

УДК 621.396.69

DOI: [10.26102/2310-6018/2023.41.2.020](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2023.41.2.020)

Применение искусственной нейронной сети в задаче ультразвуковой диагностики дефектов печатных плат радиоэлектронных устройств

С.У. Увайсов, В.В. Черноверская✉, Нгуен Конг Дык, Лыу Нгок Тиен

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Российская Федерация
chernoverskaya@mirea.ru✉

Резюме. Современные радиоэлектронные устройства представляют собой сложные технические системы, функционирование которых сопровождается различными физическими процессами, протекающими в их узлах и блоках. Сочетание схемотехнической, конструктивной и технологической сложности радиоэлектронных устройств является причиной возникновения в них дефектов различного характера, в том числе скрытых, с длительным латентным периодом. Это, в свою очередь, предъявляет более высокие требования к диагностированию и контролю технического состояния радиоэлектронных устройств. Актуальность исследования, представленного в данной статье, обусловлена необходимостью повышения достоверности и точности идентификации дефектов в узлах и блоках электронных устройств, разработкой новых методов и средств технической диагностики, сочетающих в себе традиционные подходы с активно развивающимися технологиями искусственных нейронных сетей, обработки больших данных, вычислительного эксперимента. В статье представлено исследование по ультразвуковой диагностике внутренних дефектов расслоения печатных плат. Описана методика моделирования различных дефектов с применением специализированного программного обеспечения ABAQUS. Раскрыты особенности последующей обработки экспериментальных данных – амплитудно-временных, амплитудно-частотных характеристик, формирование численных массивов исследуемых параметров. Приведена структура искусственной нейронной сети для задачи диагностирования и идентификации дефектов печатных плат, раскрыта технология ее обучения и тестирования. Материалы статьи представляют практическую ценность для инженеров-конструкторов, схемотехников радиоэлектронных систем, а также разработчиков сложных технических комплексов.

Ключевые слова: печатная плата, неразрушающий контроль, ультразвуковая диагностика, расслоение, скрытые дефекты, ультразвуковая волна, пьезоэлектрический преобразователь, искусственная нейронная сеть, обучение, идентификация.

Для цитирования: Увайсов С.У., Черноверская В.В., Нгуен Конг Дык, Лыу Нгок Тиен. Применение искусственной нейронной сети в задаче ультразвуковой диагностики печатных плат радиоэлектронных устройств. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2023;11(2). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1338> DOI: 10.26102/2310-6018/2023.41.2.020

The use of an artificial neural network in the problem of ultrasonic diagnostics of defects in printed circuit boards of electronic devices

S.U. Uvaysov, V.V. Chernoverskaya✉, Nguyen Hong Duc, Lu Ngoc Tien

MIREA – Russian Technological University, Moscow, the Russian Federation
chernoverskaya@mirea.ru✉

Abstract. Modern electronic devices are complex technical systems, the functioning of which is accompanied by various physical processes occurring in their nodes and blocks. The combination of

circuitry, structural and technological complexity of radio-electronic devices is the cause of various defects in them including hidden ones with a long latency period. This, in turn, imposes higher requirements for the diagnosis and control of the technical condition of electronic devices. The relevance of the research presented in this article is due to the need to increase the reliability and accuracy of defect identification in nodes and blocks of electronic devices, the development of new methods and means of technical diagnostics combining traditional approaches with actively developing technologies of artificial neural networks, big data processing, computational experiment. The article presents a study on ultrasound diagnostics of internal defects in the delamination of printed circuit boards. The method of modeling various defects using specialized software ABAQUS is described. The features of the subsequent processing of experimental data – amplitude-time, amplitude-frequency characteristics, the formation of numerical arrays of the parameters under study – are defined. The structure of an artificial neural network for diagnosing and identifying defects of printed circuit boards is given and the technology of its training and testing is defined. The materials of the article are of practical value for design engineers, circuit and system engineers of electronic systems as well as developers of complex technical complexes.

Keywords: printed circuit board, non-destructive testing, ultrasound diagnostics, delamination, hidden defects, ultrasonic wave, piezoelectric transducer, artificial neural network, training, identification.

For citation: Uvaysov S.U., Chernoverskaya V.V., Nguyen Hong Duc, Lu Ngoc Tien. The use of an artificial neural network in the task of ultrasonic diagnostics of printed circuit boards of electronic devices. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2023;11(2). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1338> DOI: 10.26102/2310-6018/2023.41.2.020 (In Russ.).

Введение

Техническая диагностика и контроль радиоэлектронных устройств (РЭУ) являются одним из обязательных этапов их жизненного цикла, позволяющим своевременно оценивать эксплуатационные и надежность показатели РЭУ, определять остаточный ресурс, предупреждать неисправности и отказы устройства. Несмотря на разнообразный арсенал методов и инструментов диагностирования РЭУ, в рамках своей проектной деятельности инженерам-разработчикам приходится учитывать все возрастающую сложность проектируемых устройств (как функциональную, так и конструктивную), а также повышение трудоемкости технологического процесса производства РЭУ. Это приводит к необходимости постоянно совершенствовать существующие и искать новые подходы в технической диагностике, сочетать физические методы исследований с моделированием и вычислительным экспериментом, что в целом позволило бы повысить достоверность и полноту проводимого диагностирования.

Представленная статья продолжает цикл исследований, посвященных вопросам применения искусственных нейронных сетей в задаче технической диагностики узлов и блоков радиоэлектронных устройств. Результаты одного из таких исследований приведены в работе [1], а в данной статье рассмотрены вопросы ультразвуковой диагностики скрытых дефектов печатных плат.

Классификация дефектов печатных плат радиоэлектронных устройств

Производство печатных плат (ПП) – это сложный технологический процесс, на каждом этапе которого может возникнуть тот или иной дефект. Согласно ГОСТ Р 56251-2014 дефекты ПП подразделяются на визуально наблюдаемые (можно увидеть) и визуально ненаблюдаемые (можно обнаружить только с применением специальных оптических приборов или современных методов неразрушающего контроля). Чаще всего появляются поверхностные дефекты, дефекты металлизации отверстий, дефекты внутренней структуры многослойных печатных плат, в том числе проводников,

микрошлифы. Кроме этого, могут присутствовать дефекты маркировки, дефекты паяльной маски, отклонение от линейных размеров и др. Необнаруженные вовремя дефекты при дальнейшей эксплуатации негативно отражаются на функциональности изделия и могут привести к преждевременному выходу из строя радиоэлектронного устройства. На Рисунках 1 и 2 приведены примеры дефектов ПП двух типов.

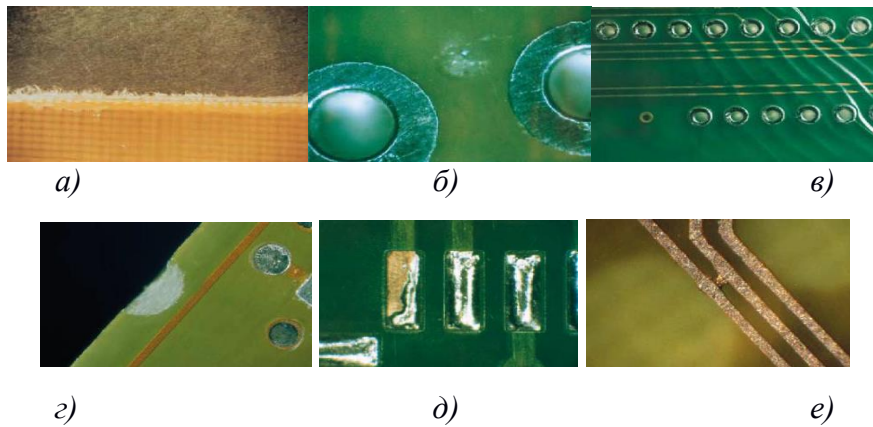


Рисунок 1 – Примеры визуально наблюдаемых дефектов печатных плат: *а)* заусенцы с краю печатной платы, *б)* раковины и пустоты на поверхности печатной платы, *в)* «волны», образовавшиеся в маске, *г)* выбоина с краю печатной платы, *д)* отсутствие покрытия на вертикальных стенках проводников, *е)* расстояния между проводниками печатной платы не соответствуют стандарту

Figure 1 – Examples of visually observed defects of printed circuit boards: *a)* burrs on the edge of the printed circuit board, *b)* shells and voids on the surface of the printed circuit board, *c)* "waves" formed in the mask, *d)* a pothole on the edge of the printed circuit board, *e)* lack of coating on the vertical walls of the conductors, *f)* the distance between the conductors printed circuit boards do not meet the standard

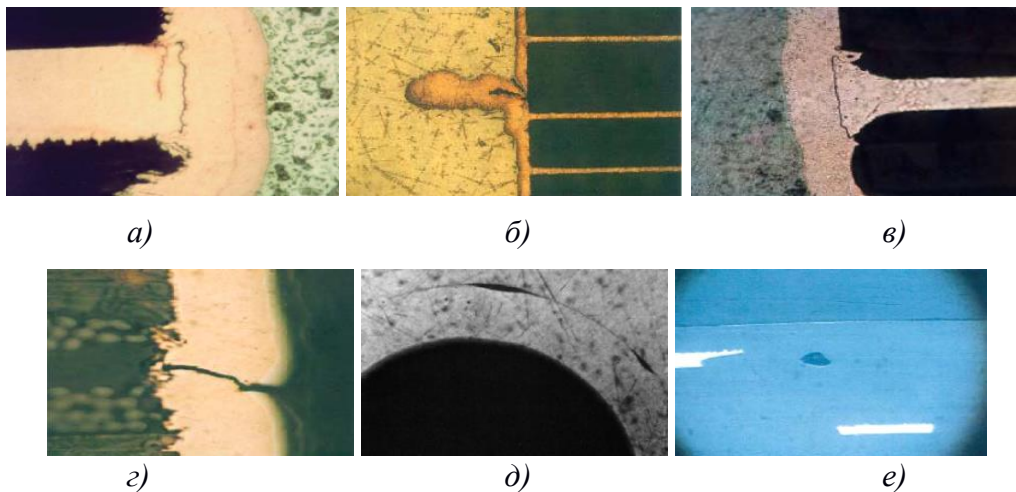


Рисунок 2 – Примеры скрытых дефектов: *а)* трещина на одной стороне отверстия; *б)* наросты на гальваническом покрытии; *в)* «шляпка» гвоздя; *г)* трещины в гальваническом покрытии отверстия; *д)* отделение внутренних слоев от металлизации отверстия; *е)* пустоты в гальваническом покрытии

Figure 2 – Examples of hidden defects: *a)* a crack on one side of the hole; *b)* growths on the electroplating; *c)* the "cap" of the nail; *d)* cracks in the electroplating of the hole; *e)* separation of the inner layers from the metallization of the hole; *f)* voids in the electroplating

Моделирование дефектов печатной платы с помощью программного обеспечения ABAQUS

В данной статье приведены результаты модельного эксперимента, посвященного ультразвуковой диагностике печатной платы с дефектом внутреннего расслоения.

Расслоение – это дефект ПП, характеризующийся отделением проводящего слоя от материала подложки, или разделением внутренней структуры подложки, или разделением внутренних слоев многослойной печатной платы. Этот дефект ПП формируется по разным причинам, среди основных – нарушение технологического процесса изготовления ПП; нарушение правил транспортирования; нарушение целостности упаковки и неправильное хранение ПП в условиях с повышенной влажностью; повышение рабочей температуры при эксплуатации РЭУ. На Рисунке 3 приведены примеры дефектов расслоения ПП.

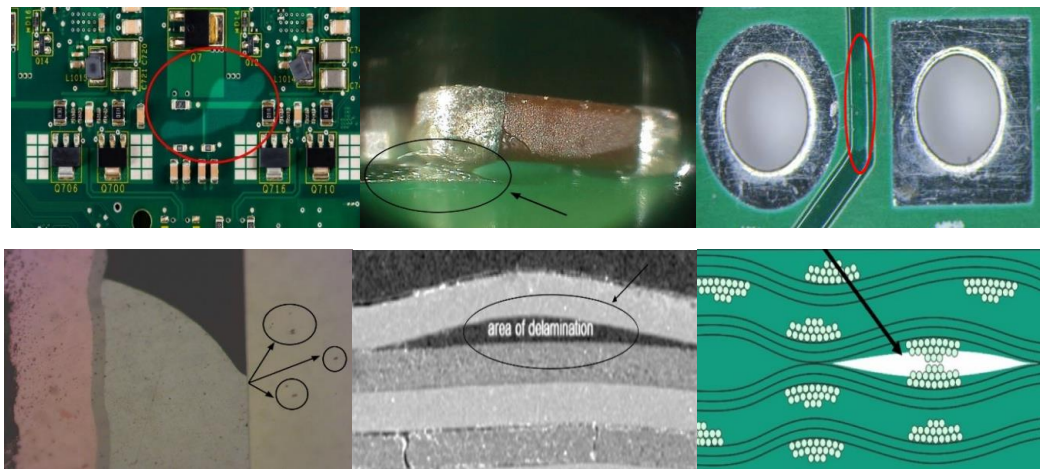


Рисунок 3 – Примеры дефектов расслоения печатной платы
 Figure 3 – Examples of PCB delamination defects

Для моделирования применялся программный комплекс ABAQUS и анализатор ABAQUS/Explicit, который позволяет проводить исследование сложных нелинейных систем на основе метода конечных элементов [2, 3, 4].

В ходе исследования была разработана модель двухслойной печатной платы с основанием из стеклотекстолита фольгированного и линейными размерами $l \times b \times h$, равными $120 \times 80 \times 1$ мм. Кроме этого, были предусмотрены 4 крепежные отверстия. Созданная модель ПП в исправном состоянии (без дефектов) представлена на Рисунке 4.

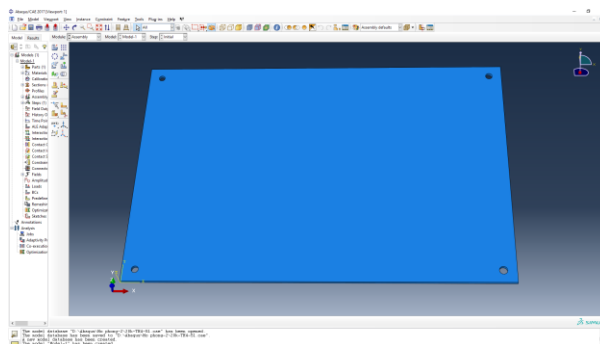


Рисунок 4 – Модель печатной платы в исправном (образцовом) состоянии
 Figure 4 – Model of the printed circuit board in good (exemplary) condition

Далее в ходе эксперимента был смоделирован процесс распространения ультразвуковой волны по печатной плате (Рисунок 5). В качестве источника волны взят пьезоэлектрический преобразователь (ПЭП) с частотой 200 кГц. Расположение источника волны – на верхнем слое печатной платы вблизи края длинной стороны. Из рисунков видно, что профиль волны имеет правильный, неискаженный фронт и равномерно распространяется по поверхности и в структуре платы. На Рисунках 5 а, 5 б, 5 в представлен расширяющийся фронт волны в моменты модельного времени $t_1 = 13$ мкс, $t_2 = 33$ мкс, $t_3 = 50$ мкс. На Рисунке 5 г приведен поперечный срез волны, распространяющейся в направлении края печатной платы.

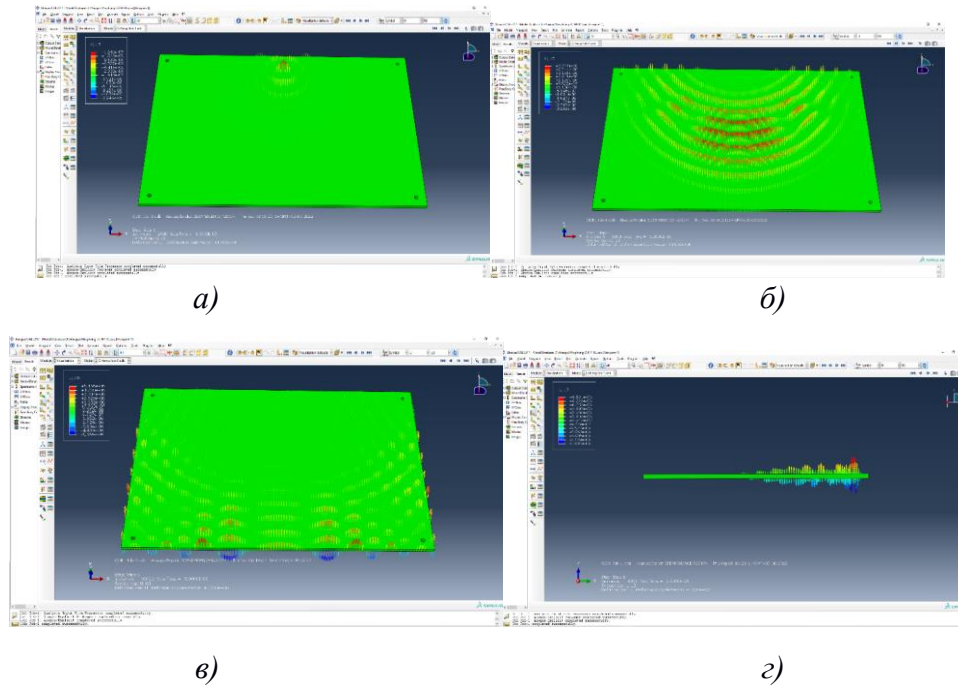


Рисунок 5 – Визуализация распространения ультразвуковых волн по печатной плате в исправном состоянии: а) в момент времени $t_1 = 13$ мкс, б) в момент времени $t_2 = 33$ мкс, в) в момент времени $t_3 = 50$ мкс, г) поперечный срез ультразвуковой волны
Figure 5 – Visualization of the propagation of ultrasonic waves on a printed circuit board in good condition: a) at time $t_1 = 13$ microseconds, b) at time $t_2 = 33$ microseconds, c) at time $t_3 = 50$ microseconds, d) cross section of the ultrasonic wave

Далее в ходе исследования были созданы 5 моделей печатной платы, содержащих дефекты в виде расслоения внутренних слоев с различной площадью повреждения: $S_1 = 1 \text{ мм}^2$; $S_2 = 1,8 \text{ мм}^2$; $S_3 = 3,6 \text{ мм}^2$; $S_4 = 2 \text{ мм}^2$; $S_5 = 2,6 \text{ мм}^2$. На рисунках 6 – 10 приведена визуализация процессов распространения ультразвуковых волн в ПП. Для наглядности представления выбраны временные интервалы $t_1 = (10 \dots 180)$ мкс, $t_2 = (30 \dots 230)$ мкс, $t_3 = (50 \dots 300)$ мкс, $t_4 = (22 \dots 196)$ мкс [5,6].

В ходе эксперимента было обнаружено, что при распространении через ПП с дефектом расслоения энергия акустической волны снижается, а фронт претерпевает искажения. При этом, чем больше площадь повреждения, тем сильнее проявляются эти искажения (Рисунки 6-10, з).

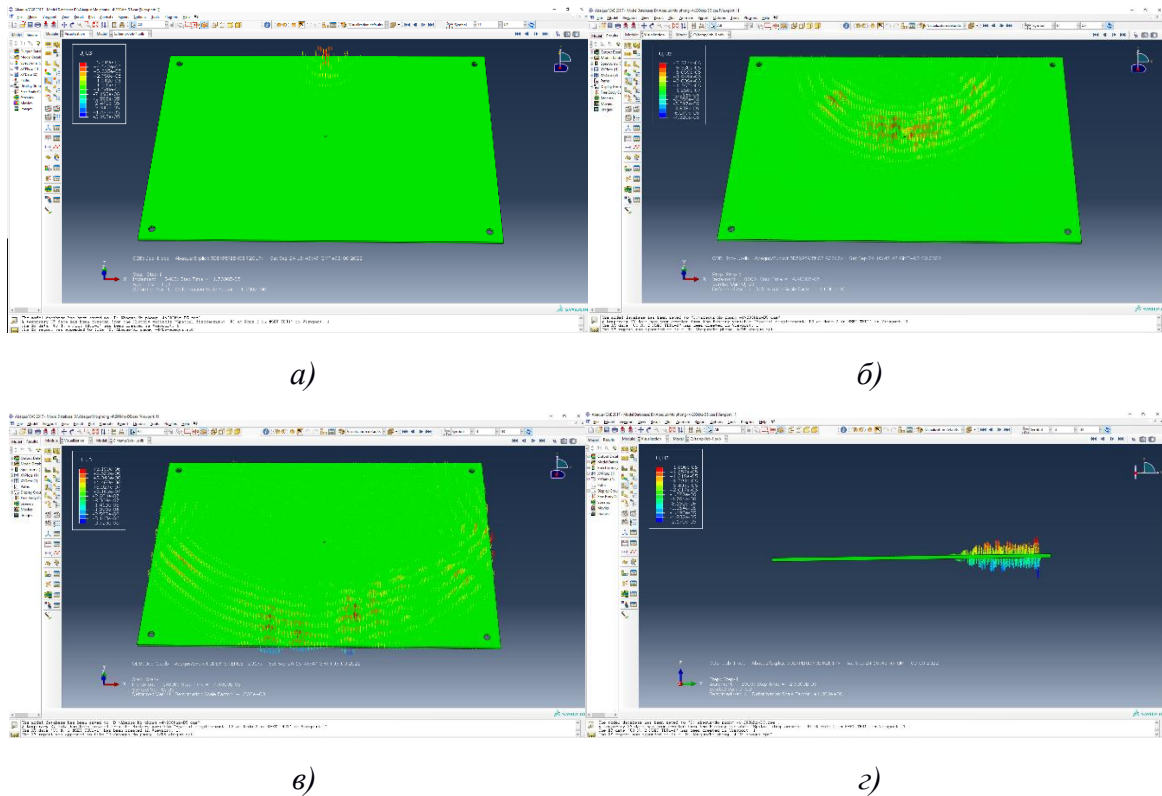


Рисунок 6 – Визуализация распространения ультразвуковой волны по ПП с дефектом № 1
(площадь повреждения $S_1 = 1 \text{ мм}^2$)
Figure 6 – Visualization of ultrasonic wave propagation on a printed circuit board with defect No. 1
(damage area $S_1 = 1 \text{ мм}^2$)

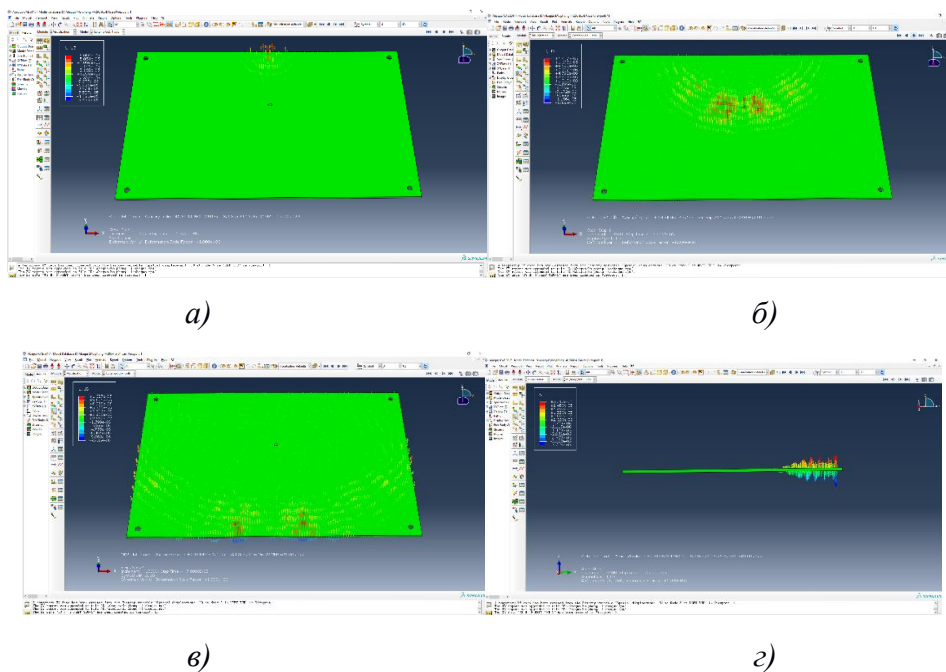


Рисунок 7 – Визуализация распространения ультразвуковой волны по ПП с дефектом № 2
(площадь повреждения $S_2 = 1,8 \text{ мм}^2$)
Figure 7 – Visualization of ultrasonic wave propagation on a printed circuit board with defect No. 2
(damage area $S_2 = 1,8 \text{ мм}^2$)

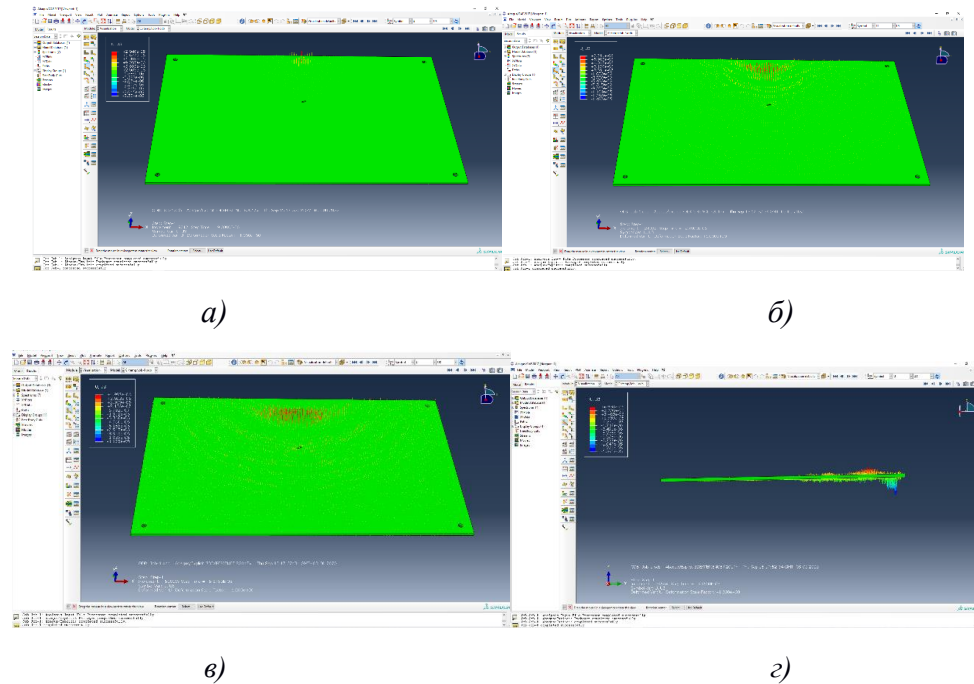


Рисунок 8 – Визуализация распространения ультразвуковой волны по ПП с дефектом № 3 (площадь повреждения $S_3= 3,6 \text{ мм}^2$)
Figure 8 – Visualization of ultrasonic wave propagation on a printed circuit board with defect No. 3 (damage area $S_3= 3,6 \text{ мм}^2$)

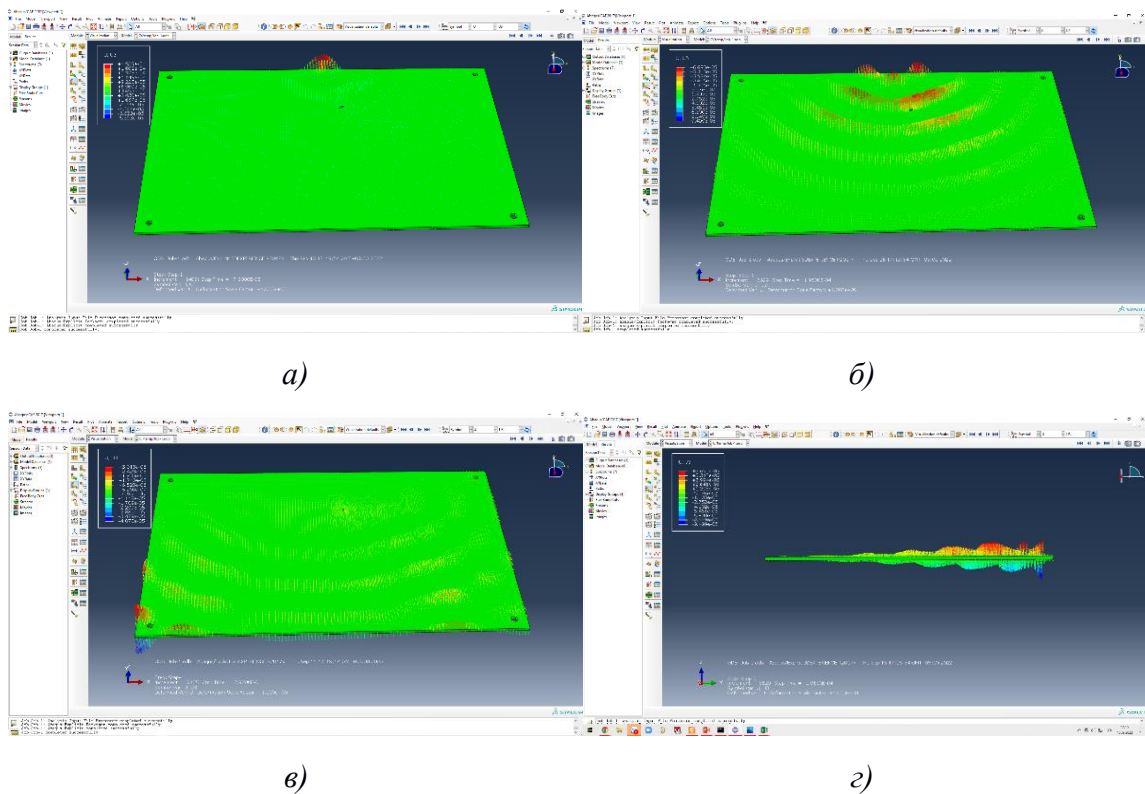


Рисунок 9 – Визуализация распространения ультразвуковой волны по ПП с дефектом № 4 (площадь повреждения $S_4= 2 \text{ мм}^2$)
Figure 9 – Visualization of ultrasonic wave propagation on a printed circuit board with defect No. 4 (damage area $S_4= 2 \text{ мм}^2$)

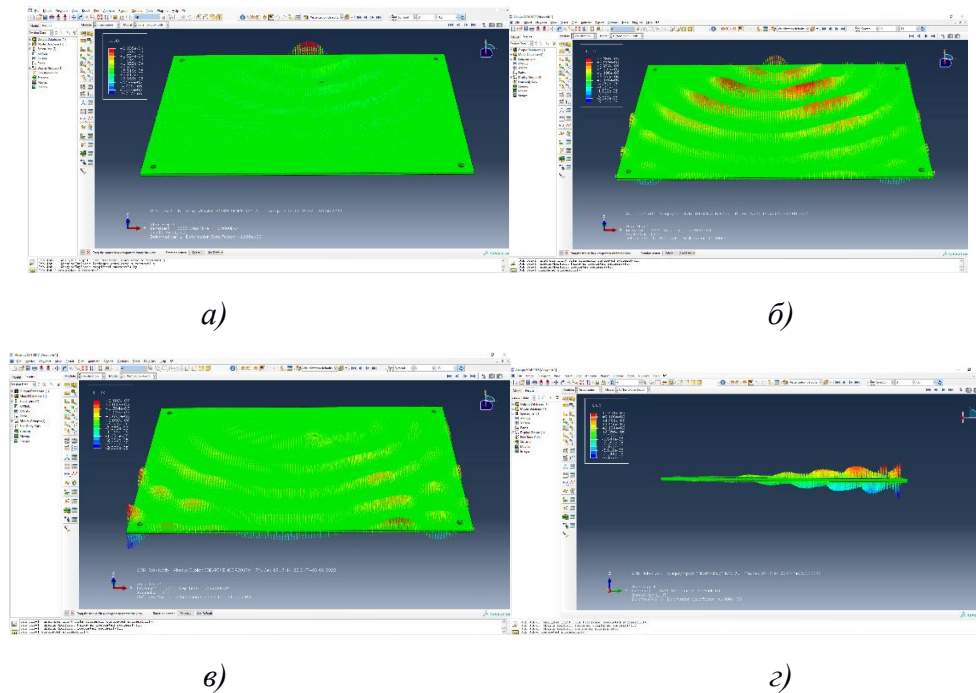


Рисунок 10 – Визуализация распространения ультразвуковой волны по ПП с дефектом № 5 (площадь повреждения $S_5= 2,6 \text{ мм}^2$)

Figure 10 – Visualization of ultrasonic wave propagation on a printed circuit board with defect No. 5 (damage area $S_5= 2.6 \text{ mm}^2$)

Далее были проанализированы амплитудно-временные характеристики (АВХ) акустических волн для всех исследуемых состояний (одно исправное и пять с дефектами). На Рисунках 11-15 приведены графики АВХ волны с дефектом в сравнении с исправным состоянием. Как видно из графиков, появление дефекта расслоения в структуре ПП приводит к уменьшению амплитуды характеристики и временному запаздыванию распространяющегося фронта.

При этом в каждом исследуемом состоянии амплитуда АВХ уменьшалась в определенный момент времени, свидетельствующий о достижении и прохождении ею конструктивного дефекта ПП. Для дефекта № 1 временной интервал составил $t_{d1} = (58...65)$ мкс, отклонение амплитуды $A_1 = 3,1$ дБ; для дефекта № 2: временной интервал составил $t_{d2} = (46...50)$ мкс, отклонение амплитуды $A_2 = 4,2$ дБ; для дефекта № 3: временной интервал составил $t_{d3} = (47...57)$ мкс, отклонение амплитуды $A_3 = 3,7$ дБ; для дефекта № 4: временной интервал составил $t_{d4} = (59...63)$ мкс, отклонение амплитуды $A_4 = 5,2$ дБ; для дефекта № 5: временной интервал составил $t_{d5} = (59...64)$ мкс, отклонение амплитуды $A_5 = 3,2$ дБ.

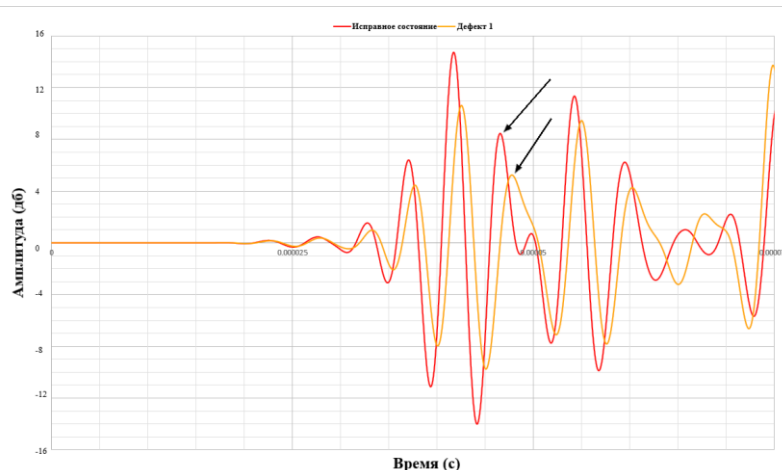


Рисунок 11 – Графики АВХ для ПП с дефектом расслоения № 1
Figure 11 – Graphs of the amplitude-time characteristics of a printed circuit board with a bundle defect No. 1

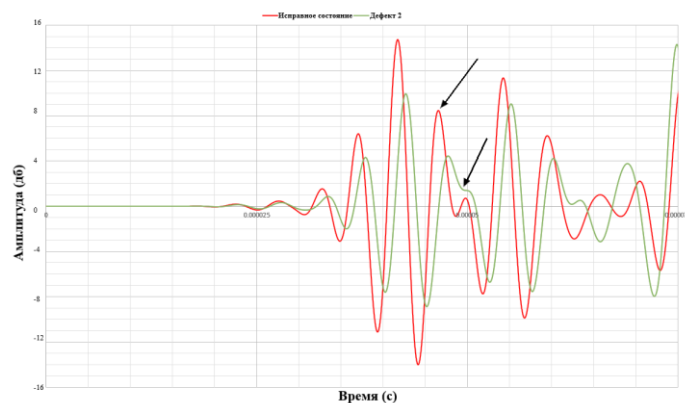


Рисунок 12 – Графики АВХ для ПП с дефектом расслоения № 2
Figure 12 – Graphs of the amplitude-time characteristics of a printed circuit board with a bundle defect No. 2

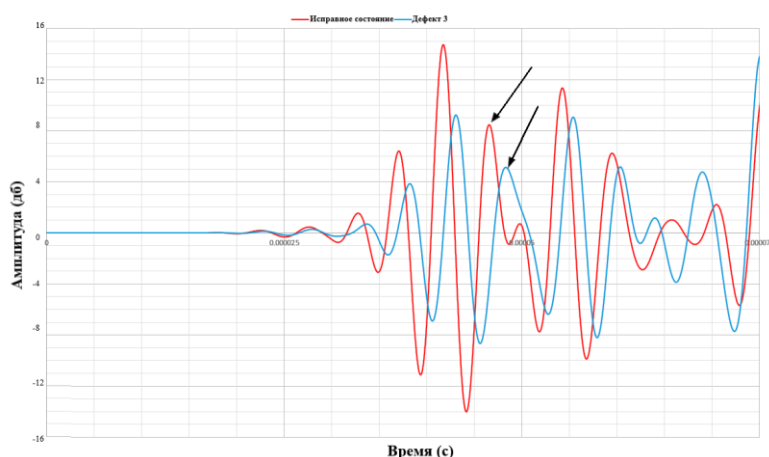


Рисунок 13 – Графики АВХ для ПП с дефектом расслоения № 3
Figure 13 – Graphs of the amplitude-time characteristics of a printed circuit board with a bundle defect No. 3

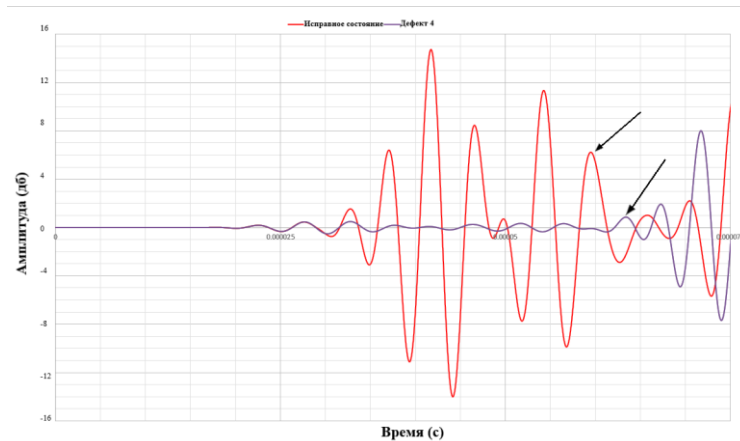


Рисунок 14 – Графики АВХ для ПП с дефектом расслоения № 4
Figure 14 – Graphs of the amplitude-time characteristics of a printed circuit board with a bundle defect No. 4

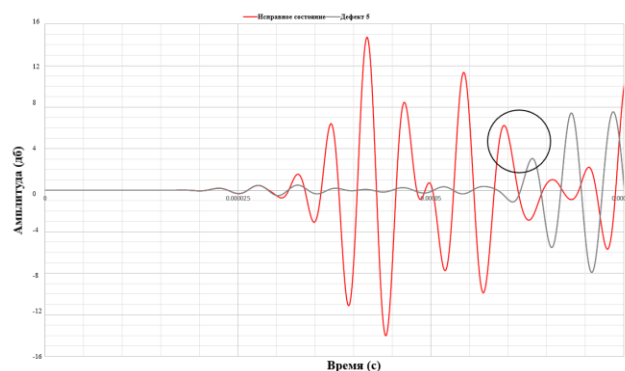


Рисунок 15 – Графики АВХ для ПП с дефектом расслоения № 5
Figure 15 – Graphs of the amplitude-time characteristics of a printed circuit board with a bundle defect No. 5

Таким образом, было установлено, что изменение АВХ акустической волны, по сравнению с образцовым состоянием, свидетельствует о наличии дефекта расслоения в структуре ПП.

Идентификация дефектов печатной платы с помощью искусственной нейронной сети

Для дальнейшего анализа результатов и подготовки данных для обучения искусственной нейронной сети вместо АВХ было решено использовать амплитудно-частотные характеристики (АЧХ), которые обладают большей стабильностью во времени. В качестве инструмента, позволяющего получить АЧХ для всех исследуемых состояний ПП, был применен алгоритм быстрого преобразования Фурье (БПФ).

Применение БПФ позволило получить амплитудно-частотные характеристики ПП для всех исследуемых состояний – исправного и состояний с внесенными дефектами. Графики АЧХ приведены на Рисунке 17. Пиковые значения амплитуд сигналов определяются на уровне 20-21 кГц.

Для формирования интервалов допустимых значений параметров АЧХ был применен метод статистических испытаний Монте-Карло и в соответствии с законом нормального распределения случайных величин получены диапазоны допустимых значений параметров АЧХ для каждого исследуемого состояния ПП [7].

Совокупность полученных АЧХ стала основой базы данных (БД) о состоянии ПП и применялась для обучения искусственной нейронной сети (ИНС), разработанной специально для идентификации состояния печатной платы.

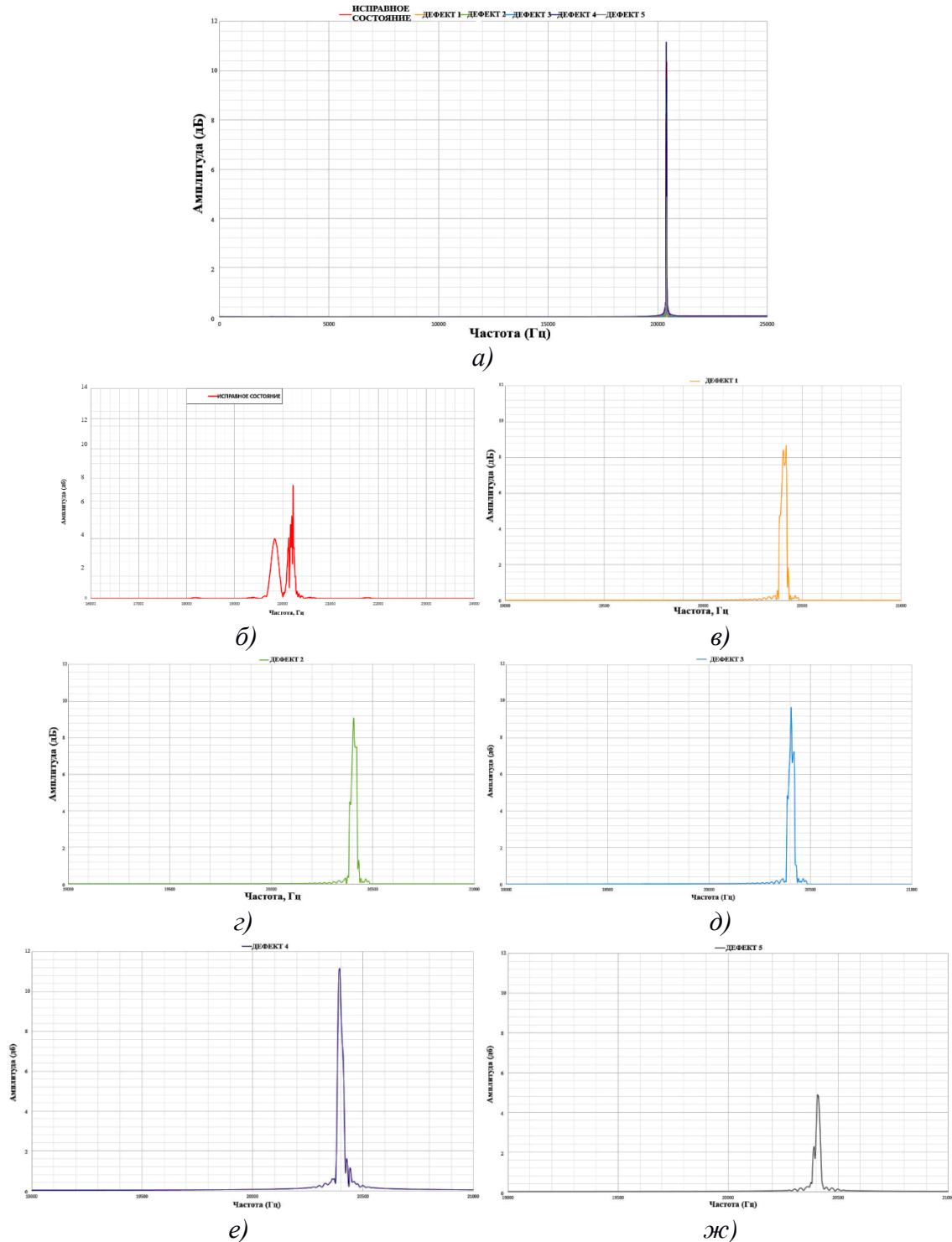


Рисунок 16 – Графики АЧХ ПП в различных исследуемых состояниях: а) обзор всех состояний; б) исправное состояние; в) дефект № 1; г) дефект № 2; д) дефект № 3; е) дефект № 4; ж) дефект № 5

Figure 16 – Graphs of the frequency response of the printed circuit board in various states under study: a) review of all conditions; b) serviceable condition; c) defect No. 1; d) defect No. 2; e) defect No. 3; f) defect No. 4; g) defect No. 5

Для обучения ИНС была выполнена предварительная обработка экспериментальных данных – все АЧХ были преобразованы в массивы численных дискретных значений амплитуды. Размерность каждого массива составила 4200x1000 (4200 отсчетов, 1000 значений частоты для каждого исследуемого состояния ПП с шагом дискретизации $k=5$ кГц). Таким образом, была сформирована БД, а на ее основе – обучающая выборка для ИНС. Размерность обучающего вектора соответствует размерности численного массива АЧХ и составляет [4200x1000]. На Рисунке 17 приведены фрагменты массивов численных значений АЧХ для каждого исследуемого состояния ПП.

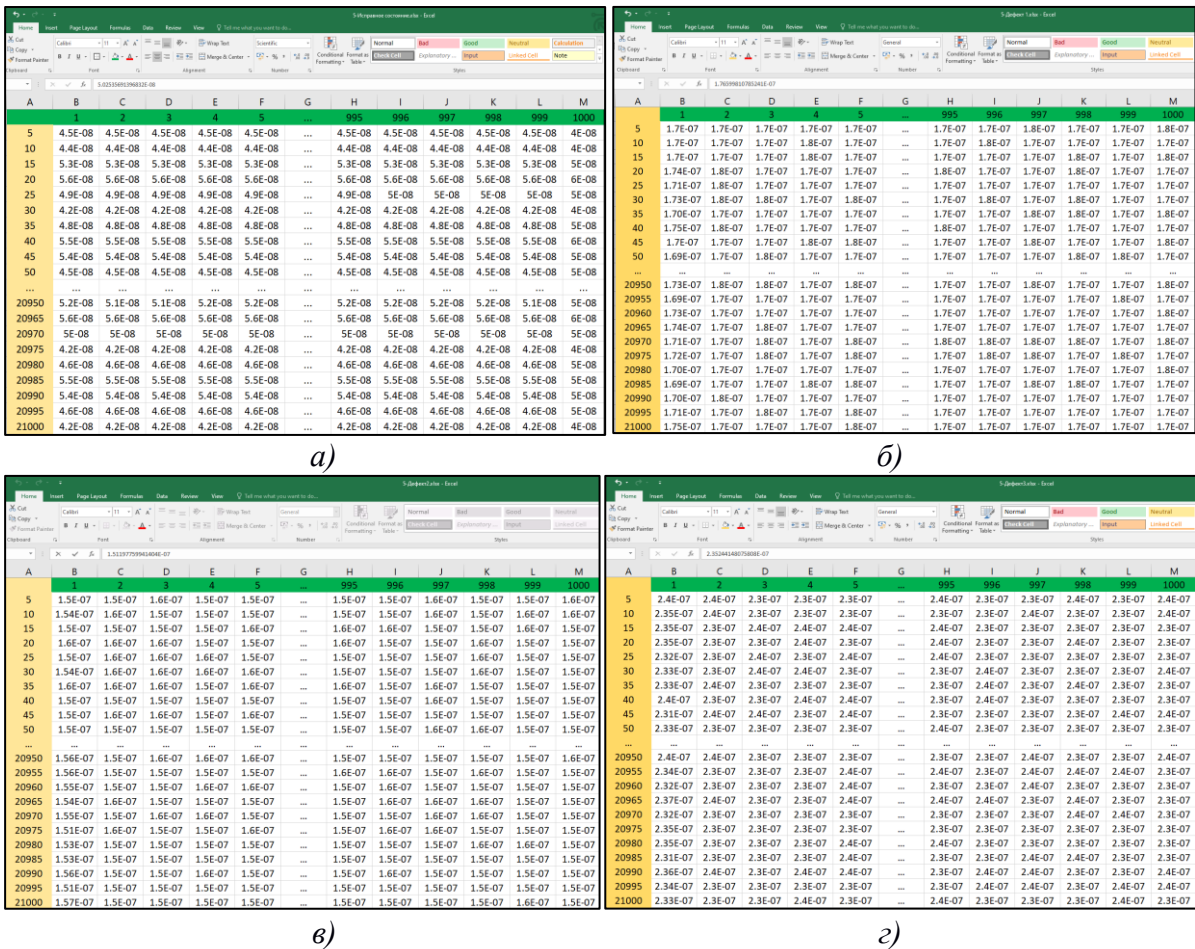


Рисунок 17 – Двумерный массив численных значений: а) для исправного состояния ПП; б) для ПП с дефектом № 1; в) для ПП с дефектом № 2; г) для ПП с дефектом № 3; д) для ПП с дефектом № 4; е) для ПП с дефектом № 5

Figure 17 – Two-dimensional data array: a) for the serviceable condition of the printed circuit board; b) for the printed circuit board with defect No. 1; c) for the printed circuit board with defect No. 2; d) for the printed circuit board with defect No. 3; e) for the printed circuit board with defect No. 4; f) for the printed circuit board with defect No. 5

d)

e)

Рисунок 17 (продолжение)
Figure 17 (extended)

На Рисунке 18 приведена блок-схема алгоритма распознавания дефектов ПП с применением искусственной нейронной сети [8]. В основе ИНС – персептрон с одним входным и одним выходным слоем, скрытых слоев нет (Рисунок 19) [9, 10]. Количество нейронов во входном слое равно $j=4200$ ($x_1, x_2, x_3, x_4, \dots, x_{4200}$). Это количество соответствует шагу дискретизации АЧХ ($k = 5$ Гц). Количество выходных нейронов соответствует числу исследуемых состояний ПП: $i= 6$ ($y_1, y_2, y_3, y_4, \dots, y_6$). Функция активации – ReLu.

Алгоритм обучения ИНС содержит следующие шаги.

1. Назначить начальные значения весовых коэффициентов всех нейронов w_i случайным образом. Назначить ошибку обучения $E=0$ и выбрать скорость обучения сети $\eta > 0$.

2. Предъявить сети входной вектор (образ) X , сформировать сигнал на выходе $F(Y)$. Если выходной сигнал совпадает с правильным ответом, то осуществить переход к шагу 5.

3. Вычислить новые значения весовых коэффициентов по формуле:

$$\Delta w_{ij} = -\eta \cdot [d_i(k) - y_i(k)] \cdot x_j(k), \quad (1)$$

$$w_{ij}(k+1) = w_{ij}(k) + \Delta w_{ij}, \quad (2)$$

где: i – номер нейрона; j – номер входа; η – скорость обучения; x_j – значение входной величины, соответствующей w_j весовому коэффициенту.

Добавление величины x_j в произведение позволяет избежать изменения тех весовых коэффициентов, которым на входе соответствовал ноль (дельта-правило).

4. Вычислить общую ошибку обучения по формуле:

$$E = E + \frac{1}{2} (\|d(k) - y(k)\|)^2. \quad (3)$$

5. Повторить шаги 3,4 для всех входных векторов. Обучать ИНС в течение заданного числа K итераций, пока на ее выходе не появится ожидаемый результат, а ошибка E станет равной нулю.

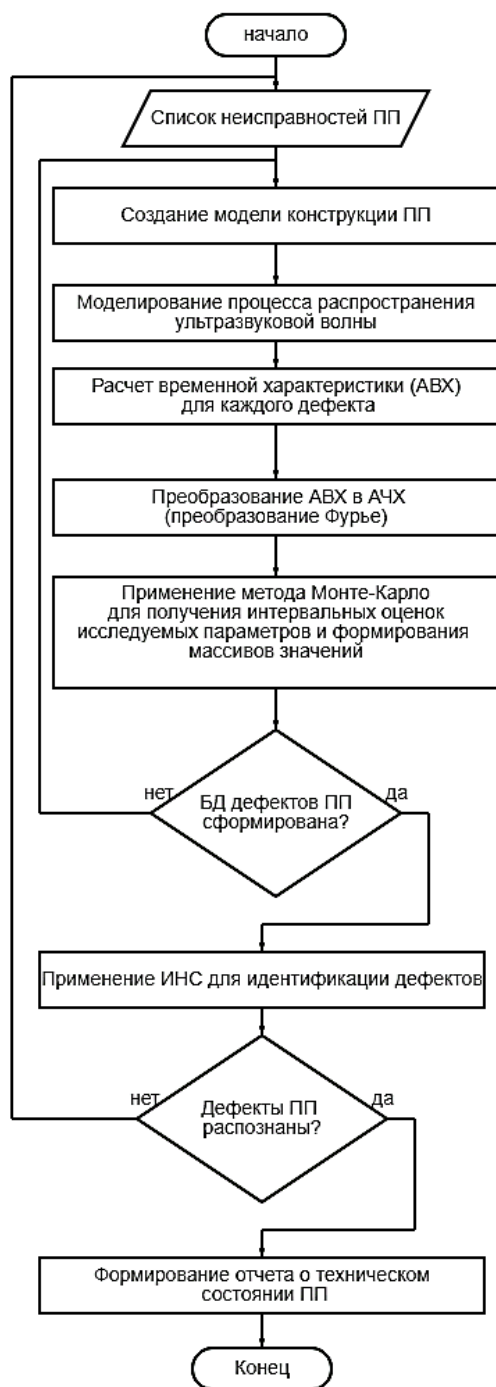


Рисунок 18 – Блок-схема алгоритма идентификации дефектов печатной платы с применением искусственной нейронной сети

Figure 18 – Block diagram of the algorithm for identifying PCB defects using an artificial neural network

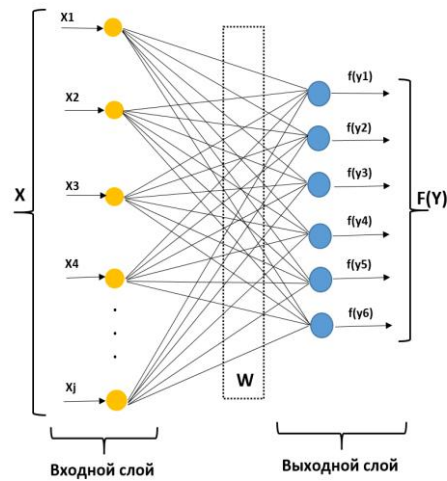


Рисунок 19 – Структура двухслойной ИНС
 Figure 19 – Structure of a two-layer artificial neural network

На Рисунке 20 приведена блок-схема алгоритма обучения созданной ИНС.

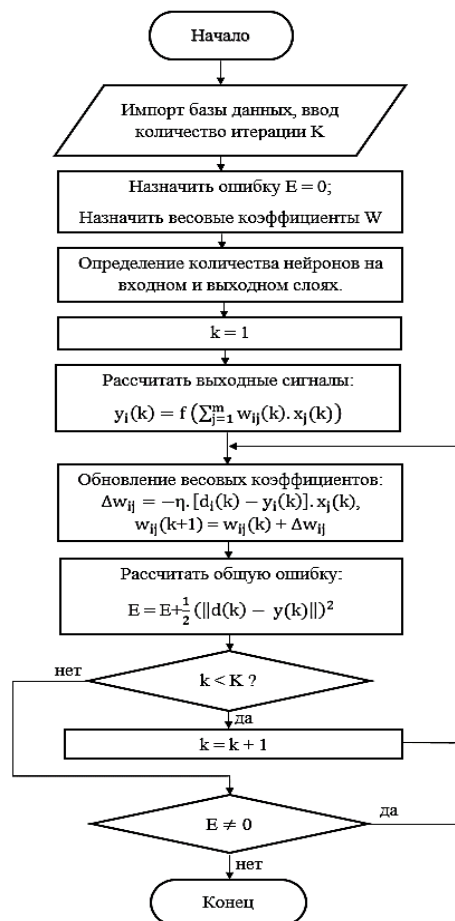


Рисунок 20 – Алгоритм процесса обучения искусственной нейронной сети перцептрона
 Figure 20 – Algorithm of the artificial neural network perceptron learning process

В процессе обучения и тестирования ИНС для определения каждого исследуемого состояния ПП применялся метод горячего кодирования. В этом случае данные кодируются 6-битовой двоичной последовательностью, где идентификатором состояния является номер бита со значением логической «1». В каждой последовательности такой бит только один, что позволяет однозначно закодировать каждое из шести исследуемых состояний. На Рисунке 21 представлены битовые последовательности для кодирования всех состояний ПП.

Состояния печатной платы	Индекс					
	0	1	2	3	4	5
Исправное состояние	1	0	0	0	0	0
Дефект 1	0	1	0	0	0	0
Дефект 2	0	0	1	0	0	0
Дефект 3	0	0	0	1	0	0
Дефект 4	0	0	0	0	1	0
Дефект 5	0	0	0	0	0	1

Рисунок 21 – Кодовые битовые последовательности, сформированные с использованием метода горячего кодирования для всех состояний ПП

Figure 21 – Code bit sequences generated using the hot coding method for all states of the printed circuit board

Графическая интерпретация метода горячего кодирования исследуемых состояний ПП, реализованного на языке Python, представлена на Рисунке 22 [11].

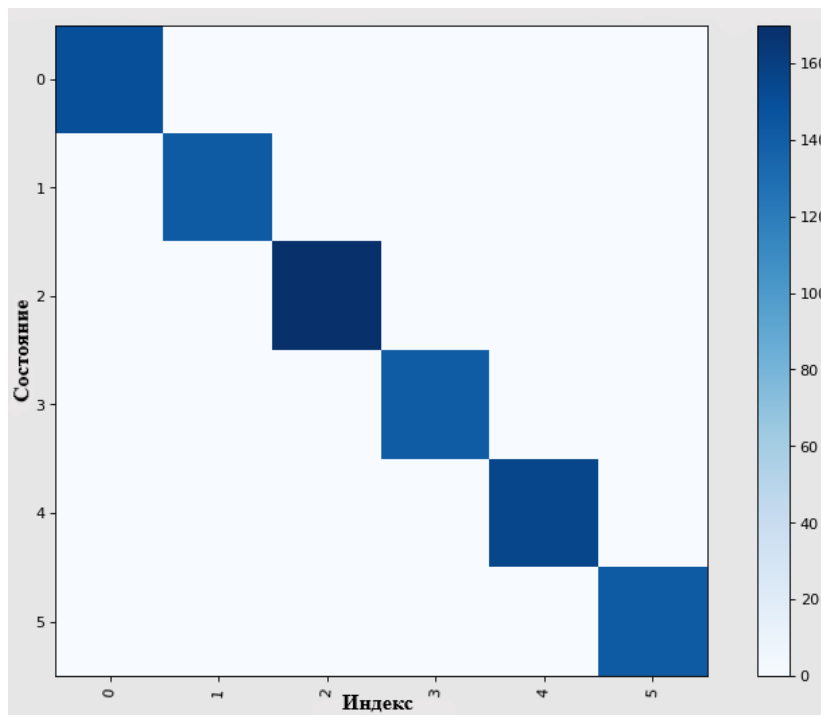


Рисунок 22 – Графическая интерпретация метода горячего кодирования исследуемых состояний ПП, реализованного на языке Python

Figure 22 – Graphical interpretation of the method of hot coding of the states under study of the printed circuit board implemented in Python

Процесс обучения и тестирования созданной с использованием языка программирования Python ИНС представлен на Рисунке 23.

- желаемый результат: [1 2 2 3 3 4 0 4 5 2 3 0 0 5 3 5 3 5 5 2]
- результаты классификации: [1 2 2 3 3 4 0 4 5 2 3 0 0 5 3 5 3 5 5 2]
- точность при тестировании по ИНС: 100 %

```
29/29 [=====] - 0s 2ms/step  
[1 2 2 3 3 4 0 4 5 2 3 0 0 5 3 5 3 5 5 2]  
[1 2 2 3 3 4 0 4 5 2 3 0 0 5 3 5 3 5 5 2]
```

Рисунок 23 – Точность ИНС при тестировании
Figure 23 – Accuracy of an artificial neural network during testing

На Рисунке 24 показаны графики обучения и тестирования ИНС при количестве итераций (эпох обучения) $K=400$. Синий график показывает зависимость точности идентификации состояний ПП при обучении от количества итераций обучения, оранжевый график – та же характеристика при тестировании ИНС.

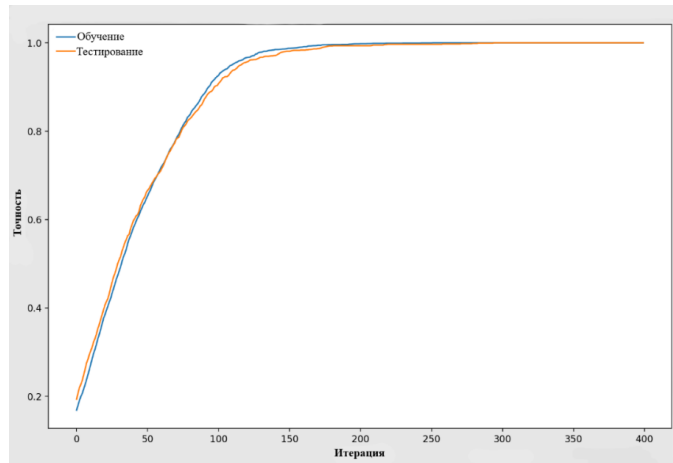


Рисунок 24 – Графики процессов обучения и тестирования ИНС при количестве итераций $K=400$

Figure 24 – Graphs of the learning and testing processes of an artificial neural network with the number of iterations $K=400$

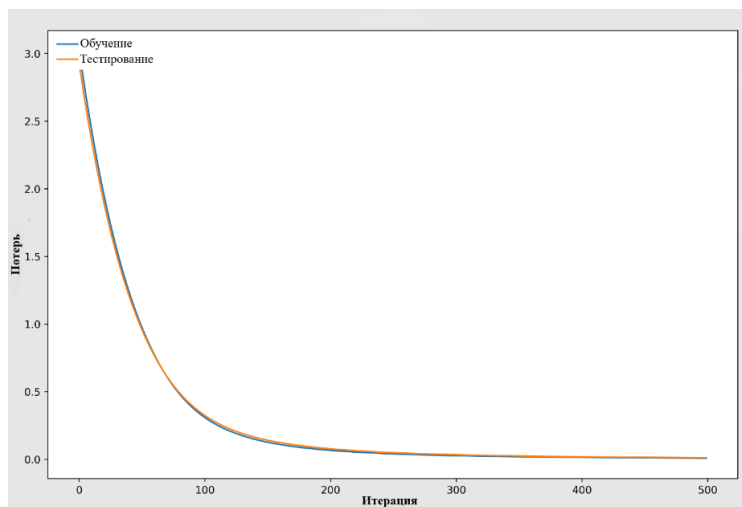


Рисунок 25 – Функция потерь модели ИНС при количестве итераций $K=500$

Figure 25 – Loss function of the artificial neural network model with the number of iterations $K=500$

На Рисунке 26 приведены графики процесса обучения и валидации ИНС при количестве итераций $K=500$. Как видно из графиков, при количестве итераций $K \geq 200$, достоверность классификации ИНС практически достигает 100 %.

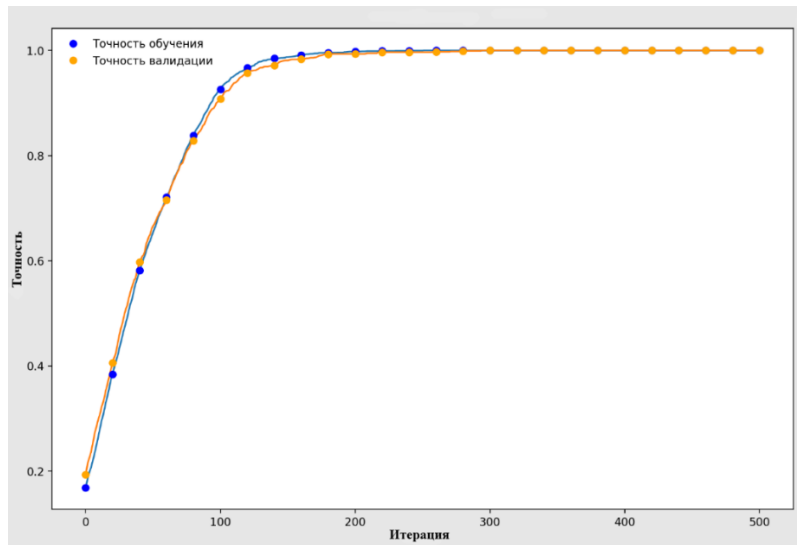


Рисунок 26 – Графики точности обучения и валидации ИНС при количестве итераций $K=500$
Figure 26 – Graphs of the accuracy of training and validation of an artificial neural network with the number of iterations $K=500$

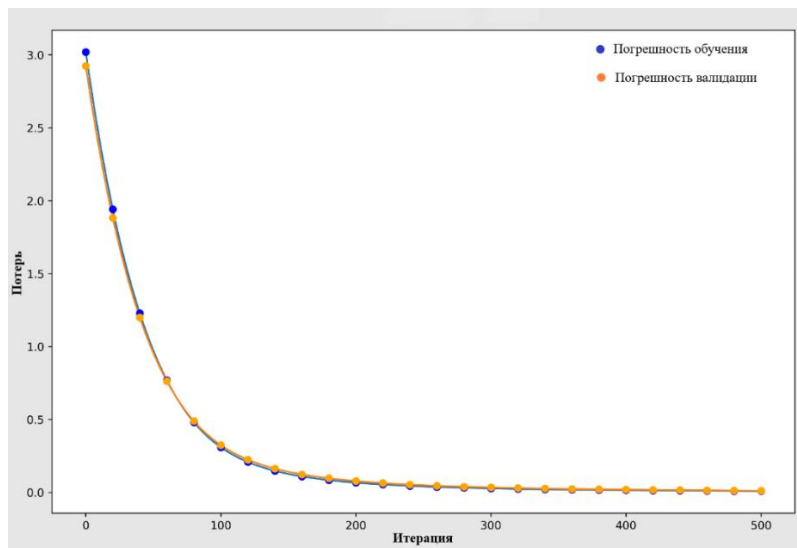


Рисунок 27 – Функция потерь ИНС в процессе обучения и валидации при количестве итераций $K=500$

Figure 27 – Loss function of the neural network model during training and validation with the number of iterations $K=500$

Заключение

Результаты исследования, представленного в данной статье, показали возможность применения ультразвуковых методов диагностики для неразрушающего контроля и выявления скрытых дефектов печатных плат. С помощью программного комплекса ABAQUS были промоделированы различные состояния печатных плат – исправное и с дефектами расслоения. Для каждого состояния фиксировались значения

мощности акустической волны и профиль распространяющегося фронта. Дальнейшая обработка экспериментальных данных позволила создать массивы численных значений частот для каждого состояния. Эти массивы легли в основу базы данных для обучения и тестирования ИНС, которая была создана с использованием языка Python специально для задачи идентификации технического состояния печатной платы. Результаты исследования показали, что сочетание модельного эксперимента с применением искусственных нейронных сетей позволяют повысить достоверность диагностирования и расширить диапазон выявляемых дефектов печатных плат.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Увайсов С.У. Черновверская В.В. Данг Н.В. Туан Н.В. Применение искусственной нейронной сети в задаче тепловой диагностики печатного узла бортового устройства контроля разбега самолета. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2022;10(3). Доступно по: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1218>. DOI: 10.26102/2310-6018/2022.38.3.012.
2. Нуштаев Д.В., Тропкин С.Н. *Abaqus: пособие для начинающих*. М.: ООО «ТЕСИС»; 2010. 43 с.
3. Золочевский А.А., Беккер А.А. *Введение в ABAQUS. Методическое пособие*. Харьков: ТОВ «Бізнес Інвестор Груп»; 2011. 49 с.
4. Манилык Т., Ильин К. *Практическое применение программного комплекса ABAQUS в инженерных задачах. Версия 6.5*. М.: МФТИ, ООО «ТЕСИС»; 2006. 67 с.
5. Дмитриев К.В., Карабутов А.А., Коробов А.И. *Линейные ультразвуковые волны в жидких и твёрдых средах: учебное пособие для физического практикума по акустике*. М.: Физический фак. МГУ; 2017. 114 с.
6. Казанцев В.Ф., Мицкевич А.М., Агранат Б.А. *Физика и техника мощного ультразвука*. М.: Наука; 1970. 689 с.
7. Фам Лэ Куок Хань. *Диагностика радиоэлектронных устройств при испытаниях на ударные воздействия: дисс. ... канд. техн. наук: 05.12.04*. М.: РТУ МИРЭА; 2021. 157 с.
8. Федоров Д.Ю. *Программирование на языке высокого уровня Python: учебное пособие для вузов*. М.: Юрайт; 2021. Доступно по: <https://urait.ru/bcode/478098> (дата обращения: 16.10.2022).
9. Тонни Гэддис. *Начинаем программировать на Python. 5-е издание*. С-Пб.: БХВ; 2022. 880 с.
10. Ростовцев В.С. *Искусственные нейронные сети: учебник*. Киров: Изд-во ВятГУ; 2014. 208 с.
11. Бураков М.В. *Нейронные сети и нейроконтроллеры: учебное пособие*. С-Пб.: ГУАП; 2013. 282 с.

REFERENCES

1. Uvaysov S.U. Chernoverskaya V.V. Dang N.V. Tuan N.V. The use of an artificial neural network in thermal diagnostics of the printed node of the on-board take-off control device of an aircraft. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2022;10(3). Available from: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1218>. DOI: 10.26102/2310-6018/2022.38.3.012 (In Russ.).
2. Nushtaev D.V., Tropkin S.N. *Abaqus: posobie dlya nachinayushchikh*. M.: OOO «TESIS»; 2010. 43 p. (In Russ.).
3. Zolochevskii A.A., Bekker A.A. *Vvedenie v ABAQUS. Metodicheskoe posobie*. Kharkov: TOV "Biznes Investor Grup"; 2011. 49 p. (In Russ.).

4. Manilyk T., Il'in K. *Prakticheskoe primeneniye programmnoy kompleksa ABAQUS v inzhenernykh zadachakh. Versiya 6.5*. M.: MFTI, OOO «TESIS»; 2006. 67 p. (In Russ.).
5. Dmitriev K.V., Karabutov A.A., Korobov A.I. *Lineinye ul'trazvukovye volny v zhidkikh i tverdykh sredakh: uchebnoye posobie dlya fizicheskogo praktikuma po akustike*. M.: Fizicheskii fak. MGU; 2017. 114 p. (In Russ.).
6. Kazantsev V.F., Mitskevich A.M., Agranat B.A. *Fizika i tekhnika moshchnogo ul'trazvuka*. M.: Nauka; 1970. 689 p. (In Russ.).
7. Fam Le Kuok Khan'. *Diagnostika radioelektronnykh ustroystv pri ispytaniyakh na udarnye vozdeystviya: diss. ... kand. tekhn. nauk: 05.12.04*. M.: RTU MIREA; 2021. 157 p. (In Russ.).
8. Fedorov D.Yu. *Programmirovaniye na yazyke vysokogo urovnya Python: uchebnoye posobie dlya vuzov*. M.: Yurait; 2021. Available from: <https://urait.ru/bcode/478098> (accessed on 16.10.2022). (In Russ.).
9. Tonni Geddis. *Nachinaem programmirovat' na Python. 5-e izdanie*. S-Pb.: BKhV; 2022. 880 p. (In Russ.).
10. Rostovtsev V.S. *Iskusstvennyye neironnyye seti: uchebnyk*. Kirov: Izd-vo VyatGU; 2014. 208 p. (In Russ.).
11. Burakov M.V. *Neironnyye seti i neirokontrollery: uchebnoye posobie*. S-Pb.: GUAP; 2013. 282 p. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Увайсов Сайгид Увайсович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой конструирования и производства радиоэлектронных средств Института радиоэлектроники и информатики, МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Российская Федерация.

e-mail: uvajsov@mirea.ru

Scopus Author ID: 55931417100

ResearcherID: H-6746-2015

ORCID: [0000-0003-1943-6819](https://orcid.org/0000-0003-1943-6819)

Saygid Uvaysovich Uvaysov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Design and Production of Radioelectronic Devices of the Institute of Radio Electronics and Computer Science, MIREA – Russian Technological University, Moscow, the Russian Federation.

Черноверская Виктория Владимировна, кандидат технических наук, доцент кафедры конструирования и производства радиоэлектронных средств Института радиоэлектроники и информатики, МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Российская Федерация.

e-mail: chernoverskaya@mirea.ru

ORCID: [0009-0009-6311-7648](https://orcid.org/0009-0009-6311-7648)

Victoria Vladimirovna Chernoverskaya, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Design and Production of Radioelectronic Devices of the Institute of Radio Electronics and Computer Science, MIREA – Russian Technological University, Moscow, the Russian Federation.

Нгуен Конг Дык, аспирант кафедры конструирования и производства радиоэлектронных средств Института радиоэлектроники и информатики, МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Российская Федерация.

e-mail: ngcongduc9x@gmail.com

Nguyen Hong Duc, Postgraduate Student, the Department of Design and Production of Radioelectronic Devices of the Institute of Radio Electronics and Computer Science, MIREA – Russian Technological University, Moscow, the Russian Federation.

Лыу Нгок Тиен, аспирант кафедры конструирования и производства радиоэлектронных средств Института радиоэлектроники и информатики, МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Российская Федерация.

Lu Ngoc Tien, Postgraduate Student, the Department of Design and Production of Radioelectronic Devices of the Institute of Radio Electronics and Computer Science, MIREA – Russian Technological University, Moscow, the Russian Federation.

Статья поступила в редакцию 30.03.2023; одобрена после рецензирования 02.05.2023; принята к публикации 06.06.2023.

The article was submitted 30.03.2023; approved after reviewing 02.05.2023; accepted for publication 06.06.2023.