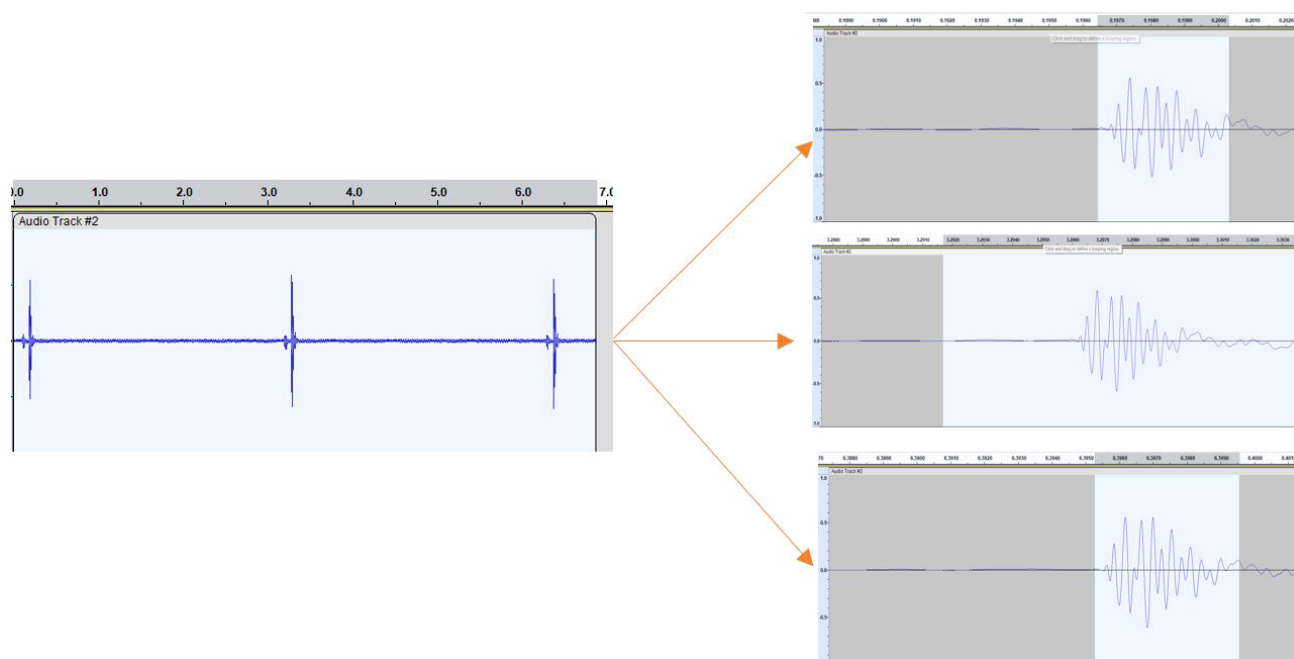


Рис. 14. Сигнал датчика после 3 ударов при наличии дефекта

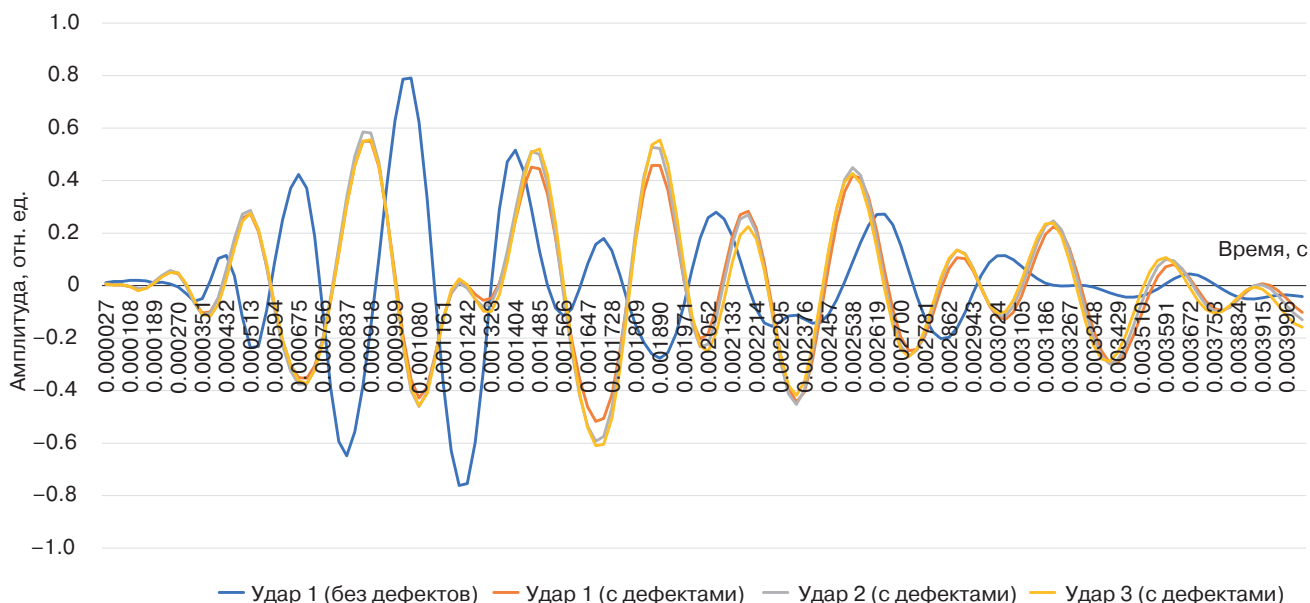


Рис. 15. Сравнение сигналов датчика при 3 ударах соленоида по печатной плате с дефектом 3×3.7 см с сигналом для печатной платы без дефектов

Исследование чувствительности датчика к наличию дефектов различных размеров

Для исследования чувствительности датчика к обнаружению дефектов были изготовлены двуслойные печатные платы с дефектами в виде квадратов с разными размерами сторон: 4, 5, 6 и 7 мм. На МПП с дефектами последовательно наносились три механических удара, и сигналы с датчика сравнивались с сигналом для МПП без дефекта. Результаты исследования приведены на рис. 16–19.

Обнаружено, что сигналы для квадратных дефектов размером 4×4 мм и 5×5 мм схожи с сигналами печатных плат без дефектов, что свидетельствует о невозможности датчика обнаруживать указанные типы дефектов. Однако сигналы для квадратных

дефектов 6×6 мм и 7×7 мм показали значительные различия по сравнению с печатной платой без дефектов, что указывает на то, что датчик может обнаруживать эти типы дефектов.

Далее исследовалось влияние количества квадратных дефектов размером 5×5 мм на способность датчика обнаруживать дефекты. Для этого были созданы печатные платы с двумя (рис. 20), тремя и четырьмя квадратными дефектами размером 5×5 мм, после чего на платы подавалось последовательно наносились три механических удара и фиксировались сигналы датчика (рис. 21–23).

Отмечено, что сигналы для каждого случая значительно отличались от сигналов печатной платы без дефектов. Это говорит о том, что количество дефектов может влиять на результаты, полученные от датчика.

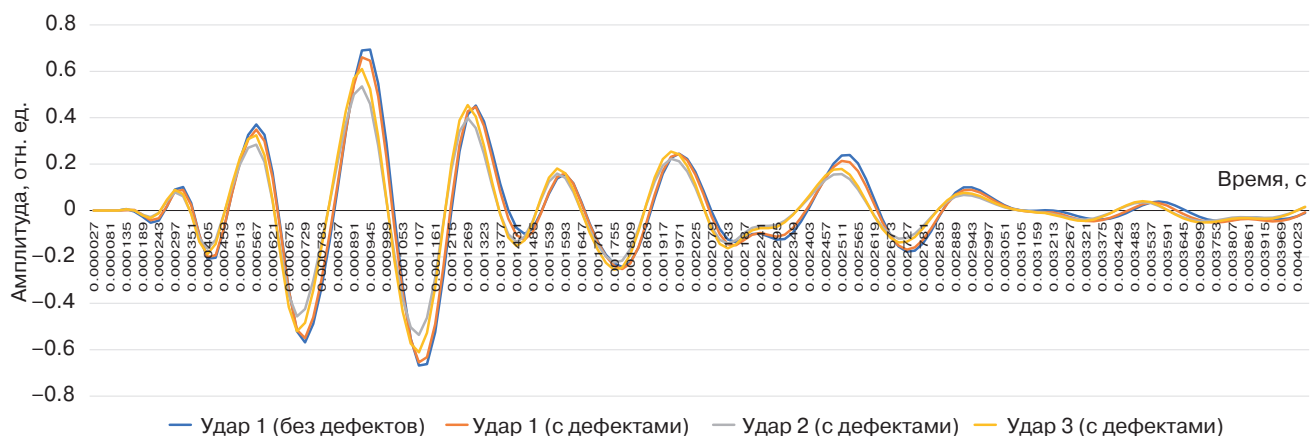


Рис. 16. Сравнение сигналов датчика при 3 ударах соленоида по печатной плате с дефектом 4×4 мм с сигналом для исправной печатной платы

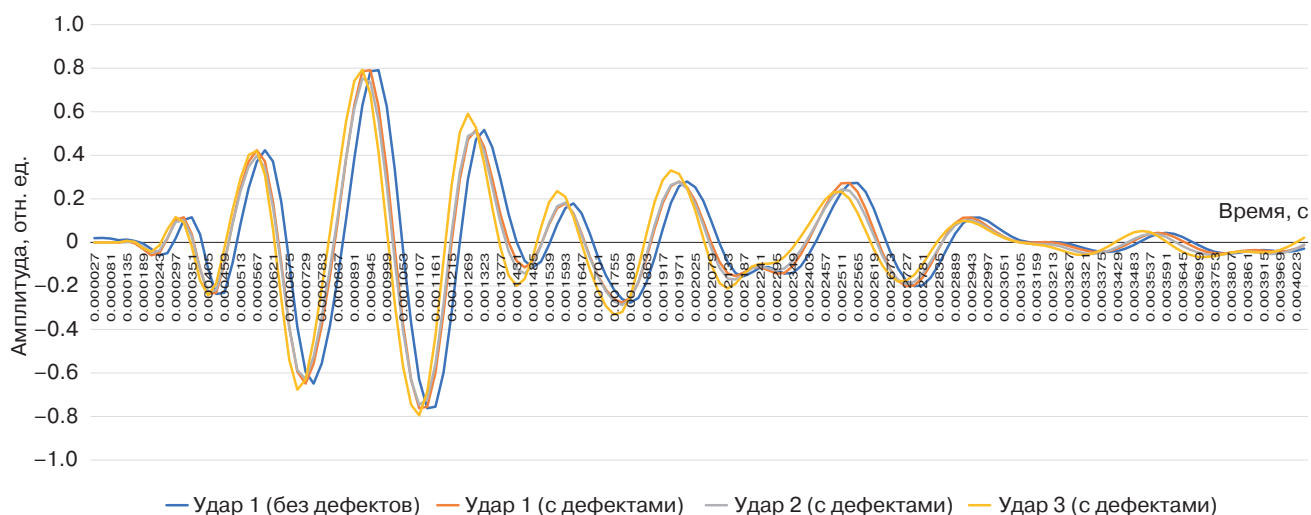


Рис. 17. Сравнение сигналов датчика при 3 ударах соленоида по печатной плате с дефектом 5 × 5 мм с сигналом для печатной платы без дефектов

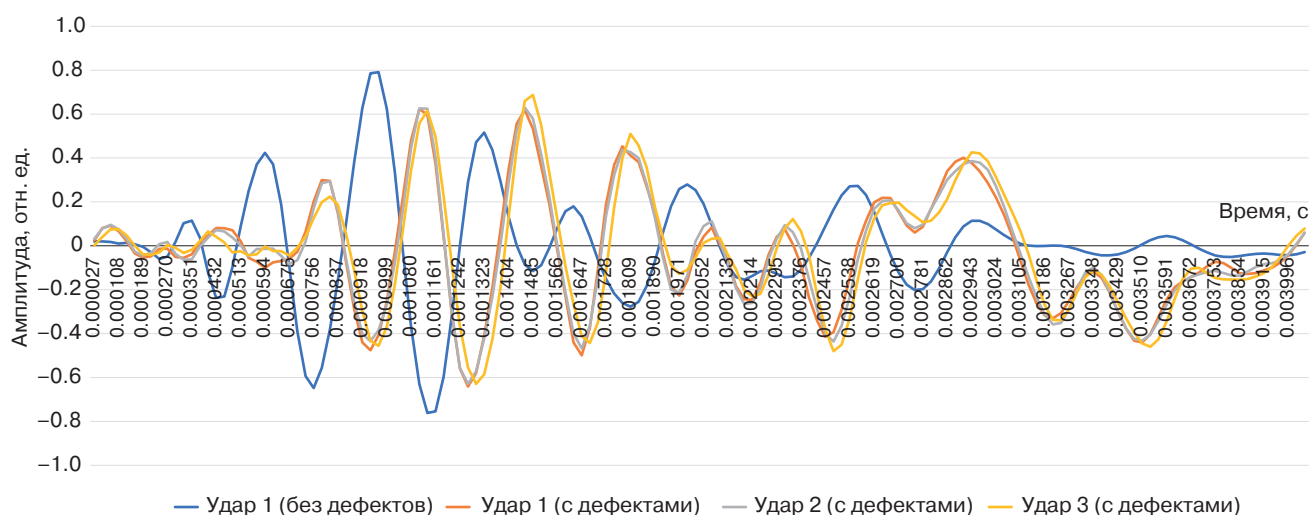


Рис. 18. Сравнение сигналов датчика при 3 ударах соленоида по печатной плате с дефектом 6 × 6 мм с сигналом для печатной платы без дефектов

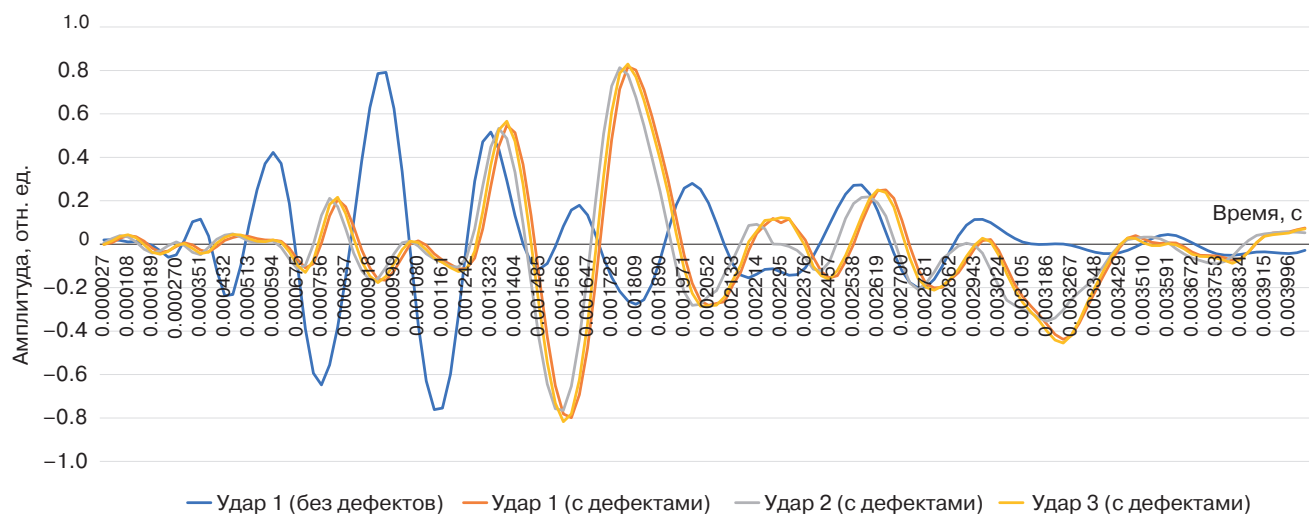


Рис. 19. Сравнение сигналов датчика при 3 ударах соленоида по печатной плате с дефектом 7 × 7 мм с сигналом для печатной платы без дефектов

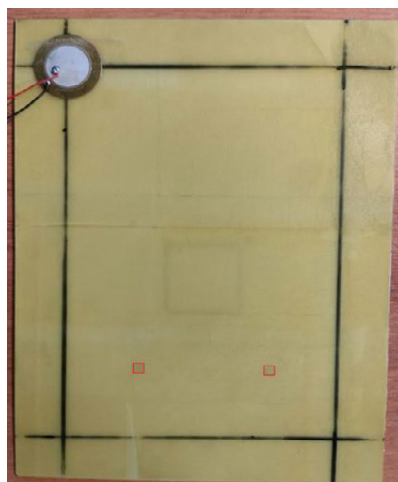


Рис. 20. Печатная плата с 2 квадратными дефектами 5 × 5 мм
(отмечены красной рамкой)

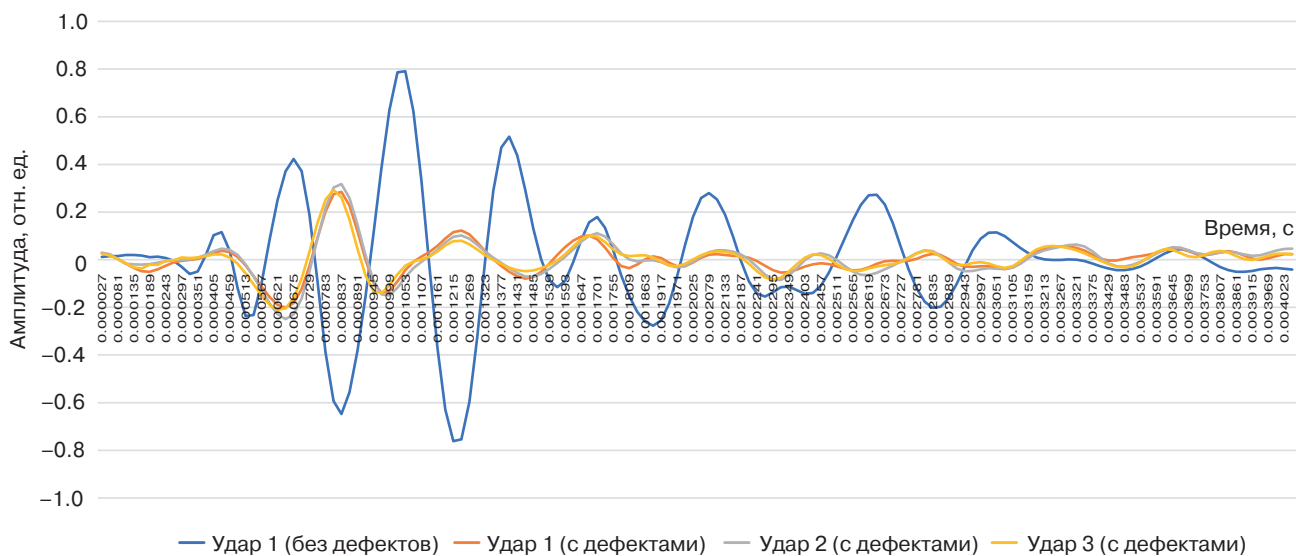


Рис. 21. Сравнение сигналов датчика при трех ударах соленоида по печатной плате с 2 дефектами 5 × 5 мм
с сигналом для печатной платы без дефектов

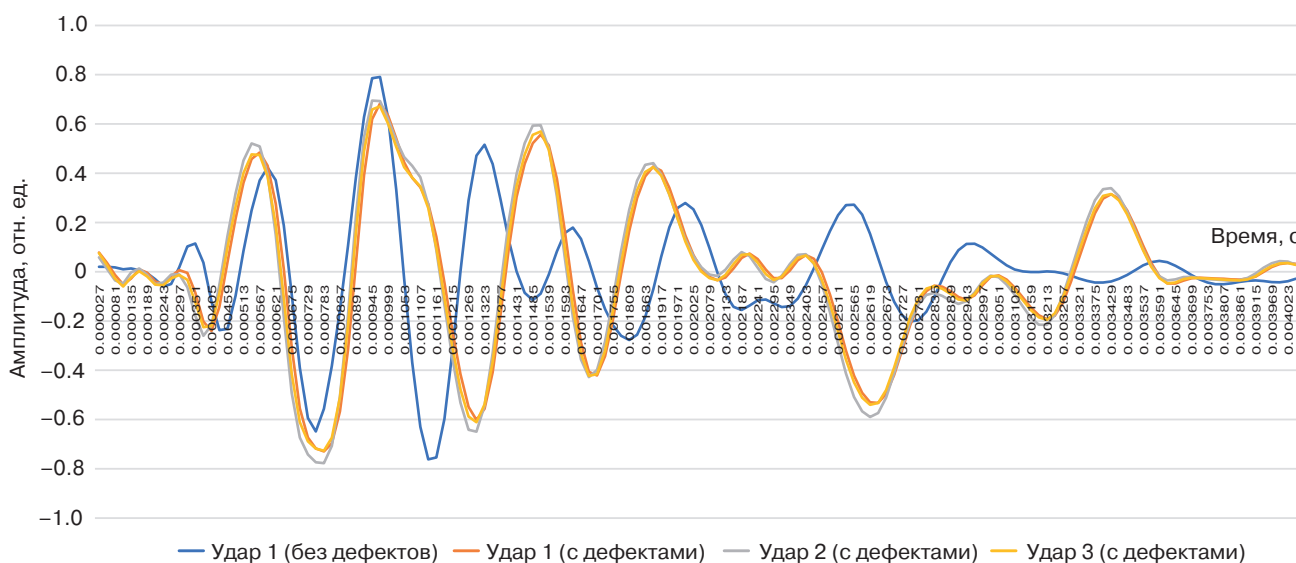


Рис. 22. Сравнение сигналов датчика при 3 ударах соленоида по печатной плате с 3 дефектами 5 × 5 мм
с сигналом для печатной платы без дефектов

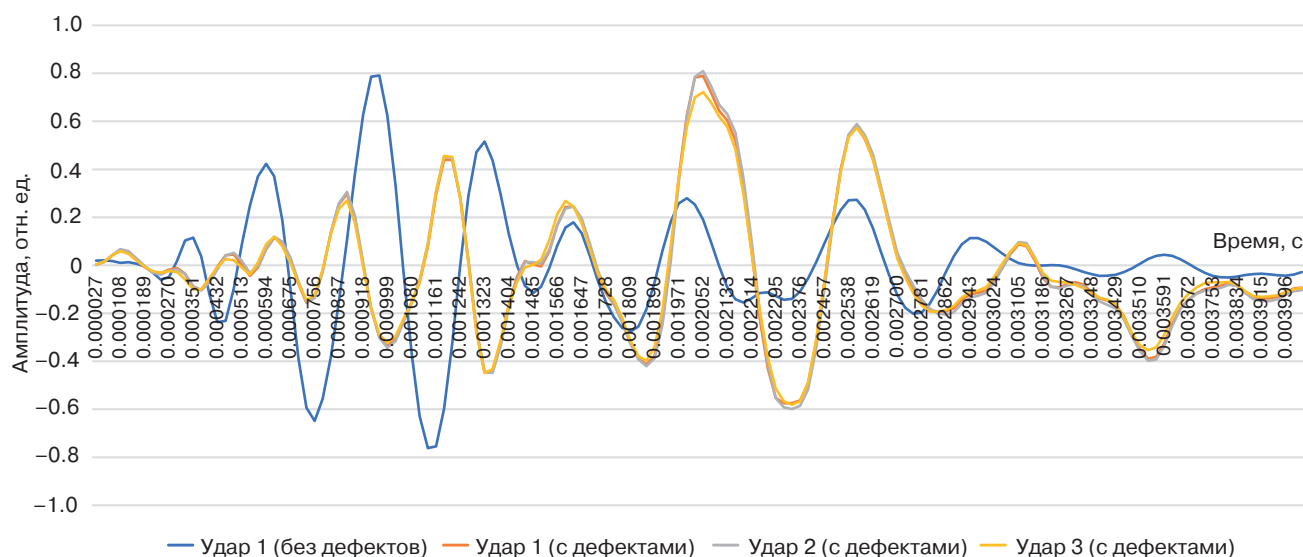


Рис. 23. Сравнение сигналов датчика при 3 ударах соленоида по печатной плате с 4 дефектами 5×5 мм с сигналом для печатной платы без дефектов

Таким образом, эксперименты показали, что с использованием метода АЭ можно обнаруживать дефекты в печатных платах, но его чувствительность зависит от размера и количества дефектов. Результаты также подчеркнули важность анализа полученных сигналов для выявления и локализации дефектов в печатных платах.

Итоговые результаты о возможности распознавания исследуемых дефектов печатной платы методом АЭ приведены в табл. 3.

Таблица 3. Исследуемые дефекты и возможность их распознавания

Дефект	Характеристика дефектов (расслоение)	Можно распознавать методом АЭ?
1	Прямоугольник 2×3 см	Да
2	Квадрат 4×4 мм	Нет
3	Квадрат 5×5 мм	Нет
4	Квадрат 6×6 мм	Да
5	Квадрат 7×7 мм	Да
6	Два квадрата 5×5 мм	Да
7	Три квадрата 5×5 мм	Да
8	Четыре квадрата 5×5 мм	Да

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе исследована возможность применения метода АЭ для обнаружения дефектов в МПП в виде расслоения. Проведен анализ результатов моделирования МПП в исправном и неисправном состояниях с прямоугольным дефектом 3×3.7 см, а также проведены экспериментальные исследования для различных размеров и количества дефектов.

Разработанный подход позволил распознавать исправное и неисправное состояния печатной платы, а также определить чувствительность метода АЭ к размеру выявляемого дефекта.

Таким образом, результаты исследования позволяют сделать вывод о возможности применения метода АЭ для диагностирования технического состояния МПП и сопоставимости результатов физических испытаний численным экспериментам.

Дальнейшие исследования авторов ведутся в направлениях разработки метода выявления дефектов в МПП с применением метода АЭ с использованием искусственных нейронных сетей, а также исследования применения метода АЭ при испытаниях на воздействие гармонической вибрации.

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. Машагулова Д.А. Сравнительный анализ акустических методов контроля и диагностирования оборудования. *Опыт, актуальные проблемы и перспективы развития нефтегазового комплекса: Материалы X Международной научно-практической конференции обучающихся, аспирантов и ученых*. Нижневартовск: 01–30 апреля 2020 г. С. 59–63.

2. Азин А.В., Пономарев С.В., Рикконен С.В., Марицкий Н.Н., Сунцов С.Б. Обзор методов поиска латентных дефектов печатных плат. *Решетневские чтения: Материалы XXIV Международной научно-практической конференции, посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнева*. Красноярск: 10–13 ноября 2020 г. 2020;1:244–245.
3. Azin A., Zhukov A., Narikovich A., Ponomarev S., Rikkonen S., Leitsin V. Nondestructive testing method for a new generation of electronics. *MATEC Web Conf.* 2018;143:04007. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201714304007>
4. Лыу Н.Т., Нгуен К.Д., Демченко С.К., Черноверская В.В. Применение метода акустической эмиссии в задачах контроля и мониторинга технического состояния диагностируемых объектов. *Труды международного симпозиума «Надежность и качество»*. 2021;2:77–82.
5. Zhao W., Feng X., Xu B. Study on defect detection of PCB based on acoustic emission technology during the drilling process. *J. Electronic Measurement and Instrumentation*. 2015;29(10):1374–1380.
6. Li H., Dong Z., Yang Y., Liu B., Chen M., Jing W. Experimental Study of Damage Development in Salt Rock under Uniaxial Stress Using Ultrasonic Velocity and Acoustic Emissions. *Appl. Sci.* 2018;8(4):553. <https://doi.org/10.3390/app8040553>
7. Levikari S., Kärkkäinen T.J., Andersson C., Tammminen J., Silventoinen P. Acoustic Detection of Cracks and Delamination in Multilayer Ceramic Capacitors. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2019;55(2):1787–1794. <https://doi.org/10.1109/TIA.2018.2873989>
8. Алтай Е., Федоров А.В., Степанова К.А. Оценка влияния методов фильтрации на погрешность измерения параметров сигнала акустической эмиссии. *XXV Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям: сборник трудов*. 2022;1:24–27. URL: https://scm.etu.ru/assets/files/2022/scm22/papers/stend01_024.pdf
9. Овчарук В.Н., Чье Е.У. Применение методов спектрального анализа в многоканальных системах регистрации сигналов акустической эмиссии. *Приборы*. 2021;11:35–39.
10. Матвиенко Ю.Г., Васильев И.Е., Чернов Д.В., Иванов В.И., Елизаров С.В. Проблемы локации источников акустической эмиссии. *Дефектоскопия*. 2021;9:35–44. <https://doi.org/10.31857/S0130308221090049>
11. Aryan P., Sampath S., Sohn H. An Overview of Non-Destructive Testing Methods for Integrated Circuit Packaging Inspection. *Sensors*. 2018;18(7):1981. <https://doi.org/10.3390/s18071981>
12. Bourne K.A., Kapoor S.G. Process Monitoring During Micro-Drilling via Acoustic Emission, Ultrasonic Sound, and Spindle Load Sensors. In: *2012 International Manufacturing Science and Engineering Conference*. 2012;7341:781–790. <https://doi.org/10.1115/MSEC2012-7341>
13. Malikov V., Ananyev M., Ishkov A., Nikonov L. Experimental Studies of Conductive Paths of Printed Circuit Boards by Using Subminiature Eddy Current Transducers. *E3S Web of Conferences*. 2021;285(4):07037. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128507037>
14. Huang M., Jiang L., Liaw P.K., Brooks C.R., Seeley R., Klarstrom D.L. Using Acoustic Emission in Fatigue and Fracture Materials Research. *JOM*. 1998;50(11). URL: <https://www.tms.org/pubs/journals/jom/9811/huang/huang-9811.html>
15. Gao Y., Xiao D. Simulation and feature analysis of modal acoustic emission wave in planar C/SiC composite. *J. Vibroengineering*. 2018;20(1):748–761. <https://doi.org/10.21595/jve.2017.18173>

REFERENCES

1. Mashagulova D.A. Comparative analysis of acoustic methods for monitoring and diagnosing equipment. In: *Experience, Current Problems and Prospects for the Development of the Oil and Gas Complex: Materials of the X International Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates and Scientists*. Nizhnevartovsk: April 01–30, 2020. P. 59–63 (in Russ.).
2. Azin A.V., Ponomarev S.V., Rikkonen S.V., Maritskii N.N., Suntsov S.B. Review of methods for searching latent defects of printed circuit boards. In: *Reshetnev Readings: Materials of the 24th International Scientific and Practical Conference dedicated to the memory of the General Designer of Rocket and Space Systems Academician M.F. Reshetnev*. Krasnoyarsk: November 10–13. 2020;1:244–245 (in Russ.).
3. Azin A., Zhukov A., Narikovich A., Ponomarev S., Rikkonen S., Leitsin V. Nondestructive testing method for a new generation of electronics. *MATEC Web Conf.* 2018;143:04007. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201714304007>
4. Luu N.T., Nguyen K.D., Demchenko S.K., Chernoverskaya V.V. Application of the acoustic emission method in the tasks of control and monitoring of the technical condition of the objects being diagnosed. In: *Proceedings of the International Symposium “Reliability and Quality.”* 2021;2:77–82 (in Russ.).
5. Zhao W., Feng X., Xu B. Study on defect detection of PCB based on acoustic emission technology during the drilling process. *J. Electronic Measurement and Instrumentation*. 2015;29(10):1374–1380.
6. Li H., Dong Z., Yang Y., Liu B., Chen M., Jing W. Experimental Study of Damage Development in Salt Rock under Uniaxial Stress Using Ultrasonic Velocity and Acoustic Emissions. *Appl. Sci.* 2018;8(4):553. <https://doi.org/10.3390/app8040553>
7. Levikari S., Kärkkäinen T.J., Andersson C., Tammminen J., Silventoinen P. Acoustic Detection of Cracks and Delamination in Multilayer Ceramic Capacitors. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2019;55(2):1787–1794. <https://doi.org/10.1109/TIA.2018.2873989>
8. Altai E., Fedorov A.V., Stepanova K.A. Evaluation of the influence of filtration methods on the measurement error of acoustic emission signal parameters. In: *25th International Conference on Soft Computing and Measurements: collection of proceedings*. 2022;1:24–27 (in Russ.). Available from URL: https://scm.etu.ru/assets/files/2022/scm22/papers/stend01_024.pdf

9. Ovcharuk V.N., Chye E.U. The concept of the multichannel system of registration and analysis of acoustic emission signals. *Pribory = Instruments*. 2021;11(257):35–39 (in Russ.).
10. Matvienko Yu.G., Vasil'ev I.E., Chernov D.V., et al. Problems of locating acoustic emission sources. *Russ. J. Nondestruct. Test*. 2021;57(9):769–778. <https://doi.org/10.1134/S1061830921090060>
[Original Russian Text: Matvienko Yu.G., Vasil'ev I.E., Chernov D.V., Ivanov V.I., Elizarov S.V. Problems of locating acoustic emission sources. *Defektoskopiya*. 2021;9:35–44 (in Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0130308221090049>]
11. Aryan P., Sampath S., Sohn H. An Overview of Non-Destructive Testing Methods for Integrated Circuit Packaging Inspection. *Sensors*. 2018;18(7):1981. <https://doi.org/10.3390/s18071981>
12. Bourne K.A., Kapoor S.G. Process Monitoring During Micro-Drilling via Acoustic Emission, Ultrasonic Sound, and Spindle Load Sensors. In: *2012 International Manufacturing Science and Engineering Conference*. 2012;7341:781–790. <https://doi.org/10.1115/MSEC2012-7341>
13. Malikov V., Ananyev M., Ishkov A., Nikonov L. Experimental Studies of Conductive Paths of Printed Circuit Boards by Using Subminiature Eddy Current Transducers. *E3S Web of Conferences*. 2021;285(4):07037. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128507037>
14. Huang M., Jiang L., Liaw P.K., Brooks C.R., Seeley R., Klarstrom D.L. Using Acoustic Emission in Fatigue and Fracture Materials Research. *JOM*. 1998;50(11). Available from URL: <https://www.tms.org/pubs/journals/jom/9811/huang/huang-9811.html>
15. Gao Y., Xiao D. Simulation and feature analysis of modal acoustic emission wave in planar C/SiC composite. *J. Vibroengineering*. 2018;20(1):748–761. <https://doi.org/10.21595/jve.2017.18173>

Об авторах

Увайсов Сайгид Увайсович, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой конструирования и производства радиоэлектронных средств Института 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>

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

Нгуен Конг Дык, аспирант, кафедра конструирования и производства радиоэлектронных средств Института радиоэлектроники и информатики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: Ngcongduc9x@gmail.com. <https://orcid.org/0009-0000-9237-156X>

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

Долматов Алексей Вячеславович, к.т.н., доцент, кафедра конструирования и производства радиоэлектронных средств Института 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>

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>

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

Cong D. Nguyen, Postgraduate Student, Department of Design and Production of Radioelectronic Devices, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: Ngcongduc9x@gmail.com. <https://orcid.org/0009-0000-9237-156X>

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

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>