

АНОТАЦІЯ

Романюк О.С. Нейромережеве прогнозування нестационарних послідовностей. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 122 «Комп'ютерні науки» (12 – Інформаційні технології). – Харківський національний університет радіоелектроніки, Міністерство освіти і науки України, Харків, 2021.

Дисертаційну роботу присвячено актуальному завданню створення математичних моделей, методів, алгоритмів та програм, орієнтованих на розв'язання задач прогнозування нестационарних послідовностей, які є складовими сучасних комп'ютерних технологій. У дисертаційній роботі на основі отриманих теоретичних і експериментальних досліджень вирішена задача побудови нейромережевих методів прогнозування нестационарних послідовностей, які на відміну від існуючих, прискорюють процес прогнозування та збільшують його точність в умовах апріорної і поточної невизначеності і наявності завад.

Метою дисертаційної роботи є розробка нейромережевих методів і моделей прогнозування нестационарних послідовностей з підвищеною точністю за наявності апріорної і поточної невизначеності.

Об'єкт дослідження – процеси прогнозування нестационарних часових рядів.

Предмет дослідження – методи та моделі прогнозування нестационарних часових рядів на основі штучних нейронних мереж.

Методи дослідження. В роботі використані методи теорії обчислювального інтелекту, а саме, методи теорії штучних нейронних мереж, що дозволило синтезувати нейромережеві моделі та отримати процедури їх навчання; методи теорії оптимізації, за допомогою яких були синтезовані швидкодіючі процедури навчання; методи робастного оцінювання, на основі яких були синтезовані робастні процедури навчання нейромережевих

моделей; методи імітаційного моделювання, що дозволили підтвердити ефективність отриманих результатів та розробити рекомендації щодо їх практичного використання. Експериментальні дослідження проводилися в лабораторних умовах і на реальних об'єктах.

Наукова новизна дисертаційної роботи полягає в такому:

1. Вперше запропоновано використання для навчання штучної нейронної мережі АДАЛТНИ в задачі оцінювання параметрів, які описуються марківською моделлю першого порядку, регуляризованих алгоритмів Качмажа та Нагумо-Ноди. Визначено умови збіжності та отримано неасимптотичні оцінки точності цих алгоритмів, що дозволяє встановити потенційно можливий виграш від їх використання.

2. Вперше запропоновано використання в задачах прогнозування комбінованого функціоналу, який складається з критерію четвертого ступеня і модульного, та градієнтну процедуру його мінімізації. Досліджено умови збіжності процедури в середньому і середньоквадратичному. Отримано аналітичні оцінки неасимптотичних та асимптотичних значень помилки оцінювання параметрів моделі та точності її ідентифікації, що забезпечило робастність оцінок шуканих параметрів мережі.

3. Отримав подальший розвиток нейромережевий метод прогнозування який, на відміну від існуючих використовує рекурентну форму l -крокової проєкційної процедури навчання, що дозволило підвищити швидкість навчання штучної нейронної мережі.

4. Удосконалено метод вибору оптимальних значень параметрів процедур навчання, що дозволяє забезпечити максимальну швидкість збіжності процедур і їхню стійкість та попередньо оцінити досліднику можливості та ефективність процедур, які використовуються, під час вирішення практичних завдань.

5. Отримав подальший розвиток метод факторизації l -крокових процедур навчання штучних нейронних мереж, що дозволило поліпшити їх обчислювальні властивості та підвищити стійкість.

У дисертаційній роботі проведено аналіз стану проблеми прогнозування. На основі системного підходу проаналізовано існуючі підходи до застосування нейронних мереж для вирішення задачі прогнозування і описані основні типи, які при цьому використовуються, сформульовано мету та задачі дослідження.

Пропонується вирішення комплексу взаємопов'язаних завдань, яке полягає у розробці методів та моделей прогнозування на основі штучних нейронних мереж. Розглянуто питання застосування нейронних мереж для вирішення завдань прогнозування нестационарних часових рядів і описані основні типи штучних нейронних мереж.

Розглянуто багатошаровий перцептрон в якості нейромережевої моделі для прогнозування. Описано процедуру вибору його структури та запропоновано процедуру навчання. Вивчено умови її збіжності та отримано вираз для оптимального значення параметра збіжності, що дозволяє зменшити час навчання мережі.

Запропоновано та досліджено використання для навчання штучної нейронної мережі АДАЛПНИ в заданні оцінювання параметрів, які описуються марківською моделлю першого порядку, регуляризованих алгоритмів Качмажа та Нагумо-Ноди.

З метою отримання робастних оцінок шуканих параметрів штучних нейронних мереж використано комбінований функціонал, що складається з критерію четвертого ступеня та модульного критерію. Досліджено градієнтну процедуру мінімізації функціоналу. Для підвищення швидкості навчання штучних нейронних мереж застосовано рекурентну форму l -крокової проекційної процедури навчання та здійснено її факторизацію. Для забезпечення максимальної швидкості збіжності процедур та їх стійкості досліджено методи вибору оптимальних значень параметрів функціоналів та процедур навчання.

З метою перевірки отриманих теоретичних результатів та розробки рекомендацій щодо практичної реалізації здійснено імітаційне моделювання

нейромережових методів прогнозування нестационарних часових рядів.

На основі запропонованих моделей та методів програмно реалізована нейромережева система прогнозування параметрів технологічних процесів виробництва кальцинованої соди.

Практичне значення отриманих результатів полягає в такому:

- розроблено програмні засоби, які реалізують запропоновані методи побудови і навчання штучних нейронних мереж прямого поширення, що дозволяють автоматизувати процес побудови нейромережових моделей досліджуваних об'єктів, здійснити структурно-параметричний синтез в умовах апріорної і поточної невизначеності;

- проведено експериментальні дослідження властивостей і характеристик розроблених методів, які показали, що запропоновані методи за рахунок використання додаткової інформації про властивості об'єкта і діючих перешкод дозволяють істотно скоротити час побудови моделей, а також забезпечити їх стійкість і робастність;

- синтезовані структури штучних нейронних мереж, їх моделі та процедури навчання можуть бути використані при розробці систем інтелектуального аналізу даних, систем інтелектуального управління об'єктами з безперервними технологічними процесами та прогнозування результатів їх роботи.

Отримані в роботі математичні моделі та методи прогнозування дозволили поліпшити стабільність вихідних параметрів технологічних процесів виробництва кальцинованої соди у Державному науково-дослідному і проектному інституті основної хімії (ДУ «НІОХІМ», м. Харків), про що свідчить акт від 19.11.2020 р. Також результати дисертаційного дослідження використані в освітньому процесі Харківського національного університету радіоелектроніки, зокрема, у навчальних дисциплінах «Нейронні обчислювальні структури», «Інтелектуальний аналіз даних», «Глибоке навчання в технологіях машинного зору» для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти за освітньою програмою «Комп'ютерні

інтелектуальні технології» (акт від 10.01.2021 р.)

Матеріали дисертації повною мірою викладені у 18 публікаціях, з них – 6 статей у фахових періодичних виданнях України з технічних наук, з яких 1 – категорії А (індексується в Scopus), 2 – категорії Б; 2 розділи у колективних монографіях, 1 стаття у інших виданнях, 9 тез доповідей у матеріалах міжнародних наукових конференцій.

Ключові слова: прогнозування, математична модель, критерій втрат, процедура навчання, робастність, нейронна мережа.

Список публікацій здобувача

1. Rudenko O. Analysis of convergence of adaptive single-step algorithms for the identification of non-stationary objects / O. Rudenko, O. Bezsonov, V. Lebediev, A. Romanyuk // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2019. – № 1/4 (97). – Р. 6–14. (Належить до категорії А, входить до міжнародної наукометричної бази Scopus).

2. Руденко О.Г. Робастна ідентифікація об'єктів на основі мінімізації комбінованого функціоналу / О.Г. Руденко О.Г., О.О. Безсонов, Н.М. Сердюк, К.О. Олійник, О.С. Романюк // Системи обробки інформації. – 2020. – №1 (160). – С.80–88 (Належить до категорії Б).

3. Бессонов А.А. Факторизованные алгоритмы обучения персептрона в задаче построения нелинейной модели / А.А. Бессонов, К.О. Олейник, С.А. Романюк, О.Г. Руденко, Н.Н. Сердюк / Бионика интеллекта.-2020. –№1(94). – С. 23-29 (Належить до категорії Б).

4. Руденко О.Г. Критерії вибору персептронної моделі для прогнозування: аналіз та практичні рекомендації щодо їх використання / О.Г. Руденко, О.О. Безсонов, О.Г. Лебедєв, О.С. Романюк // Бионика интеллекта. – 2018. –№ 2 (91). – С.31– 40.

5. Руденко О.Г. Про один алгоритм навчання нейронної мережі в задачі прогнозування часових рядів / О.Г. Руденко, О.О. Безсонов, О.Г. Лебедєв, О.С. Романюк // Бионика интеллекта. – 2018. – №1(90). –С.79–83.

6. Руденко О.Г. Робастна ідентифікація об'єктів за наявністю

негаусівських завад / О.Г. Руденко О.Г., О.О. Безсонов, Н.М. Сердюк, К.О. Олійник, О.С.Романюк // Бионика интеллекта. –2019. – №2(93). – С.7–12.

7. Руденко О.Г. Нейромережеве прогнозування часових рядів на основі багат шарового персептрона / О.Г. Руденко, О.О. Безсонов, О.С. Романюк // Development Management. – 2019. –Vol. 5 – Issue 1. – С.23–34.

8. Олійник К.О. Градієнтні алгоритми навчання згортальних нейронних мереж / К.О. Олійник, О.С. Романюк // Інформаційні технології та системи: монографія / за заг. ред. В. С. Пономаренка. – Харків. : Видавництво «Стиль-іздат», 2020. – С. 37–51.

9. Rudenko O. Analysis of the influence of interference on the statistical properties of estimates of non-stationary parameters / O. Rudenko, A. Romanyk // Інформаційні системи і технології: монографія / за заг. ред. В. С. Пономаренка. – Харків: ФОП Бровін О.В., 2019. – С.97–107.

10. Романюк О.С. Нейроеволюційний підхід до прогнозування нестационарних послідовностей / О.С. Романюк // Збірник матеріалів I Міжнар. наук.-практ. конф. молодих вчених, аспірантів і студентів; «Сучасні інформаційні технології та системи в управлінні». [Електронний ресурс] 19–20 квітня 2018 р. – Київ : КНЕУ, 2018. – С.204 – 205.

11. Руденко О.Г. Прогнозування нестационарних послідовностей за допомогою коеволюціонуючих штучних нейромереж/ О.Г. Руденко, О.С. Романюк // Збірник наукових праць за матеріалами II міжнародної науково-практичної конференції. «Синергетика, мехатроніка, телематика дорожніх машин і систем у навчальному процесі та науці». 29 травня 2018 р. – Харків, ХНАДУ, 2018. – С.159–161.

12. Руденко О.Г. Дослідження особливостей навчання штучних нейронних мереж в задачі прогнозування / О.Г. Руденко, О.С. Романюк // Матеріали восьмої міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління». 26-27 квітня 2018 р., Полтава, Баку, Харків, Жиліна. – 2018. – С. 32.

13. Rudenko O. Time series prediction based on evolving neural network CMAC / O. Rudenko, O. Bezsonov, A. Romanyk // 3-d International Conference on Computer Algebra and Information Technologies. – Odessa, August 20-25, 2018. – P. 49 –51.

14. Руденко О.Г. Про оцінювання нестационарних параметрів, що описуються марківською моделлю / О.Г. Руденко, О.О. Безсонов, О.С. Романюк // Тези доповідей шостої міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми інформатизації». 14 – 16 листопада 2018 р., Черкаси, Баку, Бельско-Бяла, Харків. – 2018. – С.48.

15. Руденко О.Г. Прогнозування часових рядів на основі коеволюційних нейронних мереж / О.Г. Руденко, О.С. Романюк // Тези доповідей міжнародної науково–практичної конференції «Інформаційні технології та системи» 10-11 квітня 2019, Харків. – 2019. С.15-16.

16. Руденко О.Г. Критерії вибору персептронної моделі для прогнозування часових рядів / О.Г. Руденко, О.О. Безсонов, О.С. Романюк // Тези доповідей дев'ятої міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних систем та засобів управління», 11-12 квітня 2019 р., Баку, Харків, Жиліна – 2019. – С.90 – 91.

17. Руденко О.Г. Про вибір математичної моделі для прогнозування часових рядів / О.Г. Руденко, О.О. Безсонов, О.С. Романюк // Матеріали XVII міжнародної науково-практичної конференції «Математичне та програмне забезпечення інтелектуальних систем». (MSSIS-2019) 20-22 листопада 2019 р., Дніпро. – 2019. – С. 221–222.

18. Олейник К.О. Дослідження спрощених алгоритмів навчання штучних нейронних мереж прямого поширення / К.О. Олейник, О.С. Романюк // Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології та системи» 9-10 квітня 2020, Харків :ХНЕУ імені Семена Кузнеця. – 2020. – С. 19.

ABSTRACT

Romaniuk A.S. Neural Network Prediction of Non-Stationary Sequences. - Qualification scientific work as a manuscript copyright.

Thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy in the specialty 122 "Computer Science" (12 - Information Technology). - Kharkiv National University of Radio Electronics, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2021.

The thesis is devoted to the current problem of creating mathematical models, methods, algorithms and programs focused on solving the tasks of predicting non-stationary sequences that are the part of modern computer technology. Based on the theoretical and experimental studies obtained, the thesis solves the problem of constructing neural network methods of non-stationary sequences prediction, which, unlike existing ones, accelerate the prediction process and increase its accuracy under the conditions of a priori and current uncertainty and the presence of interference.

The aim of the thesis is to develop neural network methods and models for predicting non-stationary sequences with improved accuracy under a priori and current uncertainty.

The object of the research is the prediction processes of non-stationary time series.

The subject of the research is the methods and models of non-stationary time series prediction based on artificial neural networks.

Research methods. The paper uses the methods of the computational intelligence theory, namely the methods of the artificial neural networks theory, which made it possible to synthesize neural network models and obtain procedures for their training; methods of optimization theory, by means of which the high-speed training procedures have been synthesized; robust estimation methods, on the basis of which the robust training procedures for neural network models have been synthesized; simulation modeling methods, which made it possible to confirm the

effectiveness of the obtained results and develop recommendations for their practical use. The experimental studies have been carried out under laboratory conditions and on real objects.

The scientific novelty of the thesis is as follows:

1. It has first been proposed to use the regularized algorithms of Kaczmarz and Nagumo-Noda for training the artificial neural network ADALINE for the task of estimating the parameters described by the Markov model of the first order. The convergence conditions have been determined and non-asymptotic estimates of the accuracy of these algorithms have been obtained, which makes it possible to establish the potential gain from their use.

2. The use of a combined functional consisting of a fourth-degree criterion and a modular degree criterion in prediction problems and a gradient procedure for its minimization have been proposed for the first time. The convergence conditions of the procedure in the mean and the RMS have been investigated. The analytical estimates of non-asymptotic and asymptotic values of the model parameter estimation error and accuracy of its identification have been obtained, which ensured the productivity of the estimates of the required network parameters.

3. The neural network prediction method has been further developed, which, unlike the existing ones, uses a recurrent form of l -step projection training procedure, which enabled to increase the training rate of the artificial neural network.

4. The method of choosing the optimal values of the parameters of training procedures has been improved, enabling to provide the maximum rate of convergence of the procedures and their stability and to preliminarily estimate by the researcher the possibility and efficiency of the used procedures when solving practical tasks.

5. The method of factorization of l -step procedures for training artificial neural networks has been further developed, which has improved their computational properties and stability.

The thesis analyzes the state of the prediction problem. Based on a systematic approach, the existing approaches to the application of neural networks for solving

the prediction problem have been analyzed and the main types used have been described, the goal and the objectives of the research have been formulated.

The solution of a complex of interrelated problems has been proposed, which consists in the development of methods and prediction models based on artificial neural networks. The issues of the neural networks application for solving the problems of non-stationary time series prediction have been considered and the main types of artificial neural networks have been described.

A multilayer perceptron has been considered as a neural network model for the prediction. The procedure for selecting its structure has been described and the training procedure has been proposed. The conditions of its convergence have been researched and the expression for the optimal value of the convergence parameter has been obtained, enabling to reduce the network training time.

The use of regularized Kaczmarz and Nagumo-Noda algorithms for training the artificial neural network ADALINE in the task of estimating the parameters that are described by a first-order Markov model, has been proposed and investigated.

In order to obtain robust estimates of the required parameters of artificial neural networks, a combined functional consisting of the fourth-degree criterion and the modular criterion has been used. The gradient procedure of the functional minimization has been studied. The recurrent form of l -step projective training procedure has been applied to increase the training rate of artificial neural networks and its factorization has been carried out.

To ensure the maximum rate of convergence of the procedures and their stability, the methods for selecting the optimal values of the parameters of the functionals and the training procedures have been investigated.

In order to verify the obtained theoretical results and to develop the recommendations for their practical implementation, the simulation of neural network methods of non-stationary time series prediction has been carried out.

Based on the proposed models and methods, the neural network system of the prediction parameters of the technological processes of the soda ash production has been implemented programmatically.

The practical value of the obtained results is as follows:

- the software tools have been developed, which implement the proposed methods of construction and training of the artificial neural networks of direct propagation, enabling to automate the process of designing neural network models of objects under research and to carry out the structural and parametric synthesis in terms of a priori and current uncertainties;

- the experimental studies of the properties and characteristics of the developed methods have been conducted, which have shown that the proposed methods by using additional information concerning the properties of the object and the existing disturbances can significantly reduce the time to build models, as well as ensure their stability and robustness;

- the synthesized structures of the artificial neural networks, their models and training procedures can be used to develop systems of data mining, intelligent control systems of objects with continuous technological processes and predict the results of their work.

The mathematical models and prediction methods obtained in the work have improved the stability of the initial parameters for the technological processes of the soda ash production in the State Research and Design Institute of Basic Chemistry (SI "NIOCHIM", Kharkiv), as evidenced by the act of 19.11.2020, the results of the dissertation research have been used in the educational process of Kharkiv National University of Radio Electronics, particularly in the academic disciplines "Neural Computer Structures", "Intelligent Data Analysis", "Deep Training in Machine Vision Technologies" for the students of the second (master's) level of higher education on the educational program "Computer Intelligent Technologies" (act of 10.01.2021).

The materials of the thesis are fully described in 18 publications, including six articles in the professional periodicals of Ukraine in the technical sciences, including one of A category (indexed in Scopus), two of B category; two sections in collective monographs, one article in other publications, and nine abstracts of reports in the proceedings of international scientific conferences.

Keywords: prediction, mathematical model, loss criterion, training procedure, performance, neural network.

List of the applicant's publications

1. Rudenko O. Analysis of convergence of adaptive single-step algorithms for the identification of non-stationary objects / O. Rudenko, O. Bezsonov, V. Lebediev, A. Romanyk // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2019. – № 1/4 (97). – P. 6–14. (Належить до категорії А, входить до міжнародної наукометричної бази Scopus).

2. Руденко О.Г. Робастна ідентифікація об'єктів на основі мінімізації комбінованого функціоналу / О.Г. Руденко О.Г., О.О. Безсонов, Н.М. Сердюк, К.О. Олійник, О.С. Романюк // Системи обробки інформації. – 2020. – №1 (160). – С.80–88 (Належить до категорії Б).

3. Бессонов А.А. Факторизованные алгоритмы обучения персептрона в задаче построения нелинейной модели / А.А. Бессонов, К.О. Олейник, С.А. Романюк, О.Г. Руденко, Н.Н. Сердюк / Бионика интеллекта.- 2020. –№1(94). – С. 23-29 (Належить до категорії Б).

4. Руденко О.Г. Критерії вибору персептронної моделі для прогнозування: аналіз та практичні рекомендації щодо їх використання / О.Г. Руденко, О.О. Безсонов, О.Г. Лебедєв, О.С. Романюк // Бионика интеллекта. – 2018. –№ 2 (91). – С.31– 40.

5. Руденко О.Г. Про один алгоритм навчання нейронної мережі в задачі прогнозування часових рядів / О.Г. Руденко, О.О. Безсонов, О.Г. Лебедєв, О.С. Романюк // Бионика интеллекта. – 2018. – №1(90). –С.79–83.

6. Руденко О.Г. Робастна ідентифікація об'єктів за наявності негаусівських завад / О.Г. Руденко О.Г., О.О. Безсонов, Н.М. Сердюк, К.О. Олійник, О.С.Романюк // Бионика интеллекта. –2019. – №2(93). – С.7–12.

7. Руденко О.Г. Нейромережеве прогнозування часових рядів на основі багатопарового персептрона / О.Г. Руденко, О.О. Безсонов, О.С. Романюк // Development Management. – 2019. –Vol. 5 – Issue 1. – С.23–34.

8. Олійник К.О. Градієнтні алгоритми навчання згортальних

нейронних мереж / К.О. Олійник, О.С. Романюк // Інформаційні технології та системи: монографія / за заг. ред. В. С. Пономаренка. – Харків. : Видавництво «Стиль-іздат», 2020. – С. 37–51.

9. Rudenko O. Analysis of the influence of interference on the statistical properties of estimates of non-stationary parameters / O. Rudenko, A. Romanyk // Інформаційні системи і технології: монографія / за заг. ред. В. С. Пономаренка. – Харків: ФОП Бровін О.В., 2019. – С.97–107.

10. Романюк О.С. Нейроеволюційний підхід до прогнозування нестационарних послідовностей / О.С. Романюк // Збірник матеріалів І Міжнар. наук.-практ. конф. молодих вчених, аспірантів і студентів; «Сучасні інформаційні технології та системи в управлінні». [Електронний ресурс] 19–20 квітня 2018 р. – Київ : КНЕУ, 2018. – С.204 – 205.

11. Руденко О.Г. Прогнозування нестационарних послідовностей за допомогою коеволюціонуючих штучних нейромереж/ О.Г. Руденко, О.С. Романюк // Збірник наукових праць за матеріалами ІІ міжнародної науково-практичної конференції. «Синергетика, мехатроніка, телематика дорожніх машин і систем у навчальному процесі та науці». 29 травня 2018 р. – Харків, ХНАДУ, 2018. – С.159–161.

12. Руденко О.Г. Дослідження особливостей навчання штучних нейронних мереж в задачі прогнозування / О.Г. Руденко, О.С. Романюк // Матеріали восьмої міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління». 26-27 квітня 2018 р., Полтава, Баку, Харків, Жиліна. – 2018. –С. 32.

13. Rudenko O. Time series prediction based on evolving neural network CMAC / O. Rudenko, O. Bezsonov, A. Romanyk // 3-d International Conference on Computer Algebra and Information Technologies. – Odessa, August 20-25, 2018. – P. 49 –51.

14. Руденко О.Г. Про оцінювання нестационарних параметрів, що описуються марківською моделлю / О.Г. Руденко, О.О. Безсонов, О.С.

Романюк // Тези доповідей шостої міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми інформатизації». 14 – 16 листопада 2018 р., Черкаси, Баку, Бельско-Бяла, Харків. – 2018. – С.48.

15. Руденко О.Г. Прогнозування часових рядів на основі коеволюційних нейронних мереж / О.Г. Руденко, О.С. Романюк // Тези доповідей міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології та системи» 10-11 квітня 2019, Харків. – 2019. С.15-16.

16. Руденко О.Г. Критерії вибору перцептронної моделі для прогнозування часових рядів / О.Г. Руденко, О.О. Безсонов, О.С. Романюк // Тези доповідей дев'ятої міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних систем та засобів управління», 11-12 квітня 2019 р., Баку, Харків, Жиліна – 2019. – С.90 – 91.

17. Руденко О.Г. Про вибір математичної моделі для прогнозування часових рядів / О.Г. Руденко, О.О. Безсонов, О.С. Романюк // Матеріали XVII міжнародної науково-практичної конференції «Математичне та програмне забезпечення інтелектуальних систем». (MSSIS-2019) 20-22 листопада 2019 р., Дніпро. – 2019. – С. 221–222.

18. Олейник К.О. Дослідження спрощених алгоритмів навчання штучних нейронних мереж прямого поширення / К.О. Олейник, О.С. Романюк // Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології та системи» 9-10 квітня 2020, Харків :ХНЕУ імені Семена Кузнеця. – 2020. – С. 19.

О. С. Романюк

