

DOI:
**НЕЙРОСЕТЕВАЯ ОБРАБОТКА ЭХО-СИГНАЛОВ УЛЬТРАЗВУКОВОГО МЕТОДА
НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ АВИАЦИОННЫХ ИЗДЕЛИЙ**

Амосов О.С., Амосова С.Г.

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Россия, г. Москва
ул. Профсоюзная, д.65
osa18@yandex.ru, amosovasg@yandex.ru*

Иочков И.О.

*Комсомольский-на-Амуре государственный университет, Россия,
г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Ленина, д. 27
iochkov07@gmail.com*

Аннотация: Дана постановка задачи обнаружения и распознавания дефектов заклепочных соединений в авиации. Решение предлагается выполнить с помощью глубокой нейронной сети с рекуррентным слоем LSTM. Рассмотрен пример решения задачи обнаружения и распознавания дефекта в заклепках. Точность результата, полученная при моделировании, составила 100% при двухклассовом и 96,25% при четырехклассовом распознавании по эхо-сигналам ультразвукового дефектоскопа.

Ключевые слова: обнаружение, распознавание образов, глубокая нейронная сеть, дефект, неразрушающий контроль, ультразвуковой метод, эхо-сигнал, заклепочное соединение.

Введение

В находящихся в эксплуатации летательных аппаратах (ЛА) проявляются дефекты соединений в конструкции, что представляет серьезную опасность для жизни людей и угрозу разрушения ЛА. Наиболее уязвимыми являются заклепочные изделия мотогондолы, где их дефекты вызываются вибрацией. Для обнаружения дефектов одним из эффективных является ультразвуковой метод неразрушающего контроля (НК), который может быть реализован с помощью дефектоскопов. При этом проблему представляет отсутствие опытных дефектоскопистов, поскольку определение дефектов производится визуально человеком. Для автоматизации процесса поиска дефектов заклепок нами предлагается для решения задачи распознавания использовать глубокие нейронные сети (НС). Рассмотрим состояние дел по автоматизации этого процесса.

Сегодня активно продолжают развиваться направления, связанные с переходом к передовым цифровым интеллектуальным производственным технологиям, роботизированным системам, созданием систем обработки больших данных с применением искусственного интеллекта и машинного обучения. В любой промышленной отрасли применяются методы неразрушающего контроля, способные исследовать свойства компонентов в помещении или в полевых условиях. Привлекательность методов неразрушающего контроля состоит в том, что они намного дешевле и быстрее по сравнению с традиционными разрушительными испытаниями и не вызывают какого-либо повреждения компонентов конструкции.

Исследования традиционных и современных методов интеллектуального анализа данных от приборов неразрушающего контроля проводятся по всему миру. В [1] рассматривается применение простой однослойной нейронной сети при обнаружении эхо-сигнала ультразвукового дефектоскопа. Анализ работы показал, что однослойной НС для указанной задачи недостаточно, необходимо создание более сложной архитектуры НС и большой обучающей выборки с образцами сигналов.

В [2] для извлечения признаков и классификации трещин, расположенных во втором нижнем слое внахлесточных соединений самолета, при вихретоковом контроле применены вейвлет-преобразование, метод главных компонент и двухслойная нейронная сеть. Проведенные исследования подтвердили возможность применимости нейронных сетей для классификации дефектных заклепок по сигналам вихретокового контроля, но отмечается нестабильная точность метода из-за шумового эффекта и малого набора данных.

В [3] продемонстрирован пример положительного применения НС Кохонена для выявления и распознавания дефектов поверхностного слоя деталей подшипников по изображениям вихретокового контроля. Точность разработанного алгоритма составила свыше 90%. В нашей работе [4] разработан вычислительный метод для решения задачи обнаружения и классификации дефектов по видеоизображениям заклепочных соединений на основе глубоких сверточных НС. Развитие мощностей вычислительной техники обусловило применение интенсивно развивающихся глубоких НС для задач в сфере авиационного машиностроения с целью интеллектуализации методов

неразрушающего контроля, создание автоматизированных рабочих мест, что позволит повысить качество и сократить время выполнения контроля, диагностики и управления производственным процессом изготовления сборочных единиц авиационной техники.

Поскольку в литературе уделено широкое внимание глубоким НС, а рассматриваемая область еще ждет их применения, предлагается в дополнение к органолептическому контролю заклепочных соединений дефектоскописта использование глубокой НС, в частности НС со слоем долгой краткосрочной памяти (англ. Long short-term memory; сеть LSTM) [5]. Это обусловлено тем, что сеть LSTM и ее модификации, в частности и сети на основе управляемых рекуррентных блоков (англ. Gated Recurrent Units, GRU), показали хорошие результаты при классификации, обработке и анализе временных последовательностей [6]. Поэтому в данном исследовании основное внимание уделено сетям LSTM.

1 Проблема выявления, контроля и диагностики дефектов авиационных изделий по данным неразрушающего контроля

Авиационное оборудование и транспортные средства требуют надежных методов проверки, так как дефектные области должны обнаруживаться достаточно рано, чтобы предотвратить катастрофический отказ.

Изготовление самолетов производится по типовым (клепка, сборка, монтаж) и специальным технологическим процессам (термическое, гальваническое, литейное производство, герметизация), разработанных на основании требований конструкторских и нормативных документов. Задачами отдела технического контроля (ОТК) авиационных предприятий являются: контроль соблюдения технологических процессов изготовления деталей и сборочных единиц; обнаружение дефектов производства на ранних этапах. В настоящее время, на отечественном производстве большинство проверок проводятся специалистами ОТК визуально с применением измерительных средств и методов неразрушающего контроля.

Методы НК играют жизненно важную роль в обеспечении качества, оценке структурной целостности, мониторинге состояния изделия в целом. В авиастроительной отрасли активно применяются ультразвуковой, рентгеновский, капиллярный и магнитопорошковый методы НК [7]. Подробно рассмотрим ультразвуковой метод НК для оценки возможности применения интеллектуальных технологий при обработке получаемых образов, изображений и сигналов от дефектоскопа.

Ультразвуковой метод НК основан на распространении ультразвуковых волн через объект контроля и регистрации сигнала прошедшей волны (теневой метод) либо сигнала, отраженного или рассеянного от любой поверхности или дефекта (эхо-импульсный метод). При контроле указанными методами может использоваться совмещенный преобразователь, который выполняет функции излучателя и приемника; раздельно-совмещенный преобразователь; раздельные преобразователи, работающие один на излучение, другой на прием. При контроле в обоих методах могут использоваться промежуточные отражения от одной или нескольких поверхностей объекта контроля [8].

Ультразвуковой метод применяется: 1) при проведении акустического контроля сварных соединений деталей, изготовленных из титановых сплавов в условиях производства и эксплуатации (например, шпангоутов), для выявления дефектов типа «непровар» в сварных соединениях; 2) при неразрушающем контроле в производстве металлических заготовок деталей из плит, профилей, поковок; 3) при акустическом контроле клепаных соединений с потайной головкой для выявления недопустимых дефектов – полностью разрушенного клепанного соединения. Нормы недопустимых дефектов устанавливаются разработчиками в конструкторской документации. Не допускаются дефекты, амплитуда эхо-сигнала от которых превышает амплитуду эхо-сигнала допустимого [9].

Акустический контроль проводят дефектоскописты ручным способом контактным эхо-импульсным методом при помощи наклонного преобразователя и высокочастотного дефектоскопа серии ЕРОСН модели LTC (рис. 1). Имеются уже более новые версии дефектоскопов с расширенными показателями [10]. Контроль объекта производится путём сканирования ультразвуковым преобразователем (УЗП), прижатым к покрытой акустической смазкой поверхности ввода ультразвуковых колебаний. В процессе контроля оценка качества материала объекта ведётся путем наблюдения за появлением на экране дефектоскопа эхо-сигналов.



Рис. 1. Внешний вид дефектоскопа модели LTC

Контроль проводится в две стадии: на чувствительность поиска и на чувствительность оценки для забракования объекта. Поисковый контроль осуществляется при настройке дефектоскопа на чувствительность, повышенную в два раза по сравнению с чувствительностью оценки контрольного образца. Контрольный (настроечный) образец представляет собой конструктивно-подобные контролируемому объекту дефекты. Задачей поискового контроля является исключение возможности пропуска дефектов в изделии. Контроль на чувствительность оценки образца служит для сопоставления, обнаруженных при поисковом контроле, эхо-сигналов от дефектов с эхо-сигналом от контрольного дефекта (браковочного), установленного нормативной документацией и для принятия решений о забраковании данного изделия [8].

Забракованию подлежат объекты, в которых наблюдаются эхо-сигналы от дефектов, амплитуды которых равны или превышают амплитуды эхо-сигналов от искусственных отражателей в образцах, оговоренных в нормативной документации на контроль различных участков данных объектов.

Критериями оценки обнаруженных дефектов, служащими основанием для задержания и забракования объекта могут быть:

- превышение амплитуды эхо-сигнала от одиночного дефекта над амплитудой эхо-сигнала от заданного искусственного отражателя в образце;
- уменьшение амплитуды донного эхо-сигнала ниже установленного уровня, не связанное с геометрией объекта (например, наличие зоны крупнозернистой структуры в объекте);
- наличие нескольких дефектов, амплитуда эхо-сигналов от которых превышает оговоренный уровень браковки;
- превышение эхо-сигнала от дефекта выше уровня структурных шумов материала объекта при контроле его качества на предельной чувствительности дефектоскопа [8].

Объекты, в которых при поисковом контроле не наблюдаются эхо-сигналы с амплитудой равной или превышающей эхо-сигнал от искусственного отражателя в образце, считаются годными.

Регистрацию дефектов осуществляют специалисты ОТК вручную, путём отметки карандашом условных границ дефектов на поверхности детали, с последующим переносом их на дефектограмму. Оценка поверхности контролируемой детали производится по наличию на ультразвуковом дефектоскопе эхо-сигнала, превышающего уровень в зоне строба, а также определяются координаты выявленных дефектов, их протяженность, границы и амплитуды [8].

Ультразвуковой метод НК осуществляется специалистами визуально, при необходимости с применением мерительных инструментов и специальных шаблонов. Такой контроль не только утомителен, но и требует много времени и затрат, в некоторых ситуациях является даже сложной задачей для человека, особенно при работе с мелкими дефектами, едва или вообще невидимыми невооруженным глазом. К преимуществам органолептического метода контроля можно отнести доступность и быстроту, а к недостаткам – субъективизм оценки и человеческий фактор, так как каждый специалист по-разному видит и оценивает дефекты.

Автоматизированная с интеллектуализацией система контроля и диагностики призвана не только снизить стоимость инспекции, но и повысить надежность – снизить риск возникновения человеческих ошибок. Поэтому нейросетевая обработка эхо-сигналов ультразвукового метода неразрушающего контроля авиационных изделий актуальна.

2 Постановка и решение задачи обнаружения и распознавания дефектов по эхо-сигналам от приборов неразрушающего контроля

Рассматривается испытуемое изделие, состояние которого можно классифицировать как исправное или дефектное. Введем конечное множество $\mathbf{B} = \{\beta_1, \dots, \beta_\mu, \dots, \beta_\eta\}$, содержащее η классов состояния контролируемого изделия. Его элементами являются класс состояний, характеризующий исправное состояние изделия и несколько классов неисправных состояний, характеризующих дефектное состояние.

Пусть имеются:

1) множество эхо-сигналов $s \in \mathbf{S}$, поступающих с приборов системы неразрушающего контроля, представленных в виде случайных временных последовательностей $\mathbf{s} \equiv \mathbf{s}_i = [s_1, \dots, s_i]^T$, с имеющимися признаками $x_i, i = \overline{1, n}$, совокупность которых для сигнала s представлена векторными описаниями $\mathbf{x} = [x_1(s), \dots, x_n(s)]$;

2) множество классов состояния изделия $\mathbf{B} = \{\beta_1, \dots, \beta_\mu, \dots, \beta_\eta\}$, η – количество классов.

Априорная информация представлена обучающим множеством $\mathbf{D} = \{(\mathbf{s}^j, \beta^j)\}$, $j = \overline{1, L}$, заданным таблицей, каждая j -я строка которой содержит экземпляр временной последовательности \mathbf{s}^j и соответствующую ему метку класса $\beta^j = \beta_\mu, \mu = \overline{1, \eta}$. Заметим, что обучающее множество характеризует неизвестное отображение $\mathbf{F}^* : \mathbf{S} \rightarrow \mathbf{B}$.

Требуется по имеющимся временным последовательностям эхо-сигналов $\mathbf{s} \equiv \mathbf{s}_i = [s_1, \dots, s_i]^T$, получаемых с приборов неразрушающего контроля, и априорной информации, заданной обучающим множеством $\mathbf{D} = \{(\mathbf{s}^j, \beta^j)\}$, $j = \overline{1, L}$, решить задачу оценки признаков $\tilde{\mathbf{x}}$ сигнала s с помощью отображения $\mathbf{F}_1 : \mathbf{s} \rightarrow \tilde{\mathbf{x}}$ [4, 11]. По $\tilde{\mathbf{x}}$ необходимо обнаружить и классифицировать дефекты с использованием отображения $\mathbf{F}_2 : \tilde{\mathbf{x}} \rightarrow \beta_\mu, \mu = \overline{1, \eta}$ в соответствии с заданным критерием $\mathbf{P}(\tilde{\mathbf{x}})$, минимизирующим вероятность ошибки распознавания.

Решение поставленной задачи распознавания дефектов изделий, а именно поиск отображений $\mathbf{F}_1 : \mathbf{s} \rightarrow \tilde{\mathbf{x}}$ и $\mathbf{F}_2 : \tilde{\mathbf{x}} \rightarrow \beta_\mu, \mu = \overline{1, \eta}$, предлагается осуществить с использованием семейства параметрически заданных функций и процедур машинного обучения, так как имеется практическая возможность составить обучающее множество с помощью реальных эхо-сигналов от приборов НК. При этом реализация параметрически заданных функций может быть осуществлена с использованием синтетических систем [12–14]: нейронных сетей, нечетких систем, вейвлетов и их комбинаций.

3 Пример

Рассмотрим пример обнаружения и распознавания дефектов заклепочных соединений по эхо-сигналам от ультразвукового дефектоскопа Olympus EPOCH LTC. Данный дефектоскоп имеет USB порт для обеспечения связи с персональным компьютером, что позволяет получать данные о поверке (временную последовательность) в формате Excel.

Дефектоскоп настроен на контроль различных участков заклепочных соединений (рис. 2). Для проверки настройки основных параметров дефектоскопа подготовлен настроечный образец клепаных соединений разного типа материалов, который содержит разрушенные заклепки известной длины с дефектами у основания шляпки, в середине и качественные заклепки без дефектов. Заклепки, в которых наблюдаются эхо-сигналы от дефектов, подлежат забракованию.

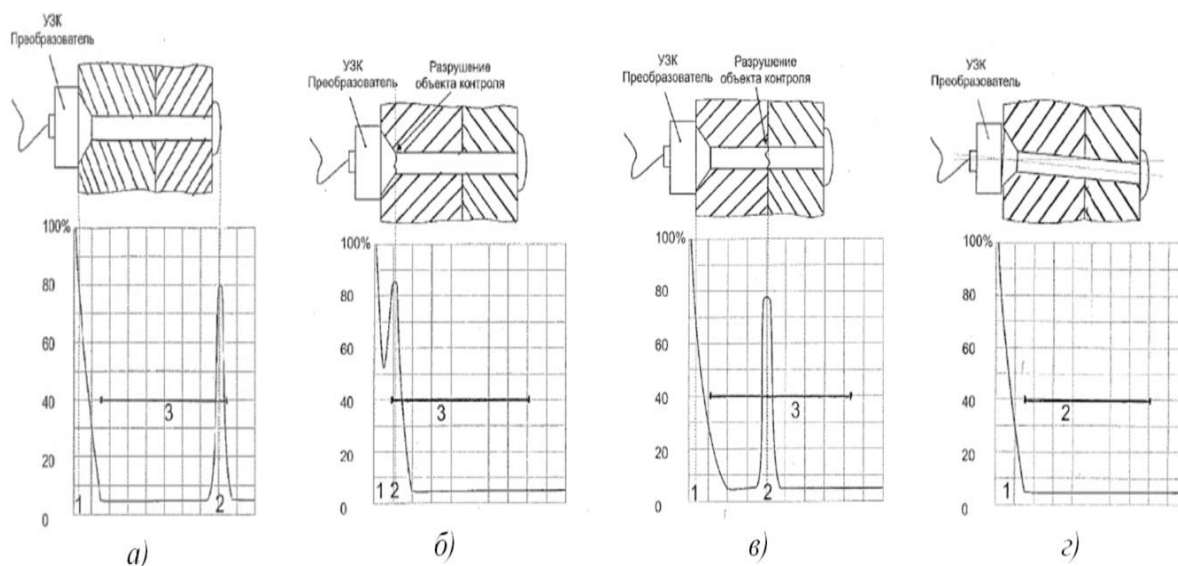


Рис. 2. Изображения на экране дефектоскопа при контроле заклепочных соединений ультразвуковым методом неразрушающего контроля, где 1–зондирующий импульс, 2–эхо-сигнал, 3–строб: а) качественный объект контроля; б) разрушение объекта контроля в начале; в) разрушение объекта контроля в середине; г) деформирование объекта контроля

Для обучения глубокой нейронной сети нами создано обучающее множество (датасет) по настроечному образцу клепаных соединений. Материал для клепания состоит из двух пластин дюралюминия. Заклепки потайного типа, длина 6 мм после клепки. Датасет содержит временные последовательности эхо-сигналов и метки классов. Сформировано 4 класса по 35 представлений сигнала: 1) дефект у основания шляпки заклепки, подрез 50%; 2) дефект в середине длины заклепки, подрез 50%; 3) дефект в середине длины заклепки, подрез 80%; 4) без дефекта (рис. 3). Для обучения использовалось 80% датасета, а для тестирования – 20%.

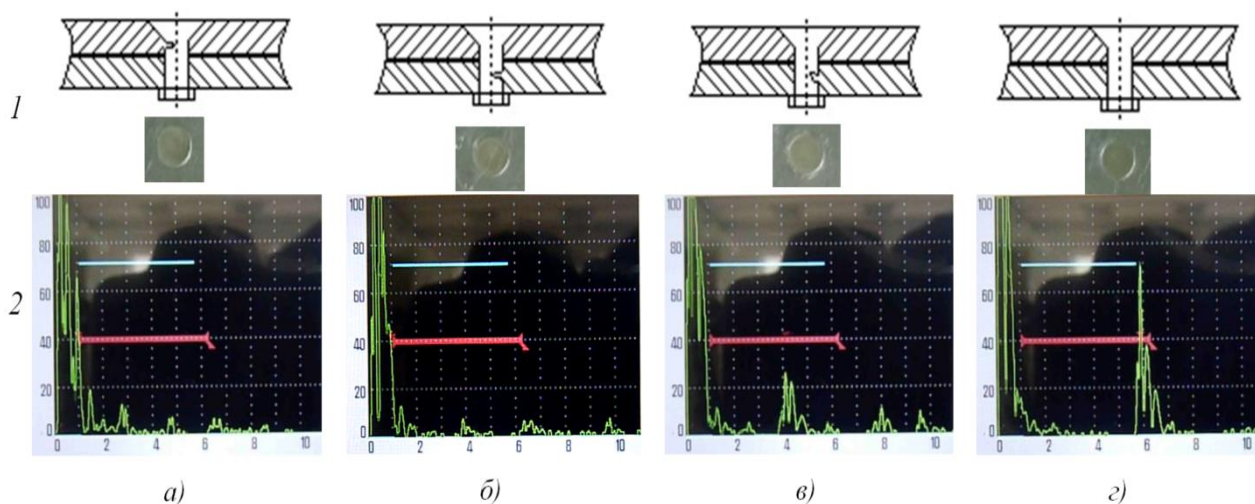


Рис. 3. Иллюстрации заклепок с дефектом и без, где 1 – чертежи и фото заклепок и 2 – скан-экрана ультразвукового дефектоскопа: а) дефект у основания шляпки заклепки, подрез 50%; б) дефект в середине длины заклепки, подрез 50%; в) дефект в середине длины заклепки, подрез 80%; г) без дефекта

Для выделения признаков дефектов заклепочных соединений, их распознавания и классификации предлагается 5-ти слойная глубокая нейронная сеть со слоем LSTM с активационной функцией гиперболический тангенс (tanh) для состояния и сигмоид (sigmoid) для памяти (рис. 4). Слой LSTM выполняет анализ временных последовательностей с хранением долгосрочной зависимости для признаков дефектов. Моделирование проводилось в среде MatLab на ПК ЦПУ Intel Core i5-9600KF, ГПУ GeForce 1080 Ti.

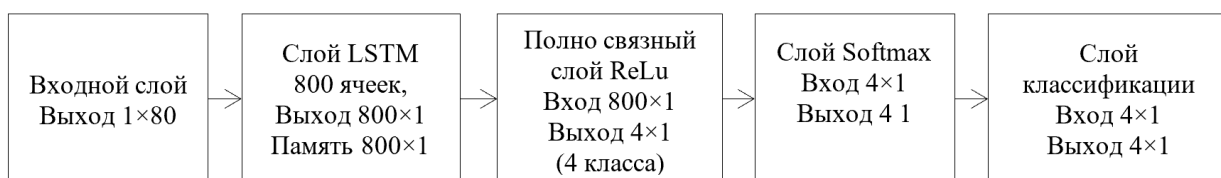


Рис. 4. Архитектура глубокой нейронной сети со слоем LSTM и 4 классами

При двухклассовом распознавании, без дефекта и с дефектом у основания шляпки заклепки с подрезом 50%, обеспечивается точность (Accuracy) 100% при обучении и тестировании глубокой НС с 200 ячейками для слоя LSTM. Скорость обучения – 5 с при 60 эпохах (рис. 5). Скорость тестирования – не более 0,1 с.

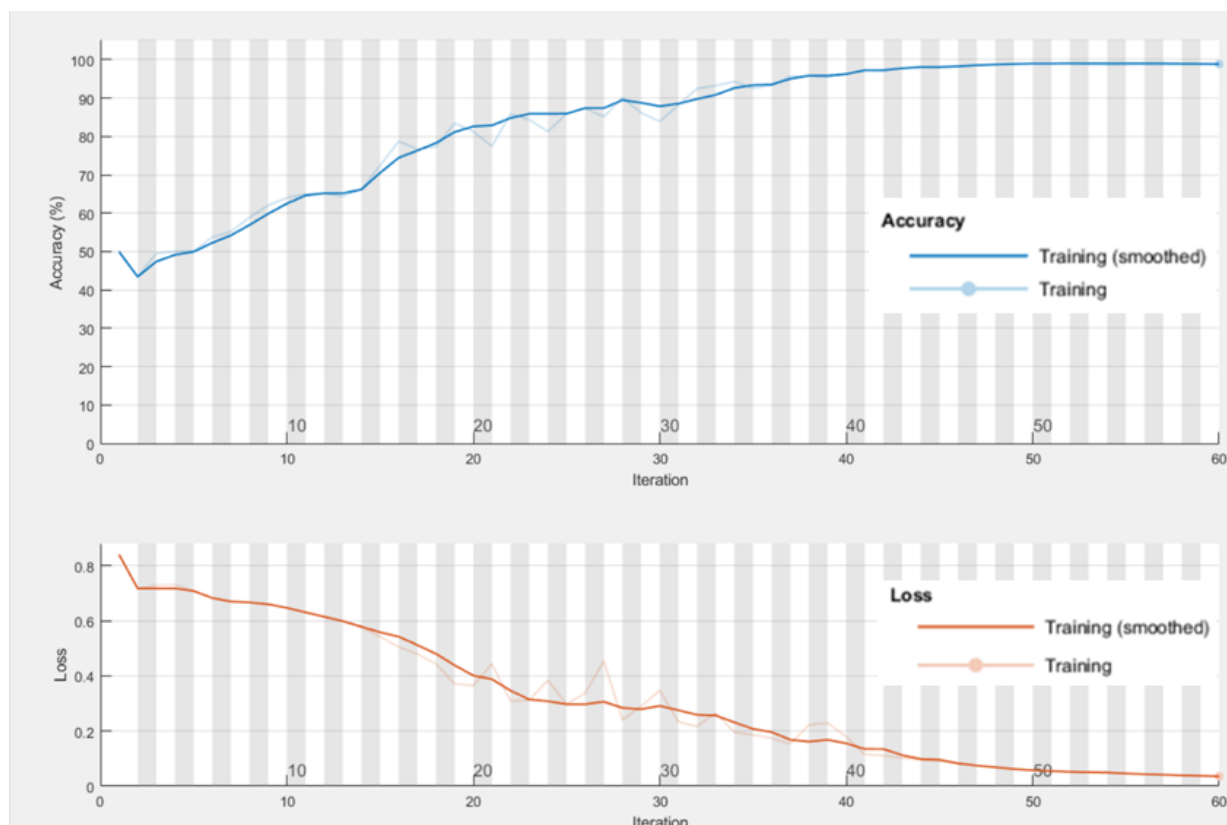


Рис. 5. Пример расчета точности при обучении глубокой НС на 2 классах

При четырехклассовом распознавании дефектов заклепок при тестировании глубокой НС с 800 ячейками для слоя LSTM обеспечивается точность 96,25%. Скорость обучения – 176 с при 1400 эпохах (рис. 6). Скорость тестирования не более 0,3 с.



Рис. 6. Пример расчета точности при обучении глубокой НС на 4 классах

Заключение

Дана постановка задачи обнаружения и распознавания дефектов авиационных сборочных единиц по эхо-сигналам от приборов неразрушающего контроля.

Для решения поставленной задачи при наличии обучающего множества на основе реальных эхо-сигналов от приборов НК предлагается применение семейства параметрически заданных функций и процедур машинного обучения с реализацией примеров на основе глубокой нейронной сети со слоем LSTM.

Точность результата, полученная при моделировании, составила 100% в случае бинарной классификации и 96,25% при четырехклассовом распознавании дефектов заклепочных соединений по сигналам ультразвукового дефектоскопа. Однако, здесь следует подчеркнуть, что и при этой классификации 100% выявляются все дефекты. Ошибки возникают при отнесении дефекта к другому, близкому классу дефекта, а не к исправному состоянию.

Литература

1. Бархатов В.А. Распознавание дефектов с помощью искусственной нейронной сети специального типа // Журнал «Дефектоскопия», №2, 28-39, 2006.
2. Lingvall F., Stepinski T. Automatic detecting and classifying defects during eddy current inspection of riveted lap-joints // NDT&E International. Vol. 33. 2000. – P. 47–55.
3. Игнатьев А.А., Самойлова Е.М. Интеллектуальный анализ и обработка данных о качестве механической обработки деталей // Вестник СГТУ, 2012. № 3(67). – С.194-198.
4. Амосов О.С., Амосова С.Г. Иочков И.О. Вычислительный метод на основе глубоких нейронных сетей для обнаружения и классификации дефектов, возникающих в заклепочных соединениях авиационной техники // Материалы двенадцатой международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем MLSD 2019», Москва, 2019.
5. Hochreiter S., Schmidhuber J. Long short-term memory // Neural Computation. Iss. 9(8). 1997. – P. 1735–1780.
6. Lipton Z.C., Berkowitz J., Elkan Ch. A Critical Review of Recurrent Neural Networks for Sequence Learning. 2015. URL: <https://arxiv.org/pdf/1506.00019.pdf>. (дата обращения: 01.06.2020).
7. Dr. Gary Georgeson. Trends in R&D for Nondestructive Evaluation of In-Service Aircraft // 5th International Symposium on NDT in Aerospace, Singapore. 2013. URL:

- https://www.ndt.net/article/aero2013/content/papers/60_Georgeson_Rev2.pdf. (дата обращения: 01.06.2020).
8. ГОСТ Р ИСО 16810-2016. Неразрушающий контроль. Ультразвуковой контроль. Общие положения (Non-destructive testing. Ultrasonic testing. General principles).
 9. ГОСТ Р ИСО 16823 Неразрушающее испытание. Ультразвуковой контроль. Техника передачи звукового сигнала (ISO 16823:2012 Non-destructive testing - Ultrasonic testing - Transmission technique).
 10. Olympus [электронный ресурс] URL: <https://www.olympus-ims.com/ru/epochlhc/> (дата обращения: 01.06.2020).
 11. *Stepanov O.A., Amosov O.S.* The Comparison of the Monte-Carlo Method and Neural Networks Algorithms in Nonlinear Estimation Problems // В сборнике: IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline) 9th IFAC Workshop "Adaptation and Learning in Control and Signal Processing", ALCOSP'2007. Сер. "9th IFAC Workshop "Adaptation and Learning in Control and Signal Processing", ALCOSP'2007 - Final Program and Abstracts" sponsors: IFAC-TC on Adaptive and Learning Systems, Russian National Committee on Automatic Control (RNKAU), Saint Petersburg Regional Group of RNKAU, (Russ. Acad. Sci.) Inst. Probl. Mech. Eng., Saint Petersburg State University. Saint Petersburg, 2007. С. 392-397.
 12. *Amosov O.S., Baena S.G.* Decomposition Synthetic Approach for Optimum Nonlinear Estimation // IFAC-PapersOnLine. 2015. Vol. 48. № 11. – P. 819-824.
 13. *Амосов О.С., Муллер Н.В.* Исследование временных рядов с применением методов фрактального и вейвлет анализа // Интернет-журнал Науковедение. 2014. № 3 (22). – С. 89.
 14. *Амосов О.С., Амосова Л.Н., Магола Д.С.* Оценивание случайных последовательностей с использованием регрессии и вейвлетов // Информатика и системы управления. 2009. № 3 (21). С. 101-109.