

## ОБРАБОТКА ДАННЫХ В МОБИЛЬНОЙ СИСТЕМЕ ИМИТАЦИИ ИЗОЛИРУЮЩИХ ДЫХАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ НА ОСНОВЕ НЕЙРОСЕТЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

А.Д. ОБУХОВ, канд. техн. наук, Д.Л. ДЕДОВ, канд. техн. наук,  
М.В. ЗВЕРЕВ, магистрант

Тамбовский государственный технический университет, 392000, Тамбов,  
ул. Советская, д. 106, e-mail: obuhov.art@gmail.com

© Обухов А.Д., Дедов Д.Л., Зверев М.В., 2021

Рассматривается задача обработки информации в подсистеме тренажерного комплекса – мобильной системе имитации изолирующих дыхательных аппаратов. Выявлены две проблемы: необходимость определения новых расчетных формул после замены компонентов системы на аналоги и прогнозирования значений при потере пакетов данных в процессе их беспроводной передачи. Для их решения разработаны алгоритмы обработки данных на основе нейросетевых технологий, позволяющие автоматизировать поиск расчетных формул при переходе от эталонных компонентов к аналогам и уменьшить количество потерь пакетов данных за счет прогнозирования отсутствующих значений. Проведенные экспериментальные исследования подтвердили адекватность и эффективность предложенных алгоритмов. Применение нейронных сетей при решении задач обработки информации позволило повысить точность данного процесса.

*Ключевые слова:* нейронные сети, обработка данных, восстановление отсутствующих значений, прогнозирование, тренажерные комплексы, системы имитации, мобильная разработка.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2021-1-92-101**

### ВВЕДЕНИЕ

Для повышения эффективности работы персонала человеко-машинных систем необходима организация качественной и регулярной подготовки. При моделировании пожара и задымления, чрезвычайной ситуации, поломки оборудования и так далее высокую эффективность показывают тренажерные комплексы, функционирующие на основе технологий виртуальной или дополненной реальности [1, 2]. Однако в ряде случаев отображения только визуального представления каких-либо процессов или сценариев недостаточно для полноценной подготовки персонала.

В таких областях, как химическая, горнодобывающая промышленность, актуальной проблемой является выработка у сотрудников правильных навыков дыхания в изолирующих дыхательных аппаратах (ИДА). Достаточный уровень владения ИДА позволит человеку в условиях загрязнения воздуха и наличия в нем ядовитых примесей использовать ИДА в рамках установленного регламента и получать необходимый объем кислорода (на основе проходящих в аппарате химических реакций). Однако высокая стоимость подготовки из-за одноразовости ИДА приводит к необходимости разработки различных систем их имитации [3]. В этом направлении ранее были получены положительные теоретические и практические результаты [4, 5].

В ходе практических испытаний системы имитации ИДА выявлены проблемы в области сбора, анализа и обработки информации, оказывающих влияние на точность работы системы.

Первая проблема связана с наличием нескольких видов датчиков, собирающих информацию о температуре, дифференциальном давлении, а также о пульсе человека, на основе чего осуществляется как регулирование работы системы (увеличение или уменьшение нагрева газодыхательной смеси), так и мониторинг состояния пользователя (путем расчета спирограммы, пневмотахограммы, пульсограммы). При замене датчика на альтернативу от другого производителя либо при разработке новой конструкции датчика, обладающей некоторыми преимуществами (например, большей надежностью или влагостойкостью), приходится заново определять расчетные формулы метрик или вводить поправочные коэффициенты. Это приводит к снижению точности получаемых данных.

Вторая проблема заключается в нестабильности потока получаемой информации от датчиков на сервер или мобильные устройства оператора, осуществляющего контроль выполнения упражнений [6]. Ввиду необходимости активной деятельности в процессе тренировки невозможно осуществить передачу данных проводным способом, что приводит к неизбежной потере отдельных пакетов из-за нестабильности беспроводного сигнала, наличия помех, внешних условий и т.п.

Перспективным вариантом решения данных задач является использование нейросетевых технологий и методов машинного обучения, так как они относятся к классу регрессионных [7, 8] и успешно решаются с помощью нейронных сетей с достаточной точностью [9, 10]. В связи с этим в работе рассматривается разработка алгоритмического и программного обеспечения, направленного на решение данных задач, с использованием нейросетевых технологий, что позволит автоматизировать процессы анализа и обработки информации в мобильной системе имитации ИДА.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Формализуем обозначенные задачи обработки информации в системе имитации ИДА.

Пусть задано множество исходных данных  $X = \{x_n\}$ , собранных с  $K = \{k_q\}$  компонентов системы имитации, т.е. имеет место отображение  $k_q \rightarrow \{x_i^q \mid x_i^q \in X_q, X_q \subseteq X\}$ .

Тогда необходимо реализовать функцию  $FP$  обработки информации, которая при замене компонента  $k_a \in K$  (эталона) на  $k_b \in K$  (аналог) обеспечит максимальное отклонение получаемых от аналога  $X_b$  значений от эталона  $X_a$  не более  $\varepsilon$ :

$$FP: X_a \rightarrow X_b, \quad (1)$$

$$\forall x_i^a \in X_a, x_i^b \in X_b \left( |x_i^a - x_i^b| \leq \varepsilon \right).$$

Для канала передачи данных от компонента  $k_q$ , в которых сигнал поступает с периодом  $\tau$  (т.е. каждые  $\tau$  секунд), необходимо осуществить прогнозирование  $FM$  отсутствующих значений  $\{xm_i^q \mid xm_i^q \in XM_q\}$  на основе собранных данных  $X_q$  с ошибкой не более  $\varepsilon$  при отсутствии новых данных в течение времени  $t > \tau$ :

$$FM: X_q \rightarrow XM_q, \quad (2)$$

$$\left( |xm_i^q - x_i^q| \leq \varepsilon \right).$$

Для решения данных задач и реализации функций  $FP$  и  $FM$  разработаем необходимое алгоритмическое и программное обеспечение, функционирующее на основе нейронных сетей.

### АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ В СИСТЕМЕ ИМИТАЦИИ ИДА НА ОСНОВЕ НЕЙРОСЕТЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Рассмотрим теоретическое обоснование возможности решения задач (1) и (2) с помощью нейронных сетей.

В первой задаче задано непрерывное отображение вектора эталонных значений в вектор значений компонента аналога ( $X_a \rightarrow X_b$ ). Размерность векторов одинакова:  $|X_a| = |X_b|$ . Таким образом, искомая функция  $FP$  решает задачу регрессии. Возможность решения данной задачи с помощью многослойной нейронной сети доказана теоремами Хехт-Нильсена, Колмогорова и Цыбенко [11].

Для решения первой задачи с применением нейросетевых технологий создан следующий алгоритм обработки информации (рис. 1).

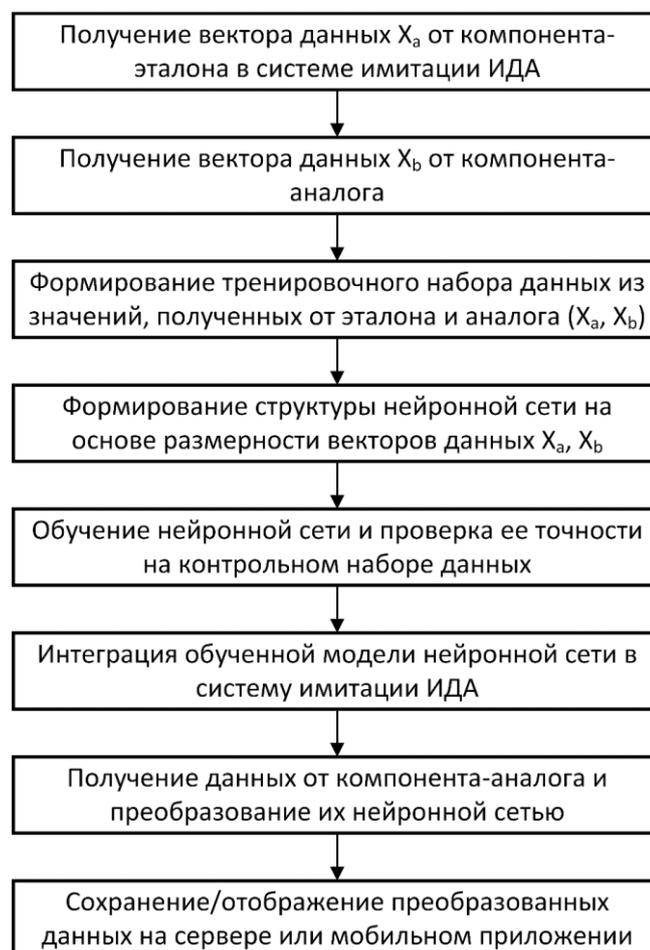


Рис. 1. Алгоритм обработки информации при замене компонентов в системе имитации ИДА

Во второй задаче заданный вектор  $X_{M_q}$  отсутствующих значений имеет одинаковую размерность с векторами поступающих от компонента  $k_q$ :  $|X_{M_q}| = |X_q|$ . Однако данные вектора относятся к различным временным отрезкам:

$t_0 \rightarrow X_q, t_0 + \tau \rightarrow XM_q$ . Таким образом, можно сформировать временной ряд из упорядоченных пар  $\{(X_{q,i}, t_i), i = \overline{0..T}\}$ . Поскольку в момент  $t_0 + \tau$  в систему имитацию ИДА не поступил соответствующий ему новый вектор данных, необходимо осуществить его прогнозирование функцией  $FM$ . Продолжение временного ряда на основе предыдущих значений также относится к классу регрессивных задач и аналогично может быть осуществлено путем использования нейронных сетей за счет непрерывности отображения  $\{(X_{q,j}, t_j), j = i - h..i\} \rightarrow (XM_q, t_i + \tau)$ . В данном отображении для прогнозирования значений в момент времени  $t_i + \tau$  используется множество пар за время от  $t_{i-h}$  до  $t_i$ . Переменная  $h$  отражает количество данных, используемое для формирования прогноза.

Для решения второй задачи с применением нейросетевых технологий разработан алгоритм прогнозирования потерянных значений (рис. 2).

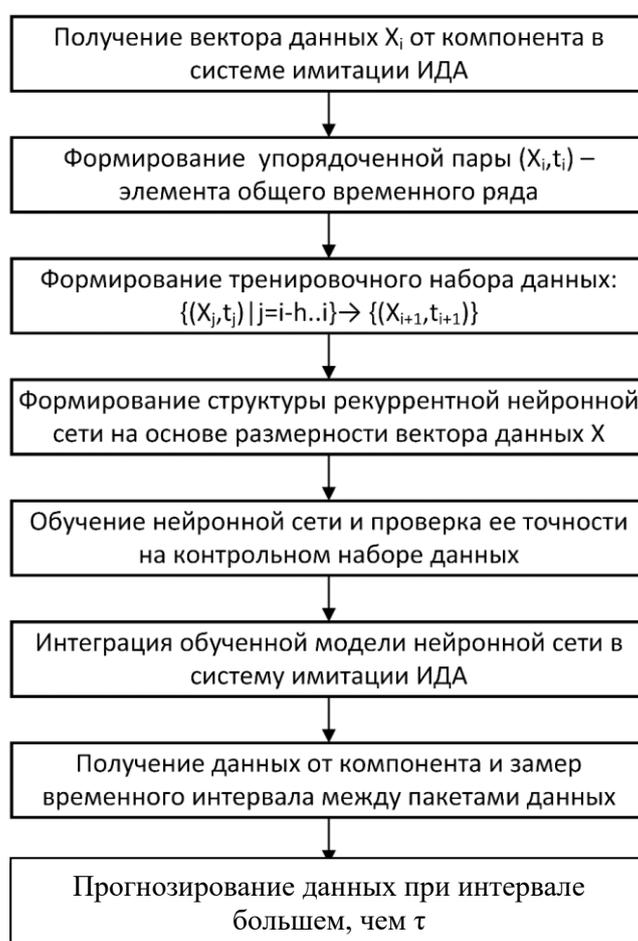


Рис. 2. Алгоритм прогнозирования потерянных значений в системе имитации ИДА

Рассмотренное математическое и алгоритмическое обеспечение позволит осуществить решение задач обработки информации в системе имитации ИДА и повысить точность собираемых данных.

## ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

Для проверки адекватности разработанных алгоритмов и их апробации осуществлены экспериментальные исследования на базе реализованной системы имитации ИДА [4].

Экспериментальная установка включает в себя следующие основные компоненты:

имитатор ИДА (в него входят датчики дифференциального давления, потока, температуры, управляющие механизмы и контроллер для сбора и передачи данных) [12];

мобильный терминал для сбора и мониторинга информации о легочной активности пользователя (реализуется на базе приложения для операционной системе Android [13]);

мобильное устройство для измерения пульса [14];

роутер для создания беспроводной сети.

В рамках первого эксперимента рассматривается задача замены эталонного датчика потока SpiroQuant H на аналог [15]. В качестве аналога выступает спроектированный датчик потока, изготовленный из металла и способный выдержать воздействие различных внешних негативных факторов, таких как влага, температура, которые достаточно быстро приводят эталон в неработоспособное состояние.

Так как установленный в имитатор датчик дифференциального давления настроен на работу с датчиком потока SpiroQuant H, то при установке аналога он отражает некорректные значения. На первом этапе осуществлена аналитическая регрессия значений путем подбора корректирующих коэффициентов, что позволило сократить ошибку.

На втором этапе выполнен сбор данных на эталонном датчике и аналоге (2 045 значений) на установке искусственных легких, при этом исключена вариативность значений (что неизбежно при замере на человеке). Размерность вектора составила одно значение. Обучим простейшую регрессионную нейронную сеть, включающую дополнительно пять скрытых слоев: три Dense, один Dropout для снижения эффекта переобучения и слой BatchNormalization для нормализации. На вход сети подаются значения аналога, на выход – эталонные.

Результаты сравнительного анализа значений эталона, исходных значений датчика-аналога, аналога с корректирующими коэффициентами и, наконец, аналога с нейросетевой обработкой представлены на рис. 3 и 4.

Графики на рис. 4 могут не совпадать, так как при различных методах достаточно трудно синхронизировать начало вдоха и выхода при замере на человеке (ввиду изменяющейся частоты дыхания), однако они позволяют сделать вывод об амплитуде вдоха-выдоха.

Ошибка относительно эталона (1.0) составила:

для аналога без обработки: от 2,28 до 3,12;

для аналога с коэффициентами: от 0,99 до 1,36;

для аналога после нейросетевой обработки: от 0,98 до 1,03.

Таким образом, нейросетевой подход к обработке информации, получаемой с датчика-аналога, показал большую точность в реальных условиях при замере на человеке. Это также подтверждают графики на рис. 3 и 4, где максимальные и минимальные значения датчика-аналога после нейросетевой обработки максимально близки к датчику-эталону.

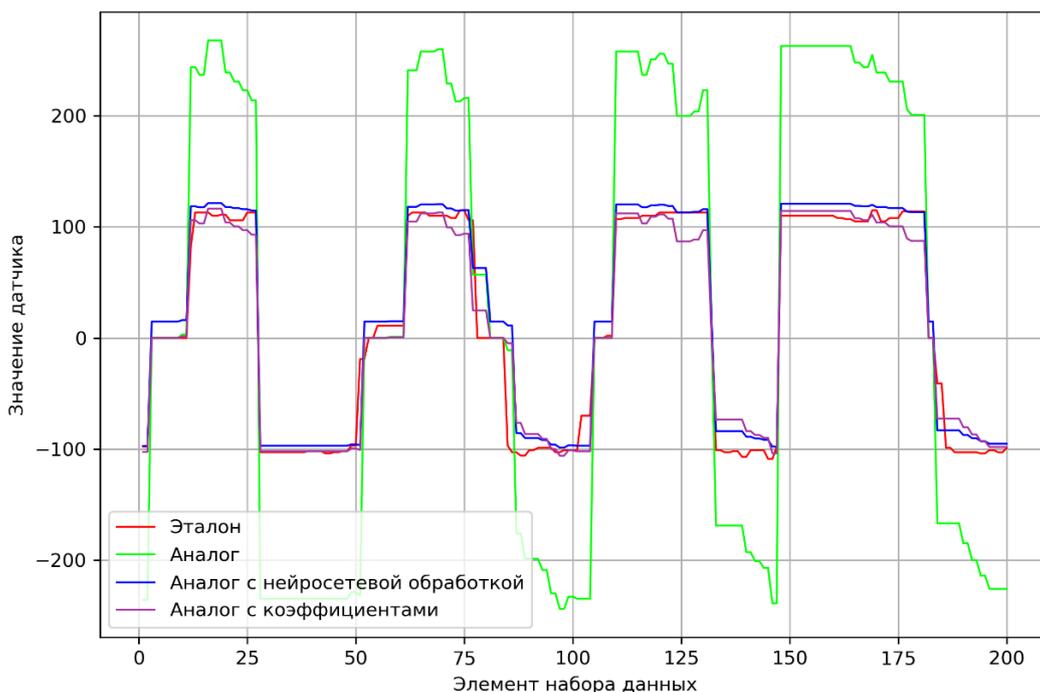


Рис. 3. Сравнение методов обработки данных при замере на искусственных легких

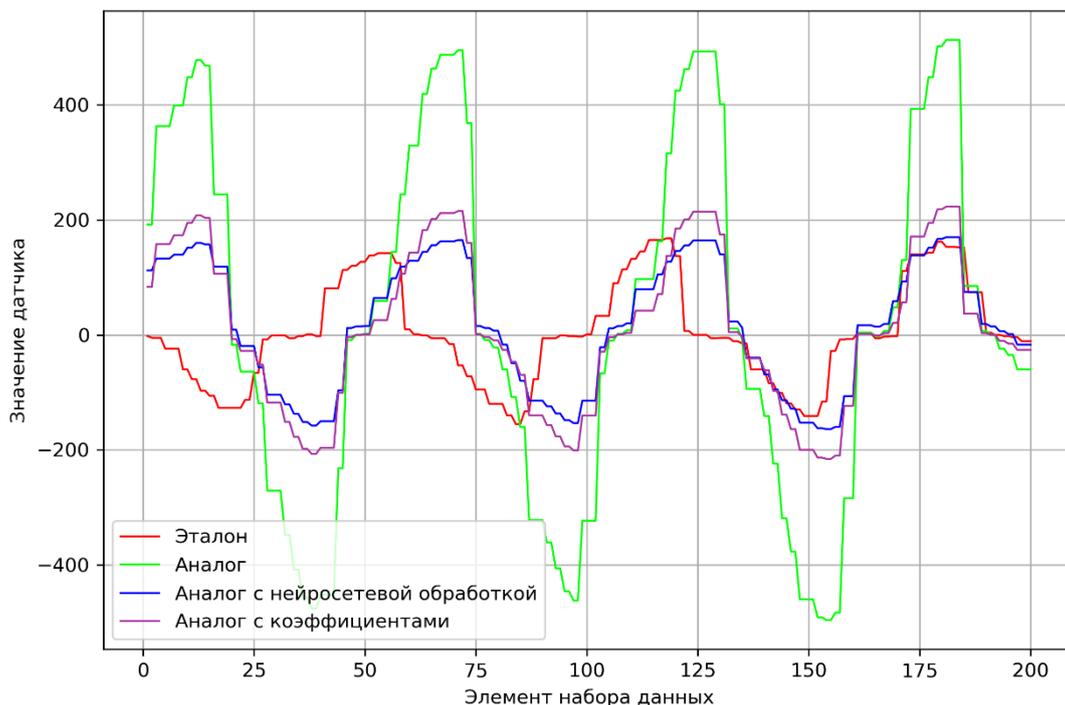


Рис. 4. Сравнение методов обработки данных при замере на легких человека

Второй эксперимент заключается в прогнозировании значений датчика дифференциального давления и, соответственно, значений на графиках спирограмм и пневмотахограмм в случаях нарушения связи с имитатором и потери пакетов.

Для решения данной задачи обучим рекуррентную нейронную сеть, на вход которой поступает вектор размерностью (20, 3), т.е. 20 последних записей по

3 значения (дифференциальное давление, спирограмма, пневмотахограмма), на выход – прогнозируемое значение. В случае, если от имитатора в течение установленного промежутка времени (50 миллисекунд) не поступает нового пакета данных, нейронная сеть формирует возможные значения давления, спирограммы, пневмотахограммы. Обучающий набор включал более 18 000 записей. Точность прогнозирования обученной нейронной сети составила 85 %.

Затем проводились практические испытания по восстановлению потерянных пакетов данных различной размерности (от 8 до 20 замеров). Средняя ошибка нейронной сети при прогнозировании данных составила 14,6 (4,4 %), что можно считать удовлетворительным результатом. На рис. 5 представлен исходный график значений с датчика дифференциального давления и восстановленные точки при потере данных в различные отрезки времени.

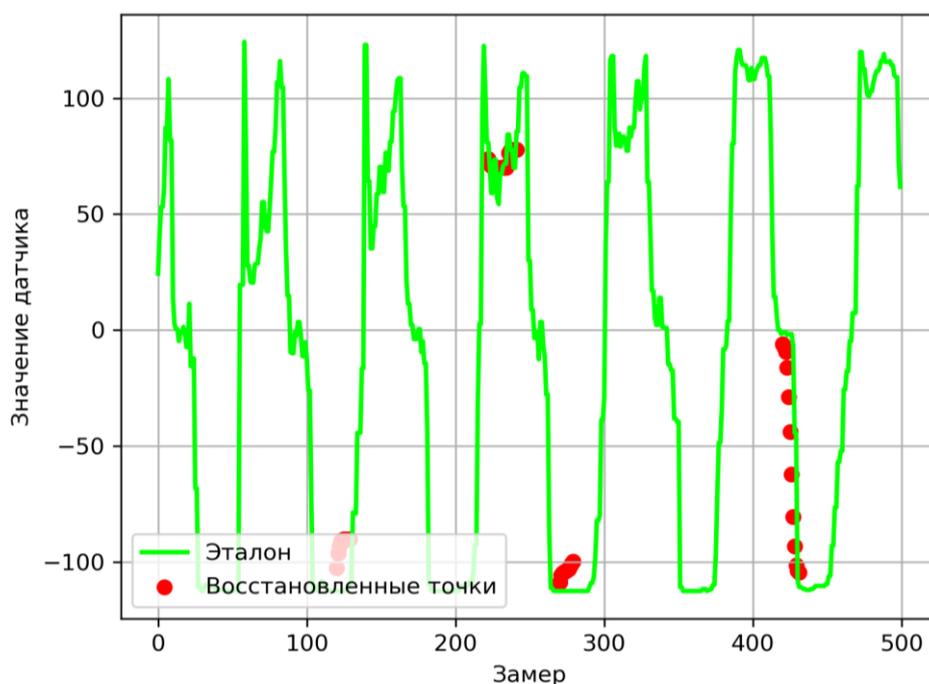


Рис. 5. Экспериментальные исследования по восстановлению потерянных данных

Таким образом, применение алгоритмов на основе нейросетевых технологий для обработки данных в системе имитации ИДА показывает достаточную эффективность и позволяет повысить точность при сборе и анализе информации.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрена задача повышения точности обработки данных в тренажерных комплексах на примере мобильной системы имитации дыхательных аппаратов. В данной предметной области выявлено две актуальные проблемы: определение расчетных формул для компонентов-аналогов при их замене в рамках системы, а также прогнозирование и восстановление потерянных пакетов данных.

Для обеих задач разработано алгоритмическое обеспечение, основанное на применении нейросетевых технологий для автоматизации процессов обработки информации. В ходе практической реализации алгоритмов успешно решены обе задачи. Общая ошибка при замене компонентов улучшена по сравнению с аналитическим

решением (с применением поправочных коэффициентов) с 0,99...1,36 до 0,98...1,03 при эталоне 1,0.

При решении задачи прогнозирования в ходе экспериментального исследования нейронная сеть успешно восстанавливала отсутствующие пакеты данных (вплоть до 20 пакетов) со средней ошибкой 4,4 %.

Полученные результаты подтверждают применимость и эффективность предлагаемых подходов на основе нейросетевых технологий.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-07-00660 с использованием вычислительного оборудования ЦКП «Цифровое машиностроение».

### ЛИТЕРАТУРА

1. Gavish N., Gutiérrez T., Webel S., Rodríguez J., Peveri M., Bockholt U., Tecchia F. Evaluating virtual reality and augmented reality training for industrial maintenance and assembly tasks // *Interactive Learning Environments*. 2015. V. 23. № 6. P. 778–798.

2. Pallavicini F., Argenton L., Toniuzzi N., Aceti L., Mantovani F. Virtual reality applications for stress management training in the military // *Aerospace medicine and human performance*. 2016. V. 87. № 12. P. 1021–1030.

3. Захаров А.Ю., Обухов А.Д., Дедов Д.Л. Постановка задачи структурно-параметрического синтеза системы имитации изолирующих дыхательных аппаратов // *Вестник Тамбовского государственного технического университета*. 2019. № 3. С. 412–422

4. Obukhov A., Dedov D., Siukhin A., Arkhipov A. Mobile Simulator Control System for Isolating Breathing Apparatus of Software-Hardware Platform // *International Journal of Interactive Mobile Technologies (iJIM)*. 2020. V. 14. № 08. P. 32–42.

5. Obukhov A., Dedov D., Arkhipov A. Determination of the design parameters of the simulator breathing apparatus for training complexes // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2020. V. 709. № 2. P. 022090.

6. Kamalesh S., Ganesh Kumar P. Data aggregation in wireless sensor network using SVM-based failure detection and loss recovery // *Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence*. 2017. V. 29. № 1. P. 133–147.

7. Cao W., Wang X., Ming Z., Gao J. A review on neural networks with random weights // *Neurocomputing*. 2018. V. 275. P. 278–287.

8. Bataineh M., Marler T. Neural network for regression problems with reduced training sets // *Neural networks*. 2017. V. 95. P. 1–9.

9. Lahmiri S., Bekiros S. Cryptocurrency forecasting with deep learning chaotic neural networks // *Chaos, Solitons & Fractals*. 2019. V. 118. P. 35–40.

10. Данилов А.Д., Мугатина В.М. Решение задачи оптимизации регрессионного тестирования с использованием нейросетевого подхода // *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2020. Т. 8. № 1. С. 35–36.

11. Pednault E. Transform regression and the kolmogorov superposition theorem // *Proceedings of the 2006 SIAM International Conference on Data Mining. – Society for Industrial and Applied Mathematics*. 2006. P. 35–46.

12. He Z., Chen X., Fang Z., Sheng T., Xia S. Fusion estimation of respiration rate from ECG and PPG signal based on Android platform and wearable watch. *2nd IET International Conference on Biomedical Image and Signal Processing (ICBISP 2017)*, 2017.

13. Drigas A., Angelidakis P. Mobile applications within education: An overview of application paradigms in specific categories // *International Journal of Interactive Mobile Technologies (IJIM)*. 2017. V. 11. № 4. P. 17–29.

14. Agustine L., Muljono I., Angka P.R., Gunadhi A., Lestariningsih D., Weliamto W.A. Heart rate monitoring device for arrhythmia using pulse oximeter sensor based on android // *2018 International Conference on Computer Engineering, Network and Intelligent Multimedia (CENIM)*. IEEE. 2018. P. 106–111.

15. Nagel M.W., Suggett J.A., Mitchell J.P. Method for Recording Inhalation Waveforms from a Valved Holding Chamber and Comparison of Potential Inhalation Techniques on Inspired Volume // *Journal of aerosol medicine and pulmonary drug delivery*. 2019. V. 32. № 3. P. A34.

**Для цитирования:** Обухов А.Д., Дедов Д.Л., Зверев М.В. Обработка данных в мобильной системе имитации изолирующих дыхательных аппаратов на основе нейросетевых технологий // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2021. № 1 (9). С. 92–101.

## **DATA PROCESSING IN A MOBILE SYSTEM OF IMITATION OF ISOLATING RESPIRATORY EQUIPMENT BASED ON NEURAL NETWORK TECHNOLOGIES**

A.D. OBUKHOV, Cand. Sc., D.L. DEDOV, Cand. Sc., M.V. ZVEREV, undergraduate

Tambov State Technical University, 106, st. Soviet, 392000, Tambov,  
Russian Federation, e-mail: obuhov.art@gmail.com

The paper considers the problem of information processing in the subsystem of the training complex – a mobile system for imitation of self-contained breathing apparatus. Two problems have been identified: the need of determine new calculation formulas after replacing the system components with analogs and predicting values in case of loss of data packets during their wireless transmission. To solve them, data processing algorithms have been developed based on neural network technologies, which make it possible to automate search for calculation formulas during the transition from system components to analogs and reduce the number of data packet losses by predicting missing values. Experimental studies have confirmed the adequacy and effectiveness of the proposed algorithms. The use of neural networks in solving information processing problems has improved the accuracy of this process.

*Keywords:* neural networks, data processing, missing values restoration, forecasting, training complexes, simulation systems, mobile development.

### **ACKNOWLEDGMENTS**

The study was carried out with the financial support of the RFBR within the framework of scientific project No. 19-07-00660 using the computing equipment of Center for Collective Use "Digital Engineering".

### **REFERENCES**

1. Gavish N., Gutiérrez T., Webel S., Rodríguez J., Peveri M., Bockholt U., Tecchia F. Evaluating virtual reality and augmented reality training for industrial maintenance and assembly tasks. *Interactive Learning Environments*. 2015. V. 23. No. 6, pp. 778–798.

*Вестник Тверского государственного технического университета.  
Серия «Технические науки». № 1 (9), 2021*

2. Pallavicini F., Argenton L., Toniuzzi N., Aceti L., Mantovani F. Virtual reality applications for stress management training in the military. *Aerospace medicine and human performance*. 2016. V. 87. No. 12, pp. 1021–1030.
3. Zakharov A.Yu., Obukhov A.D., Dedov D.L. Formulation of the problem of structural-parametric synthesis of a system for imitation of self-contained breathing apparatus. *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2019. No. 3, pp. 412–422. (In Russian).
4. Obukhov A., Dedov D., Siukhin A., Arkhipov A. Mobile Simulator Control System for Isolating Breathing Apparatus of Software-Hardware Platform. *International Journal of Interactive Mobile Technologies (iJIM)*. 2020. V. 14. No. 08, pp. 32–42.
5. Obukhov A., Dedov D., Arkhipov A. Determination of the design parameters of the simulator breathing apparatus for training complexes. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2020. V. 709. No. 2, pp. 022090.
6. Kamalesh S., Ganesh Kumar P. Data aggregation in wireless sensor network using SVM-based failure detection and loss recovery. *Journal of ExpErimEntal & thEorEtical artificial intElligEncE*. 2017. V. 29. No. 1, pp. 133–147.
7. Cao W., Wang X., Ming Z., Gao J. A review on neural networks with random weights. *Neurocomputing*. 2018. V. 275, pp. 278–287.
8. Bataineh M., Marler T. Neural network for regression problems with reduced training sets. *Neural networks*. 2017. V. 95, pp. 1–9.
9. Lahmiri S., Bekiros S. Cryptocurrency forecasting with deep learning chaotic neural networks. *Chaos, Solitons & Fractals*. 2019. V. 118, pp. 35–40.
10. Danilov A.D., Mugatina V.M. Solution of the optimization problem for regression testing using a neural network approach. *Modelirovaniye, optimizatsiya i informatsionnyye tekhnologii*. 2020. V. 8. No. 1, pp. 35–36. (In Russian).
11. Pednault E. Transform regression and the kolmogorov superposition theorem. *Proceedings of the 2006 SIAM International Conference on Data Mining. – Society for Industrial and Applied Mathematics*. 2006, pp. 35–46.
12. He Z., Chen X., Fang Z., Sheng T., Xia S. Fusion estimation of respiration rate from ECG and PPG signal based on Android platform and wearable watch. *2nd IET International Conference on Biomedical Image and Signal Processing (ICBISP 2017)*, 2017.
13. Drigas A., Angelidakis P. Mobile applications within education: An overview of application paradigms in specific categories. *International Journal of Interactive Mobile Technologies (iJIM)*. 2017. V. 11. No. 4, pp. 17–29.
14. Agustine L., Muljono I., Angka P.R., Gunadhi A., Lestariningsih D., Weliamto W.A. Heart rate monitoring device for arrhythmia using pulse oximeter sensor based on android. *2018 International Conference on Computer Engineering, Network and Intelligent Multimedia (CENIM)*. IEEE. 2018, pp. 106–111.
15. Nagel M.W., Suggett J.A., Mitchell J.P. Method for recording inhalation waveforms from a valved holding chamber and comparison of potential inhalation techniques on inspired volume. *Journal of aerosol medicine and pulmonary drug delivery*. 2019. V. 32. No. 3. P. A34.

Поступила в редакцию/received: 16.10.2020; после рецензирования/revised: 26.10.2020;  
принята/accepted 05.11.2020