

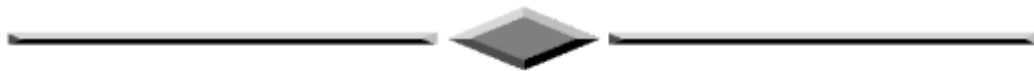
ISSN 2710 – 1681 (ONLINE)

ISSN 2710 – 1673 (PRINT)

National Academy of Sciences of Ukraine
Institute of Artificial Intelligence Problems MES of Ukraine and NAS of Ukraine

ARTIFICIAL INTELLIGENCE

2023 № 2 (96)



Національна академія наук України
Інститут проблем штучного інтелекту МОН України і НАН України

ШТУЧНИЙ ІНТЕЛЕКТ

2023 № 2 (96)



KYIV 2023

INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD

EDITOR-IN-CHIEF

SHEVCHENKO Anatolii Ivanovych,

Doctor of Technical Sciences, Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Ukraine, Professor, Director of the Institute of Artificial Intelligence Problems of the Ministry of Education and Science of Ukraine and the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine, ipai.kiev@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-0095-538X>, Scopus Author ID: 57188766815, ResearcherID: GLT-3967-2022.

ASSOCIATE EDITOR

BILOKOBYLSKY Oleksandr Volodymyrovych,

Doctor of Philosophy, Professor, Head of the Department of the Institute of Artificial Intelligence Problems of the Ministry of Education and Science of Ukraine and the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine, <http://orcid.org/0000-0002-0139-4748>.

EXECUTIVE SECRETARY

VAKULENKO Maksym Olegovich,

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, leading researcher of the Institute of Artificial Intelligence Problems, Kyiv, Ukraine, <http://orcid.org/0000-0003-0772-7950>, Scopus Author ID: 57191078619, ResearcherID: J-6071-2017. maxvakul@gmail.com

EDITORIAL BOARD MEMBERS

BOYUN Vitalii Petrovych,

Doctor of Technical Sciences, Academician of the National Academy of Sciences of Ukraine, Professor, Head of the Department of the V.M. Glushkov Institute of Cybernetics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine, <http://orcid.org/0000-0002-3932-3558>, Scopus Author ID: 6505900928. vboyun@gmail.com

BRYTSKYI Oleksandr Ihorovych,

Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher at the Institute for Information Recording of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine, <http://orcid.org/0000-0003-1081-7543>. ipri@ipri.kiev.ua

GUPAL Anatolii Mykhailovych,

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Ukraine, Professor, Head of the Department of the V.M. Glushkov Institute of Cybernetics of the

National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine, <http://orcid.org/0000-0003-2011-4040>, Scopus Author ID: 15750518500. gupalanatol@gmail.com

ZADIRAKA Valerii Kostiantynovych,

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Academician of the National Academy of Sciences of Ukraine, Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Ukraine, Professor, Head of the Department of Numerical Analysis Optimization of the V.M. Glushkov Institute of Cybernetics, Deputy Academician-Secretary of the Department of Informatics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine, <http://orcid.org/0000-0001-9628-0454>, Scopus Author ID: 14062655100. zvk140@ukr.net

KISELYOVA Olena Mykhailivna,

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Ukraine, Professor, Academician of the Academy of Sciences of the Higher School of Ukraine, Dean of the Faculty of Applied Mathematics, Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro, Ukraine, <http://orcid.org/0000-0003-4303-1707>, Scopus Author ID: 7103102844. Kiseleva47@ukr.net

KONDRATENKO Yurii Panteleiovych,

Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine, <http://orcid.org/0000-0001-7736-883X>, Scopus Author ID: 6602324472, Researcher ID: T-5296-2017. yuriy.kondratenko@chmnu.edu.ua

KRAK Yurii Vasyliovych,

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Ukraine, Professor, Head of the Department of Taras Shevchenko National University of Kyiv, Ukraine, <http://orcid.org/0000-0002-8043-0785>, Scopus Author ID: 6602577533, ResearcherID: ABC-2649-2021. yuri.krak@gmail.com

KUZNETSOV Mykola Yuriiiovych,

Doctor of Technical Sciences, Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Ukraine, Professor, Head of the Department of the V.M. Glushkov Institute of Cybernetics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine, <http://orcid.org/0000-0002-8447-7863>, Scopus Author ID: 8982745600, ResearcherID: AAG-8807-2019. Kuznetsov2016@icloud.com

PALAGIN Oleksandr Vasylovych,

Doctor of Technical Sciences, Academician of the National Academy of Sciences of Ukraine, Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Ukraine, Professor, Deputy Director of the V.M. Glushkov Institute of Cybernetics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine, <http://orcid.org/0000-0003-3223-1391>, Scopus Author ID: 8251028900. Palagin_a@ukr.net

PANKRATOVA Nataliia Dmytrivna,

Doctor of Technical Sciences, Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Ukraine, Deputy Director of Research, Educational and Research Complex Institute for Applied Systems Analysis of the National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine, <http://orcid.org/0000-0002-6372-5813>, Scopus Author ID: 7004316033, Researcher ID: E-7148-2018. natalidmp@gmail.com

PEPELYAYEV Volodymyr Anatoliiovych,

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, Head of the Department of the V.M. Glushkov Institute of Cybernetics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine, <http://orcid.org/0000-0002-5936-7830>, Scopus Author ID: 8967548400. pepelaev@yahoo.com

RAMAZANOV Sultan Kurbanovych,

Doctor of Economics, Professor, Head of the Department of Kyiv National Economic University named after Vadym Hetman, Kyiv, Ukraine, <http://orcid.org/0000-0002-8847-6200>, Scopus Author ID: 57210346169, Researcher ID: AAN-2236-2020. sramazanov@i.ua

SUBBOTIN Serhii Oleksandrovych,

Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Zaporizhia National Technical University, Zaporizhia, Ukraine, <http://orcid.org/0000-0001-5814-8268>, Scopus Author ID: 7006531104, Researcher ID: K-4862-2017. Subbotin.csit@gmail.com

STETSYUK Petro Ivanovych,

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, Head of the Department of the V.M. Glushkov Institute of Cybernetics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine, <http://orcid.org/0000-0003-4036-2543>, Scopus Author ID: 12785999500. stetsyukp@gmail.com

TERESHCHENKO Vasyl Mykolaiovych,

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of the Department of Taras Shevchenko National University of Kyiv, Ukraine, <http://orcid.org/0000-0001-7639-2969>, Scopus Author ID: 35319035700. V_ter@ukr.net

KHIMICH Oleksandr Mykolaiovych,

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Ukraine, Professor, Academician-Secretary of the Informatics Department of the National Academy of Sciences of Ukraine, Deputy Director of the V.M. Glushkov Institute of Cybernetics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine, <http://orcid.org/0000-0002-8103-4223>, Scopus Author ID: 57209683749. khimich505@gmail.com

CHERTOV Oleh Romanovych,

Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of the National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine, <http://orcid.org/0000-0003-0087-1028>, Scopus Author ID: 57206489823, Researcher ID: J-8282-2012. chertov@i.ua

CHETVERIKOV Gryhorii Gryhorovych,

Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine, <http://orcid.org/0000-0001-5293-5842>, Scopus Author ID: 55386924000. chetvergg@gmail.com

FOREIGN MEMBERS OF THE EDITORIAL BOARD

AMJADIAN Ehsan,

Doctor of Philosophy, Professor, Director of AI & Technology - Royal Bank of Canada, Toronto, Ontario, Canada, <http://orcid.org/0000-0002-4400-6717>, Scopus Author ID: 57195446822. Ehsan_Amjadian@carleton.ca

CEBERIO Martine,

Ph.D, Professor, AT&T Fellow in Information Technology. Department of Computer Science, University of Texas at El Paso (El Paso, TX 79968, USA). Chair of UTEP's Graduate Council. UTEP Provost Faculty Fellow for DEI. UTEP Distinguished Teaching Professor. Member of the UT System Academy of Distinguished Teachers. <http://orcid.org/0000-0001-5680-1155> Scopus Author ID: 55332856800 mceberio@utep.edu

VALENTI Vincenzo,

Doctor of Medical Sciences, Professor, Department of Integrated Medicine and Biophysics «Giuseppe Martinez» Federiciana Università Popolare Clinic of Integrative Medicine and Biophysics, Florence, Italy. vinvalenzi@gmail.com

VUYCYK Waldemar,

Doctor of Technical Sciences, Professor, Director of the Institute of Electronics and Information Technologies of the Lublin University of Technology, Lublin, Poland, <http://orcid.org/0000-0002-6473-9627>, Scopus Author ID: 7005121594, Researcher ID: F-2330-2010. Waldemar.Wojcik@pollub.pl

SIEGEL Melanie,

Doctor of Technical Sciences, Professor, University of Applied Sciences (Computer Linguistics), Darmstadt, Germany, <http://orcid.org/0000-0002-3517-8488>, Scopus Author ID: 56808730600. melanie.siegel@h-da.de

KALIMOLDAYEV Maksat Nuradylovych,

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Academician of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Corresponding Member of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Professor, General Director of the Institute of Information and Computational Technologies of the Ministry of Education and Science, Almaty, Kazakhstan, <http://orcid.org/0000-0003-0025-8880>, Scopus Author ID: 56153126500, Researcher ID: ABE-8607-2021. mnk@ipic.kz

KATSPZHYK Yanush Oleksandrovych,

Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician, Head of the Laboratory of the Systems Research Institute of the Polish Academy of Sciences, Warsaw, Poland, Scopus Author ID: 7007041453, <http://orcid.org/0000-0001-7990-4296>, Researcher ID: M-9574-2014. Janusz.kacprzyk@ibspan.waw.pl

KREINOVICH Vladik

Doctor of Technical Sciences, Professor AT&T Fellow in Information Technology, Department of Computer Science, University of Texas at El Paso, El Paso, TX 79968, USA. Vice President International Fuzzy Systems Association (IFSA), Vice President, European Society of Fuzzy Logic and Technology (EUSFLAT) <http://orcid.org/0000-0002-1244-1650> vladik@utep.edu

KUC Roman Oleksandrovych,

Professor of Electrical Engineering, Ph.D., Sub-Dean of the Yale School of Engineering and Applied Science, New Haven, USA, Scopus Author ID: 7007041453, <http://orcid.org/0000-0001-7990-4296>. roman.kuc@yale.edu

Co-founders:

National Academy of Sciences of Ukraine,
Institute of Artificial Intelligence Problems of the Ministry of Education and Science of Ukraine
and the National Academy of Sciences of Ukraine.
Founded in 1995.

Certificate of registration of KB № 24609-14549 IIP from 26.11.2020.

The archive of the journal is available in “Scientific Periodicals of Ukraine”
on the website of Vernadsky National Library of Ukraine.

A digital reproduction of the journal is published on the IAIP (Institute of Artificial Intelligence Problems)
website (<http://www.ipai.net.ua>).

Journal «Artificial Intelligence» is published 2 times a year.

The articles are published in Ukrainian and English.

DOI: <https://doi.org/10.15407/jai2022.02>.

Editorial and publishing department:

Tel. +38-044-248-06-23; e-mail: ipai.kiev@gmail.com; aipijournal@gmail.com.

Computer typesetting: Nemtsevich A.I. Translation: Zolkina A.S.
Given to type-setting 30.09.2023. Passed for printing. 30.09.2023. Format 70×108/16.
Publisher's signature 3,6. Circulation 150 copies.

The journal "Artificial Intelligence" registered in the list of specialized editions of Ukraine, where
main dissertations results for the scientific degree in the area of engineering science and physics &
mathematics are published (Order of MES of Ukraine dated by 15.04.2021, № 420).

The journal is indexed in Google Scholar, ICI Journals Master List,
Ulrich's Periodicals Directory, DOAJ, World Cat, COPE, Journal Factor, Info Base Index,
Academia Edu, Internet Archive, Autor AID, Open Academic Journals Index, ACM Digital
Library, GIGA Information Centre, IAEA'S NUCLEUS.

Make-up page was made by the editorial and publishing department of the
Institute of Artificial Intelligence Problems MES of Ukraine and NAS of Ukraine,
Ukraine, Kyiv, ac. Hlyshkov av., 40.
Tel. +38-044-278-37-59, <http://www.ipai.net.ua>,
e-mail: ipai.kiev@gmail.com, e-mail: aipijournal@gmail.com

МІЖНАРОДНА РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

ГОЛОВНИЙ РЕДАКТОР

ШЕВЧЕНКО Анатолій Іванович,

доктор технічних наук, член-кореспондент Національної академії наук України, професор, директор Інституту проблем штучного інтелекту Міністерства освіти і науки України і Національної академії наук України, м.Київ, Україна, ipai.kiev@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-0095-538X>, Scopus Author ID: 57188766815, ResearcherID: GLT-3967-2022.

ЗАСТУПНИК ГОЛОВНОГО РЕДАКТОРА

БЛОКОБИЛЬСЬКИЙ Олександр Володимирович,

доктор філософських наук, професор, завідувач відділом Інституту проблем штучного інтелекту Міністерства освіти і науки України і Національної академії наук України, м.Київ, Україна, <http://orcid.org/0000-0002-0139-4748>.

ВІДПОВІДАЛЬНИЙ СЕКРЕТАР

ВАКУЛЕНКО Максим Олегович,

кандидат фізико-математичних наук, провідний науковий співробітник ІППІ, м.Київ, Україна, <http://orcid.org/0000-0003-0772-7950>, Scopus Author ID: 57191078619, ResearcherID: J-6071-2017. maxvakul@gmail.com

ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ

БОЮН Віталій Петрович,

доктор технічних наук, академік Національної академії наук України, професор, завідувач відділом Інституту кібернетики імені В. М. Глушкова Національної академії наук України, м.Київ, Україна, <http://orcid.org/0000-0002-3932-3558>, Scopus Author ID: 6505900928. vboyun@gmail.com

БРИЦЬКИЙ Олександр Ігорович,

кандидат технічних наук, провідний науковий співробітник Інституту проблем реєстрації інформації Національної академії наук України, м.Київ, Україна, <http://orcid.org/0000-0003-1081-7543>. ipri@ipri.kiev.ua

ГУПАЛ Анатолій Михайлович,

доктор фізико-математичних наук, член-кореспондент Національної академії наук України,

професор, завідувач відділом Інституту кібернетики імені В. М. Глушкова Національної академії наук України, м.Київ, Україна, <http://orcid.org/0000-0003-2011-4040>, Scopus Author ID: 15750518500. gupalanatol@gmail.com

ЗАДІРАКА Валерій Костянтинович,

доктор фізико-математичних наук, академік Національної академії наук України, професор, завідувач відділу № 140 оптимізації чисельних методів Інституту кібернетики імені В.М.Глушкова, замісник академіка-секретаря Відділення «Інформатика» Національної академії наук України, м.Київ, Україна, <http://orcid.org/0000-0001-9628-0454>, Scopus Author ID: 14062655100. zvk140@ukr.net

КІСЕЛЬОВА Олена Михайлівна,

доктор фізико-математичних наук, член-кореспондент Національної академії наук України, професор, академік Академії наук вищої школи України, декан факультету прикладної математики Дніпропетровського національного університету імені Олеся Гончара, м.Дніпро, Україна, <http://orcid.org/0000-0003-4303-1707>, Scopus Author ID: 7103102844. Kiseleva47@ukr.net

КОНДРАТЕНКО Юрій Пантелійович,

доктор технічних наук, професор, завідувач кафедрою інтелектуальних інформаційних систем факультету комп'ютерних наук Чорноморського національного університету ім. Петра Могили, м.Миколаїв, Україна, <http://orcid.org/0000-0001-7736-883X>, Scopus Author ID: 6602324472, ResearcherID: T-5296-2017. yuriy.kondratenko@chmnu.edu.ua

КРАК Юрій Васильович,

доктор фізико-математичних наук, член-кореспондент Національної академії наук України, професор, завідувач кафедрою теоретичної кібернетики факультету комп'ютерних наук та кібернетики Київського національного університету імені Тараса Шевченка, м.Київ, Україна, <http://orcid.org/0000-0002-8043-0785>, Scopus Author ID: 6602577533, ResearcherID: ABC-2649-2021. yuri.krak@gmail.com

КУЗНСЦОВ Микола Юрійович,

доктор технічних наук, член-кореспондент Національної академії наук України, професор, завідувач відділом Інституту кібернетики імені В. М. Глушкова Національної академії наук України, м.Київ, Україна,

<http://orcid.org/0000-0002-8447-7863>,
Scopus Author ID: 8982745600,
ResearcherID: AAG-8807-2019.
Kuznetsov2016@icloud.com

ПАЛАГІН Олександр Васильович,
доктор технічних наук, академік Національної академії наук України, професор, заступник директора Інституту кібернетики імені В. М. Глушкова Національної академії наук України, м.Київ, Україна,
<http://orcid.org/0000-0003-3223-1391>,
Scopus Author ID: 8251028900.
Palagin_a@ukr.net

ПАНКРАТОВА Наталія Дмитрівна,
доктор технічних наук, член-кореспондент НАН України, заступник директора з наукової роботи Інституту прикладного системного аналізу Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м.Київ, Україна,
<http://orcid.org/0000-0002-6372-5813>,
Scopus Author ID: 7004316033,
Researcher ID: E-7148-2018.
natalidmp@gmail.com

ПЕПЕЛЯЄВ Володимир Анатолійович,
доктор фізико-математичних наук, завідувач відділом Інституту кібернетики імені В. М. Глушкова Національної академії наук України, м.Київ, Україна,
<http://orcid.org/0000-0002-5936-7830>,
Scopus Author ID: 8967548400.
perelaev@yahoo.com

РАМАЗАНОВ Султан Курбанович,
доктор технічних наук, доктор економічних наук, професор Київського національного економічного університету імені Вадима Гетьмана, м.Київ, Україна,
<http://orcid.org/0000-0002-8847-6200>,
Scopus Author ID: 57210346169,
ResearcherID: AAN-2236-2020.
sramazanov@i.ua

СУББОТІН Сергій Олександрович,
доктор технічних наук, професор, завідувач кафедрою програмних засобів Інституту інформатики та радіоелектроніки Запорізького національного технічного університету, м.Запоріжжя, Україна,
<http://orcid.org/0000-0001-5814-8268>,
Scopus Author ID: 7006531104,

ResearcherID: K-4862-2017.
Subbotin.csit@gmail.com

СТЕЦЮК Петро Іванович,
доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, завідувач відділом Інституту кібернетики імені В. М. Глушкова Національної академії наук України, м.Київ, Україна,
<http://orcid.org/0000-0003-4036-2543>,
Scopus Author ID: 12785999500.
stetsyukp@gmail.com

ТЕРЕЩЕНКО Василь Миколайович,
доктор фізико-математичних наук, професор, завідувач кафедрою математичної інформатики факультету комп'ютерних наук та кібернетики Київського національного університету імені Тараса Шевченка, м.Київ, Україна,
<http://orcid.org/0000-0001-7639-2969>,
Scopus Author ID: 35319035700.
V_ter@ukr.net

ХІМІЧ Олександр Миколайович,
доктор фізико-математичних наук, професор, академік-секретар Відділення інформатики Національної академії наук України, заступник директора Інституту кібернетики імені В. М. Глушкова Національної академії наук України, м.Київ, Україна,
<http://orcid.org/0000-0002-8103-4223>,
Scopus Author ID: 57209683749.
khimich505@gmail.com

ЧЕРТОВ Олег Романович,
доктор технічних наук, доцент, завідувач кафедрою прикладної математики факультету прикладної математики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені І.Сікорського», м.Київ, Україна,
<http://orcid.org/0000-0003-0087-1028>,
Scopus Author ID: 57206489823,
Researcher ID: J-8282-2012.
chertov@i.ua

ЧЕТВЕРИКОВ Григорій Григорович,
доктор технічних наук, професор Харківського національного університету радіоелектроніки Міністерства освіти і науки України, м.Харків, Україна,
<http://orcid.org/0000-0001-5293-5842>,
Scopus Author ID: 55386924000.
chetvergg@gmail.com

ІНОЗЕМНІ ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ

АМДЖАДЯН Ейсан,

доктор філософії, професор, директор відділення штучного інтелекту та технологій Королівського банку Канади, м.Торонто, Онтаріо, Канада,
<http://orcid.org/0000-0002-4400-6717>,
Scopus Author ID: 57195446822.
Ehsan_Amjadian@carleton.ca

ВАЛЕНЦІ Вінченцо,

доктор медичних наук, професор, директор департаменту інтегративної медицини та біофізики «Джузеппе Мартінес» Популярного університету імені Федеріціані. Клініка інтегративної медицини та біофізики, м.Флоренція, Італія.
vinvalenzi@gmail.com

ВУЙЦИК Вальдемар,

доктор технічних наук, професор, директор Інституту електроніки та інформаційних технологій Люблінської політехніки, м.Люблін, Польща,
<http://orcid.org/0000-0002-6473-9627>,
Scopus Author ID: 7005121594,
Researcher ID: F-2330-2010.
Waldemar.Wojcik@pollub.pl

ЗІГЕЛЬ Меланія,

доктор технічних наук, професор, Університет прикладних наук (спеціальність «Комп'ютерна лінгвістика»), м.Дармштадт, Німеччина,
<http://orcid.org/0000-0002-3517-8488>,
Scopus Author ID: 56808730600.
melanie.siegel@h-da.de

КАЛІМОЛДАЄВ Максат Нурадилович,

доктор фізико-математичних наук, академік Національної академії наук Республіки Казахстан, професор, Генеральний директор РГП «Інститут інформаційних і обчислювальних технологій КН МОН РК, м.Алмати, Казахстан,
<http://orcid.org/0000-0003-0025-8880>,
Scopus Author ID: 56153126500,
Researcher ID: ABE-8607-2021.
mnk@ipic.kz

КАЦПЖИК Януш Олександрович,

доктор технічних наук, професор, академік, керівник лабораторії Інституту системних досліджень Польської академії наук,

м.Варшава, Польща.

<http://orcid.org/0000-0001-7990-4296>,
Scopus Author ID: 7007041453,
Researcher ID: M-9574-2014.
Janusz.kacprzyk@ibspan.waw.pl

КРЕЙНОВИЧ Владік,

доктор технічних наук, професор, науковий співробітник кафедри комп'ютерних наук Техаського університету в Ель-Пасо (Ель-Пасо, TX 79968, США).
Лауреат премії AT&T з інформаційних технологій.
Віцепрезидент Міжнародної асоціації з нечітких систем (IFSA).
Віцепрезидент Європейського товариства з нечіткої логіки та технологій (EUSFLAT).
<http://orcid.org/0000-0002-1244-1650>
vladik@utep.edu

КУЦ Роман Олександрович,

доктор технічних наук, професор, заступник декана Школи інженерії та прикладної науки Єльського університету, м.Нью-Гейвен, США,
<http://orcid.org/0000-0001-7990-4296>,
Scopus Author ID: 7007041453,
roman.kuc@yale.edu

ЦЕБЕРІО Мартін,

доктор технічних наук, професор кафедри комп'ютерних наук Техаського університету в Ель-Пасо (Ель-Пасо, TX 79968, США).
Голова Ради по аспірантурі Техаського університету в Ель-Пасо.
Лауреат премії AT&T з інформаційних технологій.
Головний радник проректора з питань різноманітності та інклюзивності.
Заслужений професор UTER.
Дійсний член Академії видатних викладачів в системі університетів штату Техас (США).
<http://orcid.org/0000-0001-5680-1155>
Scopus Author ID: 55332856800
mceberio@utep.edu

Співзасновники:

Національна академія наук України,
Інститут проблем штучного інтелекту Міністерства освіти і науки
України і Національної академії наук України.
Заснований у 1995 році.

Свідоцтво про реєстрацію КВ № 24609-14549 ПР від 26.11.2020.

На вебсторінці Національної бібліотеки імені В.І. Вернадського у рубриці
«Наукова періодика України» розміщений архів журналу.

Електронна копія журналу розміщується на вебсторінці ІПШІ (<http://www.ipai.net.ua>).

Науковий журнал «Штучний інтелект» друкується 2 рази на рік.

У журналі публікуються статті українською, англійською мовами.

DOI: <https://doi.org/10.15407/jai2022.02>.

Редакційно-видавничий відділ:

тел. +38-044-248-06-23; e-mail: ipai.kiev@gmail.com; aijournal@gmail.com

Комп'ютерна верстка: Немцевич А.І. Переклад: Золкіна А.С.

Здано до набору 30.09.2023. Підписано до друку 30.09.2023. Формат 70×108/16.
Обл.-вид. арк. 3,6. Наклад 150 прим.

Журнал «Штучний інтелект» внесено до переліку фахових видань України, в яких публікуються основні результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів з фізико-математичних та технічних наук (Наказ МОН України від 15.04.2021 р. № 420).

Журнал індексується Google Scholar, ICI Journals Master List,
Ulrich's Periodicals Directory, DOAJ, World Cat, COPE, Journal Factor, Info Base Index,
Academia Edu, Internet Archive, Autor AID, Open Academic Journals Index, ACM Digital
Library, GIGA Information Centre, IAEA'S NUCLEUS

Оригінал-макет виготовлено в редакційно-видавничому відділі
Інституту проблем штучного інтелекту МОН України і НАН України,
Україна, м.Київ, пр. Академіка Глушкова, 40,
Тел. +38-044-278-37-59; <http://www.ipai.net.ua>,
e-mail: ipai.kiev@gmail.com

Chapter 1. **CONCEPTUAL AND
THEORETICAL PROBLEMS
OF ARTIFICIAL
INTELLIGENCE AND
MODELING**

Розділ 1. **КОНЦЕПТУАЛЬНО-
ТЕОРЕТИЧНІ ПРОБЛЕМИ
ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ І
МОДЕЛЮВАННЯ**

THE IMPACT OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE ON MODERN EDUCATION: PROSPECTS AND CHALLENGES

A. Nykonenko

Cherkasy State Technological University, Ukraine
Shevchenka Blvd, 460, Cherkasy, 18000
andrey.nikonenko@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-9442-1601>

Annotation. This paper examines the intricate links between artificial intelligence (AI) and education, delving into both theoretical and practical aspects while evaluating possible ramifications for labor market dynamics, professional activity, and wider educational paradigms. Our research methodology involved analyzing relevant scientific literature, classifying data, consulting with subject matter experts, and synthesizing the results. Our research suggests that AI has the ability to greatly improve pedagogical processes, personalize learning experiences to meet individual student needs, and successfully address the time and financial limitations that are inherent in traditional educational models. However, our study also reveals challenges related to data confidentiality, potential plagiarism and fraud associated with AI use, and socioeconomic disparities resulting from unequal technology access.

Additionally, we identified a significant gap in current AI usage standards legislation. It is essential for researchers, educators, and policymakers to recognize the potential risks of AI implementation in educational settings and proactively develop strategies that prioritize ethics, safety, and effectiveness. With labor market trends favoring specialists knowledgeable in utilizing AI tools, a consequent change in curricula is expected. In response to our findings, we recommend the creation of new academic disciplines that concentrate on the cultivation of AI expertise; the establishment of comprehensive national AI strategies; the crafting of retraining roadmaps for those who may be affected by AI automation; the inclusion of online AI courses in existing educational programs; and the promotion of grant funding for future AI research. Our future research will concentrate on reducing the potential negative impacts of integrating AI into educational systems.

Keywords: artificial intelligence, innovations, educational technologies, future competencies.

ВПЛИВ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ НА СУЧАСНУ ОСВІТУ: ПЕРСПЕКТИВИ ТА ВИКЛИКИ

А. О. Никоненко

Черкаський державний технологічний університет, Україна
б-р Шевченка, 460, м. Черкаси, 18006
andrey.nikonenko@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-9442-1601>

Анотація. Стаття досліджує вплив штучного інтелекту (ШІ) на освіту, аналізує теоретичні та практичні аспекти такого впливу, а також оцінює можливі наслідки для динаміки ринку праці, професійної діяльності та ширших науково-освітніх парадигм. Методологія дослідження включає опрацювання відповідної наукової літератури, класифікацію даних, консультації з експертами і синтез отриманих результатів. Наше дослідження вказує на те, що ШІ має потенціал значно покращити педагогічні процеси, персоналізувати навчання з урахуванням індивідуальних потреб студентів, а також успішно вирішити проблеми часових і фінансових обмежень, що є властивими для традиційних освітніх моделей. Однак, дослідження також вказує на виклики, пов'язані з конфіденційністю даних, потенційним плагіатом і шахрайством з використанням ШІ, а також соціально-економічною нерівністю, що може виникнути через нерівний доступ до технологій.

Додатково, ми звертаємо увагу на значні прогалини в поточному законодавстві щодо стандартів використання ШІ. Існує потреба в тому, щоб дослідники, освітяни та законодавці визнали потенційні ризики застосування ШІ в освітньому середовищі та активно включилися в розробку стратегій використання ШІ, спрямованих на етику, безпеку та ефективність. З урахуванням трендів на ринку праці та росту потреби в спеціалістах, які володіють навичками використання інструментів ШІ, потрібна відповідна зміна в навчальних програмах. Проведене дослідження виявило потребу у створенні нових академічних дисциплін, сфокусованих на розвитку компетенцій у галузі ШІ; розробку всеохоплюючої національної стратегії розвитку та впровадження ШІ; створення дорожньої карти для перепідготовки осіб, яких може бути скорочено через автоматизацію з

використанням ІІІ; включення онлайн-курсів зі ІІІ до існуючих освітніх програм; сприяння отриманню грантового фінансування для майбутніх досліджень ІІІ.

Ключові слова: штучний інтелект, інновації, освітні технології, компетенції майбутнього.

Introduction

In the modern world of information technologies, artificial intelligence (AI) is increasingly permeating various spheres of human activity, which is especially noticeable in the field of education. Expanding the capabilities of AI provides new perspectives for pedagogical practice and requires adaptation of educational processes to changing conditions. That's why research on the impact of AI on education, identification of possible prospects and challenges in the future is becoming relevant.

Recent studies and publications show a mixed view on the impact of artificial intelligence on education. On the one hand, modern technologies contribute to the rapid acquisition of information; on the other hand, they raise concerns about children's readiness for a wide use of new technologies [1]. This raises questions about possible changes in teaching methods as a result of the use of AI [2]. The need to teach modern students to effectively use digital tools is also noted [2].

One of the key challenges is the authorship of educational materials developed using AI. Legal regulation of copyright is faced with the problem of defining the role of the author [3]. In addition, digitalization is accompanied by new risks and unforeseen consequences [4], in particular with regard to interpersonal communication [5]. At the same time, one cannot ignore the positive side of the use of AI, which is already beneficial today, for example, in medicine for the diagnosis of diseases [6]. On the other hand, the growth of fake news and disinformation due to digital manipulations can be observed [6].

The main purpose of this article is to analyze the theoretical and practical aspects of the application of artificial intelligence in the educational process, as well as to evaluate its impact on the labor market, professional activity and education.

In order to achieve the goal, a comprehensive study was conducted. The main research methods were: analysis of scientific literature, systematization and classification of the obtained data, consultations with experts and synthesis of the obtained results. The use of these methods allows for an in-depth analysis of the impact of artificial intelligence on education and the development of recommendations for its further use in the pedagogical process.

This work aims to reveal the prospects and potential problems of using artificial intelligence in the educational process and to offer appropriate recommendations for its use in pedagogical activities.

Positive consequences of AI application

At the current stage of society's development, the traditional education system is undergoing dramatic changes, one of the leading directions among which is the introduction of information technologies and artificial intelligence should take a significant place among them. General expectations from this process can be described by the following thesis: "modern innovations make people's lives easier" [3], and in education they should lead to increased learning efficiency and the creation of new knowledge. These technologies can contribute to both increasing the level of educational achievement and knowledge assimilation, as well as increasing the convenience of the learning process itself, for example, "thanks to the use of artificial intelligence, teachers will have the opportunity to work more efficiently and save their time" [5].

According to researchers, the changes will affect not only education but also professional activities: "the labor market will need new specialists in mathematics, physics, logic, engineering, medicine, and economics" [4]. It is quite expected that these specialists should receive training that includes the ability

to work effectively with AI. This will also contribute to changes in curricula and revision of the educational process in general.

Great expectations are placed on the implementation of innovations in the organization of the educational process. "Thanks to the digitalization of education, teachers have more time for research, the results of which can be incorporated not only into electronic learning materials, but also into production solutions" [7]. In order to maximize the benefits of innovation, the authors suggest following certain principles: "The digitization of education can be successful if the educational process, which is based on the use of information and communication technologies and is focused on specific users, has specific subject matter, is based on the correct methodology and approaches, interesting content, good student motivation, and a well-established software and hardware base" [8].

The use of AI can also lead to improved learning efficiency. For example, studies show a significant impact of AI-assisted learning on student outcomes: "The program uses technology developed by the Center for Game Science at the University of Washington. It was able to improve the efficiency of learning seventh-grade algebra by an average of 93% in just an hour and a half of use" [9]. Another useful application can be the flexible adaptation of learning to the individual characteristics and needs of students: "The program identifies strengths and weaknesses, gaps in knowledge, and then assigns tasks to correct them." [10].

Individualized education, together with the use of AI in professional activities, contributes to increased efficiency: "the use of machine learning can significantly reduce time and financial costs and contribute to labor productivity" [11]. The positive impact of AI is based on the thesis that "artificial intelligence technologies should contribute to the transformation of the economy, the labor market, government institutions, and society as a whole" [12]. This shows that the importance of AI goes beyond the education sector and affects other areas of public life. General expectations from the introduction of AI

technologies can be described by the following quote: "The use of artificial intelligence technologies will help reduce costs, increase production efficiency, and improve the quality of goods and services" [12].

Thus, the main positive effects of the use of artificial intelligence are to facilitate the work of teachers, adapt to the individual needs of students, reduce the time and financial costs of the educational process, and provide additional opportunities for successful transformation and socio-economic development of society.

Negative consequences of AI application

The use of artificial intelligence in education has its benefits, but potential drawbacks must also be considered. For example, there are concerns about the confidentiality of personal data and the undermining of the status of teachers [1]. This could lead to a complete discrediting of new ways of teaching. Serious concerns are being raised about the possible emergence of a personality in artificial intelligence, which could lead to it escaping human control [1]. The risk of job losses falls into the same category: "Working with new technologies and artificial intelligence will leave few areas where humans need to work: medicine, education, personal services, households" [4].

Unregulated access to AI can lead to problems with plagiarism and fraud. For example, ChatGPT has been banned in public schools in New York, Los Angeles, and Seattle due to concerns about these issues [2]. The legal definition and regulation of AI is currently lacking in current legislation [3], making it difficult to develop standards for the use of AI and to draw a line between acceptable and unacceptable use cases. Other common concerns include a shrinking labor market, for reasons such as the automation of routine, repetitive tasks, which could lead to job losses [13]. AI can also take over routine homework, which can lead to a reduction in effort and create the illusion of independent work for students [5]. This, in turn, can lead to a

decrease in student and teacher motivation. Another issue is the objectivity of assessing the results of educational activities by artificial intelligence [5]. For example, biased decisions of systems due to distortion of initial educational data (algorithmic bias) [13, 3] can lead to discrimination against certain groups of students in the assessment.

There are also issues of a more global nature, for example, unequal access to the benefits of artificial intelligence can perpetuate socioeconomic inequalities between different populations and nations around the world [13]. Another global risk is that technological development can also lead to technological dependency [5], which in turn can limit human curiosity and creativity. The question of the impact on social interaction [5] may be related to the possible isolation of students from real communication if all learning is mediated by AI. This can lead to a deterioration of interpersonal skills and empathy. The use of AI may also lead to a violation of privacy [5], as students' personal data may be inappropriately stored and processed. In addition, the proliferation of AI makes it increasingly difficult to ensure the confidentiality and security of information, requiring the constant development of protection mechanisms.

Thus, the negative consequences of the use of artificial intelligence in education can have a serious impact on the quality of the educational process and the social aspects of students' and teachers' lives. It is important that researchers, educators, and lawmakers consider the potential risks and actively develop strategies to ensure the ethical, safe, and effective use of AI in education and society.

Impact on education

The impact of artificial intelligence on modern education can be seen in a number of ways, including the development of technology, the updating of curricula and methods, and the changing roles of teachers and students in the learning process. AI can help create more effective teaching methods and materials, as well as more opportunities to individualize education.

AI can create personalized learning programs that take into account the needs and abilities of each student [5]. This is important because the uniformity of curricula is considered one of the drawbacks of modern higher education [10], and the use of artificial intelligence eliminates this by providing the opportunity to develop and change the curriculum together with students [10]. Chatbots can be an effective tool to improve communication and coordination in an educational institution, as well as to build an educational path [1]. AI can also help improve the quality of materials, for example, ChatGPT can be a mentor or co-author, supporting teachers in their learning and teaching activities and creating interesting and interactive content [2]. Artificial intelligence also provides students with access to more diverse and relevant sources of information [5].

However, without a revision of educational standards and programs, the implementation of AI will remain incomplete [1].

The automation of learning also poses certain risks that need to be managed:

- Widening the gap between rich and poor students due to unequal access to technology [5].
- Lack of direct contact between the teacher and the student (pupil), which can have a negative impact on the quality of education and future professional activity [7].

It is also necessary to take into account the possible technical risks associated with the occurrence of malfunctions of programs and equipment, incorrect storage and archiving of data, etc., as well as the likelihood of increased cyber risks associated with hacker attacks on university servers and software [7]. The quality of AI performance depends on the accuracy of the data provided. If inaccurate information is included in the training data, the results of AI analysis will be incorrect [9]. Therefore, the role of experts to ensure the quality of educational content is important.

Thus, artificial intelligence influences modern education and opens a number of prospects in the development of technologies,

curricula and pedagogical methods. At the same time, ensuring the quality of education and balanced access to new technologies for all stakeholders are important aspects that should be addressed.

Recommendations for AI implementation

In view of the above changes, the implementation of artificial intelligence technologies is an important aspect of the development of education in the modern world. Education can become a way to adapt to the future [1] if it provides high-quality knowledge and skills to work with innovative technologies. At the same time, ensuring the objectivity and fairness of student assessment using AI becomes a particularly important task [5, 3]. The proliferation of AI in education cannot be ignored [5], and the need to improve the digital literacy of teachers and other staff is becoming increasingly apparent [7]. The digitization of education can be successful if it is targeted at specific users, has a specific focus, is based on the right methodology and approaches, interesting content, good student (learner) motivation, and a well-established software and hardware base [7]. At the same time, the insufficient level of quality of higher education and educational programs aimed at training specialists in the field of artificial intelligence in higher education institutions [12] jeopardizes the successful implementation of such innovations.

The Concept of Artificial Intelligence Development in Ukraine was approved by the Decree of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated December 2, 2020,¹ 1556-r [3]. However, Ukraine is not yet properly prepared to study artificial intelligence, develop it, and formulate strategies and principles for its implementation [4]. The modern educational system should much better train competitive specialists in the field of artificial intelligence [12]. To ensure this, it is necessary to create new specialties that will be able to train specialists in the field of artificial intelligence [4] and enable them to compete in the international labor market. It is also necessary to create conditions for

participation in the activities of international organizations and the implementation of initiatives to formulate strategies for the development, regulation and standardization of artificial intelligence [12].

Another important aspect is the development of a roadmap for retraining people whose work can be automated in the next five to ten years [12]. It is also necessary to integrate leading online courses on artificial intelligence into educational programs, to promote the attraction of grants for scientific activities in the field of artificial intelligence in order to stimulate the transition of Ukrainian scientists to effective models, standards, and forms of cooperation [12, 4]. The use of artificial intelligence technologies in information security is one of the factors that will contribute to the protection of national interests [12]. A society of creators, where artificial intelligence systems will help people to get rid of routine, feel solidarity and spend their free time on creative activities [13], may be a prospect for Ukraine.

Thus, for the successful implementation of AI in education, the following recommendations should be taken into account: creating new specialties for training specialists in the field of artificial intelligence; creating conditions for international cooperation; developing national strategies, principles and standards for the development of AI; developing a roadmap for retraining people; integrating online courses on artificial intelligence into educational programs; and promoting grant funding for research in the field of artificial intelligence.

Conclusions and prospects for further research

This paper examines the impact of artificial intelligence on education, analyzing the main prospects and challenges. The conclusions can be summarized as follows:

- Artificial Intelligence will have a significant impact on the world, but it will take a number of years to determine the exact depth of the changes.

- Many of the risks associated with AI are exaggerated, based on fears of the new technology.

- Job losses due to automation can be offset by the creation of new, highly skilled positions.

- Negative consequences of AI can be avoided through proper regulation and continued research.

- AI has a significant impact on education through automation, curriculum changes, and learning approaches.

The arrival of AI in education highlights the importance of rethinking the skills and knowledge that students acquire. Implementing AI in education today will provide competitive advantage in the future.

References

1. Golovina O. Artificial intelligence: how it will affect education. National University of Eastern Europe. 11.02.2020 URL: <https://nus.org.ua/articles/shtuchnyj-intelekt-yak-vin-vplyne-na-osvitu/>.

2. Antonio J. The impact of ChatGPT on education. Medium. 22.02.2020 URL: <https://medium.com/chatgpt-learning/вплив-chatgpt-на-освіту-d57e62c1686b>.

3. Klyan A. How AI is regulated in Ukraine and the world. AIN.UA. 01.02.2022 URL: <https://ain.ua/2022/02/01/yak-ai-rehulyuyut-v-ukrayini-ta-sviti/>.

4. Stashkevych O. The impact of technology and artificial intelligence on the labor market in Ukraine. InterConf. 2021. - № 81 - C. 25-30.

5. Vyshnyakova O. AI and education: how artificial intelligence will affect school education. LB.ua. 20.03.2023.

URL: https://lb.ua/blog/olena_vyshniakova/547626_ai_osvita_yak_shtuchniy_intelekt.html.

6. Savchuk T. 10 examples of how artificial intelligence can change your lifestyle. Radio Liberty. 03.02.2018.

URL: <https://www.radiosvoboda.org/a/29015231.html>.

7. Tolmach M. Digital technologies in education: opportunities and trends. Digital platform: information technology in the socio-cultural sphere. 2021. - № 4(2) - C. 159-170.

8. Rasulova N. Adaptive learning in the system of higher education. Scientific progress. 2021. – No. 3 (1). - P. 88-97.

9. Kiselyova K. How artificial intelligence can help education. Observatory 09/05/2018.

URL: <https://osvitoria.media/experience/yak-shtuchnyj-intelekt-mozhe-dopomogty-osviti/>.

10. Zemba M. Artificial intelligence in education: world experience and ways of implementation in Ukraine. Universal education. 20.02.2020.

URL: <https://vseosvita.ua/library/statta-stuchnij-intelekt-v-osviti-svitovij-dosvid-ta-slahi-realizacii-v-ukraini-211487.html>.

11. How artificial intelligence works and prospects for its use. AI Conference Ukraine.

URL: <https://aiconference.com.ua/uk/news/printsipi-raboti-iskusstvennogo-intellekta-i-perspektiva-ego-ispolzovaniya-92238>.

12. Concept of the development of artificial intelligence in Ukraine dated December 2, 2020 No. 1556. Update date: 12/29/2021.

URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1556-2020-%D1%80#Text>.

13. Vyshnya G. Artificial intelligence and man: threats and opportunities. Radio Svoboda. 12.03.2021.

URL: <https://www.radiosvoboda.org/a/shtuchnyi-intelekt-zagrozy-i-mozhlyvisti/31145992.html>.

The article has been sent to the editors 11.09.23.

After processing 12.09.23.

Submitted for printing 15.09.23.

Copyright under license CCBY-SA4.0.

ОПТИМАЛЬНІ РІШЕННЯ В СИСТЕМАХ, ЩО СКЛАДАЮТЬСЯ З РАЦІОНАЛЬНИХ АГЕНТІВ

С.В. Пашко¹, І.П. Сініцин²

^{1,2}Інститут програмних систем НАН України, Україна
пр. Академіка Глушкова, 40, Київ, 03187
pashko1955@gmail.com
ips2014@ukr.net

¹<https://orcid.org/0000-0002-0453-4128>

²<https://orcid.org/0000-0002-4120-0784>

Анотація. Розглядаються раціональні агенти та системи, що складаються з таких агентів. Агентом вважається автономний об'єкт, який має джерела інформації про навколишнє середовище (наприклад, фізичні датчики) та впливає на це середовище (наприклад, за допомогою виконавчих механізмів). Раціональним агентом називається агент, який заради досягнення поставленої мети здатен діяти ефективно, тобто використовувати стратегії поведінки, близькі до оптимальних. Вважається, що існує функція корисності, яка визначена на множині можливих послідовностей дій агента (агентів, якщо розглядається система агентів) і приймає значення в множині дійсних чисел. Раціональний агент діє таким способом, щоб максимізувати функцію корисності. Системою раціональних агентів називається система, що складається з раціональних агентів, які мають спільну мету і діють оптимальним способом для її досягнення. Агенти діють, використовуючи оптимальний (або близький до оптимального) розв'язок екстремальної задачі, що сформульована для системи. В роботі наводяться приклади систем, що складаються з раціональних агентів. Визначаються основні групи задач і відповідні математичні методи їх розв'язання, що пов'язані з керуванням агентами і системами раціональних агентів: кооперування агентів (створення системи агентів), планування та координація дій агентів, розміщування системи агентів, розпізнавання. Кооперування необхідне, якщо жоден агент не володіє достатнім досвідом, ресурсами та інформацією для розв'язання задачі, натомість різні агенти мають досвід та можливості для розв'язання різних частин проблеми. Плануванням називається розроблення способу дій агентів та всієї системи в майбутньому в залежності від ситуацій, що можуть виникнути, вибір ефективного способу дій, оптимальний розподіл ресурсів. Координацією вважається така організація дій різних агентів, що складають систему, яка забезпечує ефективність роботи цієї системи. Важливими є задачі пошуку оптимального розміщення системи агентів та задачі розпізнавання стану навколишнього середовища. Наведено приклади таких задач та вказано математичні методи їх розв'язання.

Ключові слова: раціональний агент, система, кооперування, планування, координація, розміщення, розпізнавання.

OPTIMAL SOLUTIONS IN SYSTEMS CONSISTING OF RATIONAL AGENTS

S. Pashko¹, I. Sinitsyn²

^{1,2}Institute of Software Systems of the National Academy of Sciences of Ukraine, Ukraine
Akademika Glushkova Avenue, 40, building 5, Kyiv, 03187
pashko1955@gmail.com
ips2014@ukr.net

¹<https://orcid.org/0000-0002-0453-4128>

²<https://orcid.org/0000-0002-4120-0784>

Abstract. Rational agents and systems consisting of such agents are considered. An agent is an autonomous object that has sources of information about the environment (for example, physical sensors) and affects this environment (for example, with the help of actuators). A rational agent is an agent who, in order to achieve a set goal, is able to act effectively, that is, to use behavioral strategies that are close to optimal. It is assumed that there is a utility function, which is defined on the set of possible sequences of actions of the agent (agents, if a system of agents is considered) and takes values in the set of real numbers. A rational agent acts in such a way as to maximize the utility function. A system of rational agents is a system consisting of rational agents that have a common goal and act in an optimal way to achieve it. Agents act using the optimal (or close to optimal) solution of the extreme problem formulated for the system. The work gives examples of systems consisting of rational agents. The main groups of problems and the corresponding mathematical methods of their solution related to the management of agents and systems of rational

agents are determined: cooperation of agents (creation of a system of agents), planning and coordination of actions of agents, search of placement of the system of agents, recognition. Cooperation is necessary when no single agent has sufficient experience, resources, and information to solve a problem, but different agents have the expertise and capabilities to solve different parts of the problem. Planning is the development of a method of action of agents and the entire system in the future depending on the situations that may arise, the choice of an effective method of action, optimal distribution of resources. Coordination is such an organization of the actions of various agents that make up the system, which ensures the efficiency of this system. The tasks of finding the optimal placement of agent system and the task of recognizing the state of the environment are important. Examples of such problems are given and mathematical methods of their solution are indicated.

Keywords: rational agent, system, cooperation, planning, coordination, placement, recognition.

Вступ

В останні десятиліття в рамках теорії штучного інтелекту розвивається агентно-орієнтований підхід. Агенти, наділені штучним інтелектом, називаються інтелектуальними або раціональними агентами. Вони можуть утворювати багатоагентні системи та діяти заради досягнення спільної мети.

Багатоагентні системи почали вивчатися з початку 1980-х років; дослідження в цій області стали інтенсивно проводитися з середини 1990-х років. Теорію багатоагентних систем досить повно представлено в монографії М. Вулдріджа, де розглянуто питання комунікації та взаємодії агентів, проблеми формування коаліцій агентів, планування сумісної роботи та координацію дій членів коаліції. Багатоагентні системи вивчаються під різними кутами зору: в аспектах програмної інженерії, теорії інформації, соціальної психології, в контексті понять електроніки, з позиції теорії конфліктних процесів.

С. Рассел та П. Норвіг називають раціональним агентом автономний об'єкт, який має мету та діє оптимальним способом заради її досягнення. В даній роботі розглядаються основні види діяльності, пов'язані з керуванням агентами і системами раціональних агентів: утворення системи агентів (кооперування), планування і координування дій агентів, розміщування системи, розпізнавання. Розглянуто математичні методи вибору оптимальних рішень в системах, що складаються з раціональних агентів, які діють оптимальним способом заради досягнення спільної мети.

Агенти, системи агентів та математичні методи, що їм притаманні

В літературі існує кілька визначень поняття “агент”. В роботі [1] агентом вважається автономний об'єкт, який має джерела інформації про навколишнє середовище (наприклад, фізичні датчики) та впливає на це середовище (наприклад, за допомогою виконавчих механізмів). Агентом може бути людина, робот, комп'ютерна програма. В цій же роботі наведено наступне визначення раціонального агента: “Для будь-якої послідовності актів сприйняття раціональний агент повинен обрати дію, яка, як очікується, максимізує його показники продуктивності, з врахуванням факторів, наданих даною послідовністю актів сприйняття та всіх вбудованих знань, що ними володіє агент”. Інакше кажучи, раціональним агентом вважається агент, який заради досягнення поставленої мети здатен діяти ефективно, тобто використовувати стратегії поведінки, близькі до оптимальних.

В роботі [1] структура агента умовно визначається формулою:

агент = архітектура + програма.

Мається на увазі, що програма агента повинна працювати в деякому обчислювальному пристрої, який має фізичні датчики та виконавчі механізми. Така програма повинна приймати дані від датчиків, розпізнавати та аналізувати дані, виробляти оптимальну стратегію поведінки агента і подавати команди виконавчим механізмам.

Якщо агент знаходиться в складному оточуючому середовищі, недостатньо задати мету, яку потрібно досягти, оскільки, як правило, існують різні послідовності дій агента, що ведуть до

мети. В таких випадках доцільно вважати, що існує функція корисності, яка визначена на множині можливих послідовностей дій агента (агентів, якщо розглядається система агентів) і приймає значення в множині дійсних чисел. В роботі [1] обгрунтовано наступне твердження: “Будь-який раціональний агент повинен діяти таким способом, щоб максимізувати функцію корисності”.

Далі раціональним агентом називається агент, який заради досягнення мети діє оптимальним способом. Системою раціональних агентів називається система, що складається з раціональних агентів, які мають спільну мету і діють оптимальним способом для її досягнення. Агенти діють, використовуючи оптимальний (або близький до оптимального) розв’язок екстремальної задачі, що сформульована для системи. Прикладами таких систем можуть бути наступні:

- система роботів-таксистів;
- система рухомих агентів-датчиків, які здійснюють спостереження за деяким об’єктом;
- група дронів, що переслідують деяку ціль;
- спортивна команда;
- система економік різних країн, які розвиваються у взаємодії.

Однією з центральних проблем створення систем раціональних агентів є забезпечення агентів методами, що дають змогу діяти ефективно. Ці методи повинні враховувати стан оточуючого середовища, поставлені цілі, а також той факт, що агенти діють у складі системи.

Раціональні агенти та системи повинні мати в своєму розпорядженні математичні методи, що дозволяють будувати оптимальні стратегії поведінки, тобто скоординовані плани дій на основі даних, якими володіють агенти. Важливими є задачі створення систем оптимального складу, тобто задачі кооперування агентів, пошуку їхнього оптимального розміщення та відповідні методи оптимізації. Агенти у процесі розвитку подій повинні розпізнавати поточний стан навколишнього середовища

та на основі результатів розпізнавання приймати ефективні рішення щодо своїх подальших дій. Тому агентам потрібні якісні математичні методи розпізнавання.

Можна виділити наступні основні групи задач і математичні методи їх розв’язання, що органічно притаманні системам раціональних агентів (далі замість назви “система раціональних агентів” використовуємо назви “система агентів” або “система”):

- кооперування агентів (створення системи агентів);
- планування дій агентів;
- координація дій агентів;
- розміщування системи агентів;
- розпізнавання.

Системи, що складаються з агентів, можуть бути досліджені в різних аспектах [2]:

- аспект програмної інженерії;
- математичний аспект;
- аспект теорії інформації;
- аспект соціальної психології;
- строго логічний аспект;
- ігровий аспект;
- в контексті понять електроніки.

В даній роботі розглядається аспект оптимізації дій, пов’язаних з системами агентів.

Розглянемо відмінності між раціональним агентом та агентами інших типів. Важливим є поняття інтелектуального агента. Автор роботи [3] вважає, що інтелектуальний агент повинен мати наступні властивості:

- реактивність – здатність сприймати стан оточуючого середовища та діяти відповідним способом;
- проактивність – здатність до цілеспрямованої поведінки та виявлення власної ініціативи заради досягнення мети;
- соціальну активність – здатність до взаємодії з іншими агентами, можливо з людьми, для досягнення мети.

Інтелектуальний агент вважається автономним. Автономність означає, що поведінка агента визначається його властивостями [4], накази та ресурси отримуються таким агентом від інших

агентів тільки інколи або не отримуються зовсім.

Якщо визначення інтелектуального агента містить тільки описані вище ознаки (реактивність, проактивність, соціальну активність, автономність), воно називається “слабим” [5]. Якщо крім цих ознак у визначенні інтелектуального агента присутні додаткові ознаки, таке визначення називається “сильним”. Сильне визначення часто включає “ментальні” властивості агента:

- знання – частину знань агента, яка не змінюється на протязі його існування;
- переконання – частину знань агента, яка може змінюватися;
- бажання – стани, ситуації, які є бажаними для агента;
- наміри – те, що агент повинен зробити з огляду на свої зобов’язання перед іншими агентами, або те, що впливає з його бажань;
- цілі – множину кінцевих та проміжних цілей агента;
- зобов’язання перед іншими агентами – задачі, які агент виконує за дорученням інших агентів.

Вважаємо, що раціональні агенти можуть володіти деякими з наведених властивостей в тій мірі, в якій це необхідно для розв’язання задач, що виникають перед ними, та використання розв’язків.

Математичні моделі та методи вибору оптимальних рішень для агентів і багатоагентних систем

Для досягнення мети, що стоїть перед системою агентів, необхідне керування діями агентів. В роботі [6] керуванням називається “сукупність цілеспрямованих дій, що включає оцінку ситуації та стану об’єкта керування, вибір керівних дій та їх реалізацію”. Оцінку ситуації слід розуміти як визначення фазового вектора x (або його наближеного значення), що цю ситуацію описує. Керування системою в ситуації x вибирається у вигляді вектора $u(x)$, який описує керівні дії для всіх агентів. Функція $u(x)$ називається стратегією поведінки системи (планом роботи). Вона визначає

керування в залежності від ситуації, що склалася в деякий момент часу.

Перед визначенням ефективної стратегії $u(x)$ слід побудувати систему агентів, тобто розв’язати проблему кооперування. Кооперуванням називають об’єднання агентів у систему для досягнення спільної мети. Для побудови стратегії поведінки системи потрібно розв’язати задачі планування та координації дій агентів [3]. Під плануванням слід розуміти розроблення способу дій агентів та всієї системи в майбутньому в залежності від ситуацій, що можуть виникнути, вибір ефективного способу дій, оптимальний розподіл ресурсів. Координацією називається така організація дій різних агентів, що складають систему, яка забезпечує ефективність роботи цієї системи. Під час планування дій окремих агентів слід враховувати необхідність координації для забезпечення високого рівня ефективності всієї системи.

Кооперативне розв’язання задачі потрібне тоді, коли складність проблеми виходить за рамки індивідуальних можливостей агентів. Кооперування необхідне, якщо жоден агент не володіє достатнім досвідом, ресурсами та інформацією для розв’язання задачі, натомість різні агенти мають досвід та можливості для розв’язання різних частин проблеми [3, 7].

У роботі [8] стверджується, що кооперативне розв’язання задачі складається з трьох наступних етапів.

Задача декомпозиції. На першому етапі задача розбивається на підзадачі. Декомпозиція може бути ієрархічною, підзадачі можуть розбиватися на менші підзадачі аж до “атомарних” дій, які не можна декомпонувати далі.

Розв’язання підзадач. На цьому етапі розв’язуються підзадачі, що отримані на етапі декомпозиції. Агенти можуть обмінюватися інформацією: один агент може допомогти іншому, якщо володіє корисною інформацією.

Синтез розв’язку. Розв’язки підзадач використовуються для формування загального розв’язку. Як і для задачі

декомпозиції, цей етап може бути ієрархічним.

Способи реалізації наведеної схеми для різних предметних областей можуть значно відрізнятися [3]. В деяких областях окремі етапи можуть бути відсутніми.

В процесі кооперативного розв'язання розподіленої задачі виникає важлива проблема розподілу підзадач між агентами. В роботах [3, 8] описано протокол укладання контрактів, який використовує ті ж поняття, що застосовуються компаніями під час організації тендерів. Агент, для якого виникла потреба у розв'язанні складної задачі, дає об'яву про необхідність виконання робіт. Агенти, що можуть виконати роботу або її частину, згоджуються на пропозицію та повідомляють замовнику про свої можливості та вимоги. Замовник обирає виконавців, що відповідають його вимогам, після чого укладаються контракти.

Важливо встановити, чи відповідає агент-виконавець вимогам агента-замовника. Припустимо, виконавець повідомляє інформацію про себе у вигляді числового вектора ознак (x_1, x_2, \dots, x_n) , де n – натуральне число. Кожна ознака x_i характеризує одну з його властивостей (продуктивність праці, рівень освіти тощо). Нехай замовник має у своєму розпорядженні навчальну вибірку, яка містить скінченне число векторів (x_1, x_2, \dots, x_n) , що відповідають різним агентам, про які відомо, чи підходять вони для виконання відповідної роботи. Використовуючи навчальну вибірку та вектор (x_1, x_2, \dots, x_n) , агент-замовник має вирішити, чи відповідає виконавець його вимогам. Описана задача є задачею розпізнавання образів та розв'язується за допомогою відповідних методів.

Утворення ефективних коаліцій є одним з ключових аспектів теорії систем агентів. В роботі [9] побудована загальна теорія оптимізації коаліцій агентів. Позначимо A множини агентів. Нехай S – підмножина агентів, які складають

коаліцію. Позначимо v_S ціну коаліції S . Вважаємо, що $v_S \geq 0$. Коаліційною структурою (CS) називається розбиття множини A , тобто набір підмножин (коаліцій) множини A такий, що підмножини не перетинаються, а їх об'єднання становить A . Ціною коаліційної структури називається величина

$$V(CS) = \sum_{S \in CS} v_S.$$

В задачі CS вимагається знайти оптимальну коаліційну структуру

$$CS^* = \arg \max_{CS} V(CS).$$

Входом задачі CS є множина цін всіх коаліцій $\{v_S\}$. В роботі [9] доведено теорему про NP-складність задачі CS та побудовано алгоритми, що розв'язують задачу із заданою точністю.

Вважається, що величини v_S можуть приймати довільні значення незалежно одна від одної. Незалежність цих величин суттєво використовується під час доведення NP-складності задачі CS та інших тверджень даної теорії. Однак це припущення справджується далеко не для всіх задач, на що вказують прості приклади.

Розглянемо *планування дій* системи за умови, що рух фазової точки $x = x(t)$ в n -вимірному фазовому просторі описується системою диференціальних рівнянь

$$\dot{x}_i = f_i(x_1, \dots, x_n, u_1, \dots, u_r), \quad i = 1, \dots, n,$$

або, у векторній формі,

$$\dot{x} = f(x, u).$$

В такому разі величину керування $u = u(x)$ часто називають стратегією поведінки системи. Задача вибору оптимального керування полягає в тому, щоб перевести фазову точку x з положення x^0 , яке вона займає в момент часу 0 , в будь-яке положення x^1 , що належить заданій термінальній множині M , мінімізуючи величину

$$\int_0^T f_0(x, u) dt;$$

тут T – перший момент часу, такий, що $x^1 \in M$ [10, 11]. Для побудови оптимального плану дій $u(x)$ системи можна використати принцип максимуму Понтрягіна. Задача побудови функції $u(x)$ називається задачею синтезу [10]. В загальному випадку ця задача розв'язується за допомогою методів нелінійного програмування.

Нехай рух фазової точки описується системою диференціальних рівнянь $\dot{x} = f(x, u, v)$, де u та v – стратегії поведінки двох систем або двох агентів, що мають протилежні інтереси. Перший агент намагається мінімізувати задану

функцію плати, використовуючи стратегію u , другий – максимізувати її за допомогою стратегії v . Такі задачі називаються диференціальними іграми, або конфліктно керованими процесами [12 – 16]. В теорії диференціальних ігор розроблено методи, які дозволяють будувати оптимальні або близькі до оптимальних плани дій сторін конфліктного процесу. В роботі [17] вивчаються властивості оптимальних стратегій переслідування.

Таблиця 1.

Частота використання математичних підходів у задачі планування руху роботів

Назва математичного підходу	Кількість (%)
Нечіткі множини	18.6
Генетичні алгоритми	12.8
Нейронні мережі	12.8
Математичне програмування	8.8
Алгоритм колонії мурах	7.8
Алгоритм рою часток	5.9
Алгоритм відпалу	4.9
Інші	28.4

Можна навести значну кількість прикладів застосування задач і методів оптимізації в плануванні дій раціональних агентів та систем. В роботі [18] наведено огляд праць, в яких для мобільних роботів розв'язуються задачі побудови допустимого маршруту між двома точками на площині або у тривимірному просторі. Часто намагаються будувати оптимальний або близький до оптимального маршрут. В [18] розглянуто 198 наукових праць, які були надруковані в період з 1980 р. по 2010 р. В таблиці 1 наведено кількість використаних математичних підходів у відсотковому відношенні.

Існують наступні можливості планування дій системи [19]: централізоване планування, розподілене розроблення централізованого плану, розподілене розроблення розподіленого плану. Наведені вище задачі відносяться в основному до розроблення централізованого плану дій системи

агентів. Для розроблення такого плану та координації дій використовується структура (можливо, виділений агент) мета-рівня, в розпорядженні якої є необхідні ресурси та інформація.

Розподілене розроблення розподіленого плану означає, що структури мета-рівня не існує, агенти будують індивідуальні плани, взаємодіючи між собою. В такому випадку вважається, що агенти володіють обмеженими обчислювальними можливостями, інформацією про локальне оточення, обмеженими можливостями спілкування. Приклади включають групи автономних транспортних засобів, мобільні сенсорні мережі, маршрутизацію в мережах даних, системи транспортування, багато процесорні обчислення, енергетичні системи [20].

Для узгодження послідовності дій агентів у системах використовуються *методи координації*, що описані в

роботах [3, 21]. Методи координації часто застосовуються в теорії розподіленого штучного інтелекту, а також для систем, у яких використовуються “ментальні” властивості агентів [5].

В роботі [21] розглянуто два рівня керування: координаційний та гібридний. На координаційному рівні виконуються процедури планування та координації дій агентів. На гібридному рівні на основі інформації, що надходить від координаційного рівня, виробляється керування всією системою. Розглядаються неперервний та дискретний випадки. У неперервному випадку рух фазової точки визначається системою диференціальних рівнянь та мінімізується час переходу фазової точки з початкового положення у термінальну множину. Результати роботи застосовуються для керування системами агентів, що складаються з роботів-маніпуляторів, мобільних роботів, мостових кранів.

Проблема **розміщування системи** агентів є важливою задачею, від якості розв’язання якої залежить успіх дій цієї системи. В роботі [22] описана математична теорія розміщування об’єктів, яку можна застосовувати для оптимізації

$$f(x^1, x^2, \dots, x^n) = \sum_{1 \leq j < k \leq n} v_{jk} d(x^j, x^k) + \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m w_{ji} d(x^j, p^i).$$

Вимагається знайти точки x^1, x^2, \dots, x^n , для яких мінімізуються витрати $f(x^1, x^2, \dots, x^n)$.

В число задач розміщування входять задачі про покриття множини, в яких вимагається визначити кількість об’єктів та місця їх розміщення [22]. Прикладом може бути задача розміщування пожежних команд у такий спосіб, щоб відстань до будь-якої точки міста долалася однією з команд не більше, ніж за п’ять хвилин. Задача може бути сформульована так:

$$\begin{aligned} \min \sum_{j=1}^n c_j x_j, \\ \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \geq 1, \quad i = 1, 2, \dots, m, \\ x_j \in \{0, 1\}, \quad j = 1, 2, \dots, n. \end{aligned}$$

розміщення систем агентів. Термін “об’єкт” трактується досить широко. Об’єктом може бути поліцейський відділок, пожежна частина, фабрика, карета швидкої допомоги тощо. В роботах [23, 24] вивчаються задачі пошуку оптимального розміщення сенсорів для виявлення загрози. Також об’єктом може бути раціональний агент.

В [22] розглянута наступна задача розміщування, яку називають задачею Ферма, задачею Вебера чи задачею Стейнера. Нехай m існуючих об’єктів знаходяться в точках площини p^1, p^2, \dots, p^m , а n нових – в точках площини x^1, x^2, \dots, x^n . Відстань між новим та існуючим об’єктами позначимо $d(x^j, p^i)$, а відстань між двома новими об’єктами – $d(x^j, x^k)$. Позначимо w_{ji} витрати з перевезення (на одиницю відстані) між новим j -м та існуючим i -м об’єктами. Нехай v_{jk} – аналогічні витрати з перевезення між новими j -м та k -м об’єктами. Загальні витрати, пов’язані з розміщенням нових об’єктів у точках x^1, x^2, \dots, x^n , визначаються формулою

Величина a_{ij} дорівнює одиниці, якщо i -й споживач належить j -й області (покривається j -ю областю), в іншому випадку a_{ij} дорівнює нулю. Величина x_j дорівнює одиниці, якщо в j -й області знаходиться деякий об’єкт, інакше x_j дорівнює нулю. Вимагається “покрити” всіх споживачів з мінімальними витратами.

Наведені задачі можуть розв’язуватися методами математичного програмування. Для дискретних задач застосовуються методи вектора спаду [25], евристичні алгоритми, поліноміальні наближені схеми, метод гілок та меж, динамічне програмування, метод випадкового пошуку з локальною оптимізацією [26]. Для неперервних задач

можна використовувати методи лінійного, нелінійного та стохастичного програмування [27 – 38]. Важливе значення мають робастні методи оптимізації, які дозволяють знаходити близькі до оптимальних розв'язки за умови невизначеності даних [37]. Субоптимальні методи (тобто такі, трудомісткість яких близька до складності відповідного класу задач) опуклого програмування побудовані в роботі [27]. Ефективні методи внутрішньої точки розвинуті в [38].

Теорією *розпізнавання образів* називають математичну теорію, в якій розвиваються основи та методи класифікації об'єктів різного роду. Кожен об'єкт має множину ознак, за допомогою якої можна визначити клас, до якого належить даний об'єкт.

Загальна постановка задачі розпізнавання образів наведена в роботі [39]. Позначимо B скінченну множину об'єктів b . Кожен об'єкт $b \in B$ ототожнюється з цілочисельним вектором

$$(x_1, x_2, \dots, x_n, f).$$

Де n – натуральне число,

$$x_j \in \{0, 1, \dots, g - 1\},$$

$$j = 1, 2, \dots, n,$$

$$f \in \{0, 1, \dots, h - 1\},$$

g, h – натуральні числа, $g \geq 2, h \geq 2$.

Нехай на множині B існує розподіл ймовірностей P , який вважається невідомим. З цієї множини отримана навчальна вибірка (множина об'єктів) V . Нехай деякий об'єкт отримано з множини B незалежно від вибірки V згідно з розподілом P , причому відомі тільки значення ознак x_1, x_2, \dots, x_n . Вимагається за цими ознаками, враховуючи навчальну вибірку V , знайти значення цільової ознаки f , тобто клас об'єкта. В роботі [40] описана задача називається задачею дискримінації.

В роботі [41] наведені наступні приклади задач розпізнавання.

Розпізнавання зображень. За формою предмета, його кольором, розміром, іншими ознаками вимагається впізнати предмет.

Медична діагностика. За результатами аналізів та обстеження

вимагається встановити захворювання пацієнта або факт відсутності хвороб.

Технічна діагностика. На основі результатів тестів та виявлених ознак слід визначити причину несправності технічної системи.

Класифікація в біології. Вимагається встановити місце нового (відкритого) живого об'єкта в прийнятій ієрархії живих організмів.

Класифікація ситуацій. Необхідно розпізнати тип ситуації, що виникла, для прийняття відповідного рішення. Конкретним прикладом є розпізнавання ситуації на виробництві диспетчером, який керує технологічним процесом.

Крім цих прикладів задач розпізнавання можна навести наступні.

Оптичне розпізнавання тексту [42]. Необхідно розпізнати символи (друковані, рукописні) з метою запису тексту в формі, придатній для обробки комп'ютером (наприклад, у коді ASCII).

Розпізнавання штрих-кодів.

Визначення мови аудіоповідомлення [43]. Вимагається автоматично встановити мову, маючи фонограму мовного повідомлення.

Розпізнавання мовлення. Необхідно автоматично перетворити звуковий сигнал, що складається з вимовлених слів, у текстовий потік, придатний для обробки комп'ютером [44].

В роботі [45] описані методи розв'язання задач розпізнавання: метод найближчих сусідів, лінійні вирішуючі правила, метод еталонів, байєсівські процедури розпізнавання. В роботах [46, 47] описується метод опорних векторів, в роботі [48] – метод потенціальних функцій, в роботах [49, 50] – структурні (лінгвістичні) методи. Крім названих методів розпізнавання існує значна кількість інших.

Існує проблема вибору якісного методу розпізнавання для даного класу задач. Для розв'язання цієї проблеми потрібно формалізувати такі поняття, як клас задач, метод розпізнавання, похибка методу тощо, побудувати теорію складності класів задач розпізнавання та

субоптимальні методи розпізнавання. Цій проблемі присвячено роботи [51, 52].

Висновки

Розглянуто поняття раціонального агента і системи таких агентів. Визначено основні види діяльності, пов'язані з керуванням агентами та системами раціональних агентів: розпізнавання, розмішування, кооперування, планування, координування дій агентів. Наведено приклади відповідних математичних задач. Розв'язання таких задач у складі систем зі штучним інтелектом дозволить підвищити ефективність цих систем.

Література

- Russell S., Norvig, P. Artificial intelligence: a modern approach, 4th Edn. Hoboken, NJ: Pearson, 2021. 1115 p.
- Dunin-Keplicz B., Verbrugge R. Teamwork in multi-agent systems: a formal approach. John Wiley & Sons, 2010. 224 p.
- Wooldridge M. An introduction to multiagent systems. John Wiley & Sons, 2009. 348 p.
- Нова філософська енциклопедія. Том 1. Під ред. Стюпіна В.С. Москва: Мисль, 2010. 744 с.
- Городецький В.І., Грушинський М.С., Хабалов А.В. Багатоагентні системи. <http://www.raai.org/library/ainews/1998/2/GGKHMAS.ZIP>.
- Автоматизовані системи. Терміни та визначення: ДСТУ 2226-93. [Чинний від 1993-04-01]. К.: Держстандарт України, 1993. 86 с. (Національний стандарт України).
- Durfee E.H., Lesser V.R., Corkill D.D. Trends in cooperative distributed problem solving. IEEE Transactions on knowledge and data engineering. 1989. Vol. 1(1). P. 63–83.
- Smith R.G., Davis R. Frameworks for cooperation in distributed problem solving. IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics. 1981. Vol. 11(1). P. 61–70.
- Sandholm T., Larson K., Andersson M., Shehory O., Tohmé F. Coalition structure generation with worst case guarantees. Artificial intelligence. 1999. Vol. 111(1–2). P. 209–238.
- Понтрягін Л.С., Болтянський В.Г., Гамкрелідзе Р.В., Міщенко Є.Ф. Математична теорія оптимальних процесів. Москва: Наука, 1969. 384 с.
- Болтянський В.Г. Математичні методи оптимального керування. Москва: Наука, 1969. 408 с.
- Айзекс Р. Диференціальні ігри. Москва: Мир, 1967. 480 с.
- Петросян Л.А., Зенкевич Н.А., Шевкопляс О.В. Теорія ігор. Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2012. 424 с.
- Чикрій А.А. Конфліктно керовані процеси. К.: Наук. думка, 1992. 384 с.
- Красовський М.М., Субботін А.І. Позиційні диференціальні ігри. Москва: Наука, 1974. 455 с.
- Рихсієв Б.Б. Диференціальні ігри з простим рухом. Ташкент: ФАН, 1989. 232 с.
- Пашко С.В., Сініцин І.П. Величини прискорення в оптимальних стратегіях переслідування. Проблеми керування та інформатики. 2023. № 2. С. 5–17.
- Tang S.H., Khaksar W., Ismail N.B., Ariffin M.K. A review on robot motion planning approaches. Pertanika Journal of Science and Technology. 2012. Vol. 20(1). P. 15–29.
- Durfee E.H. Distributed problem solving and planning. EASSS. 2001, Jan. P. 118–149.
- Shamma J. Cooperative control of distributed multi-agent systems. John Wiley & Sons, 2008. 435 p.
- Li H., Karray F., Basir O. A framework for coordinated control of multi-agent systems. Innovations in Multi-Agent Systems and Applications. 2010. № 1. P. 43–67.
- Моудер Дж., Елмаграбі С. Дослідження операцій, том 2. Моделі та застосування. Москва: Мир, 1981. 684 с.
- Pashko S., Molyboha A., Zabarankin M., Gorovyy S. Optimal sensor placement for underwater threat detection. Naval Research Logistics. 2008. № 7. P. 684–699.
- Пашко С.В. Оптимальне розміщення багатосенсорної системи для виявлення загрози. Кібернетика та системний аналіз. 2018. № 2. С. 85–94.
- Сергієнко І.В. Математичні моделі та методи розв'язування задач дискретної оптимізації. К.: Наук. думка, 1988. 471 с.
- Пападимітріу Х., Стайгліц К. Комбінаторна оптимізація. Алгоритми і складність. Москва: Мир, 1985. 510 с.
- Немировський А.С., Юдін Д.Б. Складність задач і ефективність методів оптимізації. Москва: Наука, 1979. 383 с.
- Карманов В.Г. Математичне програмування. Москва: ФІЗМАТЛІТ, 2004. 264 с.
- Ляшенко І.М., Карагодова О.О., Чернікова Н.В., Шор Н.З. Лінійне та нелінійне програмування. К.: Вища школа, 1975. 372 с.
- Михалевич В.С., Гупал А.М., Норкін В.І. Методи неопуклої оптимізації. Москва: Наука, 1987. 280 с.
- Васильєв Ф.П. Числові методи розв'язування екстремальних задач. Москва: Наука, 1980. 519 с.
- Васильєв Ф.П. Методи розв'язування екстремальних задач. Москва: Наука, 1981. 400 с.
- Поляк Б.Т. Введення в оптимізацію. Москва: Наука, 1979. 384 с.
- Пшеничний Б.М., Данілін Ю.М. Числові методи в екстремальних задачах. Москва: Наука, 1975. 320 с.
- Шор Н.З. Методи мінімізації

недиференційованих функцій та їх застосування. К.: Наук. думка, 1979. 200 с.

36. Ермольєв Ю.М. Методи стохастичного програмування. Москва: Наука, 1976. 240 с.

37. Ben-Tal A., Ghaoui L., Nemirovskii A. Robust optimization. Princeton University Press, 2009. 542 p.

38. Nesterov Y., Nemirovskii A. Interior-point polynomial algorithms in convex programming. Philadelphia: SIAM, 1994. 405 p.

39. Журавльов Ю.І. Про алгебраїчний підхід до розв'язування задач розпізнавання або класифікації. Проблеми кібернетики: Вип. 33. 1978. С. 5–68.

40. Кендалл М., Стюарт А. Багатовимірний статистичний аналіз і часові ряди. Москва: Наука, 1976. 736 с.

41. Мазуров В.Д. Математичні методи розпізнавання образів. Єкатеринбург: Вид-во Урал. ун-ту, 2010. 101 с.

42. Козел В.О. Методи та етапи автоматичного розпізнавання тексту. Вісник Черкаського університету. Серія прикладна математика. Інформатика. 2010. Випуск 172. С. 75–86.

43. Шалімов І.А., Бессонов М.А. Аналіз стану та перспектив розвитку технологій визначення мови аудіоповідомлення. Праці Науково-дослідного інституту радіо. 2013. № 3. С. 24–31.

44. Вінцюк Т.К. Аналіз, розпізнавання та інтерпретація мовних сигналів. К.: Наук. думка, 1987. 262 с.

45. Волошин Г.Я. Методи розпізнавання образів. Владивосток: ВГУЕС, 2000. 74 с.

46. Довбиш А.С., Шелехов І.В. Основи теорії розпізнавання образів. Суми: Сумський держ. ун-тет, 2015. 108 с.

47. Hsieh C.J., Chang K.W., Lin C.J., Keerthi S.S., Sundararajan S. A dual coordinate descent method for large-scale linear SVM. Proceedings of the 25-th international conference on machine learning (2008 Jul. 5). P. 408–415.

48. Айзерман М.А., Браверман Е.М., Розоноер Л.І. Метод потенціальних функцій в теорії навчання машин. Москва: Наука, 1970. 384 с.

49. Шлезінгер М.І., Главач В.А. Десять лекцій зі статистичного та структурного розпізнавання. К.: Наук. думка, 2004. 546 с.

50. Фу К.С. Структурні методи в розпізнаванні образів. Москва: Мир, 1977. 320 с.

51. Гупал А.М., Пашко С.В., Сергієнко І.В. Ефективність байєсівської процедури класифікації об'єктів. Кібернетика та системний аналіз. 1995. № 4. С. 76–89.

52. Сергієнко І.В., Гупал А.М., Пашко С.В. Про складність задач розпізнавання образів. Кібернетика та системний аналіз. 1996. № 4. С. 70–88.

References

1. Russell S., Norvig, P. Artificial intelligence: a modern approach, 4th Edn. Hoboken, NJ: Pearson, 2021. 1115 p.

2. Dunin-Keplicz B., Verbrugge R. Teamwork in

multi-agent systems: a formal approach. John Wiley & Sons, 2010. 224 p.

3. Wooldridge M. An introduction to multiagent systems. John Wiley & Sons, 2009. 348 p.

4. Stepin V.S. New philosophical encyclopedia. Vol. 1. Moscow: Mysl, 2010. 744 p.

5. Gorodetsky V.I., Grushinsky M.S., Khabalov A.V. Multiagent systems. <http://www.raai.org/library/ainews/1998/2/GGKHMAS.ZIP>.

6. Automated systems. Terms and definitions: DSTU 2226-93. [Effective from 1993-04-01]. K.: Derzhstandard of Ukraine, 1993. 86 p. (National Standard of Ukraine).

7. Durfee E.H., Lesser V.R., Corkill D.D. Trends in cooperative distributed problem solving. IEEE Transactions on knowledge and data engineering. 1989. Vol. 1(1). P. 63–83.

8. Smith R.G., Davis R. Frameworks for cooperation in distributed problem solving. IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics. 1981. Vol. 11(1). P. 61–70.

9. Sandholm T., Larson K., Andersson M., Shehory O., Tohmé F. Coalition structure generation with worst case guarantees. Artificial intelligence. 1999. Vol. 111(1–2). P. 209–238.

10. Pontryagin L.S., Boltyansky V.G., Gamkrelidze R.V., Myshchenko E.F. Mathematical theory of optimal processes. Moscow: Nauka, 1969. 384 p.

11. Boltyansky V.G. Mathematical methods of optimal control. Moscow: Nauka, 1969. 408 p.

12. Isaacs R. Differential games. New York: Dover Publications, 1999. 384 p.

13. Petrosyan L.A., Zenkevich N.A., Shevkoplyas E.V. Game theory. St. Petersburg: BHV-Petersburg, 2012. 424 p.

14. Chikrii A.A. Conflict-controlled processes. Kyiv: Nauk. Dumka, 1992. 384 p.

15. Krasovsky N.N., Subbotin A.I. Positional differential games. Moscow: Nauka, 1974. 455 p.

16. Rikhsiev B.B. Simple motion differential games. Tashkent: FAN. 1989. 232 p.

17. Pashko S.V., Sinitsyn I.P. Magnitudes of acceleration in optimal pursuit strategies. Problems of Control and Informatics. 2023. № 2. P. 5–17.

18. Tang S.H., Khaksar W., Ismail N.B., Ariffin M.K. A review on robot motion planning approaches. Pertanika Journal of Science and Technology. 2012. Vol. 20(1). P. 15–29.

19. Durfee E.H. Distributed problem solving and planning. EASSS. 2001, Jan. P. 118–149.

20. Shamma J. Cooperative control of distributed multi-agent systems. John Wiley & Sons, 2008. 435 p.

21. Li H., Karray F., Basir O. A framework for coordinated control of multi-agent systems. Innovations in Multi-Agent Systems and Applications. 2010. № 1. P. 43–67.

22. Moder J., Elmaghraby S. Investigations of operations. Vol. 2. Models and applications. Moscow: Mir, 1981. 684 p.

23. Pashko S., Molyboha A., Zabarankin M., Gorovyy S. Optimal sensor placement for underwater threat detection. Naval Research Logistics. 2008. № 7. P. 684–699.

24. Pashko S.V. Optimal placement of a multi-sensor system for threat detection. *Cybernetics and system analysis*. 2018. № 2. P. 85–94.
25. Sergienko I.V. *Mathematical models and methods for solving discrete optimization problems*. K.: Nauk. Dumka, 1988. 471 p.
26. Papadimitriou H., Steiglitz K. *Combinatorial optimization. Algorithms and complexity*. Moscow: Mir, 1985. 510 p.
27. Nemirovskii A.S., Yudin D.B. *Complexity of tasks and efficiency of optimization methods*. Moscow: Nauka, 1979. 383 p.
28. Karmanov V.G. *Mathematical programming*. Moscow: FIZMATLIT, 2004. 264 p.
29. Lyashenko I.N., Karagodova E.A., Chernikova N.V., Shor N.Z. *Linear and non-linear programming*. K.: Vishcha shkola, 1975. 372 p.
30. Mikhalevich V.S., Gupal A.M., Norkin V.I. *Methods of non-convex optimization*. Moscow: Nauka, 1987. 280 p.
31. Vasiliev F.P. *Numerical methods for solving extreme problems*. Moscow: Nauka, 1980. 519 p.
32. Vasiliev F.P. *Methods for solving extreme problems*. Moscow: Nauka, 1981. 400 p.
33. Polyak B.T. *Introduction to optimization*. Moscow: Nauka, 1979. 384 p.
34. Pshenichny B.N., Danilin Yu.M. *Numerical methods in extremal problems*. Moscow: Nauka, 1975. 320 p.
35. Shor N.Z. *Methods for minimizing non-differentiable functions and their applications*. K.: Nauk. Dumka, 1979. 200 p.
36. Ermoliev Yu.M. *Methods of stochastic programming*. Moscow: Nauka, 1976. 240 p.
37. Ben-Tal A., Ghaoui L., Nemirovskii A. *Robust optimization*. Princeton University Press, 2009. 542 p.
38. Nesterov Y., Nemirovskii A. *Interior-point polynomial algorithms in convex programming*. Philadelphia: SIAM, 1994. 405 p.
39. Zhuravlev Yu.I. On an algebraic approach to solving problems of recognition or classification. *Problems of Cybernetics*. Vol. 33. 1978. P. 5–68.
40. Kendall M., Stuart A. *Multivariate statistical analysis and time series*. Moscow: Nauka, 1976. 736 p.
41. Mazurov V.D. *Mathematical methods of pattern recognition*. Yekaterinburg: Publishing House Ural univ. 2010. 101 p.
42. Kozel V.O. *Methods and stages of automatic recognition of the text*. *Bulletin of Cherkasy University. Series applied mathematics. Informatics*. 2010. Issue 172. P. 75–86.
43. Shalimov I.A., Bessonov M.A. *Analysis of the state and prospects for the development of technologies for determining the language of an audio message*. *Proceedings of the Radio Research Institute*. 2013. № 3. P. 24–31.
44. Vintsyuk T.K. *Analysis, recognition and interpretation of speech signals*. K.: Nauk. Dumka, 1987. 262 p.
45. Voloshin G.Ya. *Pattern recognition methods*. Vladivostok: VGUES, 2000. 74 p.
46. Dovbish A.S., Shelekhov I.V. *Fundamentals of the theory of recognition of images*. Sumi: Sumy State. univ., 2015. 108 p.
47. Hsieh C.J., Chang K.W., Lin C.J., Keerthi S.S., Sundararajan S. *A dual coordinate descent method for large-scale linear SVM*. *Proceedings of the 25-th international conference on machine learning (2008 Jul. 5)*. P. 408–415.
48. Aizerman M.A., Braverman E.M., Rozonoer L.I. *Method of potential functions in the theory of machine learning*. Moscow: Nauka, 1970. 384 p.
49. Shlesinger M.I., Glavach V.A. *Ten lectures on statistical and structural recognition*. K.: Nauk. Dumka, 2004. 546 p.
50. Fu K.S. *Structural methods in pattern recognition*. Moscow: Mir, 1977. 320 p.
51. Gupal A.M., Pashko S.V., Sergienko I.V. *The effectiveness of the Bayesian procedure for classifying objects*. *Cybernetics and system analysis*. 1995. № 4. P. 76–89.
52. Sergienko I.V., Gupal A.M., Pashko S.V. *On the complexity of pattern recognition problems*. *Cybernetics and system analysis*. 1996. № 4. P. 70–88.

The article has been sent to the editors 16.07.23.

After processing 17.08.23.

Submitted for printing 20.08.23.

Copyright under license CCBY-SA4.0.

PROBLEMS OF LEGAL REGULATION OF THE USE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNOLOGIES IN COURT PROCEDURES WITHIN THE FRAMEWORK OF THE UKRAINE-EU ACTION PLAN

O. Chernykh

State Organization «Valentyn Mamutov Institute of Economic and Legal Research of the National Academy of Sciences of Ukraine», Ukraine
Taras Shevchenko Boulevar, 60, Kyiv, 01032
alexandrchas@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-5904-1734>

Abstract. The article is devoted to the study of discussion issues of scientific developments in the field of legal support of the implementation of the technology of "artificial intelligence" in the judicial procedures of Ukraine on the basis of international experience and taking into account the latest changes in the legislation of Ukraine.

The article deals with the main international legal principles of artificial intelligence application, their practical implementation in Ukraine, the problems of defining the main institutional categories, separating the technical aspects of the functioning of "artificial intelligence" from the legal ones and trying to determine the key factors that the legislator should consider in the development of legislation in the field of implementation of "artificial intelligence" in legal proceedings. The legal analysis of five principles of artificial intelligence functioning in legal proceedings is carried out, the development of four forms of interaction between artificial intelligence and human in legal proceedings is presented, the risks of artificial intelligence application in democratic societies are analysed. Separately, the article analyses the controversial introduction of the category of "electronic person (personality)", expressed a position on the inadmissibility of granting the legal personality of artificial intelligence technology.

Keywords: Justice, artificial intelligence, process of justice, judgment, commercial process, civil process, principles of artificial intelligence, electronic person.

Introduction

The widespread use of "artificial intelligence" technologies (hereinafter referred to as AI), in particular the court "Chat-bots", has led to discussions on the implementation of the use of AI in court procedures in Ukraine and the use of international experience, in particular, Chinese, Brazilian and the United States. Research on these issues is focused on scientists, lawyers and legislators from many countries. Automation of court processes and the use of existing systems from the USA and China can positively affect the rule of law in Ukraine and contribute to the improvement of the investment climate, which is objectively associated with the acceleration of the post-war revival of Ukraine.

At the same time, there are risks identified by international and Ukrainian experts that require deep analysis and consideration in the development of state strategies and laws of Ukraine.

Analysis of recent research and publications

The issue of artificial intelligence in legal proceedings is analyzed by Ukrainian scientists, in particular, Gudima T.S., Baranov O.A., Grabovskaya T.G., Katkova M.V., Karmaza O.O., Kamyshansky V.S., Martsenko, T.V. Fedorenko O.O., Yastrebov E.O., Kharitonov O.I. and others.

International research on the implementation of artificial intelligence in justice and legal activities are engaged in scientists among which should determine the study of the Hague Center for Artificial Intelligence (Netherlands), the Corporation of Legal Services (USA), Innovation Center of the American Bar Association (USA), the Hulton Society of Legal Services Ontario (Canada), Stanford University (USA), Edinburgh, Cambridge, and Edinburgh Napier University.

Among the studies should be noted the study of the Hague Centre for Artificial

Intelligence [1], as well as documents of international organizations, in particular:

European Parliament resolution of 16 February 2017 with recommendations to the Commission on Civil Law Rules on Robotics (2015/2103 (INL) [2]

European ethical Charter on the use of Artificial Intelligence in judicial systems and their environment, [3]

Organisation for Economic Co-operation and Development, Recommendation of the Council on Artificial Intelligence, OECD/LEGAL/0449 [4]

White Book of Artificial Intelligence [5]

Declaration on the risks of decision-making using a computer or AI in the field of social protection [6]

The article is aimed at defining the basic principles of application of AI in legal proceedings, description of risks and negative consequences of uncontrolled application of AI in terms of violation of fundamental human rights and freedoms, definition as a priority principle “under user control” in the development of all scientific and practical models of using AI in legal proceedings.

Results of research

As part of the implementation of the EU-Ukraine Action Plan [7], one of the priority areas is the establishment of the rule of law and judicial reform.

In 02.12.2020, the Cabinet of Ministers of Ukraine approved the Concept for the Development of Artificial Intelligence in Ukraine (hereinafter – “Concept”). This document defines in particular the directions of state policy in the economy and public administration, in which technology of artificial intelligence can be involved.

Among the problems of the concept and problems that the development of artificial intelligence technology should solve are defined – “the lack of implementation of artificial intelligence technologies in judicial practice”.

The development and implementation of artificial intelligence technologies in the judicial systems of the leading countries of the world, contributed to the need to develop common principles and rules for their use. In

December 2018, the European Commission on the effectiveness of Justice adopted an ethical charter on the use of artificial intelligence in judicial systems and their environment,[8] which was the first step of the Commission in the field of regulating the risks of uncontrolled use of AI in legal proceedings.

In particular, the Charter enshrines five principles regarding the use of artificial intelligence in the administration of justice:

- respect for fundamental human rights during its use;

- the use of artificial intelligence technologies to identify unfair judicial practice by analysing the texts of court decisions and other data that are formed in computerized systems/ registers in the process of justice;

- non-discrimination, namely prevention of development of any discrimination between individuals or groups of persons;

- quality and safety related to the processing of court decisions and data in a safe technological environment;

- the principle of “under user control”/ “user-controlled”; transparency, impartiality and justice.

These five principles are elaborated in detail by scientists in order to develop and implement into practice and should be implemented in legislation, in order to prevent the replacement of the justice system with the system of automatic formation of court decisions.

The principle of respecting fundamental human rights in the use of AI is that the entire process of applying AI in legal proceedings should be subject to international human rights standards, and not ignore them in a deal of technical progress. The basis of the legal understanding of AI Martsenko N. distinguishes the principle of the rule of law as a prerequisite for technical development. [9, p. 95]. Which emphasizes the primacy of the rule of law over the technological part and should always be taken into account when using AI. The observance of rights and freedoms also consists in the observance of Article 6 of the Convention for the Protection of Human Rights and Fundamental Freedoms (hereinafter – the Convention). Given that Ukraine is the “leader” in appeals to the ECHR (3th place in the number of appeals [10]),

which indicates the bed quality of the court procedures, the development and implementation of the concepts of the use of artificial intelligence technology in legal proceedings is of priority for ensuring Ukraine's compliance with Article 6 of the Convention and the implementation of the EU-Ukraine Action Plan for the post-war restoration of Ukraine.

The principle of application of AI technologies to identify unfair judicial practice is already widely used. In particular, in China, Argentina, France, Great Britain, USA, Brazil [11] uses a variety of AI systems, even in China, when judges are required in case of disagreement with the decision of the formed AI to argue in writing their disagreement [12]. But analysis of judicial practice, prevention of unfair judicial practice and risks of interference or distortion of the justice process must be distinguished among themselves. Thus, in order to protect the justice process in France, restrictions have been imposed on the use of AI to “predict the court decision”, because in the opinion of the judiciary, this undermines the foundations of justice. [13] Therefore, the principle of using AI to identify unfair judicial practice should not be absolute, but to ensure the use of AI specifically to identify unfair actions, rather than forecasting court decisions or simulating the justice process.

The development of the principle of non-discrimination in the application of AI in legal proceedings, reasoned by the fact that the computer system programmed for certain algorithms, may not take into account the principles of equality and non-discrimination important for modern justice on the grounds of race, article, age, language, etc. In 2016, a report was published in the United States that exposed the issue of racist conclusions used by the well-known American program “COMPAS” (“correction of offenders with profiling of alternative sanctions”). According to the report, the AI program "COMPAS" was prone to the erroneous labelling of African Americans and identify them as "black violators". [14] The principle of non-discrimination requires assessing the risks of discrimination and applying user control to

programmed algorithms, in accordance with the principle of “user-controlled”.

The study of the principle of quality and safety of the use of AI in inter-industry studies has established certain limitations on the use of AI, namely:

- Difficulty imagining problems using mathematical functions is often difficult or impossible for AI;
- Overfitting, when AI can generate functions that do not exist and which are not needed;
- Lack of effective generalization due to limitations (poor quality or unreliable data) [15].

This confirms, in turn, the importance of compliance with the principle of "under the control of the user".

As noted above, the most important place in the application of AI in court procedures is the principle of "user-controlled" (under user control). The paradox is that from the point of view of mathematical algorithms, legislation and law enforcement may not be ideal (or as mentioned above, not to be transformed into mathematical functions), so according to Sandra Watcher (Oxford University, Alan Turing Institute), "the current laws regardless of the country do not correspond to the ideal path of AI technology development" [16]. That is why AI should be controlled by the user because, from the point of view of justice and justice, decisions generated by AI can be absurd or violate fundamental human rights (as noted, in particular in the analysis of the principle of non-discrimination). The study of the issue of AI control in the legal proceedings and responsibility of the user was carried out by Karmaz O. and Grabovska O., which defined the category of human responsibility for the use of AI in legal proceedings. [17,p.9] this separates the issue of responsibility for the judgment taken from the implementation of auxiliary functions of analysis of judicial practice, technical set of the text, which cannot be equated to the judicial process.

Depending on the impact of man on the AI systems, it is necessary to distinguish between the amount of responsibility for the quality and fairness of court decisions created by AI. On the example of proposed schemes of

human and AI participation in the management of automated navigation systems and the study of the issue of liability for damages in the event of marine accidents, conducted by Lucy Karey (University of Aberdeen) [18], it is possible to determine the following options for the work of AI and man in the process of justice.

AI helps produce managerial (judicial) decisions by offering behavioural options. Direct justice is carried out by a person.

The AI carries out current activities (actually generates court decisions). A person checks the proposed solutions and at any time can intervene in the process of AI.

Artificial intelligence independently conducts the process of justice, a person can cancel the decision in the order of appeal review.

Artificial intelligence fully independently conducts the process of justice.

Based on these four types of human-AI interaction, it is possible to determine that the use of fully autonomous AI (the fourth type) is contrary to the task of justice and can be fraught with distortion of justice, so the introduction of a fully autonomous AI in a democratic society is impossible.

At the same time, the issue of legal regulation of the “electronic person” remains controversial, the possibility of being a subject of legal relations in AI (in particular, to perform the functions of the judiciary), as noted Karmaz O., regarding the possibility of acquiring the legal status of such an “electronic person (personality)” [19] given the significant involvement of the use of artificial intelligence technology, it is important to determine, that artificial intelligence cannot have its own legal entity, it is a coordinated entity in a way to simplify the performance of functions by the subjects and for the actions committed, transactions performed, calculations must be responsible for the person using artificial intelligence and who acquires rights and responsibilities in connection with the actions committed by artificial intelligence. According to the author, AI can not have its own legal personality, precisely because a person should monitor compliance with the five principles of using AI, taking into account the three technical limitations of AI, determined by cross-industry research.

Conclusion

The introduction of artificial intelligence technologies without reasonable scientific development of the main institutional provisions, carries the risks of discrimination of the technology itself, abuse of application, distortion of information used by artificial intelligence, loss of state and public control over the process of justice. Therefore, there is a need for scientific justification and development in the field of artificial intelligence in economic justice, in particular:

- determination of scientifically grounded level of use of technology of artificial intelligence in legal proceedings;

- determination of state mechanisms for control over information used in calculating the results of artificial intelligence technology in legal proceedings;

- development of legal mechanisms to protect the technology of artificial intelligence in legal proceedings from the use of fake, false (false) information;

- determination of the legal status of artificial intelligence technology in legal proceedings;

- Creating a system to prevent the risks of using AI and distinguishing AI from software [19. p.405];

- definition of legal status of subjects of use of technology of artificial intelligence in legal proceedings, etc.

These issues require scientific research using international experience and involvement of domestic scientists in the exchange of developments conducted by international scientific circles.

References

1. The Hague Institute for Innovation of Law. Digital technology and judicial reform. URL: <https://www.hiil.org/research/digital-technology-and-judicial-reform/>.
2. European Parliament resolution of 16 February 2017 with recommendations to the Commission on Civil Law Rules on Robotics (2015/2103 (INL)). URL: https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-8-2017-0051_EN.html.
3. CEPEJ European Ethical Charter on the use of artificial intelligence (AI) in judicial systems and their environment. URL: <https://www.coe.int/en/web/cepej/cepej-european-ethical-charter-on-the-use-of-artificial->

intelligence-ai-in-judicial-systems-and-their-environment#:~:text=The%20CEPEJ's%20view%20as%20set,on%20Human%20Rights%20(ECHR)%20and.

4. Organisation for Economic Co-operation and Development, Recommendation of the Council on Artificial Intelligence.
URL: <https://legalinstruments.oecd.org/en/instruments/OECD-LEGAL-0449>.

5. White Paper on Artificial Intelligence.
URL: https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/commission-white-paper-artificial-intelligence-feb2020_en.pdf.

6. Declaration of the Committee of Ministers on the risks of decision-making through computer or artificial intelligence in the field of social security network. March 17, 2021

URL: https://search.coe.int/cm/Pages/result_details.aspx?ObjectId=0900001680a1cb9

7. Action plans of the Council of Europe for Ukraine. Official resource of the Representation of Ukraine in the Council of Europe.
<https://coe.mfa.gov.ua/spivrobotnictvo/plani-dij-radi-yevropi-dlya-ukrayini>.

8. European Commission for the Efficiency of Justice (2019). European Ethical Charter on the use of AI in the judicial systems and their environment. Adopted at the 31st plenary meeting of the CEPEJ (Strasbourg, 3-4 December 2018).
URL: <https://rm.coe.int/ethical-charter-en-forpublication-4-december-2018/16808f699c>.

9. Martsenko N. the legal regime of artificial intelligence in civil law. Actual problems of law. 2019. No. 4. C. 91–98.

10. European Court of Human Rights. PENDING Applications allocated to a judicial formation requêtes pendantes devant une formation judiciaire 31/12/2019
URL: https://www.echr.coe.int/documents/d/echr/Stats_pending_2020_BIL.

11. Reiling A. D. (Dory). Courts and Artificial Intelligence. International journal for court administration. 10.08. 2020.
URL: <https://iacajournal.org/articles/10.36745/ijca.343>.

12. Guodong Du, Meng Yu, Yuan Yanchao. Chinese Judges Shall Undergo Review and Approval Before Rendering Judgments Sat, 20 Oct 2018.

UPD: <https://www.chinajusticeobserver.com/insights/chinese-judges-shall-undergo-review-and-approval-before-rendering-judgments.html>.

13. Stec A. Artificial intelligence will be used in Ukrainian courts. Zaxid.net. 10.02.2021.
URL: https://zaxid.net/shtuchniy-intelekt-hochut-zastosovuvati-u-sudah-pershoyi-instantsiyi_n1514249.

14. Plakhotnik O. Practical use artificial intelligence in criminal proceeding. January 2019. Herald of criminal justice. DOI:10.17721/2413-5372.2019.4/45-57.

15. Vasylenko M. D., Slatvinska V. M. Artificial intelligence in judicial practice: features and its capabilities (intersectoral research). Law and Society 4/2022. 271-278.
http://pravoisuspilstvo.org.ua/archive/2022/4_2022/39.pdf.

16. Moor, J.H. The Status and Future of the Turing Test. Minds and Machines 11, 77–93 (2001).
<https://doi.org/10.1023/A:1011218925467>.

17. Karmaza, O.; Grabovska, O. Electronic person (personality) as a subject of legal relations in the civilized process. Entrepreneurship, economy and law, 2021, 2: 5-10.

18. Carey, Luci, Contractual and Tortious Maritime Liability Regimes and the Introduction of Autonomous Vessels (March 1, 2023). NUS Law Working Paper No. 2023/012, NUS Centre for Maritime Law Working Paper 23/03, Available at SSRN: <https://ssrn.com/Abstract=4403620>
or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4403620>.

19. Gudima, T.; Kamishanskiy, V. Artificial intelligence as an instrument of digitalization of foreign economic policy: features of legal regulation. Financial and credit activity problems of theory and practice, [S. l.], v. 3, n. 50, p. 398–409, 2023.
URL: <https://fkd.net.ua/index.php/fkd/article/view/4039>

The article has been sent to the editors 28.08.23.
After processing 13.09.23
Submitted for printing 15.09.23

Copyright under license CCBY-SA4.0.

Chapter 2. **INTELLIGENT
LEARNING
SYSTEMS**

Розділ 2. **ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ
СИСТЕМИ
НАВЧАННЯ**

TRAINING OF TRANSLATORS AND IMPLEMENTATION OF AI IN THE EDUCATIONAL PROCESS: CHALLENGES AND PROSPECTS

S. Yukhymets¹, O. Koliasa²

^{1,2}Odessa National Maritime University, Ukraine
Mechnikova str., 24, Odesa, 65029

²Drohobych Ivan Franko State Pedagogical University, Ukraine
I. Franko str., 24, Drohobych, Lviv region, 82100

²olenakoliasa@gmail.com

¹yukhymets.svetlana@gmail.com

¹<https://orcid.org/0000-0003-3350-7310>

²<https://orcid.org/0000-0001-5301-480X>

Abstract. The view of the science of translation as an applied branch of linguistics, which developed in the middle of the last century at the stage of formation of this scientific discipline, does not correspond to the current state of scientific knowledge of translation, which can only be transdisciplinary. Given that currently, the training of translation personnel is carried out mainly by teachers of foreign languages who do not have the necessary understanding of translation activity and the differences between linguistic didactics and translation didactics, it is also important to develop professional retraining programs in educational institutions with a pedagogical or philological focus. Thus, today the professional training of a translator, which already competes, so far successfully, with AI, poses many pressing questions to the scientific and pedagogical community, the solution of which cannot be delayed: how many translators will be needed in the digital space; with what competencies and cognitive abilities; For which fields of activity and with which language combinations; what will be the nature of human interaction with artificial intelligence; will the translation remain as we are used to imagine it today. All these and many other questions of a futuristic plan are necessarily faced by those who are entrusted by society to prepare translators for the digital age because those who come to master the speciality of translator today will enter the labour market only in 4-6 years when AI reaches such a level of abilities, which is difficult to predict today.

Keywords: translation, digital age, artificial intelligence, neural machine translation.

Translation is never just about languages, it is also influenced by culture. Compared to machine translation, human translation is more unique and cultural because translations also reflect a way of understanding and interpretation. In other words, human intelligence will make it possible to translate them into living human experiences and contribute to a better understanding by the target audience. Today, a new concept is born — "digital translation", which defines a new type of translation technology, a system of interaction between a translator and digital information and communication tools, artificial intelligence (AI), designed to increase the efficiency of translation art and the quality of translation products. In this regard, three types of approaches are considered: cognitive-technological — correlation of translation technologies and digital information and communication technologies in the modern world; socio-economic — possible social changes that may affect the translation profession in the next 20 years; Pedagogical —

features of training translation staff for the successful functioning of the "digital society".

Throughout its history, translation has often been defined as an art. French encyclopedist scientist D'Alembert in the middle of the 18th century in his "Observations on the Art of Translation" wrote about translation as an art that should not be required to obey rules and laws too rigidly, because this could equate the translator to a king captured by slaves (d'Alembert, 1822). Art, as is known, is an activity based on the figurative understanding of reality; it is also a form of creativity, directed in such a way as to reflect what is interesting not only to the creator himself but also to other people; finally, it is one of the ways of knowing the world. The word art has Slavic roots in both Church Slavonic and Old Slavic languages - it is "experience, test".

The art of speech transformation, the art of mediation, the art of decision-making in an environment of uncertainty, translation is the work of the intellect, which involves not only

linguistic knowledge, a broad outlook, and technological mastery, but also creativity, even cunning, dexterity and intelligence, as well as the ability to social and psychological adaptability.

These and many other qualities form the cognitive portrait of a person who devotes his life to translation - a type of verbal art - regardless of the historical era, for what purpose, and in which language pair it is carried out.

The 20th century turned translation into a mass profession, and the art of translation could not be passed on from master to master: a scientific understanding of the phenomenon of translation was needed. At the dawn of modern scientific knowledge of translation, two hundred years after D'Alembert's observations on the Art of Translation, the French linguist Munin (1963) stated that translation remains an art, but like medicine, an art based on science.

Modern technological transformations caused by the transition of society to the "digital" era are revolutionary and affect all aspects of social life - from the development of social institutions to the organization of everyday life and socialization of the individual, and therefore the problem of digitalization today attracts special attention of science and society (Koliassa et al., 2021).

The onset of a new industrial revolution was announced by Klaus Schwab, the initiator, ideological inspirer and permanent president of the Economic Forum. known for his economic predictions that often come true: "We are standing at the beginning of a revolution that will fundamentally change our lives, our work and our communication. In terms of scale, volume and complexity, this phenomenon, which I consider the fourth industrial revolution, has no analogues in all previous human experience" (Schwab, 2016: 8).

2002 is considered the beginning of digitization. At the same time, many questions arise, the main of which is how to make a digital transition with all the consequences for security, sovereignty and quality of life, what the result of this transition can be, what society will emerge as a result of all these changes, and whether humanity will change.

The assessment of the prospects of digital transformation thus turns out to be one of the key tasks along with the implementation of the digital transition strategy itself. In these conditions, one cannot help but think about the future of the art of translation.

Indeed, the history of translation convincingly shows that the evolution of this type of cognitive-communicative activity is directly related to the development of technologies that ensure perception, fixation, storage, reproduction and transmission of information. The invention of technical means for receiving and transmitting sound at a distance led to the birth of simultaneous interpretation. The development of algorithms for automatic interlanguage transitions initiated the so-called machine translation.

Over the centuries, information carriers have also changed: stone, clay tablets, wax tablets, papyrus, parchment, paper, and then diskettes, CDs, and flash drives, all the way to cloud storage, which surpasses the largest classical libraries in terms of the volume and speed of stored information.

In the 21st century, another invention gave another impetus to this development — the network interaction of computers and remote transmission of information from one machine to another, which was called the Internet. The properties of the modern digital format of information presentation — the possibility of copying without loss of accuracy, increasing the recording density, transmission speed, and, as a result, the scale of replication — is another milestone in the course of those technological trends that have contributed to the evolution of translation activity throughout its history. The benefits of using the new opportunities associated with ICT in translation are that they save resources, such as time. Editing a text, making changes to it, copying takes less time today than it did 30-40 years ago. Another example is the absence of the need to use bulky material carriers. If earlier you needed paper, stationery, a large number of dictionaries and reference books, special literature, and much of this could be obtained only in libraries and even then not always, today translation requires a personal computer, software and an Internet connection, which have limitations in terms of resources

since the entire toolkit is virtual. Add to this the adaptability and flexibility of programs. The costs of searching for information are reduced. The translator can change the workspace, characteristics and properties of translation tools (translation memory programs, automatic translation programs, databases and corpora) optimally for him, creating conditions for the most comfortable and efficient work.

Artificial intelligence in translation

Technological progress has changed and continues to change the face of the profession. It affects the translation process and its qualitative and quantitative characteristics. Active developments in the field of artificial intelligence (AI), designed to become the next round of scientific and technical progress, cause certain fears: does it not harbour a threat to the art of translation, as a kind of human creative activity and the source of its existence, does it not mark the beginning of the art of translation the end

If we are guided not so much by the desire to follow intellectual fashion, but by the need to predict possible answers to the challenges of the modern era, to reveal the essence of changes in translation practice and in the training of translation personnel, which are happening today before our eyes, and those predicted for the next 10-20 years, then the issue of the correlation of the art of translation of activity and artificial intelligence in the global information and communication system turns out to be far from empty.

In this regard, three groups of questions relating to the following aspects can be considered first of all:

1) cognitive-technological: about the possible correlations of traditional cognitive operations, which constitute the art of translation, and digital information and communication technologies of AI in the modern world;

2) socio-economic: about possible social changes that can affect the translator profession in the next 20 years;

3) pedagogical and psychological: about the peculiarities of training translation personnel for uninterrupted communication, which ensures the functioning of the "digital society" of the future, and about the

development of constructive behavioural and activity reactions in response to predicted changes in the translation profession.

The concept of "neural machine translation" (NMT)

Neural machine translation is a new type of translation that is a system of network interaction of the cognitive-communicative activity of a human translator and digital information and communication tools.

The idea of interaction between human translators and AI (machine) is not new. At the beginning of the 90s of the last century, due to the introduction of computerization in many types of human activity, the issues of automatic translation were once again at the centre of the attention of translation researchers. It was also necessary to study the nature of human-machine interaction in translation activity. And the simplest and most logical way seemed to be the distribution of functions between a human translator and a machine by the goals of communication and requests from society. At a scientific conference in Montreal in 1993, dedicated to determining the place of automatic and "human" translation in public translation practice, one of the reports admitted that in terms of translation methodology, it is very tempting to talk about competition and even antagonism between human and machine translation, that these two processes are irreconcilable and lead to completely different results. However, in the market of translation services, these two types of translation can complement each other under different requests and requirements for quality, volume and terms of product submission and financial capabilities of the consumer-customer, i.e. coexist with each other (Derieux, 1994).

NMT appeared in 2016. To date, this is the most successful translation software. In addition to being able to reduce error by 60% compared to its predecessor, statistical machine translation (SMT), NMT is also significantly faster.

NMT is based on a model of neurons created in the likeness of the human brain. This set allows the software to create contextual links between words and phrases. She can make these connections by learning language

rules. It scans millions of blocks from your database, identifying common features. The machine then uses the learned rules to create statistical models that help it understand how a sentence should be constructed.

An innovative feature of the creation of NMT is a new language of numbers, which helps with translation. The machine encodes each word into a number, into the so-called vectors: 1, 2, 3, 4, 5, 6. This number series is transmitted to the neural network and further decoding takes place. Based on the learned language rules, the system outputs the corresponding words in the translation language. The numbers 7, 8, 9, 10, and 11 corresponding to the words of the entire sentence are generated. Then these numbers are deciphered and as a result, are turned into sentences.

Essentially, the system translates words into its language and then "thinks" about how, based on what it already knows, it can shape those words into an understandable solution — just like the human brain did.

NMT can successfully translate different types of literature because it slowly but surely understands the context. The system focuses not only on the translated word but also on the words before and after it.

Key events in the development of neural machine translation:

2010. How Google Translate Works

Google Translate online translator already knows how to translate not only individual words but also entire sentences and texts. And if you look at these translations, you will see that the translated words do not always go in the same order as the original ones: the translator tries to generate sentences taking into account the meaning and rules of the language. For translation, a person needs a wide variety of knowledge about the world and the language. But Google Translate uses a different hack: it analyzes millions of texts and human translations and generates patterns from frequently occurring phrases. The more translations he processes, the better its translation becomes.

2016. Google Translate starts using meaning to translate

Until then, Google Translate has used a statistical method of translation. It broke the sentence into phrases, and analyzing millions of previously made translations, determined the most likely translation of a given phrase. This works much better than literal translation but is still significantly worse than human translation. The new version of the service, based on Neural Machine Translation technology, translates not words or phrases, but entire sentences. The system extracts objects, events and connections between them from the sentence, and then expresses the meaning in another language. It consists of two 8-layer neural networks, analyzing and synthesizing. An additional attention module is installed between the neural networks, which controls that rare words that are important for the meaning of the sentence are not missed. At the moment, the new algorithm works with 9 languages: English, French, German, Spanish, Portuguese, Chinese, Japanese, Korean and Turkish. Support for all 109 languages will be added in the future.

2016. Facebook abandoned Bing Translator in favour of its translator

Facebook has been providing the ability to translate posts into your language for several years now. Until now, this function was carried out using Microsoft's Bing Translator, but Facebook decided to abandon it and developed its own. It is said that Bing is suitable for official texts, but does not cope well with ordinary human hacks filled with errors and phraseological units. To train the translator, Facebook uses its huge database of user messages, i.e. everything you write on Facebook can be used as a translation of other posts.

2017. Google introduced wireless headphones with a built-in translator

In a big reveal, along with a new phone, laptop and other goodies, Google introduced the \$159 Pixel Buds wireless earbuds, which are designed to get you closer to your Google Assistant. At first glance, this is just a pathetic parody of Apple AirPods + Siri. However, Google has a big advantage - a translator that translates speech in real-time. And with the new headphones, you will be able to negotiate with foreign partners like a President. The speech recorded by the built-in microphone in

a foreign language (and 40 languages are supported) will be played back in your language in the headphones. And your partner will hear a simultaneous translation of your speech in his headphones.

2019. PROMT released a corporate translation server based on neural networks

PROMT has introduced a translation solution using neural networks and big data technologies - PROMT Neural Translation Server. Modern machine translation systems mainly use a statistical or neural method. PROMT Neural - uses a hybrid approach, where both the statistical model and the neural network offer their translation option. Algorithms developed by the company analyze the text and decide which technology is best suited for translating a particular piece of text. At the same time, according to the developers, the system takes into account the full context of the sentence in the source text and the previously created translation. This approach, according to PROMT, provides a translation without a "machine accent", the closest to a "human" one. The cost of the solution may vary depending on the client's requirements for customization and the number of users.

2019. Google introduced Translatotron - a technology for the simultaneous translation of the oral speech

Google has introduced a new technology for simultaneous translation of oral speech - Translatotron. Typically, systems use a waterfall model to translate spoken language from one language to another. First, the system automatically recognizes speech for its transcription, then the received text is machine translated, and then the text is converted into an audio recording. Such a system is also used in Google Translate. Google's new experimental algorithm skips the speech-to-text step. The neural network created by the developers receives a spectrogram of the original audio recording with a voice and synthesizes a spectrogram with a speech in another language. The algorithm then synthesizes the audio file.

2019. Google Assistant learned simultaneous translation for 27 languages, including Ukrainian

The Google Assistant virtual assistant can now help you communicate more easily

with foreign partners and clients. It has a simultaneous translation mode into 27 languages. The first device to support it was the Google Home Hub smart display. To activate the function, you need to ask the Assistant to be a translator in the selected language. While the translator does not work perfectly, therefore, in addition to simultaneous translation, you will also get funny meanings that will create a more relaxed atmosphere for communicating with foreign partners and clients.

2020. iOS 14 introduces offline translator, browser selection, camera indicator

Apple introduced a new version of iOS 14 mobile OS. The new "App Library" automatically organizes applications into categories - like folders, only better. It will also be possible to hide entire screens with applications on the main page. Apple Translate has more language pairs for translation and a simultaneous translation capability that uses machine learning-assisted speech recognition. The application can work completely offline. Also, there is a choice of browser and mail service by default. Before this, links only opened in Safari by default. Now you can assign various commands by tapping on the back cover of the phone. An indicator of a working camera or microphone has appeared. If some application is using your camera right now, you will see a green dot in the upper right corner. If using a microphone, yellow.

2022. Facebook releases AI technology for translating texts into 200 languages

Mark Zuckerberg said that his company has opened the source code of an AI model that can translate text into 200 languages. According to him, the multilingual model has more than 50 billion parameters, it was trained using the Research SuperCluster supercomputer. Advances in this area will enable more than 25 billion transfers per day across the company's apps, Zuckerberg wrote. This is part of the No Language Left Behind (NLLB) project that the company announced in early 2022. In particular, the NLLB-200 model can perform "high-quality" translations in 55 African languages.

2023. *Online translator DeepL introduced the Write AI assistant to correct errors in the text*

The German company DeepL has released a beta version of DeepL Write, an AI assistant for writing texts in a foreign language. Like the similar service Grammarly, this tool corrects grammatical errors and suggests options to improve style or find more accurate words. The team decided to launch the tool after noticing that users often translate text from their language into a foreign language and vice versa to catch possible errors. The next step in the development of the tool will be to focus not on the content of the text, but on "elusive tones and wording".

Like the brain, deciphering different information, this artificial neural network looks at the received information and generates the next word based on the previous one. In this way, it will learn which words to focus on and, relying on existing examples, determine which context is of primary importance. This method is a type of multi-level learning and can improve as the system receives more and more data. In NMT, the context of decryption is called "alignment", it occurs with the help of the Attention mechanism, which takes an intermediate place in the system between encryption and decryption.

In this methodological system, both outright antagonism and mutual benefit are indeed combined. The antagonism between machine and man is caused, on the one hand, by the ever-increasing concern about the future of the human profession of the translator, who will try to replace artificial intelligence in all situations of interlanguage communication, which is more economically advantageous, and on the other hand, by criticism of automatic translation programs that offer options, are not able to compete in various situations of interlanguage communication with the options of a human translator.

The mutual benefit of the human-AI relationship in this system is obvious. On the one hand, a smart machine that instantly operates with large data allows the translator to quickly review a possible large number of options for a "specific case" that caused difficulties, and make a choice based on individual logic. On the other hand, each new

version of the "specific case" translation proposed by the translator and entered into the cloud of big data in the global information system enriches the system and allows the self-learning machine to predict it in the future for new translation decisions.

Thus, thinking about "digital translation" and the binomial human translator/AI as a system of human interaction that takes advantage of information technology in translation and AI that performs so-called automatic translation should not be limited solely to the ability of AI to perform with that or to some other extent the functions of a human translator, completely or partially replacing him in some situations of interlanguage communication. It is also important that the AI systematizes the previous decisions of the human translator by constantly learning itself.

Cognitive aspect

It would be naive to assume that the interaction between humans and artificial intelligence affects only the technological processes of translation, as well as the fact that only AI is subject to development and evolution. Human cognitive abilities, constantly interacting with AI, also remain unchanged. Cognitive operations carried out by a person in the process of translation directly depend on the degree of development of such abilities as perception and attention, speed of information processing, memory, simultaneous operation of language systems, and language activity.

By delegating some functions of working with information to artificial intelligence, a person frees his mind from some cognitive operations, which in the process of evolution can lead either to the weakening of human intelligence, up to complete degradation, or, on the contrary, to the filling of the vacated intellectual space with new, until known cognitive abilities.

It is hardly possible to predict all possible changes in the translator's cognitive activity. Therefore, let's focus on only two, but extremely important for the art of translation, phases of the translation process - perception and understanding of the original message.

Socio-economic aspect

In the socio-economic sphere, it is still too early to make predictions about the translator. Of course, compared to human translation, automatic translation is more profitable for translation consumers: volumes increase, and translation speed increases with minimal costs. Therefore, the question of whether AI can displace humans from this activity is not entirely accurate. Rather, the question should be asked whether human society will want to entrust the performance of this social function to AI, and if so, in which areas of communication, in which language combinations, in which types of translation, in which communicative situations.

Today, there is a lot of talk about the fact that the introduction of new technologies and the achievement of the level of digitalization that is already possible today will inevitably result in the release of huge masses of workers, and the disappearance of entire classes of professions. Mass professions, both workers and intellectuals (drivers, salesmen, accountants, economists, lawyers, porters, etc.) will be under threat. At the same time, the shortage of highly qualified personnel capable of working in new economic conditions will worsen. The development of digital technologies is designed primarily to optimize the work of translators and to fall into pessimism about the future of the profession and its demand is at least unconstructive. A study conducted by Frey and Osborne from the University of Oxford 6 years ago ranked the professions of translators and interpreters only 265 out of 702 professions susceptible to full or partial automation with a probability ratio of 0.38 (Frey, Osborne, 2).

Indeed, "technological unemployment", associated with the complete replacement of man by machine, threatens translators only to a weak extent. Of course, complex algorithms and developments in the field of robotics and artificial intelligence based on big data make it possible to automate many non-standard tasks today. But activities involving complex perception and awareness tasks, creative intelligence tasks, and social intelligence tasks are difficult to automate.

The art of translation, whether it is an oral or a written form, includes the tasks

inherent in creative intelligence and, of course, the tasks of social intelligence. The main obstacle to automating the art of translation is the difficulty or impossibility of classifying creative values in such a way that they can be coded in a program (Boden, 2003). In addition, human values change over time and differ from culture to culture. If art and creativity by definition involve not only innovation but also value, and since values vary widely, it follows that many of the arguments, counterarguments, and controversies about creativity stem from disagreements about value itself. Even if we could discover, categorize and encode our creative values so that a computer could then operate and control these algorithms on its own, the differences would remain the same. They would relate to how creatively the computer approached the solution of the problem, and how skillful it was. The task becomes even more difficult when it comes to translation evaluation.

However, although some algorithms and robots can reproduce certain aspects of human interaction in society, recognizing natural human emotions in real-time is still very difficult for artificial intelligence, and responding to them adequately is more difficult.

Thus, it can be assumed that under the influence of new digital technologies, the profession of translator will not disappear, but will change. The axiological aspect is important in connection with the prospects of the digital revolution and its impact on social life. Thus, according to scientists, the consequence of the globalization model approved in the 90s was not only the financial and economic and power pressure of some countries on others.

Pedagogical aspect

To prepare translators to ensure successful interlingual communication in the conditions of digitization of most types of human activity, it is necessary to carefully and comprehensively consider the issue of changes in the content of the education of translators, which provide not only an effective dialogue between human intelligence (translator) and AI (automatic translation programs) within the framework of the translation binomial and features of electronic media.

The considered example of reading in a digital environment makes us take a closer look at the main tasks of translation didactics for the formation of translation personnel of the future, which needs to resolve the main contradiction between the cognitive abilities formed spontaneously by the digital environment during the mastering of the main program of secondary general and higher special education. Translation is necessary, under conditions when the former opposes the development of the latter.

Accordingly, it is necessary to clarify and supplement the content of the education of a translator in the digital era, which involves, first of all, the introduction of new disciplines aimed at both the development of new competencies and the improvement of previously acquired ones in the secondary general education system, in particular: professional “translation reading”, “home” text processing, post-machine editing of texts, search, processing and verification of information in the “big data” system, etc.

Currently, the so-called post-editing, i.e., editing texts translated by machine translation programs. To clarify the content of translator training, it is also necessary to determine the areas of interlanguage communication that are most prone to automation soon. This involves a careful study of the feasibility of including in the training program the development of branch translation skills (legal, medical, technical, etc.), based on mastering complexes of special terminology, to establish the most effective balance between memorizing and searching for linguistic information.

Conclusion

In the conditions of a competitive dialogue between natural and artificial intelligence in translation activities in the digital era, more attention should be paid to the formation of the translator's personality as a specialist in interlingual and intercultural communication, capable of rationally making the most effective decisions based on a systemic transdisciplinary view of translation activities. At the beginning of the 20th century,

there was a popular saying: "Generals always prepare for the last war." If we continue to train translators today according to the models and ideas about translation activity that were developed decades ago and have not yet lost their relevance, then we can resemble such generals, and the new generation of translators that is being formed today may not be ready for future changes in society. As for the threats posed by artificial intelligence to the art of translation, let's remember that art and technology have always intersected and fed each other — the experiments of Leonardo da Vinci and Michelangelo are a vivid confirmation of that. How and what will be demanded and appreciated by society is another question.

References

1. Boden M. A. The creative mind: Myths and mechanisms. Routledge, 2003.
2. D'Alembert J. le R. Observations sur l'art de traduire (1763). Oeuvres de d'Alembert. Tome 4, Partie 1. Paris, Ed. A. Belin, Bossange père et fils, Bossange frères, 1822, pp. 29-42.
3. Durieux C. Traductique et traduction humaine : concurrence ou complémentarité? TATAO: RECHERCHES DE POINTE ET APPLICATIONS IMMEDIATES. Actualité scientifique. Actes du Colloque de Montréal 1993. Sous la direction de: André Clas, Université de Montréal, Pierrettes Bouillon, ISSCO de Genève, 1994.
4. Frey C. B., Osborne M. A. The future of employment: how susceptible are jobs to computerisation? Available at: http://www.oxford-martin.ox.ac.uk/downloads/academic/The_Future_of_Employment.pdf.
5. Mounin G. Les problèmes théoriques de la traduction. Paris, Gallimard, 1963.
6. Koliassa O., Lelet I., Serebriakova V., Yukhymets S. The Use of Hypermedia Technologies in Higher Education Institutions During COVID Lockdown (May 23, 2021). Arab World English Journal (AWEJ) Special Issue on COVID-19 Challenges April 2021. Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=3851662>.

The article has been sent to the editors 19.07.23.
After processing 04.08.23.
Submitted for printing 10.08.23.

Copyright under license CCBY-SA4.0.

Chapter 3. **PATTERN RECOGNITION
AND PERCEPTION
SYSTEMS**

Розділ 3. **СИСТЕМИ РОЗПІЗНАВАННЯ
І СПРИЙНЯТТЯ ОБРАЗІВ**

IMPROVING THE ACCURACY OF LANDMINE DETECTION USING DATA AUGMENTATION: A COMPREHENSIVE STUDY

O. Kunichik¹, V. Tereshchenko²

^{1,2}Taras Shevchenko National University of Kyiv, Ukraine

60, Volodymyrska st., Kyiv, 01033

¹ao669517126@gmail.com

²V_ter@ukr.net

¹<http://orcid.org/0000-0002-4938-9446>

²<http://orcid.org/0000-0001-7639-2969>

Abstract. In areas such as landmine detection, where obtaining large volumes of labeled data is challenging, data augmentation stands out as a key method. This paper investigates the role and impact of different data augmentation methods, and evaluates their effectiveness in improving the performance of deep learning models adapted to landmine detection.

Landmine detection is governed by international security requirements on the one hand, and urgent humanitarian needs on the other. This field, characterized by its urgency and the requirement for meticulous accuracy, is key against the explosive ordnance. The hidden dangers of these munitions go beyond direct physical damage, leaving their mark on the socio-economic structures of the affected regions. They hinder agricultural activities, impede the restoration of infrastructure and create obstacles to the return and resettlement of displaced populations. The mission to detect and neutralize these hidden hazards combines advanced technology with an unwavering commitment to humanitarian principles to leave future generations with a land cleared of the heavy legacy of past wars.

The effectiveness of machine learning models in detecting landmines is inextricably linked to the diversity, volume and reliability of the data they are trained on. The effort to collect a diverse and representative dataset is fraught with challenges, given limitations related to accessibility, ethical considerations and security issues. The lack of comprehensive data poses significant obstacles to the development and refinement of machine learning algorithms, potentially limiting their ability to operate effectively in diverse and unpredictable areas.

In response to these limitations, data augmentation has become an important method. It is a way to circumvent data limitations by supplementing existing datasets with synthesized variations. Augmentation strategies include spatial alignment, pixel intensity manipulation, geometric transformations, and compositing, each of which is designed to give the dataset a semblance of real-world variability.

This study explores the various applications of data augmentation in the field of landmine detection. It emphasizes the importance of augmentation as a means of overcoming data limitations.

Keywords: Landmine Detection, Data Augmentation, Machine Learning, Dataset Enhancement, Computer Vision, Deep Learning Architectures.

1.Introduction

Landmine detection plays a key role in global security and humanitarian efforts, ensuring the safety of people in war-torn areas. Detecting these often invisible threats is a process accompanied by many challenges, one of the most important of which is the lack of reliable and diverse data suitable for training pattern recognition systems. This article discusses the importance of landmine detection, the challenges associated with limited datasets, and explores an innovative solution for data augmentation to improve detection capabilities.

Landmine detection is not only a technical challenge; it has profound humanitarian implications. Undetected landmines continue to pose risks that result in casualties, hindering socio-economic development and impeding post-war recovery and the return of people to their homes. For example, the de-occupied territories of Ukraine are a continuous zone of contamination by landmines and other explosive hazards [1]. Therefore, effective landmine detection systems are becoming essential to ensure both human safety and the rapid recovery of the affected areas.

Modern landmine detection relies heavily on algorithmic approaches, such as machine learning models, which require diverse and comprehensive datasets to perform optimally [2], [3]. However, obtaining such datasets is challenging. Conflict zones, which are often prime locations for data collection, pose logistical, ethical, and geopolitical obstacles that make data collection limited and difficult. This scarcity impedes the development of robust algorithms, leading to the risk that models will not generalize and will not be effective across different territories.

To address the challenges posed by data scarcity, data augmentation emerges as a promising approach. This technique amplifies both the volume and diversity of datasets through artificial means. Employing a range of transformations, such as spatial, pixel-based, and temporal (spanning day-night shifts), data augmentation enriches the quality and scope of training data. This not only curtails the potential for model overfitting but also equips models to adapt to real-world variability, enhancing the accuracy of landmine detection.

In the realm of pattern recognition, augmentation serves as a pivotal instrument to enhance data utilized in machine learning, especially deep learning. Through diverse transformations, including rotation, scaling, cropping, flipping, and noise addition, it bolsters data diversity and quality. These modifications are vital for elevating model precision and recall rates. This manuscript offers an overview of augmentation methodologies employed within a broader project dedicated to constructing an explosive ordnance detection system [4].

2.Related Work

Different types of images and tasks require specialized augmentation methods. To this end, many studies have developed frameworks and libraries to provide a wide range of image augmentation methodologies. Paper [5] made a significant contribution to a broad overview of image data augmentation methods, assessing their impact on the main tasks of computer vision, namely semantic segmentation, image classification, and object detection.

The imgaug library [6] contains many methods, such as flipping, rotation, noise addition, contrast change, and others, which are used in the study. Also, in [7], the "Keras preprocessing layers" were introduced, a module integrated into TensorFlow that facilitates image resizing, scaling, rotation, flipping, and other augmentation processes. This paper also includes a practical guide that explains how to use these layers to process datasets and train models.

Among recent developments, the "albumentations" library [8] deserves special attention. This library offers an efficient and flexible tool for image augmentation, presenting a variety of methods optimized for various computer vision tasks. The flexibility and extensibility of "albumentations" position it as an essential asset for researchers and practitioners in this field.

3.The need to supplement the detection of landmines: Overcoming dataset limitations and issues of overfitting

In the complex field of landmine detection, collecting comprehensive datasets is a huge challenge, which emphasizes the indispensable role of data augmentation. The foundation of effective landmine detection models is a dataset that reflects the diverse typologies of landmines scattered across a range of terrains, atmospheric conditions and types of emplacements. However, the effort to assemble such a comprehensive collection faces pragmatic obstacles. The search for authentic, multifaceted images of landmines faces many logistical, ethical and security challenges. The lack of diverse images of landmines poses a huge obstacle, making it difficult to develop models that are universally adaptable.

Against this backdrop, augmentation is a reasonable solution. By skillfully applying a variety of transformations to existing images, augmentation artificially increases the diversity in a dataset. This careful process produces a dataset that, while based on a limited set of authentic samples, resonates with the unpredictability and complexity of real-world landmine encounters.

Limited datasets invariably raise the spectre of overfitting, a phenomenon where

models, in their quest for accuracy, become constrained by the specifics of the training data, decreasing their effectiveness in new scenarios. The lack of real landmine imagery exacerbates this problem. Without sufficient variability, models tend to memorize the features of the dataset, which makes them poorly adapted to real-world conditions.

This is where augmentation comes in. By generating many synthetic variations based on a base set, it effectively expands the variability of the model. This augmentation reduces the risks associated with overfitting the model, contributing to models that, although based on limited real-world data, are able to recognize the diverse environmental combinations associated with landmines.

4.Common augmentation methods: Exploring the complexities of data augmentation in landmine detection

4.1. Basic augmentation techniques

Landmine detection benefits greatly from data augmentation, which uses a set of techniques to enhance and diversify the dataset. This section focuses on the main types of augmentation techniques relevant to this field: spatial transformations, pixel-level variations and geometric changes. The impact of different techniques on different objects may vary. Determining which algorithm to apply to an object is learned through experience and experimentation. For example, grayscale for some types of mines (round MON-100 and MON-200) (Fig.1.c) significantly reduces the accuracy of the models, while for others, such as PFM-1 (petal) (Fig.1.a), it increases it. This is because the former, when grayscaled, becomes simple round objects, while for the petal, which has a wide range of colors, this, on the contrary, helps to improve accuracy. For MON-50 grayscale is an option - it can be different colors (Fig.1.b).

4.1.1. Spatial transformations

Spatial transformations change the overall arrangement of an image without changing its content. The most common methods include rotation, scaling, cropping, and flipping. Rotation provides different

angles of the same image (Fig. 2). Zooming allows you to get a close-up or wide view. Cropping focuses on specific parts, and flipping creates mirror images, adding variety to the dataset.

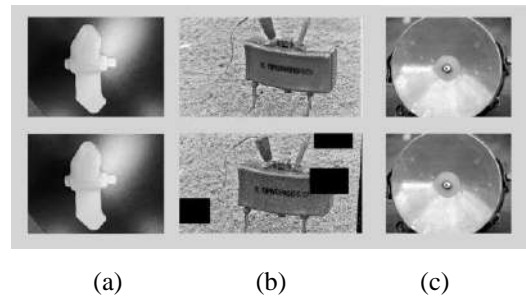


Fig. 1. Grayscale: PFM-1 (a), MON-50 (b), MON-100 (c)

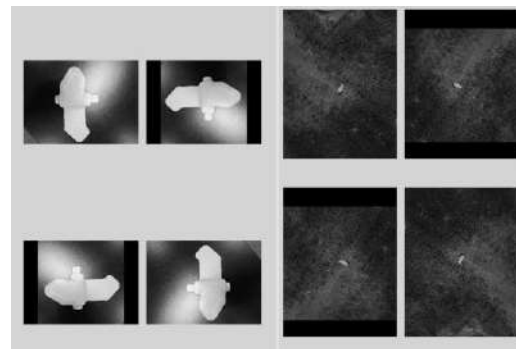


Fig. 2. Rotate PFM-1

4.1.2. Variations at the pixel level

Pixel-level adjustments adjust brightness, contrast, saturation, and even introduce noise (Fig. 3). These adjustments help models train on images that simulate different lighting conditions and minor imperfections that are common in the real world.

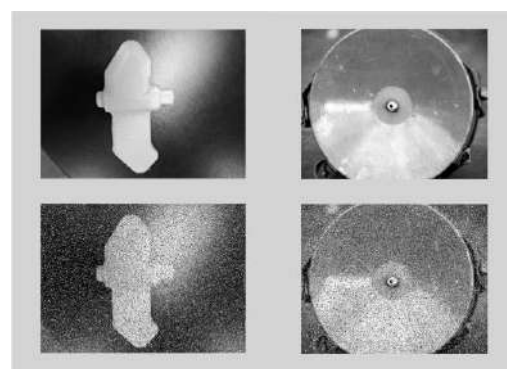


Fig. 3. Noise 25% PFM-1 (left), MON-100 (right)

4.1.3. Geometric and morphological transformations

Geometric alterations involve manipulating an image to distort its structure, such as stretching or curving it. Morphological techniques, such as dilation and erosion, shear (pic. 4), change the contours and features of an image. Both types help models to recognize landmines in different terrains and under different conditions.

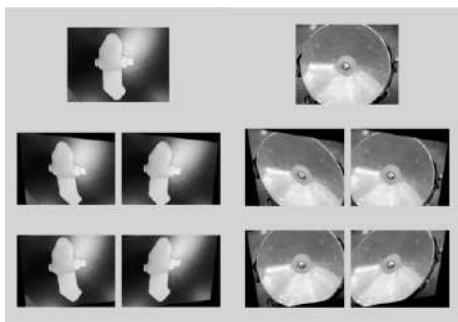


Fig. 4. Shear PFM-1 (left), MON-100 (right)

Thus, these augmentation techniques expand and diversify the training data. By simulating different conditions and scenarios, they prepare models for real-world challenges in landmine detection, increasing accuracy and reliability.

4.2. Advanced Augmentation Techniques

In the study, advanced data augmentation holds a pivotal position. These techniques are integrated into the YOLOv8 training process, enhancing the data's variety and subsequently the model's performance. Let's introduce definitions of some metrics.

In machine learning, the term "loss" refers to a measure of how well a model's predictions match the true values. There are many different loss functions, such as Mean Absolute Error (MAE), Mean Squared Errors (MSE), Sum of Squared Errors, etc. The latter is mathematically expressed by the formula:

$$L_{SSE}(y, \hat{y}) = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2,$$

where y is the true value and \hat{y} - is the predicted value. A larger loss, or also error, indicates a larger discrepancy between the predictions and the true values.

The Box loss is the specific metric that measures how close the predicted bounding

box is to the actual labels on the image in the dataset. In YOLO the Mean Square Error loss function is used to calculate the Box loss [15]:

$$L_{MSE}(y, \hat{y}) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2,$$

where y is the true value and \hat{y} - is the predicted value.

The Class loss is calculated on the Binary cross-entropy loss (or Log-loss) function for the confidence values of each bounding box between predicted and ground truth ones:

$$L_{BCE}(y, \hat{y}) = -\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i \log \hat{y}_i + (1 - y_i) \log(1 - \hat{y}_i)),$$

where y is the true value and \hat{y} - is the predicted value.

Box loss is usually understood as the difference between the predicted coordinates of the object's bounding box and the actual coordinates of the bounding box. In contrast, `cls_loss` quantifies the difference between the predicted class labels and the true class labels.

With mosaic and mix-up augmentations activated during YOLOv8 training, we have noted elevated values for `box_loss` and `cls_loss`. This is due to the nature of the Mosaic method – it combines 16 images from a dataset, and Mix-up makes these pictures merged from several files [9]. That is why the box loss and the class loss in these augmentation methods becomes higher with increasing precision and, particularly, recall (Fig 5-6). However, when these parameters are turned off, their values are significantly reduced to less than 0.01. It should be noted that even with these loss values, the precision and recall remain very high – both exceed 90%.

Maintaining high precision (1) and recall (2) remains crucial so it is acceptable not to pay attention to high `box_loss` and `cls_loss` metrics.

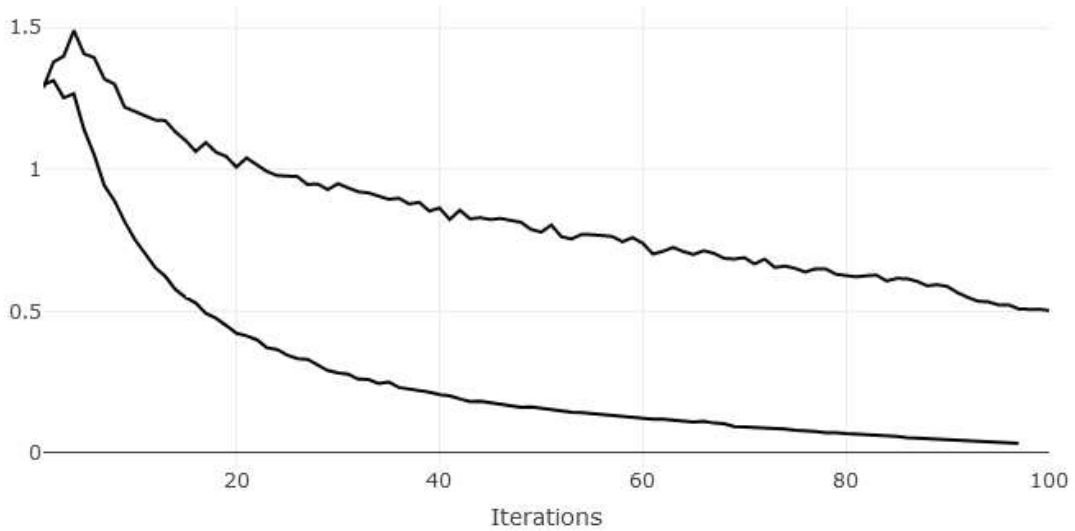


Fig. 5. Box loss for training with Mosaic and Mix-up (top line) and without them (bottom line)

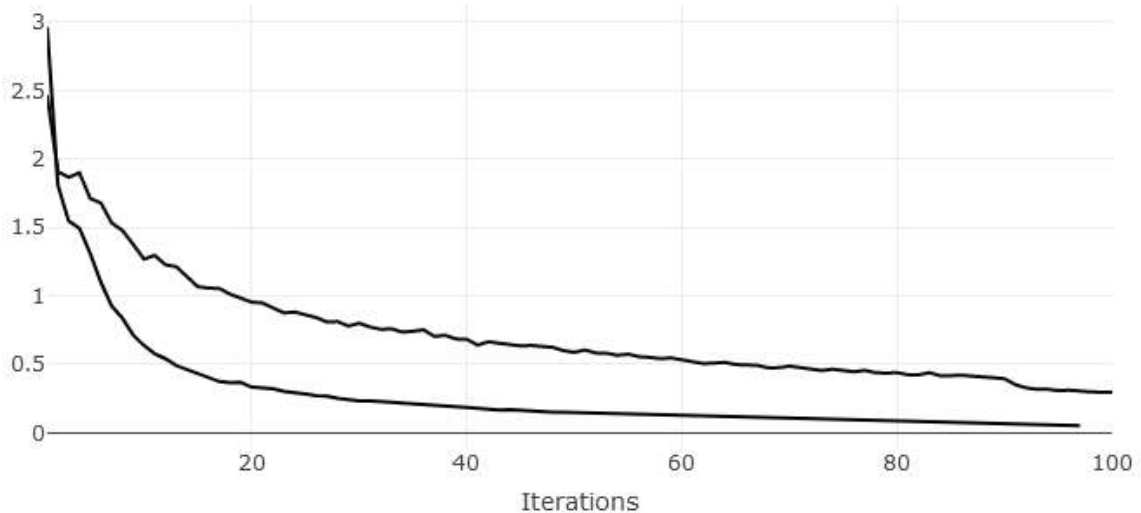


Fig. 6. Class loss for training with Mosaic and Mix-up (top line) and without them (bottom line)

Figures 5-6 show the last 10 epochs of the learning processes when Mosaic was disabled (the default YOLOv8 setting), the upper lines on Fig. 5-6 go down because there are no combined images in the training process (Fig. 8).

Precision is an indicator of how often the model's predictions are correct, and recall indicates how many true alarms were identified by the model (Fig. 7 and formulas (1), (2)).

$$\text{Precision} = \frac{\text{True Positives}}{\text{True Positives} + \text{False Positives}} \quad (1)$$

$$\text{Recall} = \frac{\text{True Positives}}{\text{True Positives} + \text{False Negatives}} \quad (2)$$

		Positive	Negative	
Predicted	Positive	True Positive	False Positive	
	Negative	False Negative	True Negative	
		Actual		

Fig. 7. The Confusion Matrix

Balancing these metrics, as well as managing box_loss and cls_loss, is vital to achieving optimal performance, especially in tasks such as object detection.

Here, some advanced strategies that add depth and adaptability to the data are explored. The current study uses algorithms from the YOLO family. So, one of the methods used by default is a Mosaic - a set of several images grouped into a single image.

4.2.1. MixUp and CutMix

MixUp and CutMix [9, 10] are the techniques that go beyond simple image modification. They combine parts of different images and their labels. This not only diversifies the labels, but also provides models with a wider selection of images to learn from. This approach helps the models understand different types of landmines and reduces the likelihood of false positives. In the study, we use Mix-Up together with Mosaic (Fig. 8).

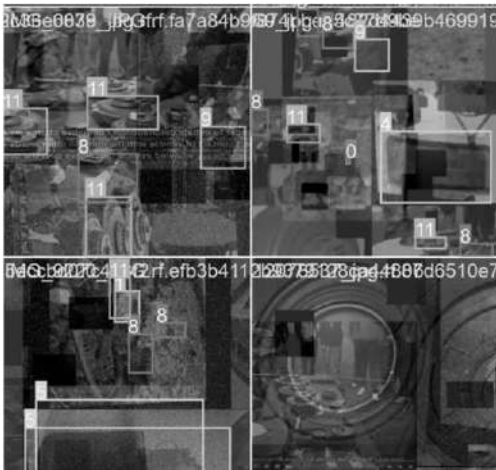


Fig. 8. The Part of the mosaic of mix-ups

4.2.2. GAN-based Augmentation

Generative adversarial networks (GANs) [11] have reshaped the perspective on data augmentation. They are adept at producing images closely resembling actual mines. A GAN is structured with two components: a generator, which crafts images, and a discriminator that evaluates their authenticity. This interplay aids models in deepening their understanding of landmine appearances. The inclusion of these synthetic images in the dataset enriched the training examples of the models. This approach is earmarked for implementation in upcoming study phases.

4.2.3. Sim2Real augmentation

Sim2Real [12] combines virtual simulations with real data. These simulations contain a diverse set of scenarios and challenges, allowing the models to learn from both simulated and real environments. The main benefit is the enhanced ability of the models to identify landmines under different conditions, surpassing the limitations of simple camera snapshots. Although we have considered this method, it has not yet been integrated into research.

In summary, by applying these advanced techniques, it is possible to manage diverse and complex data sets for the models. This enriched data bolsters the precision and adaptability of the models. Such strategies redefine the potential in landmine detection, enhancing the efficacy and safety of the solutions.

5. Experiment and results: Testing the preprocessing methods

In this section, we will discuss the different data preprocessing methods we used and how they affected the performance of the model.

While the primary focus of the study is on data augmentation, it's crucial to touch upon the initial steps of preprocessing. Although preprocessing doesn't increase the dataset size like augmentation, it remains a foundational phase in most machine learning processes. One such integral process is resizing all images to maintain consistency across the dataset. The study recognized and used numerous preprocessing tools to improve data quality. Specifically:

- Auto-Orient was used to standardize image orientation, ensuring uniformity in model input.
- Resizing all images provided a consistent dimension, ensuring dataset consistency.
- Leveraging the auto-adjust contrast ensured clearer, more discernible images, facilitating improved pattern detection by the models.
- While it was initially considered converting all images to grayscale, later it was opted to augment only 30% of the dataset in this manner, as it yielded superior outcomes.

The repercussions of these preprocessing strategies on the model's effectiveness are elaborated upon in the provided Table 1.

Table 1. Results of experiments with preprocessing

Version ID	mAP / Recall /Precision	Preprocessing	Augmentations
6	94.4/82.4/93.6	Auto-Orient, Resize: Stretch to 640x640	No
17	89.1/83.0/91.3	Auto-Orient, Resize: Stretch to 640x640, Auto-Adjust Contrast	Grayscale: Apply to 30% of images
19	91.0/84.2/93.4	Auto-Orient, Resize: Stretch to 640x640, Auto-Adjust Contrast	Grayscale: Apply to 30% of images., Cutout: 3 boxes with 21% size each
20	88.8/81.4%/91.2	Auto-Orient, Resize: Stretch to 640x640, Auto-Adjust Contrast	Grayscale: Apply to 40% of images
21	89.6/81.1/92.1	Auto-Orient, Resize: Stretch to 640x640, Auto-Adjust Contrast	Grayscale: Apply to 40% of images., Cutout: 3 boxes with 21% size each
26	88.7/84.6/89.0	Auto-Orient, Resize: Fit (white edges) in 640x640	Grayscale: Apply to 30% of images. Cutout: 3 boxes with 21% size each
27	89.5/82.1/91.7	Auto-Orient, Resize: Fit (black edges) in 640x640	Grayscale: Apply to 30% of images. Cutout: 3 boxes with 21% size each
29	91.3/85.9/90.3	Auto-Orient, Resize: Fit within 640x640	Grayscale: Apply to 30% of images. Cutout: 3 boxes with 21% size each
39	91.2/85.2/91.7	Auto-Orient, Resize: Fit within 640x640, Auto-Adjust Contrast: Using Contrast Stretching	Grayscale: Apply to 30% of images. Cutout: 3 boxes with 21% size each
41	94.2/90.2/96.1	Auto-Orient, Resize: Fit within 640x640, Auto-Adjust Contrast: Using Contrast Stretching	Grayscale: Apply to 30% of images. Cutout: 3 boxes with 21% size each
42	93.7/89.4/95.2	Auto-Orient, Resize: Fit within 640x640, Auto-Adjust Contrast: Using Contrast Stretching, Flip: Horizontal, Vertical	Grayscale: Apply to 30% of images. Cutout: 3 boxes with 21% size each

6.Dataset Overview: Utilizing YOLOv5 and Roboflow [13]

We started with a diverse collection of landmine photographs. This collection of different types of landmines captured under different conditions laid the foundation for the experiments. Our initial modifications to the data were done on the Roboflow platform, where the model was also published [16]. Several augmentations were applied here, including grayscale, cutout, rotation, flip, shift, blur, and noise, adapted specifically for the YOLOv5 model. The best results were

obtained with Cutout 21% and Grayscale (Table 1, Version Id 41). At this stage, we switched to the more modern YOLOv8 model and tested different augmentation techniques again. After testing different configurations, the following techniques were selected, as shown in the Table. 2.

These methods were chosen based on the qualitative performance of each method applied to the same dataset, and the metrics of all experiments are shown in Table 3 (There are all experiments listed – for stages 1 and 2).

Table 2. The best methods of augmentation on the first stage

#	Augmentation
1	Flip: Horizontal, Vertical
2	90° Rotate: Clockwise, Counter-Clockwise, Upside Down
3	Grayscale: Apply to 30% of images
4	Noise: Up to 15% of pixels

Table 3. The metrics of methods of augmentation on the 1 and 2 stages

Augmentation Technique(s)	Precision	Recall	mAP50	mAP50-95	Fitness
No 1 stage and ALL 2nd stage(YOLO) aug	99	89.2	95.3	76.7	78.6
Grayscale, Rotate, Noise, Flip, ALL 2nd stage augment	97.4	92.6	95.7	77.3	79.2
Grayscale, Rotate, Noise, Flip. No 2 nd st.	96.6	79	89.1	68.1	70.2
Grayscale No 2 nd st.	96.2	68.9	84.6	66.1	68
Noise No 2 nd st.	93.3	74.9	86.4	64.7	66.9
Rotate No 2 nd st.	90.8	73.3	86.6	65.7	67.8
Flip No 2 nd st.	90.2	76.1	86.9	68.4	70.2
Bounding Box Rotate No 2 nd st.	90.1	70.5	83.6	63.3	65.4
Mosaic No 2 nd st.	91.6	71.8	82	61.3	63.4
No augmentation	91.6	71.8	82	61.3	63.4
Blur No 2 nd st.	87.6	75.1	83.8	61.6	63.8
Bounding Box Rotate No 2 nd st.	88	75.8	85.3	59.6	62.2
Cutout No 2 nd st.	86	63.2	80.2	61.5	63.3

The second stage: Switching to YOLOv8

When YOLOv8 was selected for training, the best practices from the first phase

were used and additional augmentations were implemented, as shown in tab. 4. Results also could be found in the tab. 3.

Table 4. The YOLOv8 augmentation parameters

Augmentation Method	YOLO Code	Description
Mosaic	mosaic	Create a mosaic of four images
HSV Hue Shift	hsv_h	Shift hue in HSV color space
HSV Saturation Shift	hsv_s	Shift saturation in HSV color space
HSV Value Shift	hsv_v	Shift value in HSV color space
Degrees Rotation	degrees	Rotate images by specified degrees
Translate	translate	Translate images by specified values
Scale	scale	Scale images by specified factors
Shear	shear	Apply shear transformations
Flip Vertical	flipud	Flip images vertically
Flip Horizontal	fliplr	Flip images horizontally
Mixup	mixup	Apply mixup to combine images

At this point, it worth to mention the mixing and mosaic techniques. It is worth noting that mosaic gave the best results among all the methods that were tested. The Table 3 shows that Blur and Bounding Box Rotate, although they give lower precision, increase the recall, the best methods applied together (Grayscale, Rotate, Noise, Flip) give the maximum result, and when paired with the above-mentioned techniques from stage 2 (Tab. 4), the best result was achieved with an precision of 97.4 and a recall of 92.6. Although the experiment with only stage 2 augmentation is on the first place in the table, the recall is much lower, so the following methods were considered: Grayscale, Rotate, Noise, Flip, All 2-nd stage augmentations set to be the best model.

The following notations are worth noting:

– **Average Precision** (AP) is a metric that calculates the precision of an object detection algorithm for a specific class. It is calculated as the mean of the precision at various recall levels, generally visualized using a precision-recall curve. The formula is represented as the area under the precision-recall curve, typically computed as:

$$AP = \int_0^1 p(r)dr$$

where p and r are precision and recall, which are calculated using formulas (1) and (2).

– **Mean Average Precision** is calculated as follows:

$$mAP = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n AP_k$$

where AP_k is Average precision of a class k.

– **mAP50**: Mean Average Precision at 50% IoU (Intersection over Union). IoU measures the overlap between two bounding boxes. mAP50 is the mean of the average precision scores at IoU of 50%.

– **mAP50-95**: This is the mean average precision calculated at different IoU thresholds from 50% to 95%. It's a more rigorous metric than mAP50 as it averages mAP over a range of IoU values.

– **Fitness**: a value that YOLO defaults to a weighted combination of metrics: mAP@0.5 with 10% weight, and mAP@0.5:0.95 with 90%. In the Table 3 it can be observed that the Fitness metric is the highest for 2 row that we chose as the best.

Model training and results

Using the YOLOv5 model and later the YOLOv8 model for recognition, the models were trained on augmented data from both stages. The combination of different augmentations ensured that the models were exposed to a wide range of variations, which contributed to better generalization. As a result, it can be observed a big jump compared to the data without augmentation and with augmentation.

6.1. Progressing to YOLOv8

Transitioning to YOLOv8 for further training, we blended the top methods from the previous phase and introduced new

augmentation processes. In this phase, a strong reliance was placed on the mixing and mosaic techniques, with the latter demonstrating the most promising results in the evaluations conducted.

For example, in Fig. 9 it can be observed that the lines are arranged in ascending order for the Precision of Cutout, Greyscale, and methods delineated in Table 2, as well as the combined methods from Tables 2 and 4 (the top line).

The better difference for recall (same line order as in Fig. 9) in Fig. 10 is the main reason why we chose the 2nd set of augmentations from Table 3. Since the recall metric given in (2) plays a crucial role for landmine detection, the precision can be lower if the recall increases significantly. Simply put,

it is acceptable that not all detected landmines are landmines (lower precision), but it is very important not to have objects that are landmines but were not detected as landmines at all.

6.2. Training Process and Findings

Our training kicked off with the YOLOv5 model, moving later to YOLOv8. We harnessed data enriched with variations from both the initial and advanced phases. This diverse exposure allowed the models to experience a vast array of data changes, resulting in more adaptable models. The stark improvement was evident when comparing the graphs from Figures 9-12.

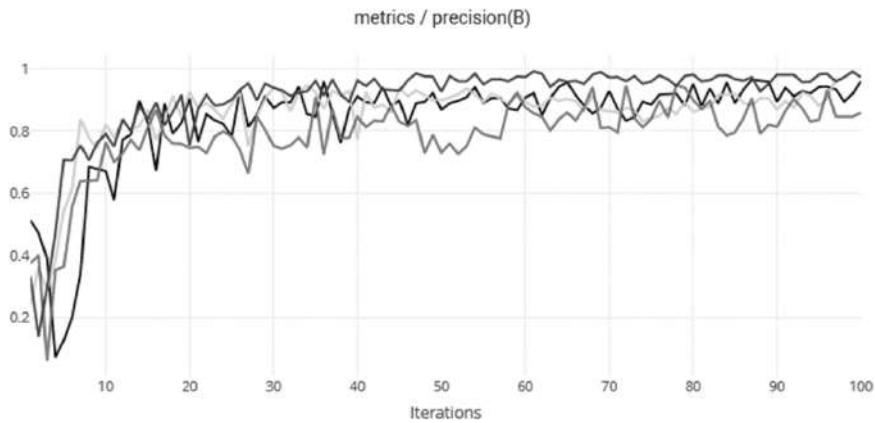


Fig. 9. Precision of Cutout, Greyscale, Methods from Table 2 and Methods from the Tables 2 and 4

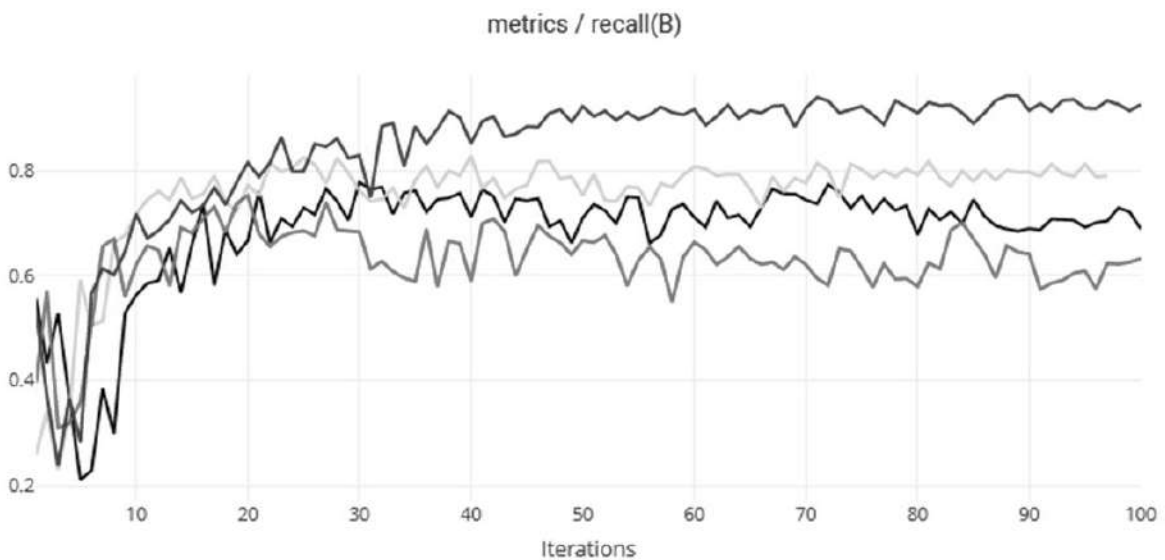


Fig. 10. Recall graph Also the same order of lines for mAP@50 and mAP@50-95 given in Fig. 11-12

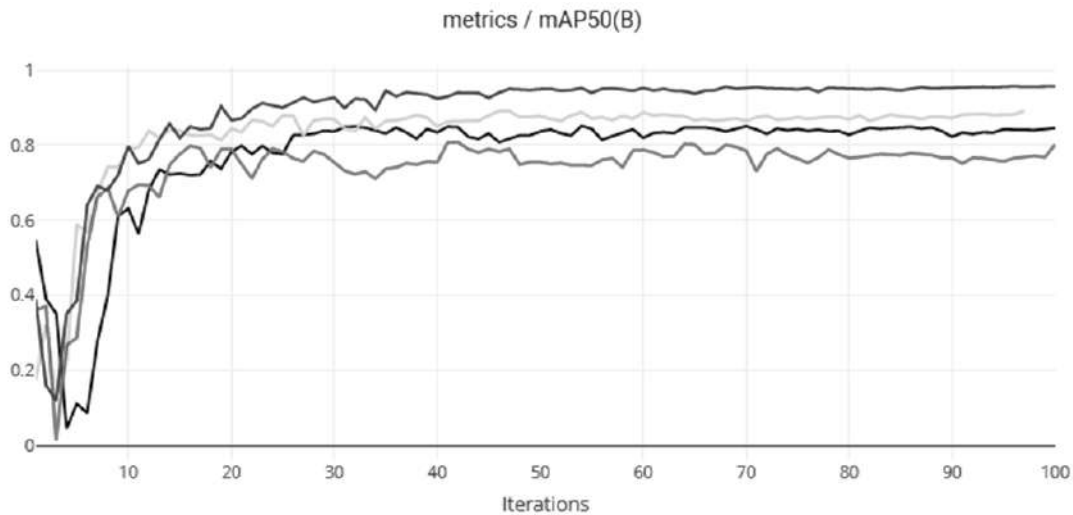


Fig. 11. mAP@50 graph

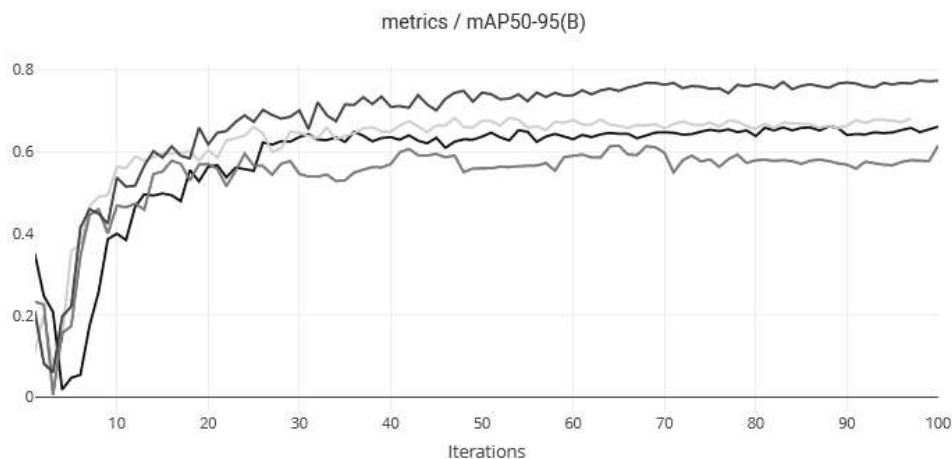


Fig. 12. mAP@50-95 graph

The experiments with different types of augmentation emphasized the importance of data diversity when training robust models. Mosaic, blending, and other methods from Phase 2 (Table 4) proved that augmentation can significantly improve important metrics such as recall. Our findings pave the way for further research into advanced augmentation techniques to improve landmine detection.

7. Challenges and insights in landmine detection through data augmentation

There are both benefits and challenges to using data augmentation for landmine detection. Appropriate application of these techniques is essential to ensure the accuracy of the model and its application in the field.

7.1. Unnatural scenarios

Data augmentation can inadvertently lead to the creation of images that do not reflect real-world mine risk scenarios. For example, converting images to grayscale may improve certain characteristics, but it may also prevent the model from distinguishing between different types of landmines. It is important to use augmentation methods that are appropriate for the real world.

7.2. Achieving balance with augmentation

While augmentation techniques can enrich a dataset and improve model performance, over-reliance on them can intuitively harm model performance. Excessive or inappropriate augmentation can

cause the model to prioritize irrelevant features. Regular performance evaluation is crucial for monitoring and adjusting augmentation strategies.

7.3. Ensure consistency of the dataset across classes

Some augmentation methods may disproportionately affect different classes in the dataset. This can lead to an unbalanced dataset where some classes are overrepresented (overfitted). It is very important to use augmentation methods that maintain a consistent representation of all classes.

8. Conclusions and next steps: The role of augmentation in landmine detection

Given the limited amount of data and the dangers of experimenting with explosive objects, augmentation provides important information to improve the quality of effective landmine detection models and expand the capabilities.

Our research efforts clearly emphasize the effectiveness of data augmentation in enhancing the capabilities of the landmine detection model. Incorporating techniques such as Mix-up, Grayscale, among others, has enriched the datasets, encapsulating an expansive gamut of landmine detection scenarios. This enrichment has subsequently rendered the models more adaptable for diverse deployments.

Harnessing the YOLOv5 [14] and YOLOv8 [15] frameworks has proffered profound insights, particularly elucidating the interplay between augmentation and detection precision. However, the use of augmentation for detecting landmines requires further development. We strive for innovative augmentation methodologies, potentially using state-of-the-art models, GANs, and real-time data emulation. Nonetheless, armed with our current understanding, we are poised for further model optimization. In parallel, a mobile application project is being developed to expand the data set and classes of landmines to be recognized.

A paramount forthcoming endeavor involves subjecting the models to rigorous testing in genuine conditions. The goal is to ascertain their competency across varied

topographies and ambient conditions, transitioning from the confines of labs to on-ground implementations.

It is also planned to conduct a series of experiments to improve the model's response, as this indicator is of great importance in the case of searching for explosive objects.

In conclusion, notwithstanding the substantial journey ahead, the steadfast commitment is evident: progressing towards outcomes that promise enhanced safety and preservation of human lives on a global scale. Saving lives is the cornerstone of the project, which gives us the strength to move forward with the implementation of the system for the future safe environment and happy life of future generations.

References

1. Marchuk O. How Oleksandrivka resisted the occupation. Available: <https://ukrainer.net/oleksandrivka-opir/>.
2. Baur J., Steinberg G., Nikulin A., Chiu K., de Smet T.S. Applying deep learning to automate UAV-based detection of scatterable landmines (2020) *Remote Sensing*, 12 (5), art. no. 859. Available: <https://doi.org/10.3390/rs12050859>.
3. Xiong, Z.; Zhang, X.; Hu, Q.; Han, H. IFormerFusion: Cross-Domain Frequency Information Learning for Infrared and Visible Image Fusion Based on the Inception Transformer. *Remote Sens.* 2023, 15, 1352. Available: <https://doi.org/10.3390/rs15051352>.
4. Kunichik O., Tereshchnko V. Analysis of modern methods of search and classification of explosive objects. «Artificial Intelligence and Intelligent Systems», 2022. Available: <https://doi.org/10.15407/jai2022.02.052>.
5. Suorong Yang, Weikang Xiao, Mengcheng Zhang, Suhan Guo, Jian Zhao, Furao Shen. Image Data Augmentation for Deep Learning: A Survey. Available: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2204.08610>.
6. Jung, A.B.; Wada, K.; Crall, J.; Tanaka, S.; Graving, J.; Yadav, S.; Banerjee, J.; Vecsei, G.; Kraft, A.; Borovec, J.; et al. *Imgaug*. 2019. Available: <https://github.com/aleju/imgaug>.
7. Data augmentation. TensorFlow Developers. (2023). TensorFlow (v2.14.0-rc0). Zenodo. Available: <https://doi.org/10.5281/zenodo.8256979>.
8. Buslaev, A.; Iglovikov, V.I.; Khvedchenya, E.; Parinov, A.; Druzhinin, M.; Kalinin, A.A. Albumentations: Fast and Flexible Image Augmentations. *Information* 2020, 11, 125. Available: <https://doi.org/10.3390/info11020125>.
9. Sangdoo Yun; Dongyoon Han; Seong Joon Oh; Sanghyuk Chun; Junsuk Choe; Youngjoon Yoo; CutMix: Regularization Strategy to Train Strong Classifiers with Localizable Features. Available: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1905.04899>.

10. Hongyi Zhang, Moustapha Cisse, Yann N. Dauphin, David Lopez-Paz. mixup: Beyond Empirical Risk Minimization.

Available: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1710.09412>.

11. Christopher Bowles, Liang Chen, Ricardo Guerrero, Paul Bentley, Roger Gunn, Alexander Hammers, David Alexander Dickie, Maria Valdés Hernández, Joanna Wardlaw, Daniel Rueckert. GAN Augmentation: Augmenting Training Data using Generative Adversarial Networks. Available: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1810.10863>.

12. Liqian Ma, Jiaojiao Meng, Shuntao Liu, Weihang Chen, Jing Xu, Rui Chen. Sim2Real2: Actively Building Explicit Physics Model for Precise Articulated Object Manipulation. Available: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2302.10693>.

13. Dwyer, B., Nelson, J. (2022), Solawetz, J., et. al. Roboflow (Version 1.0) [Software].

Available: <https://roboflow.com>. computer vision.

14. Glenn Jocher, Ayush Chaurasia, Alex Stoken, Jirka Borovec, NanoCode012, Yonghye Kwon, Kalen

Michael, TaoXie, Jiacong Fang, imyhxy, Lorna, (Zeng Yifu), Colin Wong, Abhiram V, Diego Montes, Zhiqiang Wang, Cristi Fati, Jebastin Nadar, Laughing, ... Mrinal Jain. (2022). ultralytics/yolov5: v7.0 - YOLOv5 SOTA Realtime Instance Segmentation (v7.0). Zenodo.

Available: <https://doi.org/10.5281/zenodo.7347926>

15. Jocher, G., Chaurasia, A., & Qiu, J. (2023). YOLO by Ultralytics (Version 8.0.0) [Computer software].

Available: <https://github.com/ultralytics/ultralytics>.

16. O. Kunichik, Findmine_filtered Computer Vision Project,

Available: https://universe.roboflow.com/oleksandr-kunichik-sugbr/findmine_filtered.

The article has been sent to the editors 12.09.23.

After processing 13.09.23.

Submitted for printing 15.09.23.

Copyright under license CCBY-SA4.0

Chapter 4. **HARDWARE AND SOFTWARE
OF INTELLIGENT SYSTEMS**

Розділ 4. **ПРОГРАМНО-ТЕХНІЧНІ
ЗАСОБИ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ
СИСТЕМ**

ВИКОРИСТАННЯ НЕЙРОЕВОЛЮЦІЇ ПРИ ПОШУКУ ПОЛІТИК В ФОРМІ НЕЙРОМЕРЕЖ ДЛЯ УПРАВЛІННЯ РОБОЧОЮ КІНЦІВКОЮ

А. Є. Вітюк¹, А. Ю. Дорошенко²

^{1,2}Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Україна
Пр. Перемоги, 37, м. Київ, 03056

²Інститут програмних систем НАН України, Україна
Пр. Академіка Глушкова, 40, м. Київ, 03187

¹alyonavityuk@gmail.com

²doroshenkoanatoliy2@gmail.com

¹<https://orcid.org/0000-0002-1445-9598>

²<https://orcid.org/0000-0002-8435-1451>

Анотація. Розглянуто підхід до використання нейроеволюції для пошуку політик нейронної мережі для завдання позиціонування роботизованої руки. Робототехнічні задачі, як правило, мають відносно великі простори розв'язків, тому тут нейроеволюційні алгоритми виступають гарною альтернативою традиційним методам глибокого машинного навчання. Нейроеволюційний алгоритм автоматично розвиває нейронні мережі для конкретного завдання та середовища. Перевага полягає в тому, що необхідно лише абстрактно визначити бажану поведінку, а алгоритм максимально оптимізує штучну нейронну мережу для виконання вимог. Розглянутий алгоритм NEAT дозволяє обробляти багатовимірні простори стану та дії, забезпечуючи гнучкість для керування складними рухами руки робота. Він також здатний виявляти політики керування, які демонструють непередбачувану поведінку, явно не запрограмовану людьми – інженерами. Нейроеволюція дозволяє паралельно оцінювати кілька нейронних мереж, забезпечуючи ефективне дослідження простору пошуку. Роботу алгоритму досліджено у експерименті, проведеному у двовимірному середовищі з роботизованою рукою для задачі позиціонування.

Ключові слова: нейроеволюція, маніпулювання об'єктами, контролер роборуки.

USE OF NEUROEVOLUTION FOR NEURAL NETWORK POLICIES SEARCH FOR ROBOTIC ARM

A. Vitiuk¹, A. Doroshenko²

^{1,2}National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
37, Prosp. Peremohy, Kyiv, Ukraine, 03056

²Institute of Software Systems of the National Academy of Sciences of Ukraine
40, Akademika Glushkova Avenue, Kyiv, Ukraine, 03187

¹alyonavityuk@gmail.com

²doroshenkoanatoliy2@gmail.com

¹<https://orcid.org/0000-0002-1445-9598>

²<https://orcid.org/0000-0002-8435-1451>

Abstract. An approach to using neuroevolution to find neural network policies for the task of positioning a robotic arm is considered. As a rule, robotic problems have relatively large solution spaces, so here neuroevolutionary algorithms are a good alternative to traditional methods of deep machine learning. A neuroevolutionary algorithm automatically develops neural networks for a specific task and environment. The advantage is that it is only necessary to define the desired behavior abstractly, and the algorithm optimizes the artificial neural network as much as possible to fulfill the requirements. The considered NEAT algorithm allows processing multidimensional state and action spaces, providing flexibility to control complex robot arm movements. It is also capable of detecting control policies that exhibit unpredictable behavior that is not clearly programmed by human engineers. Neuroevolution allows multiple neural networks to be evaluated in parallel, providing efficient exploration of the search space. The operation of the algorithm was investigated in an experiment conducted in a two-dimensional environment with a robotic arm for the positioning task.

Keywords: neuroevolution, objects manipulation, roboarm controller.

Вступ

В останні роки машинне навчання зробило революцію у сфері робототехніки та автоматизації. Використовуючи алгоритми, роботів можна навчити виконувати різні завдання і навіть навчатися самостійно. Це дозволило створити більш досконалих роботів, які можуть самостійно орієнтуватися в складних середовищах, взаємодіяти з людьми більш природним чином, а також виконувати виробничі завдання більш ефективно.

Машинне навчання дозволяє роботам обробляти величезні обсяги даних у реальному часі, дозволяючи їм приймати більш швидкі та точні рішення. Це допомагає роботам краще розуміти навколишнє середовище та об'єкти навколо них. Наприклад, їх можна запрограмувати ідентифікувати об'єкти за допомогою комбінації візуальних, тактильних і звукових датчиків. Це дозволяє розпізнавати різні об'єкти в навколишньому середовищі та відповідно реагувати.

Машинне навчання також дозволяє роботам вчитися на їхньому досвіді. Використовуючи дані, зібрані з попередніх завдань, роботи можуть коригувати свою поведінку, щоб краще виконувати майбутні завдання. Це особливо корисно в областях, де роботам потрібно швидко адаптуватися до мінливих умов і середовища. Більшість робототехнічних завдань вимагають багатокрокових цілей, які вимагають механізму планування. Традиційні роботизовані контролери зазвичай проєктуються вручну, а розподіл завдань на підзадачі виконує людина [1].

Багато сценаріїв вимагають адаптації роботів до нових умов або навіть навчання абсолютно новій поведінці. Роботу, який виробляє автомобілі, наприклад, час від часу доведеться адаптуватися до нових моделей автомобілів. Для багатьох реальних додатків достатньо запрограмувати необхідну поведінку вручну, але часто це неможливо, оскільки середовище може просто змінюватися надто часто або навіть бути заздалегідь

невідомим інженерам, які програмують систему.

Методи навчання та еволюційні техніки призначені для оптимізації швидкої реакції, яка потім використовується деяким контролером вищого рівня. Оскільки завдання та робоче середовище для роботів стають все більш складними, зростає потреба в методах навчання та пошуку, які можуть планувати досягнення мети, не покладаючись на вже існуючу структуру підзадач, розроблених людиною.

Оскільки традиційні методи глибокого навчання досить обмежені, все більше дослідників почали шукати альтернативні підходи до навчання штучних нейронних мереж. Глибоке машинне навчання надзвичайно потужне для розпізнавання образів, але не дозволяє виконувати завдання, які вимагають розуміння контексту або працюють з незнайомими даними. Багато дослідників сходяться на думці, що сучасний підхід до проєктування систем штучного інтелекту вже не в змозі впоратися з актуальними проблемами.

Альтернативою традиційним методам глибокого машинного навчання є нейроеволюційні алгоритми. Нейроеволюція — це сімейство методів машинного навчання, які використовують еволюційні алгоритми для полегшення вирішення складних проблем, таких як ігри, робототехніка та моделювання природних процесів. Нейроеволюційні алгоритми імітують процес природного відбору. Кінцевим результатом нейроеволюції є оптимальна топологія мережі, яка робить модель більш ресурсоефективною та легшою для аналізу [4].

Нейроеволюційний алгоритм автоматично розвиває нейронні мережі для конкретного завдання та середовища. Перевагою є те, що необхідно лише абстрактно визначити бажану поведінку, а алгоритм максимально оптимізує штучну нейронну мережу для виконання вимог. Однак застосувати нейронні мережі для робототехніки все ще складно, і досягнута продуктивність часто нижча, ніж очікується. Оскільки нейронні мережі

загалом і нейроеволюційні алгоритми зокрема мають багато переваг і недоліків порівняно з альтернативами, цікаво розглянути їх порівняння з іншими підходами [9]. Дослідження показують, що все ще досить складно використовувати штучні нейронні мережі в задовільний спосіб для контролю стану автономного робота [5]. Щоб отримати прийнятні результати від генетичних алгоритмів, потрібно багато часу. Оскільки штучні нейронні мережі прямого зв'язку не мають жодного внутрішнього стану, їх обчислювальні можливості дуже обмежені, що може зробити їх гіршими від конкуруючих підходів. Однак нейроеволюція є абсолютно загальним підходом, який можна застосовувати без будь-яких детальних знань про навколишнє середовище. Крім того, цей клас алгоритмів може адаптуватися до непередбачених змін у середовищі [6]. При проектуванні контролерів спеціального призначення для досягнення прийнятних результатів потрібна детальна інформація про задачу та середовище. Крім того, важко або навіть неможливо розробити ці контролери таким чином, щоб вони могли адаптуватися до будь-яких змін у середовищі.

Таким чином, нейроеволюцію варто використовувати, якщо знання про задачу дуже обмежені або якщо задача може змінитися непередбачуваним чином у майбутньому. Проте, якщо середовище та задача добре визначені, написання алгоритму з нуля є кращим підходом. У таблиці 1 наведено огляд переваг і недоліків двох підходів.

Дана робота присвячена розробці засобів автоматизації проектування нейроконтролера для управління роботизованою кінцівкою. Точне розташування руки робота дозволяє точно та повторювано виконувати завдання, що призводить до підвищення ефективності та продуктивності. При правильному позиціонуванні роботи можуть виконувати завдання швидше, з меншою кількістю помилок і цілодобово, що значно економить час і кошти. Точне розташування кінцівки має важливе значення для виконання таких завдань, як

обробка деталей, складання, зварювання або фарбування. Позиціонування руки робота має важливе значення для роботи в складних і динамічних середовищах. Точно розташовані руки робота можуть адаптуватися до мінливих умов, уникати перешкод і переміщатися складними шляхами. Це особливо важливо в таких галузях, як логістика, складське господарство та охорона здоров'я, де роботам потрібно взаємодіяти з динамічним і незнайомим середовищем.

Таблиця 1. Порівняння нейроеволюції та контролерів спеціального призначення [5]

Підхід	Переваги	Недоліки
Нейроеволюція	Не потрібні детальні знання про проблему. Агенти адаптуються до змін середовища	Непередбачувані та суперечливі результати. Симуляції з інтенсивними обчисленнями.
Контролери спеціального призначення	Зазвичай більш висока продуктивність. Результати передбачувані та зрозумілі.	Необхідне детальне знання проблеми. Зазвичай не в змозі адаптуватися до змін навколишнього середовища.

1. Політики позиціонування роботизованої руки

Позиціонування роботизованої руки – це процес точного керування положенням і орієнтацією кінцівки роботизованої руки (інструмента або захватного пристрою) для виконання певних завдань. Це положення має вирішальне значення для взаємодії руки з об'єктами, маніпулювання ними та точного виконання різних операцій.

Роботизована рука зазвичай складається з кількох шарнірів, які забезпечують руку ступенями свободи (DOF). DOF представляє кількість незалежних параметрів, необхідних для опису конфігурації руки. Кожен суглоб дозволяє руці обернутися або переміститися вздовж певної осі, дозволяючи руці рухатися в кількох напрямках. Позиціонування роботизованої руки базується на використанні систем координат для визначення положення та орієнтації руки. Найпоширенішою

системою координат є декартова система координат, де положення визначаються координатами X , Y і Z . Орієнтація руки може бути представлена за допомогою кутів Ейлера, кватерніонів або матриць обертання.

Пряма кінематика передбачає визначення положення та орієнтації кінцевого ефектора на основі кутів або довжин з'єднань. З іншого боку, зворотна кінематика передбачає знаходження кутів або довжин з'єднань, необхідних для досягнення бажаного положення та орієнтації кінцівки.

Планування траєкторії передбачає створення плавного й оптимального шляху, яким рука робота буде рухатися під час переходу з одного положення в інше. Він враховує такі фактори, як уникнення перешкод, спільні обмеження та оптимізація шляху на основі таких критеріїв, як час, споживання енергії або точність. Планування траєкторії гарантує, що рука рухається ефективно та безпечно, досягаючи бажаного положення.

Для точного позиціонування роботизованих рук використовуються різні методи керування. При управлінні з

відкритим циклом попередньо визначені команди надсилаються на руку без зворотного зв'язку, припускаючи, що рука рухатиметься згідно з інструкціями. Контроль із замкнутим контуром, також відомий як контроль із зворотним зв'язком, включає зворотний зв'язок датчика для постійного регулювання положення руки та коригування будь-яких відхилень.

Для задачі навчання ми розглянемо модель роботизованої руки, представлену як інтелектуальний агент в обмеженому та спрощеному середовищі. Агент — це суб'єкт, який здатний сприймати своє оточення за допомогою датчиків, а також впливати на своє оточення за допомогою приводів. Агенти зазвичай можуть сприймати власні дії, але не обов'язково вплив цих дій на навколишнє середовище. Агент може бути математично описаний функцією агента, яка визначає дію агента на основі всієї його послідовності сприйняття. Таким чином, поведінка агента може бути повністю описана шляхом визначення дії для кожної можливої послідовності сприйняття [10]. Схема взаємодії агента і середовища представлена на рис. 1.



Рис. 1. Взаємодія компонентів навчального середовища

Взаємодія з цільовим об'єктом потребує певного планування. Для успішної маніпуляції об'єктом завдання буде розділено на дві підзадачі з окремими контролерами. Перша підзадача полягає в тому, щоб перемістити кінцівку відносно близько до цільової позиції, уникаючи перешкод. Друга підзадача відноситься до прямого маніпулювання об'єктом, наприклад переміщення випадково розміщених об'єктів із початкового стану

до заданої цільової конфігурації. Необхідність використання двох контролерів для цього завдання демонструє, що нейроеволюції легше розвинути реактивну поведінку, ніж довгострокову стратегічну поведінку.

Давайте окремо розглянемо першу визначену підзадачу – позиціонування кінцівки роботизованої руки за допомогою середовища OpenAI Gym із двовимірною роботизованою рукою з двома суглобами.

Це середовище моделювання, призначене для забезпечення віртуальної платформи для тестування та розробки алгоритмів керування для двовимірної роботизованої

руки [7]. Приклад стану навколишнього середовища представлений на рис. 2.

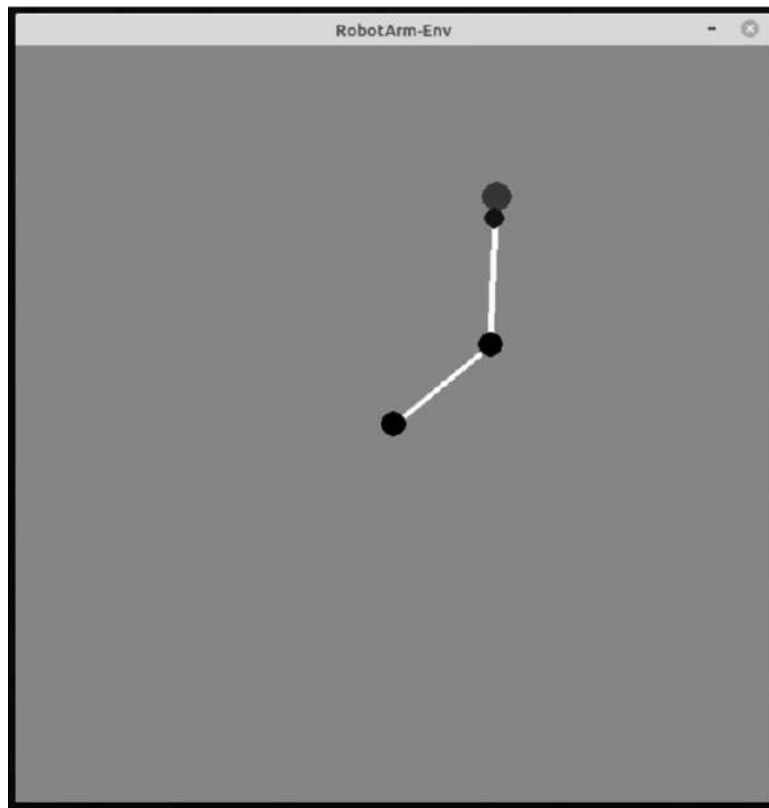


Рис. 2. Середовище OpenAI Gym 2D Robot Arm

Робот складається з двох з'єднань, кожне довжиною 100 пікселів, і мета — досягти червоної крапки, яка випадковим чином генерується в кожному епізоді. Простір дій представляє можливі дії, які може виконати агент. У двовимірному середовищі маніпулятора простір дій складається з керування кутами з'єднання маніпулятора робота:

- 0: залишити поточне значення кута з'єднання;
- 1: приріст кута з'єднання 1;
- 2: зменшення кута з'єднання 1;
- 3: приріст кута з'єднання 2;
- 4: зменшення кута з'єднання 2;
- 5: приріст кутів з'єднань 1 і 2;
- 6: зменшення кутів з'єднань 1 і 2.

Простір спостережень дає інформацію про поточний стан навколишнього середовища. У середовищі двовимірної руки робота простір спостережень є безперервним і містить

відповідну інформацію, необхідну для контролю та прийняття рішень:

- цільова позиція в напрямку x (у пікселях);
- цільова позиція в напрямку y (у пікселях);
- поточне положення з'єднання 1 (у радіанах);
- поточне положення з'єднання 2 (у радіанах).

Навколишнє середовище забезпечує винагороду для управління процесом навчання. Винагорода залежить від досягнення цільової позиції:

- робот отримає штраф -1 , якщо поточна відстань між кінцівкою і цільовою позицією більша, ніж попередня відстань;
- робот отримає винагороду 1 , якщо поточна відстань між кінцівкою і цільовою позицією $> -\epsilon < \epsilon$, де $\epsilon = 10$ пікселів.

Крім того, визначено умови завершення, щоб вказати кінець епізоду: поточна винагорода становить -10 або +10.

2. Нейроеволюційне навчання

Навчання з підкріпленням (RL) було успішно застосовано до політик контролю навчання для рук роботів. Алгоритми RL дозволяють роботам вивчати оптимальні стратегії керування методом проб і помилок, взаємодіючи з навколишнім середовищем і отримуючи зворотній зв'язок у формі винагород або штрафів.

У RL ми тренуємо політики агентів π_n , $n = 1, \dots, N$ для вирішення окремих випадків середовища: для кожного кроку середовища t агент спостерігає стан середовища s_t , і політика вирішує, яка дія a_t має бути здійснена. Агент отримує винагороду $r(s_t, a_t, s_{t+1})$ за кожен спостережуваний стан під час епізоду навчання. Це призводить до траєкторії з T кроків. Сукупна винагорода $\sum_{k=0}^T \gamma^k r_{t+k+1}$ наприкінці епізоду, дисконтована за коефіцієнтом γ , зазвичай використовується як цільова функція політики процесу оптимізації. Називатимемо R_t повного епізоду пристосованістю політики [2].

Алгоритми RL навчаються через ітераційний процес взаємодії з середовищем. Рука робота виконує дії на основі поточної політики, спостерігає за кінцевим станом і винагородою та відповідно оновлює свою політику. Цей процес триває, доки агент не наблизиться до оптимальної політики контролю, яка максимізує сукупну винагороду з часом. Навчання можна проводити онлайн, коли рука навчається під час взаємодії з фізичним середовищем, або офлайн, використовуючи попередньо зібрані дані чи симуляції. Використовуючи навчання з підкріпленням руки роботів можуть автономно навчатися політикам керування, які дозволяють їм виконувати складні завдання, адаптуватися до змінюваних середовищ і навіть вчитися на прикладі людей. Політики керування на основі RL були успішно застосовані до широкого діапазону задач, зокрема маніпулювання об'єктами, складання, захвата та промислової автоматизації.

Нейронна мережа обрана як політика керування роботом. Мережева архітектура зазвичай складається з вхідних нейронів, що представляють стан руки робота, прихованих нейронів для проміжних обчислень і вихідних нейронів, які генерують керуючі сигнали. Вагові коефіцієнти та зміщення нейронної мережі є параметрами, які потрібно оптимізувати. Під час кожного покоління нейронні мережі оцінюються на основі їх продуктивності в попередньо визначеній функції відповідності. Фітнес-функція вимірює, наскільки добре рука робота виконує певне завдання, наприклад досягає цілі, маніпулює об'єктами або уникає перешкод. Оцінка придатності може бути проведена шляхом моделювання або фізичних експериментів, залежно від наявних ресурсів.

Еволюційні алгоритми використовують різні оператори, такі як відбір, кросовер і мутація, щоб створити нові покоління нейронних мереж [1]. Відбір надає перевагу найкращим мережам, що дозволяє їм передавати свої гени наступному поколінню. Схрещування поєднує параметри двох батьківських мереж для створення нащадків із сумішшю їхніх ознак. Мутація вносить невеликі випадкові зміни в параметри, сприяючи дослідженню простору пошуку [3].

Процес нейроеволюції ітеративно розвиває популяцію нейронних мереж протягом кількох поколінь. Оцінка придатності, відбір, схрещування та мутація повторюються, доки не буде знайдено задовільну політику контролю. Процес спрямований на збіжність до параметрів нейронної мережі, які надають політики керування з вищими значеннями пристосованості, ефективно покращуючи продуктивність руки робота [8].

NEAT (NeuroEvolution of Augmenting Topologies) — це нейроеволюційний алгоритм, спеціально розроблений для розвитку штучних нейронних мереж (ANN) зі складною та змінною топологією. Він був представлений Кеннетом О. Стенлі та Рісто Мійкулайненем у 2002 році і з тих пір став популярним підходом у галузі нейроеволюції [3].

NEAT вирішує проблеми розвитку ШНМ із різною кількістю нейронів і з'єднань. На відміну від традиційних методів еволюції нейронних мереж, які спираються на фіксовані топології, NEAT дозволяє створювати та розвивати нові мережеві структури.

Підхід використовує історичну схему маркування, щоб забезпечити збереження інновацій у структурі мережі під час процесу еволюції. Кожному гену в геномі присвоюється історичний маркер для відстеження його походження та збереження історичного запису інновацій. Це дозволяє зберігати та рекомбінувати нові структурні особливості протягом поколінь. Він включає видоутворення для заохочення збереження різноманітності в популяції. Під час еволюції особини групуються у види на основі їх подібності в структурі мережі. Видоутворення допомагає запобігти втраті перспективних структур через надмірну конкуренцію та дозволяє досліджувати різні топології.

Алгоритм дозволяє мережам рости та збільшувати складність протягом поколінь. Він поступово вводить нові вузли та з'єднання, починаючи з простих структур і поступово ускладнюючи їх у процесі еволюції. Крім того, NEAT підтримує спрощення мереж при виявленні зайвих або непотрібних з'єднань, покращуючи ефективність і продуктивність.

NEAT був успішно застосований у різних областях, включаючи системи керування, ігри, робототехніку та розпізнавання образів. Його здатність працювати з динамічними та змінними мережевими топологіями робить його добре придатним для завдань, які потребують адаптивності, масштабованості та відкриття нових мережевих архітектур.

Підхід поєднання еволюційних алгоритмів із нейронними мережами надихнув на подальші розробки в галузі нейроеволюції. Розширення та варіації NEAT були запропоновані для вирішення конкретних завдань, таких як мережі створення композиційних шаблонів (CPPN) для генеративних завдань або HyperNEAT для розвитку великомасштабних нейронних мереж. Загалом він виявився

потужним і гнучким нейроеволюційним алгоритмом, що забезпечує еволюцію складних структур нейронної мережі та просуває сферу еволюційної робототехніки та штучного інтелекту.

3. Застосування підходу для задачі позиціонування робочої кінцівки робота

Для експерименту була обрана бібліотека NEAT-Python як реалізація алгоритму NEAT. Як випливає з назви, це реалізація алгоритму NEAT на мові програмування Python. Бібліотека NEAT-Python забезпечує реалізацію стандартних методів NEAT для моделювання генетичної еволюції геномів організмів у популяції. Вона містить утиліти для перетворення генотипу організму в його фенотип (штучну нейронну мережу) і надає зручні методи для завантаження та збереження конфігурацій геному разом із параметрами NEAT. Крім того, вона надає корисні процедури, які допомагають збирати статистичні дані про хід еволюційного процесу та зберігати/завантажувати проміжні контрольні точки. Контрольні точки дозволяють нам періодично зберігати стан еволюційного процесу і пізніше відновлювати виконання процесу [10].

У процесі нейроеволюції використовується двовимірний симулятор роботизованої руки для реалізації методу навчання методом спроб і помилок. Він підтримує популяцію геномів, які розвиваються з покоління в покоління, доки не буде знайдено успішний роз'язок. У процесі еволюції кожен організм у популяції перевіряється на придатність шляхом імітації руки з двома суглобами. Наприкінці симуляції організм отримує сигнал винагороди у вигляді кількості часових кроків, протягом яких він міг досягти цільової червоної точки та максимальної винагороди. Отриманий сигнал винагороди визначає працездатність організму і вирішує його долю в процесі нейроеволюції.

Експеримент підкреслив важливість підтримки збалансованої популяції із помірною кількістю видів. Занадто велика різноманітність видів у популяції може перешкоджати процесу нейроеволюції,

зменшуючи ймовірність спарювання між організмами, що належать до різних видів. Крім того, враховуючи, що чисельність популяції фіксована, чим більше видів у популяції, тим менша чисельність кожного виду. Менші види зменшують ймовірність корисних мутацій. З іншого боку, наявність

окремих видів дозволяє нам підтримувати корисні мутації в кожній ніші видоутворення та використовувати кожну мутацію в наступних поколіннях. Таким чином, занадто низька видова різноманітність також шкодить еволюції.

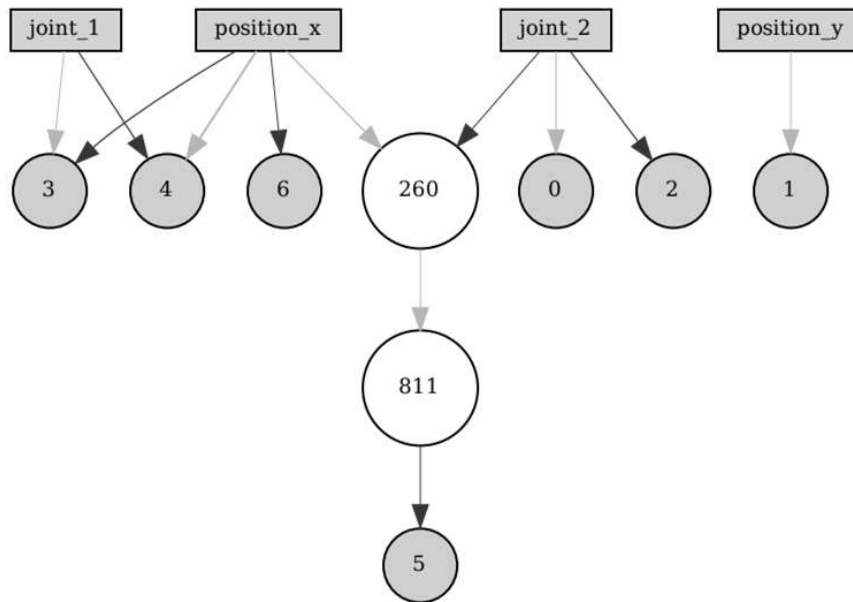


Рис. 3. Нейронна мережа після 1000 поколінь

Використання нейроеволюції в пошуку політики для позиціонування роботизованої руки має враховувати компроміс між трьома параметрами системи, що розробляється:

- обсяг тренувальних зусиль, необхідних для виконання завдання за допомогою робота;
- час на виконання завдання після отримання команди управління;
- якість результату виконаного завдання (точність позиціонування).

Висновки

Розглянутий підхід показує перспективність застосування нейроеволюції для автоматизації розробки нейронних мереж для задач управління роботизованими системами з великими просторами рішень.

Нейроеволюція в управлінні рукою робота має кілька переваг. Вона може обробляти багатовимірні простори стану та дії, забезпечуючи гнучкість для керування

складними роботами. Вона також здатна виявляти політики керування, які демонструють непередбачувану поведінку, явно не запрограмовану інженерами. Нейроеволюція дозволяє паралельно оцінювати кілька нейронних мереж, забезпечуючи ефективне дослідження простору пошуку.

Однак нейроеволюція також стикається з проблемами. Вона може бути обчислювально затратною, особливо при роботі з великими нейронними мережами та складними завданнями.

Використовуючи переваги NEAT, можливо використовувати еволюційні процеси для розвитку нейронних мереж, здатних до точного та адаптивного керування позиціонуванням роботизованої руки. Гнучкі топології, можливості оптимізації та здатність обробляти складну динаміку сприяють підвищенню продуктивності, адаптивності та ефективності систем позиціонування роботизованої руки.

Література

1. R. Mahjourian, R. Miikkulainen, Neuroevolutionary Planning for Robotic Control, Department of Computer Science The University of Texas at Austin Austin, 2018.
2. Stork, Jörg, Zaefferer et al., Behavior-based Neuroevolutionary Training in Reinforcement Learning, 2021. doi:10.48550/arXiv.2105.07960.
3. Kenneth O. Stanley and Risto Miikkulainen, Evolving Neural Networks Through Augmenting Topologies, *Evolutionary Computation* 10 (2): 99-127, 2002.
4. Застосування засобів нейроеволюції в технічних системах автоматизації керування / А.Ю. Дорошенко, І.З. Ашур // Проблеми програмування. — 2021. — № 1. — С. 16-25.
5. M. Wurtinger, Neuroevolution for Robot Control, Test Framework and Experimental Evaluation, Institut für Informatik Lehrstuhl für Programmierung und Softwaretechnik, 2011. URL: https://www.pst.ifi.lmu.de/Lehre/Abschlussarbeit/en/vorlagen/thesis-wuertinger_2011-12-19.pdf.
6. OpenAI, et al. Asymmetric self-play for automatic goal discovery in robotic manipulation. arXiv preprint arXiv:2101.04882, 2021.
7. OpenAI Gym 2D Robot Arm Environment, URL: <https://github.com/ekorudiawan/gym-robot-arm>.
8. Huang, P.-C., Lehman et al., Grasping novel objects with a dexterous robotic hand through neuroevolution. 2014 IEEE Symposium on Computational Intelligence in Control and Automation (CICA). doi:10.1109/cica.2014.7013242.
9. Huang, Pei-Chi, Sentis et al., Tradeoffs in Neuroevolutionary Learning-Based Real-Time Robotic Task Design in the Imprecise Computation Framework. *ACM Transactions on Cyber-Physical Systems*. 3. 1-29. 10.1145/3178903, 2019.
10. Omelianenko, Hands-On Neuroevolution with Python: Build high-performing artificial neural network architectures using neuroevolution-based algorithms, Packt Publishing, 2019.

References

1. R. Mahjourian, R. Miikkulainen, Neuroevolutionary Planning for Robotic Control,

Department of Computer Science The University of Texas at Austin Austin, 2018.

2. Stork, Jörg, Zaefferer et al., Behavior-based Neuroevolutionary Training in Reinforcement Learning, 2021. doi:10.48550/arXiv.2105.07960.

3. Kenneth O. Stanley and Risto Miikkulainen, Evolving Neural Networks Through Augmenting Topologies, *Evolutionary Computation* 10 (2): 99-127, 2002.

4. A.Yu. Doroshenko, I.Z. Achour, Application of neuro evolution tools in automation of technical control systems, *Prombles in programming* 2021; 1: 16-25. doi:10.15407/pp2021.01.016.

5. M. Wurtinger, Neuroevolution for Robot Control, Test Framework and Experimental Evaluation, Institut für Informatik Lehrstuhl für Programmierung und Softwaretechnik, 2011. URL: https://www.pst.ifi.lmu.de/Lehre/Abschlussarbeit/en/vorlagen/thesis-wuertinger_2011-12-19.pdf.

6. OpenAI, et al. Asymmetric self-play for automatic goal discovery in robotic manipulation. arXiv preprint arXiv:2101.04882, 2021.

7. OpenAI Gym 2D Robot Arm Environment, URL: <https://github.com/ekorudiawan/gym-robot-arm>.

8. Huang, P.-C., Lehman et al., Grasping novel objects with a dexterous robotic hand through neuroevolution. 2014 IEEE Symposium on Computational Intelligence in Control and Automation (CICA). doi:10.1109/cica.2014.7013242.

9. Huang, Pei-Chi, Sentis et al., Tradeoffs in Neuroevolutionary Learning-Based Real-Time Robotic Task Design in the Imprecise Computation Framework. *ACM Transactions on Cyber-Physical Systems*. 3. 1-29. 10.1145/3178903, 2019.

10. Omelianenko, Hands-On Neuroevolution with Python: Build high-performing artificial neural network architectures using neuroevolution-based algorithms, Packt Publishing, 2019.

The article has been sent to the editors 17.08.23.

After processing 25.08.23.

Submitted for printing 30.08.23.

Copyright under license CCBY-SA4.0.

Chapter 5. **COMPUTATIONAL
INTELLIGENCE: THEORY
AND TOOLS**

Розділ 5. **ТЕОРІЯ ТА ЗАСОБИ
ОБЧИСЛЮВАЛЬНОГО
ІНТЕЛЕКТУ**

ІНТЕГРАЦІЯ МЕТОДІВ АЛГЕБРИ АЛГОРИТМІВ ТА ОБЧИСЛЮВАЛЬНОГО ІНТЕЛЕКТУ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЄКТУВАННЯ ПРОГРАМНИХ СИСТЕМ

А.Ю. Дорошенко¹, І.П. Сініцин², В.Л. Шевченко³, О.А. Яценко⁴, І.З. Ашур⁵

^{1,2,3,4} Інститут програмних систем НАН України, Україна

пр. Академіка Глушкова, 40, м. Київ, 03187

^{1,2,5} Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут

імені Ігоря Сікорського», Україна

пр. Перемоги, 37, м. Київ, 03056

¹a-y-doroshenko@ukr.net

²ips2014@ukr.net

⁴oayat@ukr.net,

⁵ilyaachour@gmail.com

¹<https://orcid.org/0000-0002-8435-1451>

²<https://orcid.org/0000-0002-4120-0784>

³<https://orcid.org/0000-0002-9457-7454>

⁴<https://orcid.org/0000-0002-4700-6704>

⁵<https://orcid.org/0000-0003-2348-8777>

Анотація. Розглянуто підхід до створення інтелектуальних систем, що поєднує ідеї алгебри алгоритмів Глушкова з відомими нейроеволюційними алгоритмами обчислювального інтелекту, що можуть застосовуватись для автоматизації проектування та синтезу програм. Метод нейроеволюції наростаючих топологій призначений для зменшення розмірності простору пошуку параметрів нейромережі у вигляді поступового розвитку її структури у процесі еволюції. Розроблено програмний інструментарій на підтримку такого підходу, де в основу покладено конструювання високорівневих специфікацій алгоритмів, представлених у системах алгоритмічних алгебр, та генерацію відповідних програм на основі шаблонів реалізацій цільовою мовою програмування. Використовуються засоби гіперсхем — параметризованих алгоритмів для розв'язання певного класу задач. Установка конкретних значень параметрів і наступна інтерпретація гіперсхем дозволяє одержати алгоритми, адаптовані до конкретних умов застосування. Розроблений інструментарій проектування та синтезу програм забезпечує покрокову розробку програм, починаючи від високорівневої специфікації, поданої алгебро-алгоритмічною мовою. На виході інструментарію автоматизовано генерується програма однією з цільових мов програмування (C, C++, Java, Python та ін.), до яких належить також предметно-орієнтована мова проектування нейромереж. Згадана мова включає оператори та умови роботи з популяціями, конфігураціями, геномами та функцією приданості. Роботу інструментарію проілюстровано на прикладі проектування параметризованого алгоритму оцінювання для двійкового мультиплексора та генерації програми для задачі балансування зі зворотним маятником.

Ключові слова: алгебра алгоритмів, генерація програм, нейроеволюція, нейромережа, штучний інтелект.

INTEGRATION OF THE METHODS OF ALGEBRA OF ALGORITHMS AND COMPUTATIONAL INTELLIGENCE FOR AUTOMATION OF PROGRAM SYSTEMS DESIGN

A.Yu. Doroshenko¹, I.P. Sinityn², V.L. Shevchenko³, O.A. Yatsenko⁴, I.Z. Achour⁵

^{1,2,3,4} Institute of Software Systems of National Academy of Sciences of Ukraine, Ukraine

Glushkov ave., 40, Kyiv, 03187

^{1,2,5} National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine

Peremohy ave., 37, Kyiv, 03056

¹a-y-doroshenko@ukr.net

²ips2014@ukr.net

⁴oayat@ukr.net

⁵ilyaachour@gmail.com

¹<https://orcid.org/0000-0002-8435-1451>

²<https://orcid.org/0000-0002-4120-0784>

³<https://orcid.org/0000-0002-9457-7454>

⁴<https://orcid.org/0000-0002-4700-6704>

⁵<https://orcid.org/0000-0003-2348-8777>

Abstract. An approach to the creation of intelligent systems is considered, which combines the ideas of Glushkov's algebra of algorithms with the well-known neuroevolutionary algorithms of computational intelligence, which can be used to automate the design and synthesis of programs. The method of neuroevolution of augmenting topologies is intended to reduce the dimensionality of the space for searching for neural network parameters in the form of gradual development of its structure in the process of evolution. A software toolkit has been developed to support the approach, which is based on the construction of high-level specifications of algorithms represented in systems of algorithmic algebras, and generation of corresponding programs based on implementation templates in a target programming language. Parameterized algorithms called hyperschemes are used to solve a certain class of problems. Setting specific values of parameters and subsequent interpretation of hyperschemes allows obtaining algorithms adapted to specific application conditions. The developed program design and synthesis toolkit provides step-by-step development of programs, starting from a high-level algebraic-algorithmic specification. At the output of the toolkit, a program is automatically generated in one of the target programming languages (C, C++, Java, Python), that also include a subject-oriented language for designing neural networks. The mentioned language includes operators and conditions for working with populations, configurations, genomes, and fitness function. The work of the toolkit is illustrated by the example of designing a parameterized evaluation algorithm for a binary multiplexer and generation of a program for the single-pole balancing problem.

Keywords: algebra of algorithms, program generation, neuroevolution, neural network, artificial intelligence.

Вступ

В процесі розвитку робіт в області штучного інтелекту на початку 90-х рр. шляхом інтеграції низки інтелектуальних технологій та методів сформувався новий напрям, що отримав назву *обчислювального інтелекту*. Обчислювальний інтелект [1, 2] є сукупністю технологій, моделей, методів і програмних засобів, призначених для розв'язання неформальних, творчих задач у різних сферах людської діяльності з використанням засобів нечіткої логіки, штучних нейронних мереж, еволюційних обчислень, машинного навчання, ймовірнісних методів, що певною мірою моделюють види розумової діяльності людини (такі як нечіткість міркувань, якісний та інтуїтивний підходи, креативність, логічний вивід, самонавчання і т. ін.), зокрема, в галузі прийняття рішень, класифікації, розпізнавання образів і т. д.

У даній роботі ми зосереджуємось навколо одного з центральних понять обчислювального інтелекту, а саме — поняття штучної нейронної мережі, що означає граф вузлів, об'єднаних зв'язками, кожен з яких має певну вагу [3]. Вузол нейромережі є свого роду пороговим оператором, який дозволяє сигналу проходити далі тільки після спрацьовування певної функції активації. Як правило, процес навчання нейромережі

складається з вибору відповідних значень ваги для всіх зв'язків у мережі. Таким чином, нейромережа здатна апроксимувати будь-яку функцію і може розглядатися як універсальний апроксиматор, який визначається теоремою універсальної апроксимації.

За останні кілька десятиліть було винайдено багато методів навчання нейромереж. Одна з найпопулярніших технік, що здобула поширення за останні десятиліття, була запропонована Д. Хінтоном [4]. Вона ґрунтується на зворотному поширенні помилки прогнозування через мережу з різними методами оптимізації, побудованими на основі градієнтного спуску функції втрат по відношенню до ваг зв'язків між вузлами мережі. Поряд з методами зворотного поширення застосовуються дуже багатообіцяючі еволюційні алгоритми [3], які можуть вирішувати вищезгадані проблеми. Ці методи використовують принципи еволюції видів для розробки штучних нейронних мереж.

Основна ідея *нейроеволюції* полягає в тому, щоб створювати нейромережі за допомогою стохастичних методів пошуку, що ґрунтуються на популяції. Використовуючи еволюційний підхід, можна розробити оптимальні архітектури нейронних мереж, які точно вирішують конкретні завдання. В результаті можуть бути створені компактні та

енергоєфективні мережі з помірними вимогами до обчислювальної потужності. Процес еволюції реалізується шляхом застосування генетичних операторів (мутація, кросовер) до популяції хромосом (генетично кодовані уявлення нейромереж або рішень) протягом багатьох поколінь. Щоб усунути недоліки методів з фіксованою топологією, Кеннет О. Стенлі запропонував особливий метод нейроеволюції з розвитком топології NeuroEvolution of Augmenting Topologies, NEAT) [5, 6]. Основна ідея цього алгоритму у тому, що еволюційні оператори застосовуються як до вектору з вагами всіх зв'язків, так і до топології створеної нейронної мережі.

Дана робота присвячена розробці засобів автоматизації проектування програм, що використовують нейроеволюційні алгоритми. Одним з напрямів у розробці та дослідженні програмних систем є побудова програмних абстракцій у вигляді алгебро-алгоритмічних мов і моделей, що ставить своєю метою розвиток архітектурно- і мовно-незалежних засобів програмування. У попередніх роботах авторів [7, 8, 9] були запропоновані теорія, методологія та інструментарій для автоматизованого проектування паралельних програм, що ґрунтуються на засобах високорівневої алгебро-алгоритмічної формалізації. Зокрема, в Інституті програмних систем НАНУ було розроблено інструментальну систему автоматизації програмування, названу інтегрованим інструментарієм проектування та синтезу програм (англ. Integrated Toolkit for Designing and Synthesis of programs, IDS Toolkit). Інструментарій забезпечує покрокову розробку програм, починаючи від високорівневої алгебро-алгоритмічної специфікації і закінчуючи кодом цільовою мовою програмування (зокрема, C++, Java, Python). У даній роботі розглянуті результати застосування інструментарію для автоматизованої розробки нейроеволюційних програм, що використовують бібліотеки SharpNEAT [10] та NEAT-Python [11], які є

реалізаціями алгоритму NEAT мовами програмування C# та Python, відповідно.

1. Алгебро-алгоритмічний інструментарій автоматизації проектування програм

Математичним базисом для формалізації та автоматизації проектування алгоритмів та програм в даній роботі є системи алгоритмічних алгебр (САА) Глушкова [7, 8], що виступають універсальним засобом високорівневих специфікацій (САА-схем) будь-яких алгоритмів, включно з послідовними й паралельними імперативними, а також нейромережевими алгоритмами. Згадані системи покладені в основу алгоритмічної мови САА/1, призначеної для багаторівневого структурного проектування й документування послідовних і паралельних алгоритмів та програм.

Основними операторними конструкціями мови САА/1, що застосовуються в даній роботі, є такі:

- композиція (послідовне виконання) операторів: “*operator 1*”; “*operator 2*”;
- умовний оператор: IF “*condition*” THEN “*operator 1*” ELSE “*operator 2*”;
- цикл: FOR EACH (“*variable 1*” IN “*expression 1*”) LOOP “*operator 1*” END OF LOOP.

Перевагою використання мови САА/1 є можливість подання ідентифікаторів операторів та умов у формі, близькій до природної мови. В подвійних лапках в схемах алгоритмів вказуються ідентифікатори операторів, в одинарних — умови (предикати).

Однією з важливих проблем в рамках алгебро-алгоритмічного підходу є підвищення адаптивності програм до конкретних умов їхнього використання. Зокрема, вона вирішується за рахунок застосування параметрично-керованої генерації специфікацій алгоритмів на основі схем більш високого рівня, що називаються гіперсхемами [7, 8]. *Гіперсхеми* є параметризованими алгоритмами для розв'язання певного класу задач. Установка конкретних значень параметрів і наступна

інтерпретація гіперсхем дозволяє одержати алгоритми, адаптовані до конкретних умов застосування.

Розроблений інструментарій проєктування та синтезу програм IDS забезпечує покрокову розробку програм, починаючи від високорівневої алгебро-алгоритмічної специфікації, поданої мовою САА/1. На виході інструментарію автоматизовано генерується програма однією з цільових мов програмування (C, C++, Java, Python та ін.), до яких належить також предметно-орієнтована мова проєктування нейромереж. Згадана мова включає оператори та умови роботи з

популяціями, конфігураціями, геномами та функцією приданості (*fitness*), зокрема:

- “Create feedforward neural network (*net*) for (*genome*) and configuration (*config*)”;
- “Create the population (*p*), which is the top-level object for a NEAT run, for configuration (*config*)”;
- ‘Genome (*fitness*) is greater or equal to fitness threshold (*fitness_threshold*) for configuration (*config*)’;
- ‘Genome (*fitness*) is less than fitness threshold (*fitness_threshold*) for configuration (*config*)’.

Процес автоматизованої розробки алгоритмів та програм в інструментарії зображено на рис. 1.

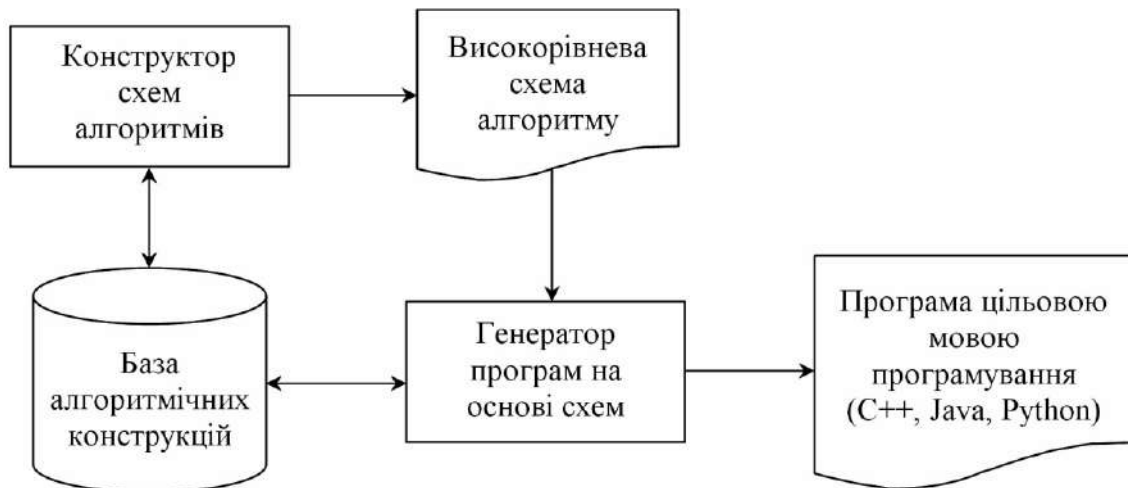


Рис. 1. Проєктування алгоритмів та синтез програм в системі IDS

В розділах 2 та 3 розглянуті приклади застосування інтегрованого інструментарію для розробки програм, що використовують нейроеволюційні алгоритми.

2. Застосування інструментарію для генерації алгоритмів оцінки двійкового мультиплексора

У даному розділі інструментарій алгебр алгоритмів використано для параметрично-керованої генерації САА-схем оцінювання для двійкового мультиплексора (BinaryMultiplexer-Evaluator) на основі гіперсхем з подальшою генерацією коду мовою програмування із використанням методів фреймворку SharpNEAT [10]. Даний

фреймворк є реалізацією алгоритму нейроеволюції наростаючих топологій мовою C# для платформи NET, розробленою К. Грінном.

Мультиплексор — пристрій, що має декілька входів даних x_i ($i=0, \dots, n-1$), адресні входи s_j ($j=0, \dots, m-1$), та один вихід y . Пристрій передає сигнал з одного зі входів даних на вихід; при цьому вибір потрібного входу здійснюється шляхом подачі відповідної комбінації керуючих сигналів на адресних входах. Кількість входів даних n та кількість адресних входів m зв'язані співвідношенням $n = 2^m$.

Фрагмент побудованої за допомогою інтегрованого інструментарію гіперсхеми

для генерації алгоритмів оцінювання двійкового мультиплексора наведений далі. Параметрами гіперсхеми є такі: $P1$ — кількість адресних входів мультиплексора; $P2$ — кількість інформаційних входів; $P3 = P1 + P2$ — загальна кількість входів. Всі входи приймають двійкові значення (0 або 1). Двійкова адреса подається на адресні входи, що репрезентує вибір одного зі значень входів для даних. Оцінка складається з вичерпної перевірки нейронної мережі на кожній з 2^{P3}

можливих комбінацій входів. Вихідне значення нейронної мережі повинне збігатися зі значенням одного зі входів даних, що представлений двійковою адресою з адресних входів. Вихідне значення, менше за 0.5, вважають двійковим нулем, вихідне значення, більше або рівне 0.5, — двійковою одиницею. Значення оцінки придатності адитивно розраховують у результаті вичерпної перевірки.

```

SCHEME BINARY{P3}MULTIPLEXEREVALUATOR =====
    "Binary{P3}MultiplexerEvaluator"
===== NAME SPACE SharpNeat.Domains.Binary{P3}Multiplexer (
    CLASS Binary{P3}MultiplexerEvaluator OF TYPE public
    INHERITS IPhenomeEvaluator<IBlackBox>
    "Declare a constant (StopFitness) of type (double) = (10E+[P1]);"
    "Declare a variable (_evalCount) of type (ulong);"
    "Declare a variable (_stopConditionSatisfied) of type (bool);"
    REGION IPhenomeEvaluator<IBlackBox> Members
    METHOD public FitnessInfo Evaluate(IBlackBox box)
    "Declare a variable (fitness) of type (double) = (0.0);"
    "Declare a variable (success) of type (bool) = (true);"
    "Declare a variable (output) of type (double);"
    "Declare a variable (inputArr) of type (ISignalArray) =
        (box.InputSignalArray);"
    "Declare a variable (outputArr) of type (ISignalArray) =
        (box.OutputSignalArray);"
    "Increase (_evalCount) by (1);"
    FOR (i FROM 0 TO [Pow(2, P3)-1]) LOOP
    "Declare a variable (tmp) of type (int) = (i);"
    FOR (j FROM 0 TO [P3-1]) LOOP
    (inputArr[j] := tmp&0x1); (tmp := tmp >> 1)
    END OF LOOP;
    "Activate the black box (box);"
    "Read output signal (output)(outputArr);"
    IF (((1<<([P1]+(i&0x[P2-1])))&i) != 0)
    THEN
    (fitness := fitness + 1.0 - ((1.0 - output) * (1.0 - output)));
    IF (output < 0.5) THEN (success := false) END IF
    ELSE
    (fitness := fitness + 1.0 - (output * output));
    IF (output >= 0.5) THEN (success := false) END IF
    END IF;
    "Reset black box state ready for next test case (box)"
    END OF LOOP;
    IF success THEN (fitness := fitness + 10E+[P1]) END IF;
    IF (fitness >= StopFitness) THEN (_stopConditionSatisfied := true)
    END IF;
    "Return value (new FitnessInfo(fitness, fitness))"
    END OF METHOD
    END OF REGION
    END OF CLASS )
END OF SCHEME BINARY{P3}MULTIPLEXEREVALUATOR

```

На основі гіперсхеми в інтегрованому інструментарії були згенеровані САА-схеми оцінки

мультиплексорів з трьома, шістьма та одинадцятьма входами відповідно до встановлених значень параметрів $P1$, $P2$,

РЗ. За схемами був згенерований програмний код мовою С# для SharpNEAT [10].

Далі наведено результати експериментів з виконання згенерованої програми оцінки мультиплексора з одинадцятьма входами при використанні однопроцесорної багатопотокової реалізації нейроеволюції наростаючих топологій, розробленої К. Гріном [11], та розподіленої реалізації, запропонованої в [12]. У якості середовищ для виконання багатопотокової та розподіленої реалізації були обрані такі конфігурації:

- локальне середовище, Intel Core i9-9900K CPU (3.60 ГГц – 5.00 ГГц), 8 ядер, 16 логічних процесорів, 32.0 ГБ RAM. Один процес, багатопотокова реалізація, 16 потоків;

- те ж саме локальне середовище, розподілена реалізація, 16 локальних клієнтів-виконувачів;

- хмарне середовище, 3rd Gen AMD EPYC Amazon EC2 C6a.large, 3.60 ГГц,

2 ядра, 4.0 ГБ RAM, до 12.5 Гбіт/с мережевої пропускної здатності та до 6600 Мбіт/с пропускної здатності сховища. Розподілена реалізація з кількістю хмарних клієнтів-виконувачів 16, 32 та 64.

На рис. 2 зображено графік залежності швидкості оцінювання (кількості оцінювань в секунду) від номера покоління для локальних конфігурацій середовища. Як видно з рисунка, розподілена реалізація очікувано демонструє гірші результати у порівнянні з однопроцесорною реалізацією у зв'язку з наявністю накладних витрат на взаємодію між процесами. З ростом складності задачі оцінювання (ростом розміру згенерованої нейромережі) ефективність однопроцесорної та локальної розподіленої реалізації вирівнюється, оскільки накладні витрати обчислювальних ресурсів стають непомірно меншими за витрати на оцінювання.

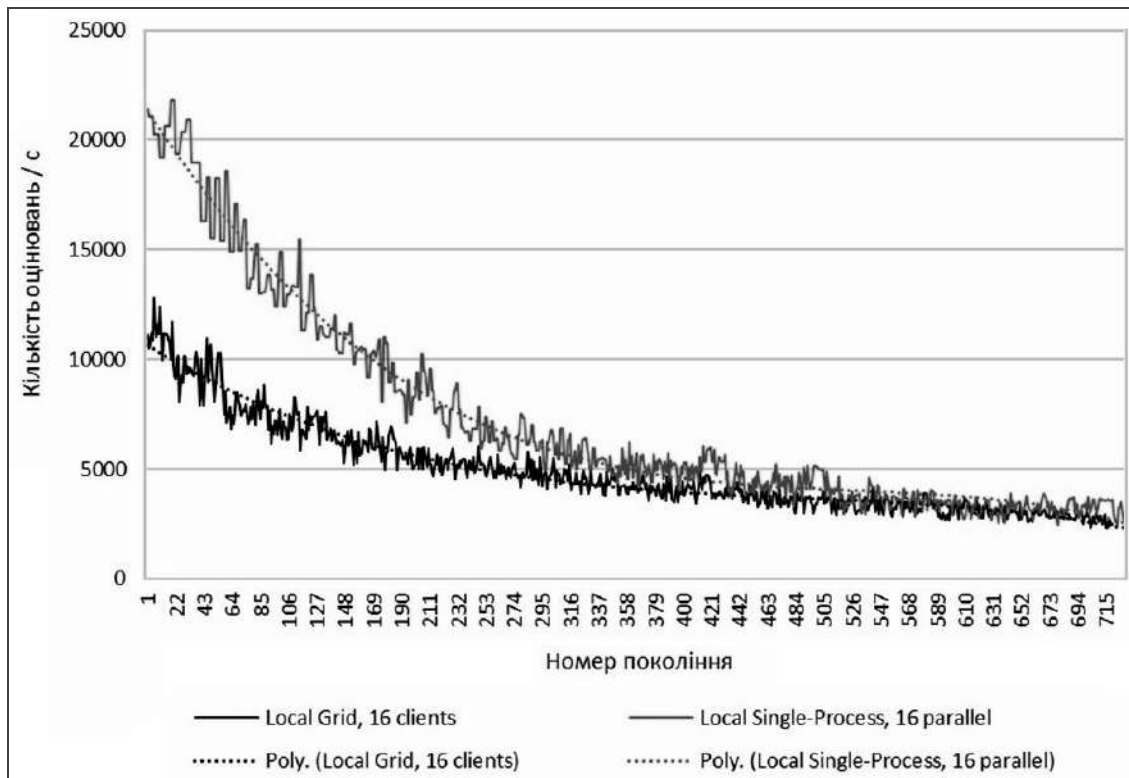


Рис. 2. Графік залежності швидкості оцінювання від номера покоління для локальних конфігурацій середовища

На рис. 3 зображено графік залежності швидкості оцінювання від

номера покоління для хмарних конфігурацій середовища.

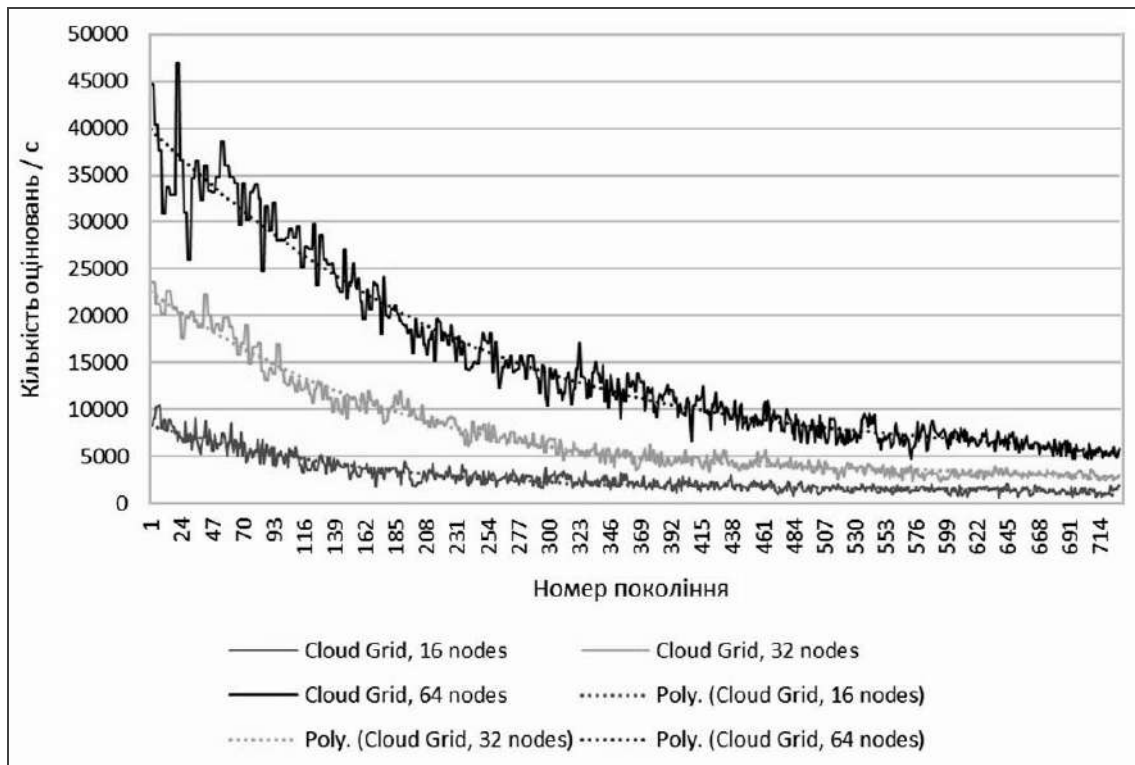


Рис. 3. Графік залежності швидкості оцінювання від номера покоління для хмарних конфігурацій середовища

Як видно з графіка, розподілена хмарна реалізація очікувано демонструє гірші результати (за тієї ж кількості клієнтів-виконувачів) у порівнянні з однопроцесорною та локальною розподіленою реалізацією у зв'язку з наявністю накладних витрат на взаємодію між процесорами багатьох клієнтів-виконувачів. Проте, з ростом кількості клієнтів-виконувачів ми можемо нехтувати сталим значенням накладних витрат і отримувати лінійний ріст ефективності розподіленої системи.

Даний експеримент продемонстрував можливість розподіленої системи проводити оцінювання на 64-ох хмарних клієнтах-виконувачах і отримувати приріст у 60–100 % від максимальних можливостей однопроцесорної локальної реалізації.

3. Застосування алгебро-алгоритмічного інструментарію для задачі балансування

У даному розділі розглядається використання інтегрованого інструментарію для прикладної задачі

балансування візка зі зворотним маятником. У даному експерименті нейроеволюційний алгоритм застосовується для реалізації контролера, що керує візком. Постановка задачі балансування зворотного маятника та використовувана математична модель (рівняння руху) детально розглянуті в [3]. Контролер балансування маятника приймає масштабовані вхідні значення і видає вихідний сигнал, що є двійковим значенням і визначає дію, яка має бути застосована у певний момент часу.

Початкова конфігурація нейромережі контролера може бути представлена у вигляді схеми на рис. 4. Вона включає п'ять вхідних вузлів: для горизонтального положення візка (x_1) і його швидкості (x_2), для вертикального кута маятника (x_3) і його кутової швидкості (x_4) і додатковий вхідний вузол для зміщення (x_0) (яке може бути необов'язковим залежно від конкретної використовуваної бібліотеки NEAT). Вихідний вузол (а) є двійковим вузлом, що видає керуючий сигнал (0 або 1). Прихований вузол (h) є необов'язковим і може бути пропущений.

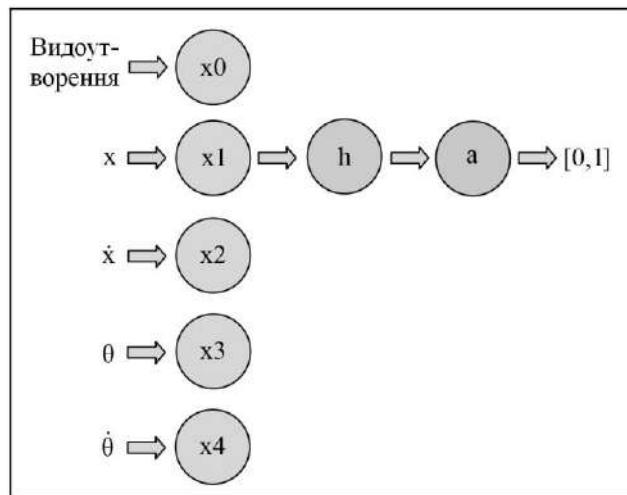


Рис. 4. Початкова конфігурація нейромережі балансувальника

Фрагмент однієї із САА-схем, що реалізує експеримент, наведений нижче. Функція (підпрограма) “Run experiment” починається із завантаження гіперпараметрів з файлу конфігурації і породжує початкову популяцію, використовуючи завантажену конфігурацію. Після цього функція налаштовує репортери для збирання статистики, що стосується виконання

еволюційного процесу. Процес еволюції виконується протягом вказаної кількості поколінь, а результати зберігаються у вихідному каталозі. Після того, як в ході еволюційного процесу знайдений найкращий геном, виконується перевірка, чи відповідає він критеріям порогу придатності, встановленому у файлі конфігурації. Програма виводить геном с формально найкращою відповідністю.

```

“Run experiment (config_file, n_generations=100)”
==== “Load configuration (config) from file (config_file)”;
“Create the population (p), which is the top-level object for a NEAT
run, for configuration (config)”;
“Add a stdout reporter to show progress in the terminal for
population (p)”;
“Run neuroevolution for up to (n) generations and display the best
genome (best_genome) among generations”;
“Create feedforward neural network (net) for (best_genome) and
configuration (config)”;
“Output the message (\n\nEvaluating the best genome in random runs)”;
(success_runs := “Evaluate best net (net, config, additional_num_runs)”);
“Output successful (success_runs) and expected runs
(additional_num_runs) and check if the best genome is a winner”;
“Visualize the experiment results for configuration (config), best
genome (best_genome) from directory (out_dir)”;
    
```

На основі сконструйованих схем алгоритмів за допомогою інтегрованого інструментарію була виконана генерація програмного коду мовою Python. Далі наведено результати експерименту з виконання згенерованої програми. У файлі конфігурації NEAT-Python було визначено популяцію з 150 окремих організмів та встановлено поріг придатності зі

значенням 1.0 в якості критерію завершення. Значення початкових параметрів нейромережі були такими: кількість прихованих вузлів — 0, вхідних — 4, вихідних — 1. Граф нейромережі контролера-переможця балансування одиночного зворотного маятника наведений на рис. 5.

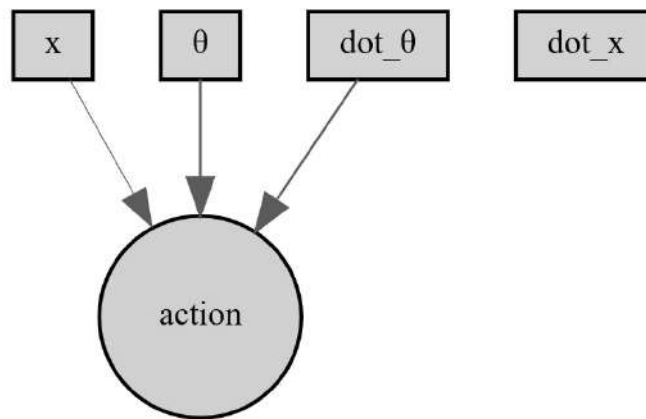


Рис. 5. Граф оптимального контролера балансування зворотного маятника, знайдений нейроеволюційним алгоритмом

Графік зміни значень придатності на протязі поколінь еволюції показано на рис. 6. Як видно з графіка, середня придатність популяції у всіх поколіннях була низькою, але з самого початку виникла корисна мутація, що породила

певну лінію організмів. Із покоління в покоління обдаровані особини з цієї лінії змогли не лише зберегти свої корисні ознаки, але й покращити їх, що в решті решт привело до появи переможця еволюції.

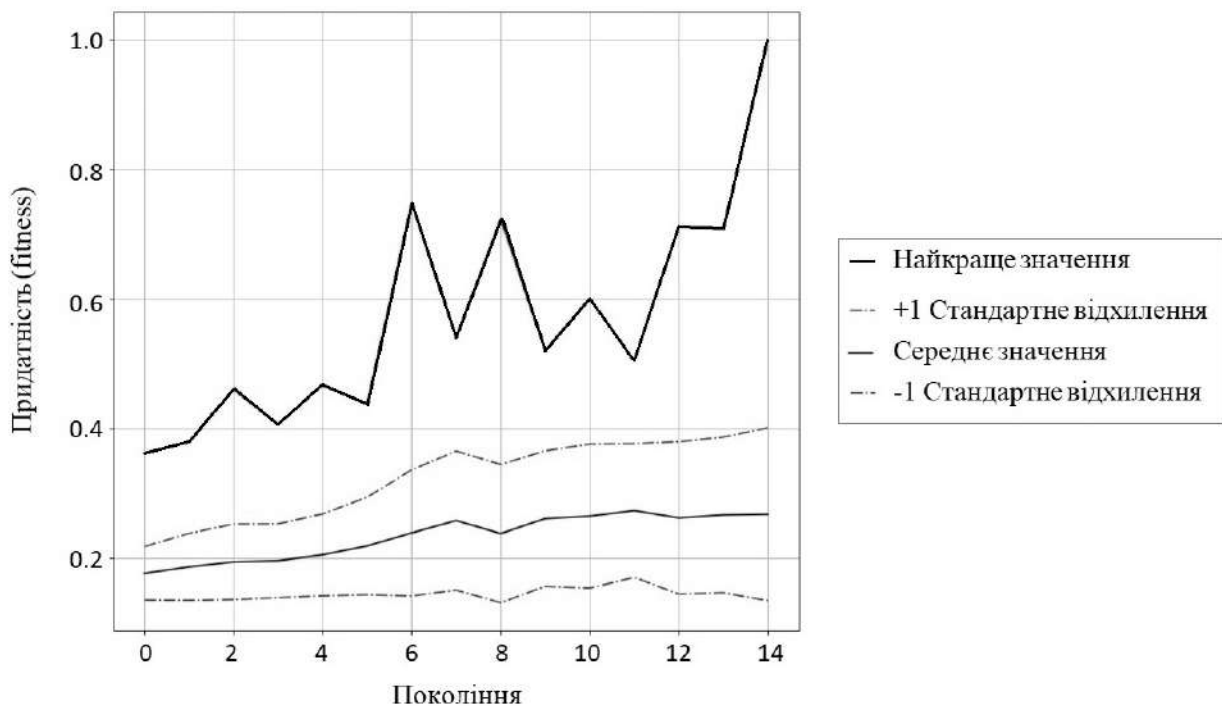


Рис. 6. Середнє і найкраще значення функції придатності в експерименті зі зворотним маятником

Висновки

Розглянуто розроблений алгебро-алгоритмічний інструментарій, що застосовується для проектування та синтезу програм, які використовують нейроеволюційні алгоритми. В основу інструментарію покладено конструювання високорівневих специфікацій алгоритмів,

поданих в системах алгоритмічних алгебр Глушкова, та генерацію відповідних програм на основі шаблонів реалізацій цільовою мовою програмування. Підхід проілюстровано на прикладі проектування параметризованого алгоритму оцінювання для двійкового мультиплектора з подальшою реалізацією алгоритму мовою

C# для фреймворку SharpNEAT та на прикладі генерації програми для задачі балансування зі зворотним маятником, що використовує нейроеволюційний алгоритм бібліотеки NEAT-Python.

Література

1. Fogel D.B., Liu D., Keller J.M. *Fundamentals of computational intelligence: neural networks, fuzzy systems, and evolutionary computation*. Hoboken: Wiley-IEEE Press, 2016. 378 p.
2. Zgurovsky M.Z., Zaychenko Yu.P. *Fundamentals of computational intelligence: system approach*. Cham: Springer, 2016. 275 p.
3. Omelianenko I. *Hands-on neuroevolution with Python*. Birmingham: Packt, 2019. 368 p.
4. Lillicrap T.P., Santoro A., Marris C.J., Akerman C., Hinton G.E. Backpropagation and the brain. *Nature Reviews Neuroscience*. 2020. Vol. 21. P. 335–346.
5. Stanley K.O., Clune J., Lehman J., Miikkulainen R. Designing neural networks through neuroevolution. *Nature Machine Intelligence*. 2019. Vol. 1. P. 24–35. <http://doi.org/10.1038/s42256-018-0006-z>
6. Stanley K.O. Neuroevolution: a different kind of deep learning. 2017. URL: <http://www.oreilly.com/radar/neuroevolution-a-different-kind-of-deep-learning>
7. Андон П.І., Дорошенко А.Ю., Акуловський В.Г., Іваненко П.А., Яценко О.А. Формальні та адаптивні методи конструювання високопродуктивних паралельних програм. Київ: Наукова думка, 2023. 312 с.
8. Doroshenko A., Yatsenko O. *Formal and adaptive methods for automation of parallel programs construction: emerging research and opportunities*. Hershey: IGI Global, 2021. 279 p.
9. Andon P.I., Doroshenko A.Yu., Zhreb K.A., Yatsenko O.A. *Algebra-algorithmic models and methods of parallel programming*. Kyiv: Akadempriodyka, 2018. 192 p.
10. SharpNEAT. Evolution of Neural Networks. URL: <http://sharpneat.sourceforge.io>
11. NEAT-Python. URL: <http://github.com/CodeReclaimers/neat-python>
12. Дорошенко А.Ю., Ашур І.З. Розподілена реалізація методу нейроеволюції наростаючої топології. *Проблеми програмування*. 2021. № 3. С. 3–15.

References

1. Fogel, D. B., Liu, D., Keller, J. M. (2016). *Fundamentals of computational intelligence: neural networks, fuzzy systems, and evolutionary computation*. Hoboken: Wiley-IEEE Press.
2. Zgurovsky, M. Z., Zaychenko, Yu. P. (2016). *Fundamentals of computational intelligence: system approach*. Cham: Springer.
3. Omelianenko, I. (2019) *Hands-on neuroevolution with Python*. Birmingham: Packt
4. Lillicrap, T. P., Santoro, A., Marris, C. J., Akerman, C., Hinton, G. E. (2020). Backpropagation and the brain. *Nature Reviews Neuroscience*, 21, 335-346. doi: 10.1038/s41583-020-0277-3
5. Stanley, K. O., Clune, J., Lehman, J., Miikkulainen, R. (2019). Designing neural networks through neuroevolution. *Nature Machine Intelligence*, 1, 24-35. doi: 10.1038/s42256-018-0006-z
6. Stanley, K. O. (2017). *Neuroevolution: a different kind of deep learning* [Online]. Available: <http://www.oreilly.com/radar/neuroevolution-a-different-kind-of-deep-learning>
7. Andon, P. I., Doroshenko, A. Yu., Akylovsky, V. G., Ivanenko, P. A., Yatsenko, O. A. (2023). *Formal'ni ta adaptivni metody konstruyuvannya vysokoproduktyvnykh paralel'nykh proham*. Kyiv: Naukova dumka.
8. Doroshenko, A., Yatsenko, O. (2021). *Formal and adaptive methods for automation of parallel programs construction: emerging research and opportunities*. Hershey: IGI Global.
9. Andon, P. I., Doroshenko, A. Yu., Zhreb, K. A., Yatsenko, O. A. (2018). *Algebra-algorithmic models and methods of parallel programming*. Kyiv: Akadempriodyka.
10. SharpNEAT. *Evolution of neural networks* [Online]. Available: <http://sharpneat.sourceforge.io>
11. NEAT-Python [Online]. Available: <http://github.com/CodeReclaimers/neat-python>
12. Doroshenko, A. Yu., Achour, I. Z. (2021). *Rozpodilena realizatsiya metodu neyroevolyutsiyi narostayuchoyi topolohiyi*. *Problemy prohamuvannya*, (3), 3-15.

The article has been sent to the editors 18.07.23.
After processing 08.08.23.
Submitted for printing 10.08.23.

Copyright under license CCBY-SA4.0.

Chapter 6. **APPLIED INTELLIGENT
TECHNOLOGIES AND
SYSTEMS**

Розділ 6. **ПРИКЛАДНІ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ
ТЕХНОЛОГІЇ ТА СИСТЕМИ**

СВІТОВИЙ ДОСВІД ЗАСТОСУВАННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМ І ТЕХНОЛОГІЙ У ВІЙСЬКОВІЙ СФЕРІ

О. В. Зінченко¹, М. А. Фесенко², Т. М. Кисіль³, Н. В. Москаленко⁴

^{1,3,4}Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, Україна

вул. Солом'янська, 7, м. Київ, 03110

²Державний науково-дослідний інститут МВС України, Україна

пров. Євгена Гуцало, 4а, м. Київ, 01011

¹zinchenkoov@gmail.com

²fesmak@ukr.net, fesenkomaksim81@gmail.com

³program2kurs@gmail.com

⁴moskalenkonv@ukr.net

¹<https://orcid.org/0000-0002-3973-7814>

²<https://orcid.org/0000-0001-8218-4154>

³<https://orcid.org/0000-0002-5123-0768>

Анотація. У даній статті проведено аналіз технологій і сучасних засобів військового призначення із інтелектуальними комп'ютерними системами (платформами). До таких засобів можна віднести «розумні» кулі, гвинтівки з окулярами доповненої реальності, а також балістичними комп'ютерами, «розумну» зброю (міномети), високоточні боеприпаси, роботизовані бойові автомобілі й іншу техніку, лазерні системи протиповітряної оборони для наземних, повітряних, а також морських сил, безпілотні літальні апарати тощо. Наведено приклади інтелектуальних засобів військового призначення, їх тактико-технічні характеристики й галузі застосування. Висвітлено переваги та недоліки використання технологій і засобів із інтелектуальними системами (платформами), а також обґрунтована доцільність їх використання для військового призначення.

Перелічені вище приклади засобів із інтелектуальними системами (платформами) ефективно використовуються у провідних країнах світу, а саме: США, Велика Британія, Японія, Франція, Німеччина, Ізраїль, Нідерланди тощо.

Досвід застосування військовими цих країн показав, що інтелектуальні системи дозволяють спростувати виконання відповідних завдань, заходів захисту від нещасних випадків або надмірної агресії злочинців (ворогів), а також підвищують безпеку цивільного населення.

Визначено, що запровадження світових досягнень, а також розроблення вітчизняних систем і засобів із інтелектуальними системами є одним із пріоритетних напрямів розвитку військово-промислового комплексу України.

Це, в свою чергу, потребує тісної співпраці науковців з військовими, що спонукає до вивчення можливостей застосування інтелектуальних систем у різних сферах, зокрема у сфері розвитку національної безпеки України. Виокремлені подальші перспективні дослідження з даного напрямку.

Ключові слова: інтелектуальна комп'ютерна система, платформа, «розумні» кулі, гвинтівки, зброя, високоточні боеприпаси, безпілотні літальні апарати, лазерні системи, національна безпека.

GLOBAL EXPERIENCE IN THE APPLICATION OF INTELLIGENT SYSTEMS AND TECHNOLOGIES IN THE MILITARY SPHERE

O. Zinchenko¹, M. Fesenko², T. Kysil³, N. Moskalenko⁴

^{1,3,4}State University of Information and Communication Technologies, Ukraine

Solomenska str., 7, Kyiv, 03110

²State Research Institute of the Ministry of Internal Affairs of Ukraine, Ukraine

Y. Gutsalo Lane, 4a, Kyiv, 01011

¹zinchenkoov@gmail.com

²fesmak@ukr.net, fesenkomaksim81@gmail.com

³program2kurs@gmail.com

⁴moskalenkonv@ukr.net

¹<https://orcid.org/0000-0002-3973-7814>

²<https://orcid.org/0000-0001-8218-4154>

³<https://orcid.org/0000-0002-5123-0768>

Abstract. This article analyzes technologies and modern means of military use with intelligent computer systems (platforms). Such means include "smart" bullets, rifles with augmented reality glasses, as well as ballistic computers, "smart" weapons (mortars), high-precision ammunition, robotic combat vehicles and other equipment, laser air defense

systems for ground, air, as well as naval forces, unmanned aerial vehicles, etc. Examples of intellectual means of military use, their tactical and technical characteristics and fields of application are given. The advantages and disadvantages of using technologies and means with intelligent systems (platforms) are highlighted, as well as the justified expediency of their use for military purposes.

The examples of tools with intelligent systems (platforms) listed above are effectively used in the leading countries of the world, namely: the USA, Great Britain, Japan, France, Germany, Israel, the Netherlands, etc.

The experience of use by the military of these countries has shown that intelligent systems make it possible to simplify the performance of relevant tasks, measures to protect against accidents or excessive aggression of criminals (enemies), and also increase the safety of the civilian population.

It was determined that the introduction of world achievements, as well as the development of domestic systems and means with intelligent systems, is one of the priority directions of the development of the military-industrial complex of Ukraine.

This, in turn, requires close cooperation between scientists and the military, which prompts the study of the possibilities of using intelligent systems in various fields, in particular in the field of national security development of Ukraine. Further prospective studies in this direction are highlighted.

Keywords: intelligent computer system, platform, "smart" bullets, rifles, weapons, precision munitions, unmanned aerial vehicles, laser systems, national security.

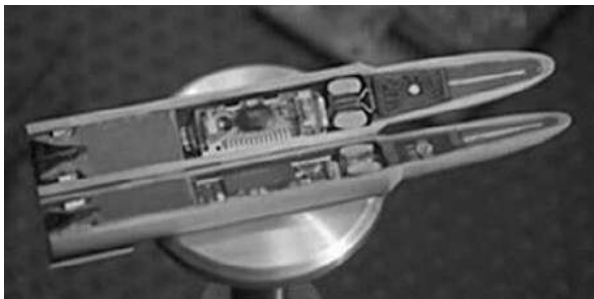
Перспективи розвитку інтелектуальних систем і технологій в збройних силах передових країн світу на даний час актуальні для всіх військових фахівців та асоціюються, в першу чергу, з інформатизацією, роботизацією, автоматизацією керування людськими ресурсами та технікою військового, а також подвійного призначення. Проте, запровадження подібних систем зажадало збору та оброблення величезної кількості різної інформації, прийняття оперативних рішень за умов значної невизначеності. Виникла проблема пошуку інструментарію, який зміг би замінити людину при вирішенні наведених задач. Значний імпульс в розвитку цифрових технологій надало запровадження інтелектуальних систем.

Відомо, що однією з переваг використання інтелектуальних систем є висока швидкість і оброблення великих обсягів даних. Саме необхідність аналітичного оброблення значних обсягів структурованих даних в короткі терміни, а

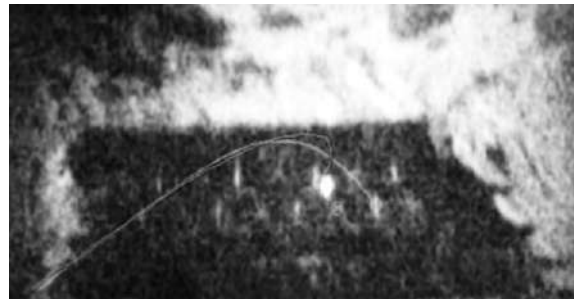
також неструктурованих даних постає однією з найважливіших причин розроблення різних систем військового призначення. Інша причина полягає в необхідності автоматизації окремих процесів (пошуку та виявлення цілей, наведення зброї, розкриття факту виявлення себе противником тощо), для цього відповідні функціональні пристрої оснащуються спеціалізованими обчислювальними модулями.

Розглянемо докладніше основні сфери застосування у військовій справі інтелектуальних систем та технологій.

Агентство перспективних оборонних дослідницьких проєктів (Defense Advanced Research Projects Agency – DARPA) Міністерства Оборони США заявило про розроблення компанією Teledyne Scientific & Imaging «розумної кулі (боєприпасу) екстремальної точності» (рис. 1) з електронною системою наведення EXACTO (Extreme Accuracy Tasked Ordnance), яка допоможе снайперам влучати в цілі без промаху [1].



а



б

Рис. 1. Розумна куля з електронною системою наведення EXACTO

Система перетворює такі кулі на самонавідні для ураження обраних цілей. Після наведення на ціль куля з електронною системою наведення EXASTO може коригувати траєкторію свого польоту (рис. 1, б), нівелюючи вітер, а також інші фактори, що впливають на влучність. Технологія виконує більшу частину роботи снайпера і полегшує



попадання по рухомих цілях як вдень, так і вночі.

Бельгійська компанія FN Herstal оголосила про своє перше велике замовлення балістичних комп'ютерів FN Elity для гвинтівок різного калібру, що застосовуються збройними силами Франції.



Рис. 2. Гвинтівка (а) з прицільним комплексом FN Elity (б)

FN Elity – це прицільний комплекс вагою 400 грам. Він оснащений OLED-екраном і лазерним далекомір, який може вимірювати дальність до цілі зростом людини з відстанню до 1750 метрів. Комплекс дозволяє бачити ціленаведення у видимому та інфрачервоному спектрі, він оснащений інфрачервоним освітлювачем зі зміною інтенсивності світла, декількома датчиками для вимірювання температури, тиску та вологості. Комплекс працює із застосуванням спеціалізованого програмного забезпечення для балістичного розрахунку від компанії АрехО, яке використовується для обчислення необхідних поправок при стрільбі в режимі реального часу. Разом із комплексом постачається застосунок для операційної системи Android з налаштуванням для кожного параметра комп'ютера.

У 2022 році під егідою дослідного центру Battle Lab Terre і Технічного відділу армії Франції на базі Центру оперативної підготовки та навчання в стрільбі провели

випробування на різних видах зброї: гвинтівках калібру 12,7-мм та 7,62-мм.

Було визначено, що балістичний комп'ютер від FN Herstal значно підвищив продуктивність стрільця, скоротивши час «виявлення-нейтралізація» на 40% і підвищивши точність стрільби на 25%. Його запровадження також замінило частину обладнання, яке застосовують снайпери, що полегшило стандартну вагу екіпування на 6 кг [2].

Американська компанія Tracking Point розробила комп'ютеризований розумний снайперський комплекс Precision Guided, в основу якого покладено самозарядну стрілецьку зброю (рис. 3).

Нові снайперські комплекси Precision Guided на даний час доступні під патрони 5,56x45 та 7,62x51, Winchester Magnum (7,62x67 міліметра).

У снайперських комплексах реалізована технологія Tag-and-Shoot. При її використанні стрілець повинен за допомогою кнопки на спусковій скобі «відмітити» ціль, а потім натиснути на спусковий гачок. Після цього власник зброї повинен поєднати прицільну мітку із зробленою відміткою у прицілі. У момент суміщення прицільна мітка стає червоною, а зброя автоматично зробить постріл.

Спусковий гачок можна натиснути і в момент, коли почервоніє мітка в прицілі. Комп'ютеризований приціл зброї враховує

тремтіння рук стрільця, дальність до цілі і її переміщення.



Рис. 3. Розумний снайперський комплекс Precision Guided

Продуктивність обчислювальної системи комплексу дозволяє з великою швидкістю відзначати і вражати різні об'єкти, а також вести вогонь по рухомих цілях. Зокрема, гвинтівка Tracking Point під набій Winchester Magnum дозволяє з високою точністю вражати цілі на дальності до 800 метрів, що рухаються на швидкості до 32 км/год.

Ще однією з розробок компанії Tracking Point є поєднання гвинтівки із окулярами доповненої реальності Google Glass, що дозволяє стрільцям вести вогонь з-за рогу, укриття, незручних положень без ризиковості та із збереженням власного життя (рис. 4).



Рис.4. Гвинтівка Tracking Point із окулярами доповненої реальності Google Glass

Комп'ютеризована система управління, система виявлення та стеження за ціллю, поєднані з керованим спусковим механізмом, дозволяють практично будь-якій людині точно вражати цілі на відстані 900 і більше метрів. Робота системи

управління гвинтівками Tracking Point була оцінена американськими військовими, які замовили в минулому році у компанії першу експериментальну партію, що складається із шести одиниць «розумної» зброї.

Подібно до такої, є зброя, запропонована та запроваджена у світі ізраїльською платформою «Corner Shot»,

яка перетворює пістолет у короткоствольну гвинтівку, для ведення стрільби по цілях з-за рогу (рис. 5).



Рис. 5. Платформа «CornerShot»

Corner Shot складається з передньої частини, яка кріпиться шарнірами на платформі. За допомогою ручки стрілець зможе швидко й легко направити ствол у потрібному напрямку.

Платформа дозволяє встановити знімну камеру високої роздільної здатності, сенсори для передачі аудіо/відео, містить видимі та інфрачервоні лазери, тактичні ліхтарі та глушники. Існують і версії для пістолетів і навіть для 40 мм гранатометів. Всі діджитал-налаштування дозволяють використовувати систему у якості засобу

спостереження, виводячи відео на 2,5-дюймовий РК-дисплей з перехрестям та функцією нічного бачення. Доступні різні додаткові знімні камери [3].

Складна електроніка і інтелектуальні системи знаходять місце в іншій переносній вогнепальній зброї. Так, компанії Heckler & Koch (Німеччина) та Alliant Techsystems (США) запропонували розроблений комп'ютеризований гранатометний комплекс XM25, призначений для знищення живої сили противника (рис. 6).



Рис. 6. Комп'ютеризований гранатометний комплекс XM25

Гранатометний комплекс оснащений системою прицілювання із лазерним далекоміром, що відображає відстань до цілі. Знання цих даних дозволяє солдату

програмувати гранати так, щоб вони вибухали в повітрі відразу за укриттям противника (рис. 7).

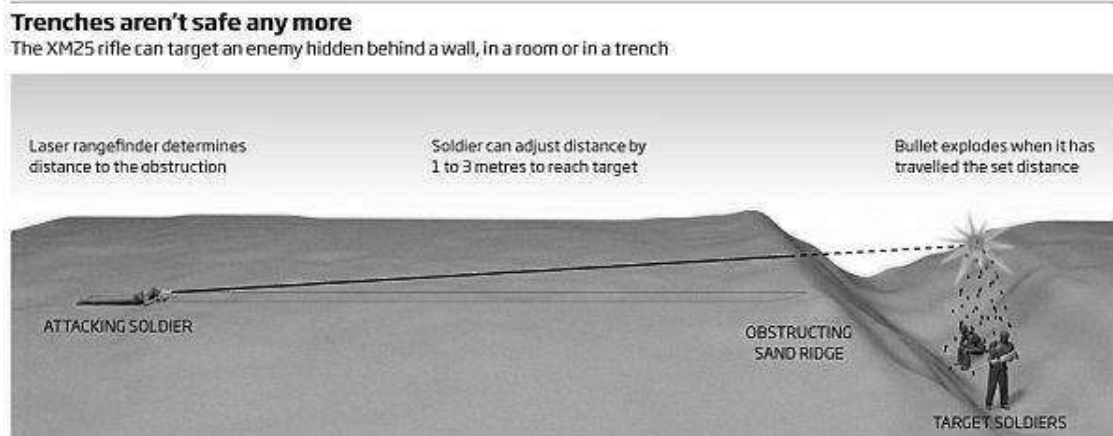


Рис. 7. Принцип дії комп'ютеризованого гранатометного комплексу XM25

Більше того, приціл підказує, як високо стрілець повинен тримати ствол, щоб снаряд проходив потрібну траєкторію. Дистанцію детонування військовий може самостійно збільшити або зменшити на три метри. Ця розробка ефективна для ураження цілей, які приховані за укріпленнями або знаходяться в окопах. Розробники стверджують, що система на 300% ефективніша за звичайні гранатомети [1].

Провідні країни світу активно проводять перспективні дослідження щодо розроблення (створення) різних за своїм призначенням роботизованих засобів (платформ, систем), здатних у перспективі повністю виключити присутність людини безпосередньо на полі бою. Технічною мовою такі бойові системи вже отримали назву, як «автономна зброя».

На теперішній час автономні роботизовані засоби з інтелектуальними

системами військового та подвійного призначення вже застосовуються на землі, у воді і в повітрі, а їх габарити змінюються від кількох сантиметрів до аналогів повноцінних бойових машин [4, 5].

В якості прикладів можна навести, систему «Залізний купол» (Ізраїль) (рис. 8, а), зенітно-артилерійський корабельний комплекс Mark 15 Phalanx (США) (рис. 8, б), роботизовану бойову платформу Mission Master (Великобританія) (рис. 8, в), які можуть забезпечувати автономний пошук і виявлення цілей у визначеному секторі, оцінити ступінь їх загрози, вибір найбільш небезпечної цілі, захоплення, супровід і визначення параметрів її руху, відкриття вогню, автоматичне коригування стрільби у замкнутому контурі, припинення вогню та захоплення нової цілі.

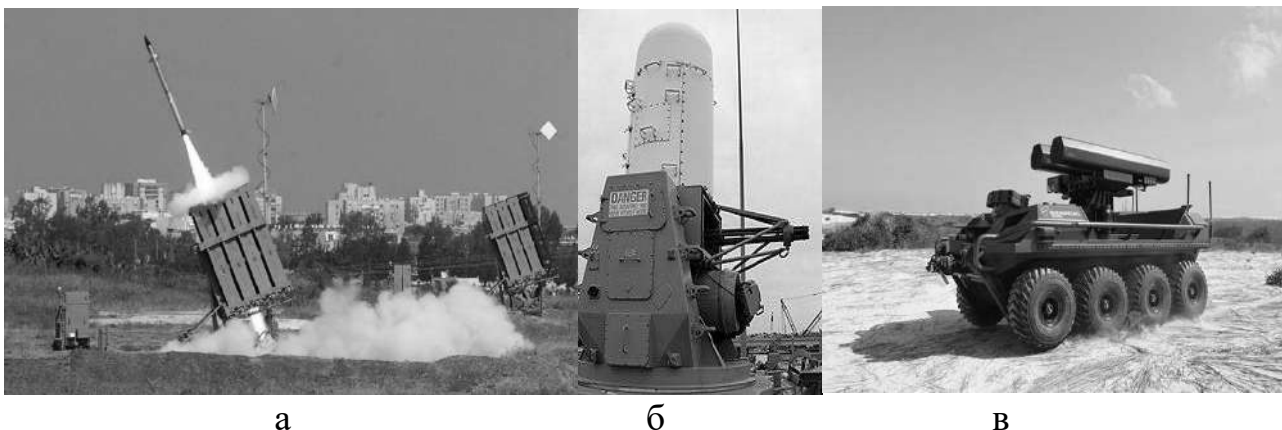


Рис. 8. Автономні роботизовані засоби військового призначення з інтелектуальними системами

Південнокорейськими фахівцями розроблено робот-вартовий SGR-1 (Intelligent Surveillance and Guard Robot) для охорони та спостереження, який здатний автоматично виявляти і знищувати

порушників державного кордону (рис. 9). У ньому об'єднані дві системи з функціями спостереження та стрільби, а також розпізнавання голосу.



Рис. 9. Робот-вартовий (Intelligent Surveillance and Guard Robot) SGR-1

Є подібні системи і у російській федерації, наприклад, багатоцільовий роботизований бойовий автомобіль «Уран-9» (рис. 10), призначений для ведення

дистанційної розвідки, а також вогневої підтримки завдань, що вирішуються у міських умовах.



Рис. 10. Роботизований бойовий автомобіль «Уран-9»

Сучасні артилерійські системи оснащуються новітніми високоточними інтелектуальними боеприпасами.

Так одним із прикладів можна навести німецький високоточний інноваційний боеприпас з «ударним ядром» SMART 155 (рис. 11, а).



а



б

Рис. 11. Боєприпас з «ударним ядром» SMART 155

Це артилерійський снаряд калібру 155 мм, спроектований для стрільби з гаубиць та самохідних установок для ураження, як стаціонарної, так і броньованої техніки верхньої частини корпусу під час руху. Боєприпас відстрілюється по заданим координатам. Він несе окремі два бойові суббоєприпаси, які після вибуху снаряду на певній висоті над ціллю розділяються і опускаються на парашутах (рис. 11, б) та здійснюють пошук цілі.

Кожен суббоєприпас оснащений індивідуальною системою самонаведення,

яка поєднана з радіолокаційними та інфрачервоними сенсорами. Після ідентифікації цілі суббоєприпас детонує та вистрілює «ударне ядро», яке і вражає згори бойову машину [6].

Високоточна система JDAM-ER (The Joint Direct Attack Munition – Extended Range) – боєприпас прямої атаки, який коригується, ще має назву «розумна бомба» (рис. 12). Вона забезпечує високий рівень точності наведення під час удару по противнику.

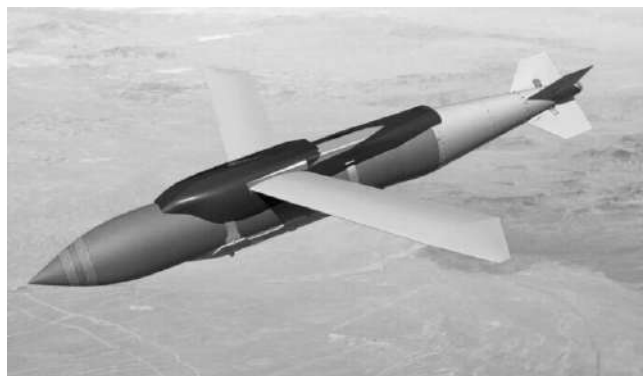


Рис. 12. Високоточна система JDAM-ER

JDAM – це спеціальний комплект, який складається з невеликих «крил», рульових поверхонь на корпусі та хвостової частини. У хвостову частину вмонтовано блок GPS-навігації.

Дана система працює наступним чином: літак із JDAM летить до поля бою; пілот може знати GPS-координати сил

противника, за якими може задаватись удар. Пілоти можуть отримувати оновлені координати в польоті від коригувальників із землі. Пілот вводить координати цілі в консоль, яка передає дані через цифрове з'єднання, що, тим самим, запрограмує бомбу. Літак кидає бомбу та відлітає. Бомба приймає сигнали із супутників GPS,

визначає, де вона знаходиться, і де знаходиться її ціль та переміщається до тих пір, поки не натрапить на тверду поверхню.

Швидке вдосконалення ракетних та артилерійських знарядь підштовхує до дзеркального розвитку оборонних засобів.

В агентстві Міністерства оборони США DARPA вважають, що гідною відповіддю на загрози, які постійно зростають, можуть стати високоенергетичні лазерні системи захисту (рис. 13).



Рис. 13. Лазерна система HELLADS

Американські військово-морські сили та регулярна армія вже розпочали впровадження подібних технологій у рамках проєкту HELLADS (High Energy Liquid Laser Area Defense System).

Очікується, що створені за програмою HELLADS установки будуть досить точними, швидкими та потужними, щоб вчасно ліквідувати ворожі ракети, артилерійські снаряди та безпілотики. В основі технології лежить твердотільний високоенергетичний лазер із рідинним охолодженням. Щоб укомплектувати таким обладнанням літальний апарат, воно має

бути в міру легким та компактним, зберігаючи при цьому потужність щонайменше 150 кВт. Успіхів у цьому напрямі досягла компанія General Atomics, яка працює з архітектурою HELLADS і незабаром може укласти контракт із ВПС США на оснащення безпілотики лазером [7].

Компанія Rafael Advanced Defense Systems представила на виставці IMDEX 2023 у Сінгапурі нову лазерну систему ППО для кораблів Naval Iron Beam (NIB) (рис. 14) [8].



Рис. 14. Лазерна система ППО для кораблів Naval Iron Beam

Це морська версія наземної системи Iron Beam, яка використовується Ізраїлем для перехоплення ракет і безпілотників. Naval Iron Beam призначена для захисту кораблів від ракет, безпілотників та іншого зняття.

Система складається з двох основних компонентів: лазерного та оптико-електронного модулів. Лазерний модуль генерує високоенергетичний промінь, який наводиться на ціль завдяки оптико-електронному модулю. Останній забезпечує виявлення, ідентифікацію, супровід і прицілення за допомогою камер та радарів.

Важливим напрямом застосування інтелектуальних технологій для військової діяльності є розвиток безпілотної авіації.

Військові використовують безпілотники у якості спеціального технічного засобу, зокрема для розвідки та фотографування ситуацій, які виникають у важкодоступних місцях. Безумовно, використання «літаючої камери» виправдане в умовах відкритого простору, в якому звичайний цифровий фотоапарат не може впоратися.

Компанія Northrop Grumman оголосила про постачання першого серійного зразка безпілотника MQ-4C Triton модифікації IFC-4 з інтелектуальними системами (рис. 15) [9].



Рис. 15. Безпілотник MQ-4C Triton модифікації IFC-4

MQ-4C Triton – висотний безпілотний літальний апарат великої тривалості польоту, призначений для збору інформації, спостереження та розвідки у прибережній зоні. Triton побудований на базі дрона RQ-4 Global Hawk, який також розроблений компанією Northrop Grumman, може підніматися на висоту понад 17 км, літати зі швидкістю 575 км/год та перебувати у повітрі до 24 годин. Розвідувальна апаратура нового дрона включає багатofункціональну РЛС, відеокамеру, електрооптичні/інфрачервоні датчики, засоби радіорозвідки, автоматичну систему ідентифікації (AIS) і апаратуру ретрансляції. Це обладнання дозволяє апарату виявляти та автоматично класифікувати різні типи надводних об'єктів.

Засновник компанії SpaceX Ілон Маск впевнено заявив, що у війнах майбутнього винищувачі не будуть мати жодного шансу в протистоянні бойовим безпілотним апаратам (дронам), а також звернув увагу на те, що саме сучасний літак F-35 програє безпілотному винищувачу, оснащеному інтелектуальною системою.

Отже, наведені вище досягнення у напрямку застосування засобів військового та подвійного призначення з інтелектуальними системами ефективно застосовуються практично в усіх країнах світу. Вони спрощують виконання відповідних завдань, захищають від нещасних випадків або надмірної агресії злочинців (ворогів), а також підвищують безпеку населення.

В свою чергу, запровадження світових досягнень, а також розроблення

вітчизняних систем і засобів з інтелектуальними системами широко використовуються, на сьогодні, у діяльності Міністерства оборони, Збройних Сил України, а також є одним із пріоритетних напрямів розвитку військово-промислового комплексу країни. Це, в свою чергу, потребує тісної співпраці науковців з військовими, що спонукає до вивчення можливостей застосування інтелектуальних систем у різних сферах, зокрема у сфері розвитку національної безпеки України.

Література

1. «Corner Shot CSM»: убий ворога із-за рогу. URL: https://zbroya.info/uk/mobile/blog/3145_cornersh_ot-csm-ubii-voroga-iz-za-rogu. (дата звернення 04.07.2023).
2. «Розумні» кулі, риба-робот та лазерна техніка: якою зброєю користуються провідні країни світу. URL: https://24tv.ua/rozumni_kuli_riba_robot_ta_lazerna_tehnika_yakoyu_zbroyeyu_koristuyutsya_prov_idni_krayini_svitu_n1129440 (дата звернення 03.07.2023).
3. SMART 155: ЗСУ використовують новітні боєприпаси з «ударним ядром» для ураження російської бронетехніки. URL: <https://mil.in.ua/uk/news/smart-155-zsu-vykorystovuyut-novitni-boeyprypasy-z-udarnym-yadrom-dlya-urazhennya-rosijskoyi-bronetehniki> (дата звернення 05.07.23).
4. Зброя майбутнього: фантастичні технології, що стали реальністю. URL: <https://znaj.ua/news/zbroya-majbutnogo-fantastychni-tehnologiyi-sho-staly-realnistyu> (дата звернення 06.07.23).
5. Штучний інтелект на полі бою. URL: <https://hi-ech.ua/article/iskusstvennyiy-intellekt-na-pole-boya> (дата звернення 05.07.23).
6. Ізраїльська компанія презентувала систему лазерного ППО. URL: <https://dev.ua/news/izrailaska-kompaniia-prezentovala-systemu-lazernoho-ppo-vona-idealno-pidkhodyt-dlia-zakhystu-ukrainskoho-moria> (дата звернення 07.00.23).
7. Флот США отримав перший серійний дрон MQ-4C Triton у версії IFC-4. URL: <https://mil.in.ua/uk/news/flot-ssha-otrymav-pershij-serijnyj-dron-mq-4c-triton-u-versiyi-ifc-4/> (дата звернення 10.04.23).
8. Франція замовила балістичні комп'ютери для снайперів. URL: https://zbroya.info/uk/blog/22680_frantsiia-zamovila-balistichni-kompiuteri-dlia-snaiperiv/ (дата звернення 03.07.2023).
9. Штучний інтелект на полі бою російсько-української війни.

URL: <https://www.ukrinform.ua/rubric-ato/3444808-stucnij-intelekt-na-poli-bou-rosijskoukrainskoi-vijni.html> (дата звернення 04.07.2023).

References

1. «Corner Shot CSM»: ubyi voroha iz-za rohu. URL: https://zbroya.info/uk/mobile/blog/3145_cornersh_ot-csm-ubii-voroga-iz-za-rogu. (data zvernennia 04.07.2023).
2. «Rozumni» kuli, ryba-robot ta lazerna tehnik: yakoiu zbroieiu korystuiutsia providni krainy svitu. URL: https://24tv.ua/rozumni_kuli_riba_robot_ta_lazerna_tehnika_yakoyu_zbroyeyu_koristuyutsya_prov_idni_krayini_svitu_n1129440 (data zvernennia 03.07.2023).
3. SMART 155: ZSU vykorystovuiut novitni boieprypasy z «udarnym yadrom» dlia urazhennia rosiiskoi bronetehniki. URL: <https://mil.in.ua/uk/news/smart-155-zsu-vykorystovuyut-novitni-boeyprypasy-z-udarnym-yadrom-dlya-urazhennya-rosijskoyi-bronetehniki> (data zvernennia 05.07.23).
4. Zbroia maibutnoho: fantastychni tekhnolohii, shcho staly realnistiu. URL: <https://znaj.ua/news/zbroya-majbutnogo-fantastychni-tehnologiyi-sho-staly-realnistyu> (data zvernennia 06.07.23).
5. Shtuchnyi intelekt na poli boiu. URL: <https://hi-ech.ua/article/iskusstvennyiy-intellekt-na-pole-boya> (data zvernennia 05.07.23).
6. Izrailaska kompaniia prezentovala systemu lazernoho PPO. URL: <https://dev.ua/news/izrailaska-kompaniia-prezentovala-systemu-lazernoho-ppo-vona-idealno-pidkhodyt-dlia-zakhystu-ukrainskoho-moria> (data zvernennia 07.00.23).
7. Flot SSHA otrymav pershyi seriinyi dron MQ-4C Triton u versii IFC-4. URL: <https://mil.in.ua/uk/news/flot-ssha-otrymav-pershij-serijnyj-dron-mq-4c-triton-u-versiyi-ifc-4/> (data zvernennia 10.04.23).
8. Frantsiia zamovyla balistychni kompiutery dlia snaiperiv. URL: [https://zbroya.info/uk/blog/22680_frantsiia-zamovila-balistychni-kompiuteri-dlia-snaiperiv/](https://zbroya.info/uk/blog/22680_frantsiia-zamovila-balistichni-kompiuteri-dlia-snaiperiv/) (data zvernennia 03.07.2023).
9. Shtuchnyi intelekt na poli boiu rosiisko-ukrainskoi viiny. URL: <https://www.ukrinform.ua/rubric-ato/3444808-stucnij-intelekt-na-poli-bou-rosijskoukrainskoi-vijni.html> (data zvernennia 04.07.2023).

The article has been sent to the editors 13.07.23.
After processing 03.08.23.
Submitted for printing 10.08.23.

Copyright under license CCBY-SA4.0.

ЗАСТОСУВАННЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В ПРОГНОЗУВАННІ ЕКОНОМІЧНОЇ МОДЕЛІ

А.В. Калюжняк

Запорізький національний університет, Україна
вул. Жуковського, 66, Запоріжжя, 69600
anastasia.korgun@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-4837-7566>

Анотація. Через стрімке зростання штучного інтелекту (ШІ) активно тривають дискусії, чи має він позитивний вплив на економічний розвиток. Однак існує лише деяке уявлення про те, яку роль і місце технології штучного інтелекту насправді відіграють в економічному розвитку. У даній статті буде розглянуто дослідження, зосереджене на створенні програмного забезпечення з прогнозування економічної моделі та обговорення на перетині штучного інтелекту та економічного розвитку. Зокрема, було проаналізовано існуючі дослідження в галузі економічного моделювання за допомогою бібліометричного інструменту Bibliometrix, представляючи внутрішню структуру та зовнішні характеристики галузі через різні метрики та алгоритми. Результати бібліометричного аналізу свідчать про те, що кількість публікацій у галузі за останні роки зростає. Крім того, глибоке навчання та дослідження, пов'язані з інтелектуальним аналізом даних, є ключовими напрямками на майбутнє. Тому науковці, віддані цій галузі, розвинули тісну співпрацю та спілкування за всіма напрямками. З іншого боку, аналіз демонструє, що більшість досліджень зосереджено на п'яти аспектах інтелектуального прийняття рішень, соціального управління, праці та капіталу, промисловості та інновацій. Результати дослідження є перспективними для вчених у Стратегії економічного розвитку України.

Ключові слова: великі дані, еконографологія, економіка, економічне моделювання, навчальна машина, нейронні мережі, штучний інтелект.

ARTIFICIAL INTELLIGENCE APPLICATION IN THE FORECASTING OF ECONOMIC MODEL

A. Kaliuzhniak

Zaporizhzhia National University, Ukraine
Zhukovskoho str., 66, Zaporizhzhia, 69600
anastasia.korgun@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-4837-7566>

Abstract. Due to the rapid growth of artificial intelligence (AI), there are active discussions whether it produces a positive effect on economic development. However, there is vague understanding of what role and place artificial intelligence technology actually plays in economic development. This article will review the research focused on the creation of economic model forecasting software and discussion of the intersection of artificial intelligence and economic development.

In particular, the existing research in the field of economic modeling was analyzed applying the bibliometric tool Bibliometrix, presenting the internal structure and external characteristics of the field through various metrics and algorithms.

The results of the bibliometric analysis indicate that the number of publications in the field has increased in the recent years. In addition, deep learning and research related to data mining are key areas for the future investigations.

Therefore, scientists dedicated to this field have developed close cooperation and communication in all directions. On the other hand, the analysis shows that the bigger part of the research is focused on five aspects of intellectual decision-making, social management, labor and capital, industry and innovation.

The results of the study are prospective for scientists within the Strategy of Economic Development of Ukraine.

Keywords: big data, econographology, economics, economic modeling, learning machine, neural networks, artificial intelligence.

Вступ

Останнім часом використання штучного інтелекту (ШІ) у різних галузях досліджень, у технічних науках або соціальних науках є більш поширеним і швидким у наші дні. Він пропонує різні варіанти моделей і додатків (машинне навчання). ШІ з кожним днем бере активнішу участь у нашому повсякденному житті. А отже, економічне моделювання не може уникнути цього. Основна ідея штучного інтелекту полягає в тому, щоб перевести людське мислення та дії в електронну або механічну машину, щоб допомогти оцінити та вирішувати щоденні проблеми. ШІ не є чимось новим, він насправді існує давно. Згідно з цим дослідженням, штучний інтелект був офіційно інституціоналізований у 1940-х роках під час створення першого апаратного (комп'ютерного) та програмного забезпечення (ручне програмування) у середині Другої світової війни. Застосування штучного інтелекту в цей історичний час полягало в тому, щоб перехоплювати зашифровані кодові повідомлення від німецьких нацистів та японського імператорського флоту, щоб запобігти нападу на великі вантажні кораблі, які постачали товари до Великобританії зі США в критичні часи Другої світової війни [1].

Також необхідно згадати великий внесок Алана Тюрінга, «батька штучного інтелекту» та сучасної комп'ютерної науки, у створенні механічного електричного комп'ютера під назвою Enigma (проект британської розвідки) і першої теоретичної основи ручного алгоритму. Основною ідеєю створення Enigma було перехоплення та декодування зашифрованих повідомлень від вторгнень німецьких і японських військ повітрям, морем і сушею на стратегічні позиції союзників і цілі громадянського суспільства [2]. Ці академічні винаходи відкривають нову еру в ШІ. Проте було виявлено, що застосування ШІ в економічному моделюванні представляє нескінченні виклики та можливості. Необхідно сказати, що використання програмування, програмного забезпечення та додатків є початком ШІ в економічному

моделюванні. Для цього можемо згадати кількох дослідників, які використовували ШІ в економічному моделюванні, економіці та фінансах, таких як: Acemoglu, Daron і Pascual Restrepo (2018); Біклі, С. Дж., Чан, Х. Ф. і Торглер, Б. (2022); Кальвано, Е., Кальцоларі, Г., Деніколо, В., Харрінгтон, Дж. Е., і Пасторелло, С. (2020); Кокберн, І.М., Хендерсон, Р., і Стерн, С. (2019); Duarte, P.G., & Giraud, Y., (2020); Dyer-Witthford, N., Kjosens, A., & Steinhoff, J. (2019); Ghoddusi, H., Creamer, G.G., & Rafizadeh, N. (2019); Гмайнер, Р. і Харпер, М., (2021).

Усі ці дослідники представляють різні погляди від історичних до технічних. У даних дослідженнях можемо спостерігати застосування штучного інтелекту в економічному моделюванні, а економіка може показати великий список потенційних застосувань. Тому, дана дослідницька стаття розкриває питання розробки програмного забезпечення на основі ШІ, яке зможе пропонувати економічне прийняття рішень. Дане програмне забезпечення використовуватиме штучний інтелект (AI), великі дані, науку про дані, нейронні мережі та еконографологію. Основною метою розробки є вирішення будь-яких економічних або фінансових проблем. Також дане ПЗ має допомогти науковцям та економістам швидше та ефективніше знайти можливі рішення чи рекомендації. ПЗ використовуватиме велику базу даних, яка складатиметься зі статей, пов'язаних з економічним розвитком та моделями. Для успішного проведення дослідження необхідно визначити загальне визначення економічного моделювання. Згідно з проаналізованими дослідженнями «економічне моделювання» можна визначити як академічну або емпіричну дослідницьку роботу, яка підтримується використанням різних теорій, а також кількісних або якісних моделей і методів для аналітичної оцінки причин і впливів будь-якої економіки на суспільство будь-де та будь-коли.

Як невід'ємну частину цього визначення, «економічний» визначається як «теоретичний або технічний інструмент,

який розроблений для вирішення конкретних проблем, що впливають, прямо чи опосередковано, на суспільства в різні періоди часу та географічні простори» [3]. База даних для програми прогнозування повинна базуватися на класифікації декількох економічних категорій, де кожна категорія є місцем зберігання бази даних.

Основна ідея використання практичних економічних підходів полягає в тому, щоб знайти відповідну та застосовну політику, яка може допомогти зменшити негативний вплив будь-яких економічних і соціальних проблем у суспільстві найбільш ефективним і реалістичним способом [3].

Розробка ПЗ на основі ПП

Основною метою економічного моделювання є створення різних відкаліброваних сценаріїв та різних рівнів ризику для оцінки можливих рішень будь-

якої економічної проблеми. Головним завданням моделювання економіки є перехід від динамічного економічного моделювання до економічного моделювання в реальному часі. Другою проблемою в аналізі економічного моделювання є використання штучного інтелекту, також відомого як підхід нейронних мереж. Нейронні мережі є потенційно важливим і цінним інструментом для аналізу економічного моделювання. Основним завданням нейронних мереж є вибір великої бази даних, а також найбільш оптимальних рекомендацій і пропозицій для вирішення будь-якої соціально-економічної проблеми. Ці рекомендації та пропозиції отримуються з великої бази даних минулого досвіду успішних теоретичних або експериментальних випадків (Рис.1).

```
// Побудова нейронної мережі

Scope root = Scope::NewRootScope();
auto input = Placeholder(root, DT_FLOAT);
auto hiddenWeights = Variable(root, {2, 10}, DT_FLOAT);
auto hiddenBiases = Variable(root, {10}, DT_FLOAT);
auto hiddenLayer = Relu(root, Add(root, MatMul(root, input, hiddenWeights), hiddenBiases));

auto outputWeights = Variable(root, {10, 1}, DT_FLOAT);
auto outputBiases = Variable(root, {1}, DT_FLOAT);
auto outputLayer = Add(root, MatMul(root, hiddenLayer, outputWeights), outputBiases);

// Визначення оптимізатора і функції втрат
auto labelsPlaceholder = Placeholder(root, DT_FLOAT);
auto loss = Mean(root, Square(root, Sub(root, outputLayer, labelsPlaceholder)), {0});
auto optimizer = GradientDescentOptimizer(root, 0.001);
auto train_op = optimizer.minimize(loss);
```

Рис.1. Побудова нейронної мережі

Таким чином, адаптація штучного інтелекту до аналізу економічного моделювання безпосередньо пов'язана з новими математичними методами та техніками, теорією хаосу, логічною математикою, еконофізикою, нейронними мережами, передовим комп'ютерним програмуванням, віртуальною реальністю, робототехнікою, швидшою розробкою програмного забезпечення та надійною апаратною підтримкою.

Наступним глибоким перетворенням аналізу економічного моделювання є природний органічний інтелект економічного моделювання. Він заснований на взаємодії мегакомп'ютерів, нового програмного забезпечення та додатків, заснованих на використанні складних і передових комп'ютерних мов і спеціалізованих математичних алгоритмів, а також інструментів штучного інтелекту та робототехніки. Крім того, існує висока

ймовірність застосування нових багатовимірних графічних моделей разом з голограмами. Голограми зможуть показати будь-якому досліднику складні та динамічні дані в реальному часі. Це також дає досліднику нове візуальне сприйняття економічних проблем з багатовимірної перспективи (Рис.2).

Дослідник може включити в голограму змінні та рівняння будь-якої економічної проблеми в процесі спостереження, аналізу та економічного моделювання. Отже, можна стверджувати, що відсутність неекономічних змінних може значно збільшити вразливість будь-якого економічного моделювання. Таким чином, це передбачає, що будь-яке

економічне моделювання має враховувати широкий спектр факторів, включаючи непередбачені фактори. Ці фактори включають, серед іншого, тенденції стихійних лих, зміну клімату, тероризм, злочинність і насильство, поширення бідності, релігію та переконання, систему освіти, соціальні події та явища, соціальні норми. Однак слід припустити, що всі ці фактори підтримують постійну кількісну та якісну трансформацію в різні історичні періоди суспільства згідно із застосуванням припущення [4].

Робота програмного забезпечення з прогнозування економічної моделі має декілька етапів:

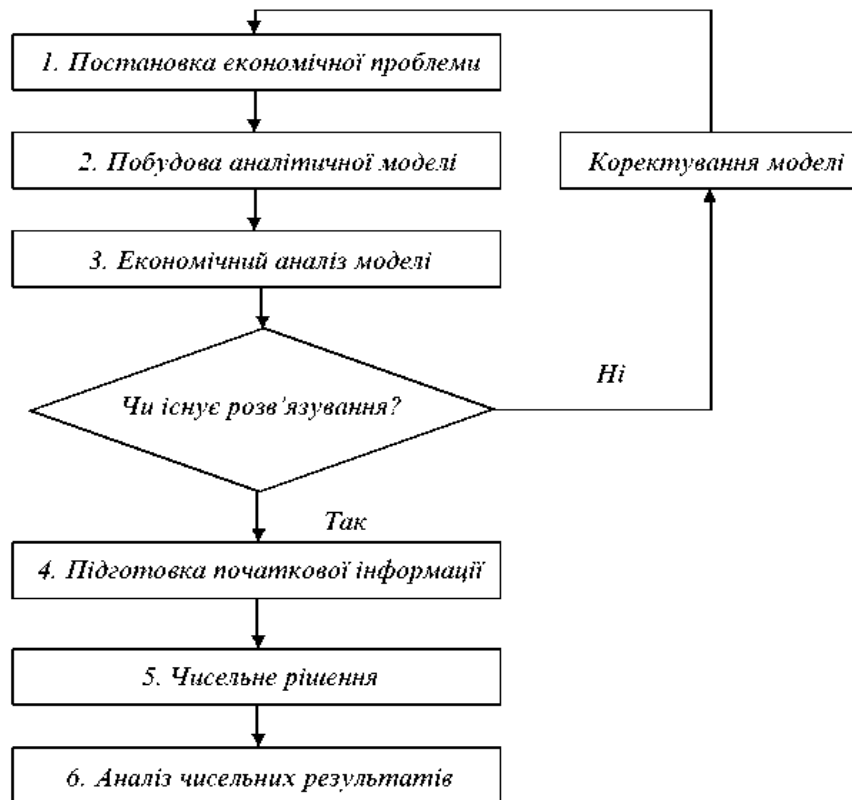


Рис. 2. Процес вибору економічної моделі

- введення та зберігання великої кількості документів;
- візуалізація багатовимірних графіків у реальному часі;
- сповіщення про можливий збій у різних сценаріях політики в одному графічному просторі;

- пошук можливого набору рішень (або економічної політики) відповідно до позиції на графіку в його багатовимірній системі координат фізичного простору відповідно;
- звіт із коротким списком рекомендацій або пропозиції щодо вирішення проблеми неправильної чи

нестабільної поведінки багатовимірною графіка.

Звіт виходить з останнього часткового диференціювання (f_i) із великого списку документів із високим рівнем цитування (Sx_i).

Тому, дана програма застосовуватиме часткове диференціювання (f_i) від першої групи документів із рішеннями з високим рівнем цитування, доки не прийде до остаточного рішення з високим цитуванням. Ідея полягає в налагодженні (∇), доки ми не зможемо досягти найкращої статті з більш високим цитуванням у рішенні з меншим ризиком і меншою вразливістю.

$$f(Sx_1) = Sx_1 \nabla Sx_2 \nabla \dots \nabla Sx_\infty$$

$$f(Sx_2)' = Sx_1 \nabla Sx_2 \nabla \dots \nabla Sx_\infty$$

$$f(Sx_3)'' = Sx_1 \nabla Sx_2 \nabla \dots \nabla Sx_\infty$$

$$\dots = \dots$$

$$f(Sx_i^i) = 0 \text{ thus } i = 1, 2 \dots \infty$$

Отже штучний інтелект (ШІ) — це лише механічний і логічний порядок інформації, який зберігаємо в базі даних. Пізніше, оцінюємо велику базу даних відповідно до параметрів і логічних рішень щодо виділення та пошуку загальних слів чи речень (якісні дані) або сум і дат (кількісні дані), які дотримуються певної логіки та порядку відповідно до інструкцій. Згодом, було отримано список можливих результатів під коротким чи довгим описом або графічно, щоб мати краще уявлення про можливі результати та можливі часткові рекомендації. Згідно з цим дослідженням, ШІ може допомогти процесу моделювання політики в розрахунковій частині та частково аналіз будь-якої соціально-економічної проблеми в даний момент. Тому, можемо спостерігати, що в моделюванні політики в теперішньому чи майбутньому часі завжди може бути так багато обмежень, таких як відсутність креативності, ідей, ірраціональності, лаконічності, уяви та людяності. Можна сказати, що штучному інтелекту потрібно більше часу, щоб включити його в моделювання політики. Бачимо, що ШІ

може відігравати важливу роль в розрахунковій частині та аналізі даних. Поки що це не можна сказати про висновки, прийняття рішень і рекомендацій. Дослідження показує, що штучний інтелект у моделюванні політики може відкрити нове поле для науковців, політиків і соціологів у вивченні складних і динамічних соціально-економічних проблем, які можуть вплинути на наше суспільство в будь-який час і в будь-якому місці без кордонів.

Висновки

Моделювання політики постійно розвивається та змінюється з надзвичайною швидкістю відповідно до швидкої зміни соціальних, економічних і політичних реалій світу. Моделювання постійно збагачується та покращується завдяки використанню нових дослідницьких підходів і дослідженню нових дослідницьких областей, одного з ШІ. Отже, штучний інтелект у моделюванні політики є потужним аналітичним інструментом, який адаптує будь-яку техніку, методологію, метод і дослідницький підхід із широкого кола дисциплін. Штучний інтелект, нейронні мережі, великі дані, навчальна машина, науки про дані, еконографологія – необхідні для того, щоб чітко пояснити складні соціально-економічні проблеми, які впливають на різні соціальні групи в різних географічних регіонах протягом різних історичних епізодів. ШІ обов'язково зробить центральний внесок у цю життєво важливу справу моделювання економіки та Стратегії розвитку України.

Література

1. Acemoglu, Daron, and Pascual Restrepo. (2018). "Artificial Intelligence, Automation and Work." In *The Economic of Artificial Intelligence: An Agenda*, ed. Ajay Agrawal, Joshua Gans, and Avi Goldfarb. Chicago: University of Chicago Press.
2. Bickley, S.J., Chan, H.F. and Torgler, B. (2022). Artificial intelligence in the field of Economic. *Scientometrics* 127, 2055–2084.
3. Cockburn, I. M., Henderson, R., and Stern, S. (2019). The Impact of Artificial Intelligence on Innovation, in: Agrawal, A., Gans, J. Goldfarb and (Eds.), *The Economic of Artificial Intelligence: An Agenda*. University of Chicago Press, pp. 115–146.

4. Ghoddusi, H., Creamer, G. G., and Rafizadeh, N. (2019). Machine learning in energy Economic and finance: A review. *Energy Economic*, 81, 709–727.

5. Ruiz Estrada, M.A. (2017). “An Alternative Graphical Modeling for Economic: Econographicology.” *Quality and Quantity*, 51(5):2115-2139.

References

1. Acemoglu, Daron, and Pascual Restrepo. (2018). “Artificial Intelligence, Automation and Work.” In *The Economic of Artificial Intelligence: An Agenda*, ed. Ajay Agrawal, Joshua Gans, and Avi Goldfarb. Chicago: University of Chicago Press.

2. Bickley, S.J., Chan, H.F. and Torgler, B. (2022). Artificial intelligence in the field of Economic. *Scientometrics* 127, 2055–2084.

3. Cockburn, I. M., Henderson, R., and Stern, S. (2019). The Impact of Artificial Intelligence on Innovation, in: Agrawal, A., Gans, J. Goldfarb and (Eds.), *The Economic of Artificial Intelligence: An Agenda*. University of Chicago Press, pp. 115–146.

4. Ghoddusi, H., Creamer, G. G., and Rafizadeh, N. (2019). Machine learning in energy Economic and finance: A review. *Energy Economic*, 81, 709–727.

5. Ruiz Estrada, M.A. (2017). “An Alternative Graphical Modeling for Economic: Econographicology.” *Quality and Quantity*, 51(5):2115-2139.

The article has been sent to the editors 28.07.23.

After processing 10.08.23.

Submitted for printing 15.08.23.

Copyright under license CCBY-SA4.0.

РЕЗОНАНСНА ДІАГНОСТИКА ВИРОБНИЧОГО ПРОСТОРУ ГЕНЕРАТИВНИХ СИСТЕМ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

С. В. Ковалевський¹, О. С. Ковалевська², Д. М. Сидюк³

^{1,2,3}Донбаська державна машинобудівна академія, Україна
вул. Академічна, 72, м. Краматорськ, Донецької обл., 84313

¹kovalevskii61@gmail.com

²olenakovalevskaya@gmail.com

³sidyukdarija@gmail.com

¹<https://orcid.org/0000-0002-4708-4091>

²<https://orcid.org/0000-0001-5884-0430>

³<https://orcid.org/0000-0003-0516-6694>

Анотація: Розвиток генеративних систем штучного інтелекту (ГСШІ) в сучасному світі вимагає вирішення проблем, пов'язаних із якістю, стійкістю та ефективністю генерованого вмісту. В цьому контексті резонансна діагностика набуває важливого значення. Метою даної роботи є дослідження можливостей застосування резонансної діагностики для виявлення, аналізу та усунення проблем в генеративних системах штучного інтелекту. Для досягнення поставленої мети були визначені наступні задачі: аналіз теоретичних основ резонансної діагностики; дослідження можливостей використання резонансного сигналу для налаштування параметрів навчання ГСШІ; вивчення впливу резонансної діагностики на стійкість та адаптацію ГСШІ до змінних умов роботи. У роботі проведено аналіз резонансної діагностики в контексті ГСШІ та виявлено її потужний вплив на вирішення проблем, пов'язаних з якістю та продуктивністю систем. Дослідження показали, що резонансна діагностика може бути використана для досягнення реалістичності, різноманітності та якості генерованого вмісту. Також встановлено, що вона може сприяти покращенню стійкості та адаптації систем до змінних умов роботи.

Ключові слова: резонансна діагностика, генеративні системи штучного інтелекту, якість, стійкість, реалістичність, різноманітність.

RESONANCE DIAGNOSTICS OF PRODUCTION SPACE OF GENERATIVE SYSTEMS OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE

S. Kovalevskyy¹, O. Kovalevska², D. Sidyuk³

^{1,2,3}Donbas state engineering academy, Ukraine

St. Akademichna, 72, Kramatorsk, Donetsk region, 84313

¹kovalevskii61@gmail.com

²olenakovalevskaya@gmail.com

³sidyukdarija@gmail.com

¹<https://orcid.org/0000-0002-4708-4091>

²<https://orcid.org/0000-0001-5884-0430>

³<https://orcid.org/0000-0003-0516-6694>

Abstract: The development of artificial intelligence generative systems (AIGS) in the modern world requires addressing issues related to the quality, stability, and efficiency of the generated content. In this context, resonance diagnostics become of paramount importance. The purpose of this study is to explore the possibilities of applying resonance diagnostics for detecting, analyzing, and resolving problems in artificial intelligence generative systems. To achieve the set goal, the following tasks were identified: analysis of the theoretical foundations of resonance diagnostics; investigation of the potential of using resonance signals to adjust AIGS learning parameters; studying the impact of resonance diagnostics on the stability and adaptation of AIGS to changing operating conditions. The study conducted an analysis of resonance diagnostics in the context of AIGS and revealed its powerful influence on addressing issues related to system quality and productivity. The research demonstrated that resonance diagnostics can be used to achieve realism, diversity, and quality of generated content. Additionally, it was determined that it can contribute to enhancing the stability and adaptation of systems to varying operational conditions.

Keywords: resonance diagnostics, artificial intelligence generative systems, quality, stability, realism, diversity.

Вступ

Зростаюча залежність сучасного суспільства від штучного інтелекту (ШІ) суттєво змінила парадигму розвитку технологій та промисловості. Системи ШІ, такі як генеративні системи, вже стали необхідною складовою для вирішення складних завдань у багатьох галузях, включаючи інженерію, медицину, фінанси та мистецтво. Їхній вплив на ефективність та продуктивність діяльності підприємств і організацій надзвичайно великий.

Однак разом зі стрімким розвитком ШІ виникають нові виклики та проблеми, пов'язані з його ефективним застосуванням у виробничих просторах. Однією з ключових проблем є надійна діагностика та контроль генеративних систем ШІ. Завдяки своїй здатності генерувати та аналізувати складні дані, системи ШІ можуть виявляти непередбачувані аномалії та несправності у виробничих процесах, що забезпечує підвищення якості продукції та зниження витрат [1].

Використання принципів резонансу та взаємодії із зовнішнім простором може надати унікальну можливість аналізувати та визначати стан генеративних систем у реальному часі. Із розширенням застосування резонансної діагностики до генеративних систем відкриваються нові перспективи щодо підвищення ефективності та надійності штучної інтелектуальної техніки у виробничих умовах.

При цьому зростання складності генеративних систем та розширення їх застосування призводить до зростання кількості факторів, які можуть вплинути на їхню працездатність. Виникає необхідність додатково вдосконалити методи діагностики та контролю, щоб забезпечити стабільну та безперебійну роботу генеративних систем у виробничих умовах [2, 3].

Актуальність і мета роботи

Резонансна діагностика – це сучасний підхід у сфері діагностики проблем з генеративними системами штучного інтелекту (ШІ). Цей метод базується на використанні резонансного сигналу для

виявлення проблем та усунення їх у ШІ. Резонансний сигнал відображає ступінь відповідності між генерованим вмістом та очікуваним результатом. Ідентифікація та вирішення проблем у генеративних системах стають важливим завданням з погляду розширення їхнього застосування та підвищення якості генерованого вмісту.

Мета цієї статті полягає в розгляді теоретичних основ резонансної діагностики та аналізі результатів проведених досліджень щодо її ефективності. Стаття також спрямована на вивчення перспектив використання резонансної діагностики для покращення надійності та продуктивності генеративних систем ШІ. Розуміння можливостей резонансної діагностики може сприяти створенню більш якісних та ефективних генеративних систем, що відповідають сучасним вимогам та завданням.

Основна частина

Процес резонансної діагностики дозволяє досягти кількох важливих цілей у вдосконаленні генеративних систем ШІ:

1. Підвищення реалістичності генерованого вмісту. Застосування резонансного сигналу дозволяє виміряти ступінь схожості між генерованим вмістом та очікуваним результатом. Це сприяє налаштуванню параметрів навчання для досягнення більш реалістичних результатів.

2. Збільшення різноманітності генерованого вмісту. Резонансний сигнал допомагає оцінити різноманітність генерованого вмісту, що важливо для створення творчого та цікавого вмісту.

3. Зниження кількості невідповідного вмісту. Використання резонансного сигналу дозволяє виявити невідповідний вміст та налаштувати параметри навчання для покращення якості генерованого вмісту.

4. Прискорення швидкості навчання. Резонансний сигнал може бути використаний для аналізу динаміки навчання генеративної системи ШІ. Це дозволяє ефективніше налаштовувати параметри навчання.

5. Зниження витрат на навчання. Використання резонансного сигналу для вимірювання ефективності навчання допомагає економити ресурси при досягненні бажаних результатів.

6. Збільшення стійкості до шуму. Резонансна діагностика допомагає зробити генеративні системи ШІ більш стійкими до шуму.

Використання резонансного підходу у генеративних системах штучного інтелекту дає можливість знаходити оптимальні рішення для налаштування параметрів та поліпшення функціональності системи. Резонансні сигнали стають ключовими індикаторами для вимірювання відповідності між генерованим вмістом та очікуваним результатом. Це, у свою чергу, розкриває можливості для вдосконалення роботи генеративних систем, забезпечуючи їхню адаптацію до змінних умов та навіть вдосконалення їх якості в умовах шуму чи невідповідності [4].

Теоретичний обґрунтований підхід використання резонансної діагностики базується на властивостях резонансу, які виявляються у фізичних системах. Це явище відображає співвідношення між впливом зовнішнього стимулу та відгуком системи, коли частота стимулу співпадає з власною частотою коливань системи. На цій точці система реагує найбільш ефективно, сприймаючи мінімальну енергію для стимуляції. Цей концепт вже успішно використовується у різних галузях (таких як інженерія та фізика) і стає цінним інструментом для діагностики та контролю генеративних систем.

У відношенні генеративних систем резонансна діагностика пропонує новий погляд на управління їх функціональністю. Вона надає можливість виявити проблеми, такі як нестабільність, чутливість до параметрів та невідповідний вміст, і розробити оптимальні стратегії налаштування. Це допомагає створити генеративні системи, які мають вищу якість, стійкість та ефективність, що в свою чергу може позитивно позначитися на різних аспектах виробництва та застосування [5, 6, 7].

Математичне моделювання

Формалізований опис (математична модель) налаштування параметрів навчання генеративних систем ШІ для отримання бажаного результату має наступний вигляд [8].

Нехай G - генеративна система, яку потрібно налаштувати, а D - дискримінаційна система, яка навчається відрізнити генерований вміст від реального вмісту. Резонансний сигнал $R(\theta)$ можна визначити як:

$$R(\theta) = E_x \sim D[D(x)] - E_z \sim N(0,1) [D(G(z))] \quad (1)$$

де θ - параметри генеративної системи G .

Резонансний сигнал є мірою когерентності між генерованим вмістом і реальним вмістом. Налаштовуючи параметри θ так, щоб збільшити резонансний сигнал, можна отримати генеративну систему G , яка генерує вміст більш високої якості.

Налаштування параметрів θ можна зробити за допомогою алгоритму градієнтного спуску, який починається з початкового значення параметрів θ_0 з наступним обчислюванням градієнта резонансного сигналу по відношенню до параметрів θ :

$$\nabla \theta R(\theta) = E_x \sim D[\nabla \theta D(x)] - E_z \sim N(0,1) [\nabla \theta D(G(z))] \quad (2)$$

Алгоритм градієнтного спуску оновлює параметри θ за допомогою наступної формули:

$$\theta_{t+1} = \theta_t - \eta \nabla \theta R(\theta_t) \quad (3)$$

де η - коефіцієнт навчання.

Алгоритм градієнтного спуску повторює цей процес доки резонансний сигнал не досягне заданого значення.

У контексті обговореного матеріалу резонансний сигнал – це міра когерентності між генерованим вмістом і реальним вмістом. Тоді резонансний сигнал можна визначити як різницю між очікуваною цінністю дискримінаційної мережі для реального вмісту та очікуваною цінністю дискримінаційної мережі для генерованого

вмісту. Налаштовуючи параметри генеративної мережі так, щоб збільшити резонансний сигнал, можна отримати генеративну систему, яка генерує вміст більш високої якості.

Наприклад, якщо є намагання створити генеративну систему, яка генерує реалістичні зображення людей, ми можемо використовувати резонансний сигнал для налаштування параметрів генеративної мережі так, щоб зображення, які вона генерує, були схожими на реальні зображення людей.

Резонансні сигнали можуть бути використані як сигнатури об'єктів ідентифікації. Сигнатура об'єкта ідентифікації – це унікальна характеристика об'єкта, яка може бути використана для його ідентифікації. Резонансні сигнали можуть бути використані для ідентифікації об'єктів у реальному часі. Це може бути використано для різних цілей, таких як контроль якості, моніторинг стану та охорона.

Проблема динамічної ідентифікації об'єктів полягає у розробці математичного апарата моделювання, який володів би можливостями, які забезпечують необхідні характеристики точності та адекватності динамічної моделі. Використання сигнатурного підходу до ідентифікації об'єктів дозволяє виключити суб'єктивні чинники в оцінці параметрів об'єктів, зменшити ресурсоємність операцій контролю. Математична модель резонансної діагностики виробничого простору генеративних систем штучного інтелекту (ГСШ) заснована на використанні резонансного сигналу, який є мірою когерентності між генерованим вмістом і реальним вмістом. Резонансний сигнал можна визначити як різницю між очікуваною цінністю дискримінаційної мережі для реального вмісту та очікуваною цінністю дискримінаційної мережі для генерованого вмісту. Налаштовуючи параметри генеративної мережі так, щоб збільшити резонансний сигнал, можна отримати генеративну систему, яка генерує вміст більш високої якості [10].

Математична модель резонансної діагностики може бути представлена наступним чином:

$$R(\theta) = E x \sim D [D(x)] - E z \sim N(0,1) [D(G(z))] \quad (4)$$

де θ - параметри генеративної мережі G , а D - дискримінаційна мережа, яка навчається відрізняти генерований вміст від реального вмісту.

Резонансний сигнал є мірою когерентності між генерованим вмістом і реальним вмістом. Налаштовуючи параметри θ так, щоб збільшити резонансний сигнал, можна отримати генеративну систему G , яка генерує вміст більш високої якості.

Математична модель резонансної діагностики може бути використана для виявлення та усунення проблем з ГСШ, що впливають на якість генерованого вмісту. Резонансний сигнал можна використовувати для виявлення широкого кола проблем з ГСШ, включаючи:

Нестабільність: ГСШ може бути нестійкою, що означає, що вона може застрягти в локальному мінімумі і не може навчитися генерувати вміст високої якості. Резонансна діагностика може бути використана для виявлення нестабільності ГСШ і налаштування параметрів навчання для підвищення стабільності.

Чутливість до параметрів навчання: ГСШ може бути чутливою до параметрів навчання, що означає, що невеликі зміни параметрів навчання можуть призвести до значних змін якості генерованого вмісту. Резонансна діагностика може бути використана для виявлення параметрів навчання, чутливих до ГСШ, і налаштування параметрів навчання для підвищення стабільності.

Генерація невідповідного вмісту: ГСШ може генерувати невідповідний вміст, наприклад, зображення, які є образливими або шкідливими. Резонансна діагностика може бути використана для виявлення невідповідного вмісту, генерованого ГСШ і налаштування параметрів навчання для запобігання генерації невідповідного вмісту.

Задача ідентифікації в умовах резонансної діагностики виробничого простору ГСШ може бути сформульована наступним чином:

- нехай G - генеративна мережа, яка генерує вміст у реальному часі;
- нехай D - дискримінаційна мережа, яка навчається відрізнити генерований вміст від реального вмісту;
- нехай $R(\theta)$ - резонансний сигнал між G і D .

Задача полягає в налаштуванні параметрів θ так, щоб збільшити резонансний сигнал $R(\theta)$.

Ця задача може бути вирішена за допомогою наступних кроків:

- навчання дискримінаційній мережі D на наборі даних з реального вмісту;
- визначення резонансного сигналу $R(\theta)$;
- налаштування параметрів θ генеративної мережі G так, щоб збільшити резонансний сигнал $R(\theta)$.

Далі слід повторювати попередні кроки до досягнення бажаного результату.

Акустична резонансна діагностика для виробничих систем

Модель акустично-резонансної діагностики виробничого простору базується на понятті резонансного сигналу та його взаємодії із зовнішнім середовищем. Нехай R представляє резонансний сигнал, а C є мірою когерентності між генерованим вмістом і бажаним вмістом.

Модель може бути представлена наступними математичними складами:

Вираз звичайного резонансного сигналу:

$$R(t) = A * \sin(\omega t + \varphi) \quad (5)$$

де A - амплітуда сигналу, ω - частота резонансного коливання, t - час, φ - фазовий зсув.

Вираз для міри когерентності:

$$C = |Corr(G, D)| \quad (6)$$

де $Corr$ - кореляційна функція, G - генерований вміст генеративної системи, D - бажаний вміст.

Застосування моделі виробничого простору відбувається у вимірюванні резонансного сигналу R та обчисленій мірі когерентності C . Взаємодія між резонансним сигналом та генерованим вмістом показує наявність аномалій або несправностей у системі [11].

Застосування цієї моделі дозволяє забезпечити діагностику генеративних систем штучного інтелекту в реальному часі та виявити можливі проблеми, такі як нестійкість, невідповідність параметрам навчання та інші. Модель також може бути використана для оптимізації параметрів навчання генеративних систем із зазначенням досягнення бажаного результату.

Математична модель для відгуку акустичного спектра зразка на збудження зразка "білим шумом" може бути описана наступним чином:

Амплітуда спектрального відгуку $A(f)$:

$$A(f) = H(f) * S(f) \quad (7)$$

де f - частота, $H(f)$ - передавальна функція системи, $S(f)$ - спектральна щільність білого шуму.

Передавальна функція системи $H(f)$:

$$H(f) = |H(f)| * \exp(j\phi(f)) \quad (8)$$

де $|H(f)|$ - амплітудна характеристика передавальної функції, $\phi(f)$ - фазовий зсув.

Спектральна щільність білого шуму

$$S(f) = const$$

Ця модель може бути використана для дослідження та аналізу реакції зразка на вплив "білого шуму", що визнає властивості та систему впливу зразка на його спектральний відгук. Відгук об'єкта на збудження "білим шумом" позначається як $H(f)$, де $A(f)$ f - це частота. Відгук $R(f)$ фактично є амплітудою вібрацій або іншої відповідної фізичної величини об'єкта при частоті f .

У частотному діапазоні відгук $R(f)$ можна розглядати як згортку частотної функції відгуку об'єкта $H(f)$ та спектральної густини потужності збудження "білим шумом" $S_{white}(f)$. Математично це можна виразити так:

$$R(f) = H(f) \cdot S_{white}(f) \quad (9)$$

Тут $H(f)$ описує, як об'єкт реагує на збудження при кожній частоті, і $S_{white}(f)$ характеризує розподіл енергії по частотах в збудженні "білим шумом".

Головна ідея полягає в тому, що частотна функція відгуку $H(f)$ містить інформацію про резонансні частоти та режими об'єкта. Ці резонанси відповідають природним частотам, при яких об'єкт має тенденцію вібрувати з більшими амплітудами. Збуджуючи об'єкт "білим шумом", який містить енергію по широкому спектру частот, ми ефективно вивчаємо відповідь об'єкта по всьому його частотному спектру.

Для визначення резонансних частот та режимів об'єкта можуть застосовуватися різні техніки обробки сигналів, такі як аналіз Фур'є, оцінка спектральної густини чи хвильовий аналіз. Ці методи дозволяють виявляти піки у частотному домені, які відповідають резонансним частотам об'єкта.

Підсумовуємо: математичний процес полягає в згортці частотної функції відгуку об'єкта зі спектральною густиною потужності збудження "білим шумом" для отримання спектру відгуку. Аналіз цього спектра дозволяє визначити резонансні частоти об'єкта та отримати уявлення про механічні властивості та поведінку об'єкта.

Отже, розділ збудження об'єкта "білим шумом" є важливою складовою резонансної діагностики, оскільки дозволяє отримати спектральну характеристику об'єкта, яка містить інформацію про його резонансні властивості. Збуджуючи об'єкт "білим шумом", йому надається випадковий спектр енергії з різними частотами. Оскільки об'єкт реагує на цей збуджувальний сигнал різними резонансними частотами, спектр відгуку відображає ці резонанси.

Застосування збудження "білим шумом" дозволяє отримати повний частотний спектр відгуку об'єкта, включаючи як основні резонансні частоти, так і додаткові моди вібрацій. Це дозволяє точніше визначити спектральні характеристики об'єкта, такі як його природні частоти, амплітуди резонансних піків та їхній розподіл по частотному діапазону.

Збудження "білим шумом" також дозволяє виявляти невидимі або менш очевидні резонансні режими об'єкта. Оскільки "білий шум" містить енергію по всьому спектру частот, це може допомогти виявити менш видимі резонанси або навіть структурні дефекти, які можуть бути приховані в інших режимах збудження.

Отже, збудження об'єкта "білим шумом" є потужним методом для вивчення його резонансних властивостей та визначення спектральної характеристики відгуку. Цей метод дозволяє отримати достатньо повну інформацію про резонанси об'єкта та допомагає зрозуміти його механічні характеристики та динамічну поведінку.

Приклади практичного використання акустичної резонансної діагностики складових виробничих систем.

Приклад 1.

Діагностика розташування робочих ланок механізмів з кінематикою паралельної структури

На підставі збуджених власних коливань об'єкта за допомогою застосування частотних спектрів поглинання акустичних сигналів нормованого «білого шуму» просторовими механізмами встановлена можливість ідентифікувати їх конфігурації в статиці і динаміці, а також, діагностувати координати траєкторій і позицій виконавчих органів і динамічних характеристик рухомих елементів верстатного обладнання з механізмами паралельної структури (рис. 1).

Реалізація запропонованого і розробленого методу ідентифікації виконана на натурній моделі шляхом

впливу на конструкцію малопотужним акустичним сигналом з рівно імовірнісним розподілом сигналів однакової амплітуди в діапазоні 20-20000 Гц. Частотний спектр

відгуку, що представляє собою суму збуджених, поглинених і відображених акустичних хвиль піддається обробці на глибоких нейроподібних мережах (рис. 2).

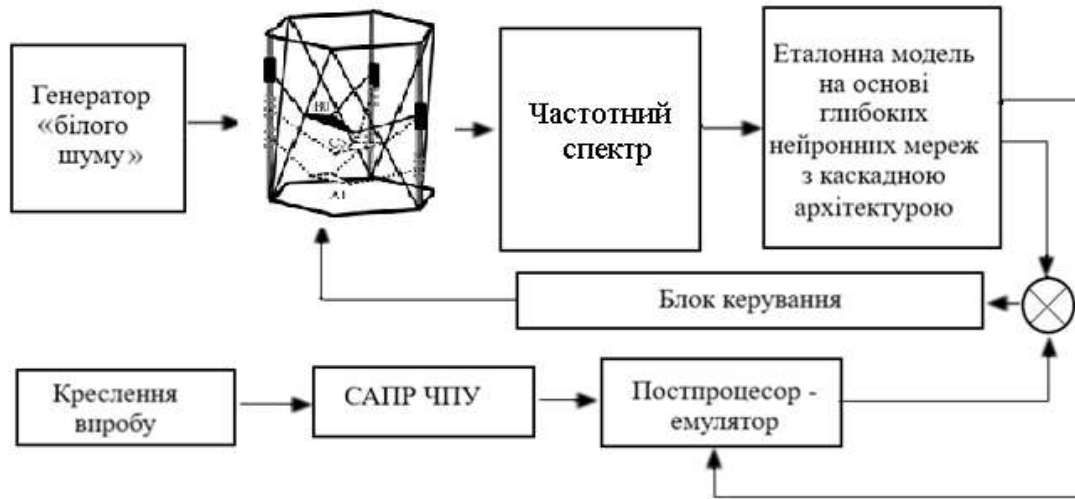


Рис. 1. Структура системи управління з використанням еталонної моделі на глибоких нейроподібних мережах і каскадною реалізацією

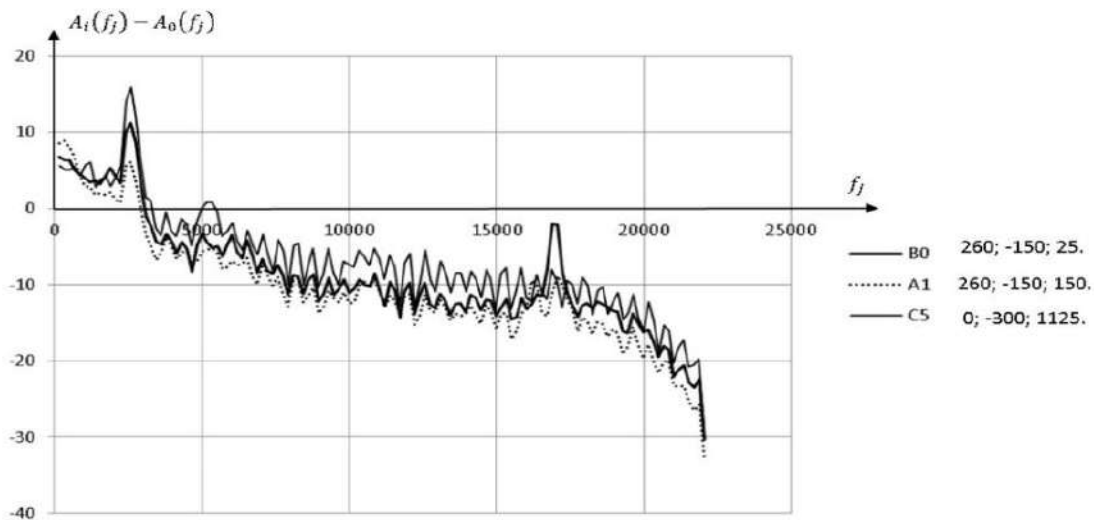


Рис. 2. Приклади спектрів акустичних сигналів для координат позиціонування виконавчого механізму технологічної машини з кінематикою паралельної структури

Результатом такої обробки є ідентифікаційна модель, що інтегрує особливості багатоповітряних перцептронів і карт Кохонена. Таке об'єднання можливе за допомогою нейроподібних мереж каскадної конфігурації і модифікованим нейроподібним елементам. Використання такої еталонної моделі дозволило отримати похибку позиціонування робочої ланки механізмів на рівні 1÷2 мкм.

Приклад 2.

Комплектування багатолезових фрез твердосплавними пластинами

Комплектування багатолезових фрез твердосплавними пластинами є важливою складовою процесу підготовки інструмента до роботи. З правильним відбором пластин можна підвищити ефективність та якість обробки матеріалу, а також зменшити

витрати на заміну твердосплавних пластин та ремонт інструменту.

Однією з головних невирішених проблем при експлуатації фрез зі змінними твердосплавними пластинами залишається їх нерівномірне зношення, яке призводить до ряду негативних наслідків. Часто в роботі одна з пластин може вийти з ладу або скоріше зноситься відносно інших пластин. Тим самим і у інших пластин починається зношення, відколи і можуть бути перенагрівання й інші проблеми.

Внаслідок аналізу причин нерівномірного зносу комплектів пластин

багатолезових фрез з'ясовано, що на це впливає майже невелика різниця у фізичних властивостях пластин з однієї партії. Тому ціллю цієї роботи є розробка засобів і методів їх використання для ідентифікації та групування пластин однієї партії.

Для досягнення цього запропоновано ідентифікацію пластин за ознакою порівняння індивідуальних спектрів їх власних коливань.

Принципову схему пристрою для визначення спектра власних коливань кожної ріжучої пластини наведено на рис.3.

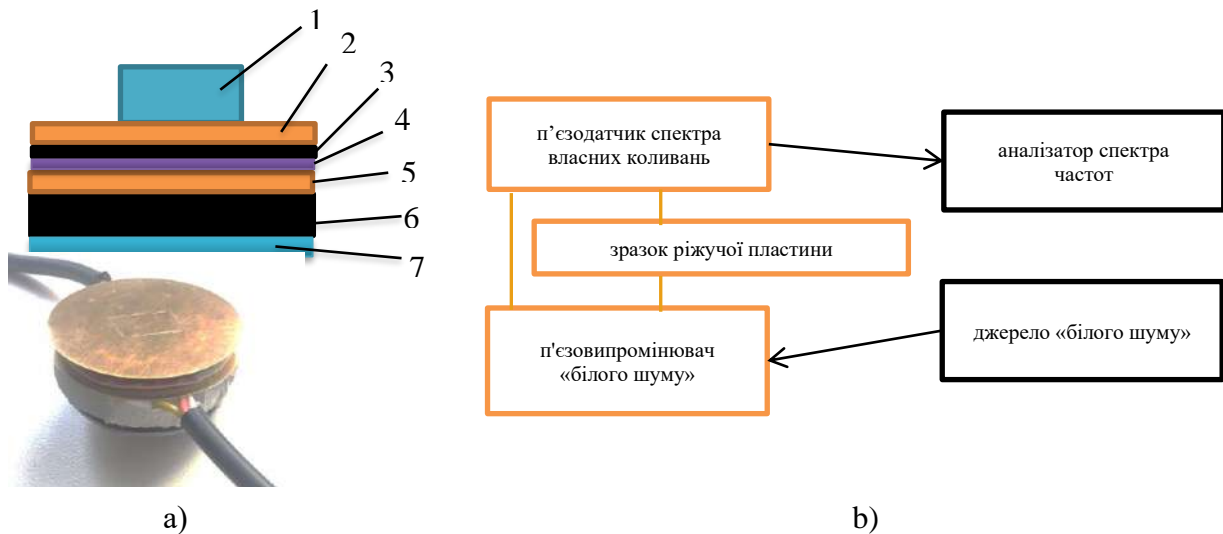


Рис. 3. а) принципова схема і зовнішній вигляд пристрою (1-зразок ріжучої пластини, 2-п'єзодатчик спектра власних коливань, 3-демпфер, 4-ізоляційна пластинка, 5-п'єзовипромінювач «білого шуму», 6-демпфер, 7-сталева пластинка); б) структура діагностичного стенду

У цьому напрямку здійснено припущення, що збудження пластин широкосмуговим спектром в акустичному діапазоні і постійним по амплітуді впливом дозволяє отримати саме індивідуальні резонансні коливання пластин. Порівняння спектрів власних коливань ріжучих пластин надає підстави для віднесення

кожної з них до тієї чи іншої групи за ознакою подібності.

Аналіз спектрів коливань ріжучих пластин виконувався на підставі використання пристрою (рис.1а) і за схемою діагностичного стенда (рис.1б). Фрагмент оцифрованого спектра частки ріжучих пластин представлений на рис. 4.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Hz	p1	p2	p3	p4	p5	p6	p7
2	0,00	-17,23	-18,86	-19,38	-20,87	-21,61	-21,20	-21,18
3	172,30	-16,11	-17,32	-17,67	-18,96	-19,51	-19,15	-19,07
4	344,50	-33,96	-34,37	-34,68	-35,20	-35,45	-35,48	-35,00

Рис. 4. Фрагмент оцифрованого спектра власних коливань частки ріжучих пластин

Розрахунок комплексного показника наведеної резонансної частоти кожного

зразка – ріжучої пластини виконувався за формулою (10):

$$f_j = \frac{\sum_{i=1}^{i=m} f_{ij} A_{ij}}{\sum_{i=1}^{i=m} A_{ij}} \quad (10)$$

У результаті обробки акустичних спектрів власних коливань ріжучих пластин отримано їх розподіл за

показником f_j і подальше групування за ознаками найближчих властивостей (табл. 1).

Таблиця 1. Групування пластин за показником f_j

Кількість пластин в групі	Номера пластин
11	3, 5, 12, 13, 15, 16, 19, 20, 21, 22, 23
10	2, 4, 7, 8, 9, 10, 14, 17, 18, 30
7	1, 24, 25, 26, 27, 28, 29
2	6, 11

Завдяки такому поділу можна підбирати пластини для фрез з різною кількістю пластин. У першу групу увійшло 11 пластин. Цю групу можна використати для підходящої фрези. У другу групу увійшло 10 пластин, в третю групу увійшло 7 пластин. Такий поділ дозволяє обирати групи пластин для відповідних фрез, в яких вони будуть максимально ефективно використовуватися. В четверту групу увійшли 2 пластини з показниками, які сильно відрізняються від інших груп. Такі пластини не можна використовувати в комбінації з іншими групами, оскільки такі пластини можуть призвести до швидкого зносу, браку, сколів. Але вони мають більшу подібність одна до одної, тому їх можна використовувати окремо.

Відбір комплектів пластин по їх інтегральним характеристикам для установки на фрезу дозволить збільшити стійкість фрези, а також стабільність різання, забезпечуючи рівномірний знос всіх пластин комплекту. Також великий розкид показників f_j в одній фірмовій партії ріжучих пластин свідчить про доцільність проводити приймальне розподілення пластин ідентичних партій. Такий підхід значно збільшує комплектацію багатолезових фрез на машинобудівному підприємстві. Попередні випробування такої методики збирання фрез показали підвищення їх стійкості в середньому на 35-50 %.

Приклад 3.

Магнітно-резонансна обробка матеріалів

Особливий науковий інтерес представляє дослідження впливу на атомний і субатомний рівень матеріалів зразків, частинки яких піддаються вібраціям у сильному рівномірному магнітному полі на власних резонансних частотах з амплітудами нанометричного діапазону [12, 13, 14].

Дослідження використання рівномірного потоку магнітного поля, утвореного потужними постійними магнітами, виконано для впливу на об'єм матеріалу непереточувальних пластин ріжучого інструмента CNMG 120508E-M. Надана схема впливу рівномірного магнітного потоку, ініційованого в результаті резонансних коливань зразка, викликаних широкосмуговим впливом рівної амплітуди за допомогою генератора «білого шуму» і п'єзовипромінювача (рис. 5а і 5в).

Додавання зразкам механічних коливань в рівномірному постійному магнітному полі дозволив досягти об'ємного зміцнення зразків від 150 НВ до 240÷250 НВ, тобто на 60÷65% за 10-12 хвилин, що складає зміцнення зразків на 5-6% за одну хвилину. Зразки твердого сплаву, поміщені в магнітне поле постійного магніту, піддані резонансним коливанням, викликаним широкосмуговим впливом постійної амплітуди - «білим шумом», змінюють твердість і досягають

максимального значення вже після 10 хвилин магніторезонансної обробки.

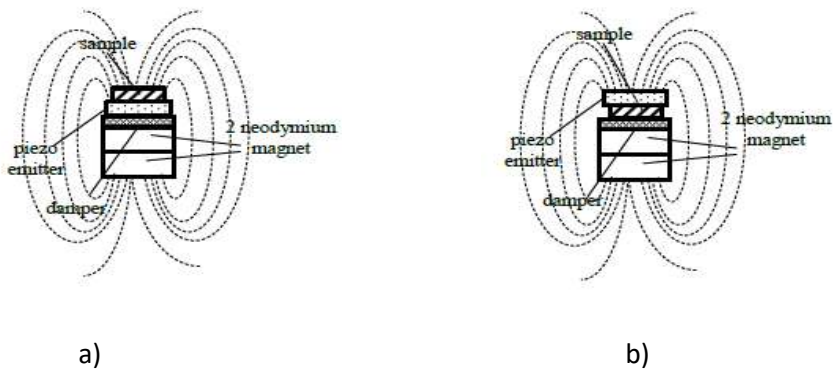


Рис. 5. Принципові схеми пристроїв для зміцнення зразків з верхнім (а) і нижнім (б) положенням зразка щодо п'єзозбудника

Варіанти взаємного розташування елементів складання для експериментальних досліджень магніторезонансної обробки евтектоїдної сталі з відповідним хімічним складом ($Z = 0,8\%$; $Si=0,15\%$; $Mn=0,15\%$; $P=0,012\%$; $S=0,017\%$; $Cr=0,10\%$; $Al=0,009\%$; $Cu=0,10\%$) можуть бути представлені ланцюжками: NM-PD-S-PV-NM (варіанти 1-3) і PD-S-PV-NM (варіант 4), де NM - неодимовий магніт; S - зразок; PV - п'єзоелемент як збудник вібрацій; PD - п'єзоелектричний датчик.

Зразки піддані резонансним коливанням і поміщені всередину

рівномірного магнітного поля, створеного неодимовими магнітами, підвищили твердість матеріалу і після 30 хвилин стабілізують значення твердості.

Порівняльна ефективність магніторезонансної обробки зразків за представленими схемами широкосмуговим п'єзоелектричним збудником потужністю до 5 Вт в магнітному полі постійного неодимового магніту підтвердила підвищення твердості зразків на 35-40%.

Металографічні дослідження результатів розглянутого принципу зміцнення матеріалу можна проілюструвати на рис.6.

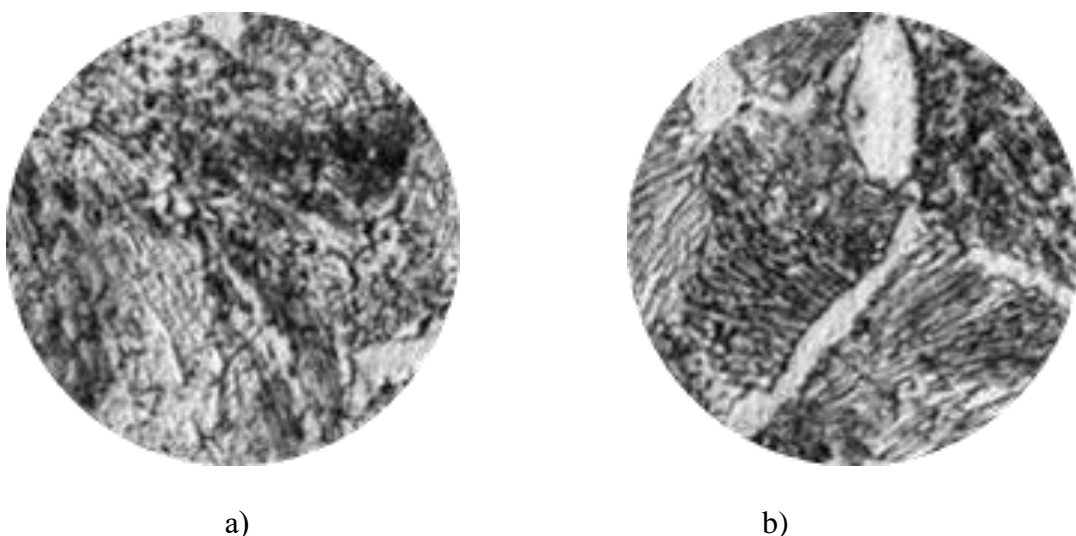


Рис. 6. Структура сталевих зразків: (а) - до магніторезонансної обробки, HB = 145; (б) - після магніторезонансної обробки, HB = 197

Фотографії структури отримані протравлюванням 4% спиртовим розчином HNO. Межі зерен проявляються після протравлювання по розірваній ферритній сітці в поздовжньому напрямку. При цьому спостерігалось формування в обсязі матеріалу зразків сітки армуючого характеру з пластинчастого перлиту. Збільшення амплітуди коливань п'єзоелектричного резонатора і, отже, зразків призводить до зростання твердості матеріалу і тривалості досягнення встановленого значення його твердості, проте характер таких змін носить екстремальний характер. Отримані результати дозволяють зробити висновок про перспективність магніторезонансної обробки для підвищення зносостійкості неперетачуваних пластин ріжучого інструменту, для підвищення довговічності елементів механічних деталей і конструкцій. Також з'являється можливість розширити перелік технологічних впливів на робочі поверхні деталей машин поряд з поверхнево-пластичним деформуванням і термообробкою.

Висновки

У підсумку дослідження резонансної діагностики генеративних систем штучного інтелекту (ГСШ) можна виділити кілька ключових висновків, які підкреслюють її важливість та потенціал у вирішенні актуальних проблем:

По-перше, дослідження підтверджують, що резонансна діагностика дійсно є могутнім інструментом для виявлення та аналізу проблем, які можуть виникати у генеративних системах штучного інтелекту. З використанням резонансного сигналу, який відображає ступінь когерентності між генерованим та бажаним вмістом, можна вчасно виявляти нестабільність, невідповідність та інші проблеми, що важливі для забезпечення якості генерованого вмісту.

По-друге, резонансна діагностика може бути успішно використана для налаштування параметрів навчання ГСШ. Аналіз резонансного сигналу допомагає досягти покращення реалістичності, різноманітності та якості генерованого

вмісту. Це має суттєве значення для досягнення бажаних результатів роботи системи та оптимального використання ресурсів навчання.

По-третє, важливим аспектом резонансної діагностики є її внесок у вирішення проблем стійкості та адаптації ГСШ до змінних умов роботи. Здатність виявляти резонанс в системі може вказувати на її стан та ефективність в умовах зовнішнього впливу або шуму, допомагаючи забезпечити більш стійке та надійне функціонування.

Звертаючи увагу на додаткові приклади використання резонансної діагностики, які були додані до статті, можна висловити впевненість у її універсальності та широкому застосуванні. Незалежно від конкретного об'єкта дослідження, резонансна діагностика може бути ефективною для виявлення, аналізу та усунення проблем різного роду.

У цілому, результати дослідження резонансної діагностики в генеративних системах штучного інтелекту наголошують на тому, що цей підхід має значний потенціал для покращення якості та продуктивності систем. Застосування резонансної діагностики допомагає вчасно виявляти, аналізувати та реагувати на можливі проблеми, забезпечуючи стійкість, якість та ефективність функціонування ГСШ.

Література

1. Fiona Fui-Hung Na, Ruilin Zheng, Jinguan Tsai, Keng Siao and Langtao Chen (2023). Generative AI and ChatGPT: Applications, challenges, and human collaboration, *Journal of Information Technology Case and Application Research*, DOI: 10.1080/15228053.2023.2233814.
2. Sujit Kumar Dehury, Deeptimayee Khatua, Ram Naresh Prasad Choudhary, Patnala Ganga Raju Achary. (2021). Electrical and Dielectric Characterization of Bismuth Holmium Nickel Titanate (BiHoNiTiO₆). *Transactions of the Indian Ceramic Society* 80:2, pages 135-141.
3. Shurong Tong, Yafei Nie. (2023) Measuring Designers' Cognitive Load for Timely Knowledge Push via Eye Tracking. *International Journal of Human-Computer Interaction* 39:6, pages 1230-1243.
4. Zhang, Wentian & Liu, Haozhe & Bing, Li & Xie, Jinheng & Huang, Yawen & Li, Yuexiang & Zheng, Yefeng & Ghanem, Bernard. (2023).

Dynamically Masked Discriminator for Generative Adversarial Networks.

5. Zillner, S., Bisset, D., Milano, M., Curry, E., García Robles, A., Hahn, T., Irgens, M., Lafrenz, R., Liepert, B., O'Sullivan, B. and Smeulders, A., (eds) (2020) "Strategic Research, Innovation and Deployment Agenda - AI, Data and Robotics Partnership. Third Release." September 2020, Brussels. BDVA, euRobotics, ELLIS, EurAI and CLAIRE.

6. Generative AI Models Explained (2022). 13 Oct, 2022. Retrieved from

<https://www.altexsoft.com/blog/generative-ai/>

7. Nguyen, T. H. (Contributor). (2021, December 08). 5 Impactful Technologies From the Gartner Emerging Technologies and Trends Impact Radar for 2022. Gartner.

URL: <https://www.gartner.com/en/articles/5-impactful-technologies-from-the-gartner-emerging-technologies-and-trends-impact-radar-for-2022>

8. Zhu, Y., Gupta, V. & Li, L. (2019). Coherence resonance in low-density jets. *Journal of Fluid Mechanics*, 881, R1. doi:10.1017/jfm.2019.782.

9. Neiman, Alexander. (2007). Coherence resonance. *Scholarpedia*. 2. 1442.

<https://doi.org/10.4249/scholarpedia.1442>.

https://www.researchgate.net/publication/220580005_Coherence_resonance

10. Panahi, Mahta & Abrevaya, Germán & Gagnon-Audet, Jean-Christophe & Voleti, Vikram & Rish, Irina & Dumas, Guillaume. (2021). Generative Models of Brain Dynamics

https://www.researchgate.net/publication/357267955_Generative_Models_of_Brain_Dynamics_-_A_review

11. Kim J. M., Wee J., Peters K. Demonstration of Coherent Interference between Acoustic Waves Using a Fiber Ring Resonator. *Sensors*. 2022; 22(11):4163. <https://doi.org/10.3390/s22114163>.

12. Ковалевський С. В., Ковалевська О. С. Спосіб зміни фізико-механічних властивостей зразків з магнітних та немагнітних матеріалів. Патент 143057 Україна. МПК В23Н 7/38 (2006.01). Донбас. держ. машинобуд. акад. № u202000120. Опубліковано 10.07.2020; Бюл. № 13.

13. Kovalevskyy S., Kovalevska O., Dasic P. Vibration-pulse machining. In: Kovalevskyy S (Ed.) *Нейромережні технології та їх застосування НМТіЗ-2020: збірник наукових праць ХІХ Міжнародної наукової конференції «Нейромережні технології та їх застосування НМТіЗ-2020»*. Краматорськ: ДДМА; 2020. С. 82–84.

14. Ковалевський С. В., Ковалевська О. С., Боровий І. Б. Об'ємна обробка матеріалів в рівномірному магнітному полі. У: *Нові й нетрадиційні технології в ресурсо- і енергозбереженні: Матеріали міжнародної науково-технічної конференції, 23–25 вересня 2020, м.Одеса: ОНПУ; 2020. С. 80–85.*

collaboration, *Journal of Information Technology Case and Application Research*,

DOI: 10.1080/15228053.2023.2233814.

2. Sujit Kumar Dehury, Deeptimayee Khatua, Ram Naresh Prasad Choudhary, Patnala Ganga Raju Achary. (2021). Electrical and Dielectric Characterization of Bismuth Holmium Nickel Titanate (BiHoNiTiO6). *Transactions of the Indian Ceramic Society* 80:2, pages 135-141.

3. Shurong Tong, Yafei Nie. (2023) Measuring Designers' Cognitive Load for Timely Knowledge Push via Eye Tracking. *International Journal of Human-Computer Interaction* 39:6, pages 1230-1243.

4. Zhang, Wentian & Liu, Haozhe & Bing, Li & Xie, Jinheng & Huang, Yawen & Li, Yuexiang & Zheng, Yefeng & Ghanem, Bernard. (2023). Dynamically Masked Discriminator for Generative Adversarial Networks.

5. Zillner, S., Bisset, D., Milano, M., Curry, E., García Robles, A., Hahn, T., Irgens, M., Lafrenz, R., Liepert, B., O'Sullivan, B. and Smeulders, A., (eds) (2020) "Strategic Research, Innovation and Deployment Agenda - AI, Data and Robotics Partnership. Third Release." September 2020, Brussels. BDVA, euRobotics, ELLIS, EurAI and CLAIRE.

6. Generative AI Models Explained (2022). 13 Oct, 2022. Retrieved from

<https://www.altexsoft.com/blog/generative-ai/>.

7. Nguyen, T. H. (Contributor). (2021, December 08). 5 Impactful Technologies From the Gartner Emerging Technologies and Trends Impact Radar for 2022. Gartner.

URL: <https://www.gartner.com/en/articles/5-impactful-technologies-from-the-gartner-emerging-technologies-and-trends-impact-radar-for-2022>

8. Zhu, Y., Gupta, V. & Li, L. (2019). Coherence resonance in low-density jets. *Journal of Fluid Mechanics*, 881, R1. doi:10.1017/jfm.2019.782.

9. Neiman, Alexander. (2007). Coherence resonance. *Scholarpedia*. 2. 1442.

<https://doi.org/10.4249/scholarpedia.1442>.

https://www.researchgate.net/publication/220580005_Coherence_resonance.

10. Panahi, Mahta & Abrevaya, Germán & Gagnon-Audet, Jean-Christophe & Voleti, Vikram & Rish, Irina & Dumas, Guillaume. (2021). Generative Models of Brain Dynamics

https://www.researchgate.net/publication/357267955_Generative_Models_of_Brain_Dynamics_-_A_review

11. Kim J. M., Wee J., Peters K. Demonstration of Coherent Interference between Acoustic Waves Using a Fiber Ring Resonator. *Sensors*. 2022; 22(11):4163.

12. Kovalevskyy S. V., Kovalevska O. S. Sposib zminy fizyko-mekhanichnykh vlastyvostei zrazkiv z mahnitnykh ta nemahnitnykh materialiv. Patent 143057 Ukraina. МПК В23Н 7/38 (2006.01). Donbas. derzh. mashynobud. akad. № u202000120. Opublikovano 10.07.2020; Biul. № 13.

13. Kovalevskyy S., Kovalevska O., Dasic P. Vibration-pulse machining. In: Kovalevskyy S (Ed.) *Neiromerezhni tekhnolohii ta yikh zastosuvannia NMTiZ-2020: zbirnyk naukovykh prats XIX Mizhnarodnoi naukovoii konferentsii «Neiromerezhni*

References

1. Fiona Fui-Hung Na, Ruilin Zheng, Jinguan Tsai, Keng Siao and Langtao Chen (2023). Generative AI and ChatGPT: Applications, challenges, and human

tehnolohii ta yikh zastosuvannia NMTiZ-2020». Kramatorsk: DDMA; 2020. S. 82–84.

14. Kovalevskyy S. V., Kovalevska O. S., Borovyi I. B. Obienna obrobka materialiv v rivnomirnomu mahnitnomu poli. U: Novi y netradytsiini tekhonolohii v resurso- i enerhozberezhenni: Materialy mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii, 23–25 veresnia 2020, m.Odesa: ONPU; 2020. S. 80–85.

The article has been sent to the editors 17.08.23.

After processing 25.08.23.

Submitted for printing 30.08.23.

Copyright under license CCBY-SA4.0.

ОПТИМІЗАЦІЯ СТОКІВ З ВИКОРИСТАННЯМ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ ПРИ ОЧИЩЕННІ ПРОМИСЛОВИХ СТІЧНИХ ВОД

М. В. Матвійчук

Національний університет водного господарства та природокористування, Україна
вул. Соборна, 11, м. Рівне, 33028
myroslavmatviichuk@ukr.net
<https://orcid.org/0000-0003-1669-3924>

Анотація. Зростання населення планети призводить до збільшення проблеми доступу до прісної води. Основні джерела води на Землі – солонувата та морська вода. У зв'язку з водною кризою, очищення води стає надзвичайно важливим процесом і його досягнення здійснюється шляхом опріснення та різних методів водопідготовки. В цьому контексті, дослідження можливості використання нейронних мереж для покращення роботи очисних споруд є необхідним. Метою дослідження було встановлено оптимізацію та аналіз ефективності роботи очисних споруд при очищенні промислових стічних вод. Для оптимізації запропонованих моделей було використано методи м'яких обчислень. У цьому дослідженні були визначені точні результати застосування нейронної мережі за допомогою аналітичного та порівняльного підходів. Очищення всіх стічних вод і відходів, що утворюються в очисній промисловості, включає ряд процесів, включаючи повітряну флотацію, хімічну коагуляцію, відстоювання і біологічне очищення з використанням повністю змішаного активного мулу. Розглядалися різні функції навчання, включаючи штучні нейронні мережі (ШНМ) з прямим поширенням, такі як багатошаровий перцептрон (MLP), каскадні ШНМ з прямим поширенням та моделі регресії з опорними векторами (SVR). Процес навчання включає використання алгоритмів оптимізації Левенберга-Марквардта та послідовного мінімуму. У статті також наведено графічні зображення, що ілюструють різні типи забруднювачів, витрати, пов'язані з очисними спорудами, та зміни кольору стічних вод, що спостерігаються після процесу очищення. Отримані результати демонструють високий ступінь подібності між прогнозованими та експериментальними даними, що підкреслює ефективність ANN-моделі зі зворотним розповсюдженням для точних прогнозів. Крім того, інтеграція машинного навчання у виробництво миючих засобів може бути надзвичайно ефективною, сприяючи ефективному та сталому використанню водних ресурсів. Загалом, стаття надає цінні висновки щодо використання машинного навчання для розв'язання проблеми дефіциту прісної води.

Ключові слова: очисні споруди, модель, ресурси, регресія опорних векторів, моделювання.

OPTIMIZATION OF EFFLUENTS USING A NEURAL NETWORK IN THE TREATMENT OF INDUSTRIAL WASTEWATER

M. Matviichuk

National University of Water and Environmental Engineering, Ukraine
11, Soborna Str., Rivne, 33028
myroslavmatviichuk@ukr.net
<https://orcid.org/0000-0003-1669-3924>

Abstract. The growth of the planet's population leads to an increase in the problem of access to fresh water. The main sources of water on Earth are brackish and sea water. In connection with the water crisis, water purification becomes an extremely important process, and its achievement is carried out through desalination and various methods of water treatment. In this context, research into the possibility of using neural networks to improve the operation of sewage treatment plants is necessary. The purpose of the research was to optimize and analyze the efficiency of the work of treatment facilities in the treatment of industrial wastewater. Soft computing methods were used to optimize the proposed models. In this study, the exact results of the application of the neural network were determined using analytical and comparative approaches. Treatment of all wastewater and waste generated in the treatment industry involves a number of processes including air flotation, chemical coagulation, settling and biological treatment using fully mixed activated sludge. Various learning functions have been considered, including forward-propagation artificial neural networks (ANNs) such as multilayer perceptron (MLP), cascaded forward-propagation ANNs, and support vector regression (SVR) models. The learning process includes the use of Levenberg-Marquardt optimization algorithms and sequential minimum. The article also provides graphical images illustrating the different types of pollutants, the costs associated with treatment plants, and the color changes in wastewater observed after the treatment process. The obtained results show a high degree of similarity between the predicted and experimental data, which emphasizes the effectiveness of the backpropagation ANN model for accurate predictions. In addition, the integration of machine learning into the production of detergents

can be extremely effective in promoting the efficient and sustainable use of water resources. Overall, the paper provides valuable insights into the use of machine learning to address freshwater scarcity.

Keywords: treatment facilities, model, resources, regression of support vectors, modeling.

Вступ

Необхідність моделювання концентрацій та характеристик стічних вод у сфері водопідготовки відкриває шлях до підвищення ефективності очисних споруд. Проблема недостатнього водопостачання є найважливішою в багатьох країнах, призводячи щодня до смерті сотень людей у слаборозвинених регіонах через недостатнє водопостачання та погані санітарні умови. Водопостачання стає проблемою навіть у багатих країнах, де відпрацьовані води стають поширеним явищем. Неefективні септичні системи та системи очищення стічних вод призводять до забруднення озер, річок та підземних вод [1]. Ці стоки відомі як стічні води, але можна використати та відновити значну частину цих вод для подальшого використання. У зв'язку з глобальною водною кризою та передбачуваною нестачею води у майбутньому, стічні води, що виходять з промислових підприємств, швидко стають безцінним альтернативним ресурсом придатної для використання води.

Постановка проблеми

Сьогодні належне поводження з промисловими стічними водами становить велику проблему, оскільки воно включає різні трудомісткі та дорогі етапи. Розрахунок онлайн-значень якості компонентів у стічних водах під час їх очищення є великим викликом. Промисловість, що використовує мийні засоби, вимагає забезпечення якості та ефективності процесу. Біохімічне споживання кисню, хімічне споживання кисню, загальна органічна речовина, загальні розчинені тверді речовини, рівень водневого потенціалу (рН) та органічні речовини загального вуглецю – всі ці забруднюючі речовини мають важливе значення для ефективної та надійної роботи очисних споруд, тому їх потрібно безпомилково та своєчасно вимірювати. Однак впровадження пристроїв для

онлайн-моніторингу в області очищення стічних вод є складним і вимагає значних фінансових витрат. У таких умовах м'які обчислення стають популярним та зручним інструментом для розробки моделей. Застосування методів м'яких обчислень, таких як нейронні мережі, нечіткі множини, машини опорних векторів, дерева регресії тощо, стає популярним у різних галузях промисловості з різноманітними застосуваннями завдяки їх простоті та здатності до надійного прогнозування значень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Зважаючи на актуальну проблему та необхідність удосконалення процесу очищення промислових стічних вод, дослідники проводили експерименти та аналізи, аби знайти необхідний варіант розв'язання проблеми. V. L. Filipchuk et al. [2] дослідили оновлені технологічно-технічні засоби для очищення виробничих стічних вод від важких металів, які містять органічні та неорганічні домішки різних фазово-дисперсних станів. В результаті проведеної розробки були створені сучасні системи очищення багатокомпонентних металомісних стічних вод, що використовують автоматизоване керування рН і Eh з використанням мікропроцесорних засобів та передових інформаційних технологій.

М. М. Tymkiv [3] досліджувала оптимізацію мережі гідроекологічного моніторингу за допомогою геоінформаційного і геостатистичного аналізу. Дослідниця вивчала ряди даних з пропусками та розрахувала екологічні ризики для окремих суббасейнів, а також побудувала карту абсолютних рівнів підземних вод на основі моніторингових досліджень для досліджень рівнів підземних вод та прогнозування мережі гідроекологічного та екологічного моніторингу.

V. M. Shtepa [4] досліджував зменшення техногенного навантаження на навколишнє середовище через поліпшення управління екологічною безпекою технологій очищення стічних вод на промислових об'єктах. У дослідженні були враховані ризики надзвичайних ситуацій та вимоги енергоефективності. Застосування віртуальної міри енергоефективності водоочищення дозволило створити системи промислового водоочищення з об'єктно-орієнтованим підходом до управління екологічною безпекою та потенційними надзвичайними ситуаціями.

L. M. Predzymirska [5] розробила заходи для підвищення екологічної безпеки промислових виробництв через створення кавітаційної технології очищення стічних вод від органічних і біологічних забруднень. Введення азоту в оброблюване середовище підвищує кількість зародків кавітації в рідині, що збільшує інтенсивність кавітаційного поля та ефективність очищення.

В експерименті дослідників Y. Xie et al. [6] проводились спроби покращення процесу прогнозування якості роботи очисних споруд при очищенні стічних вод із використанням нейронної мережі та алгоритму оптимізації. Вченими розроблено модель штучного інтелекту ML на основі FFNN і GA для точного та ефективного прогнозування якості стічних вод у реальному часі в очисних спорудах. Ця модель може вирішувати завдання з видалення забруднюючих речовин і реагування на них, забезпечуючи безпечну експлуатацію споруд.

Досліджень інших вчених недостатньо, аби почати практичне використання нейронної мережі для оптимізації очищення промислових стічних вод. Це пов'язано з тим, що з використанням конкретних параметрів не проводились подібні експерименти, а також не було досягнуто подібного результату за допомогою інших методів. Саме тому необхідно було продовжити вивчення цієї теми та провести ще одне дослідження, яке допомогло визначити чіткий метод використання нейронних

мереж для використання в очищенні промислових стічних вод.

Мета дослідження

Основні цілі дослідження оптимізації очищення промислових стічних вод з використанням нейронних мереж: підвищення ефективності очищення та зменшення забруднення навколишнього середовища; зниження витрат на очищення шляхом оптимального використання ресурсів; дотримання стандартів щодо якості очищення стічних вод; зменшення негативного впливу на природне середовище, збереження водних ресурсів; розробка оптимального методу очищення з використанням нейронних мереж, який буде проводити детальний та чіткий аналіз показників.

Виклад основного матеріалу

У дослідженні було проведено оцінку ефективності роботи очисних споруд шляхом аналізу очищених стічних вод, які були отримані з водопровідно-каналізаційного господарства. Дослідження включало аналіз різних параметрів якості води, зокрема рН, температури, кольору, запаху, хімічного споживання кисню (ХСК), біохімічного споживання кисню (БСК), загального вмісту завислих речовин (ТSS), загального вмісту розчинених твердих речовин (TDS) та нафтопродуктів і мастил (O&G). Ці параметри були використані для оцінки якості води та ефективності роботи очисних споруд. Дослідження було проведено для оцінки ефективності роботи очисних споруд при очищенні промислових стічних вод. Основною метою дослідження було визначити якість води після проходження через очисні споруди та оцінити, наскільки ефективно вони видаляють забруднюючі речовини. Дослідження також дозволяє виявити можливі проблеми або недоліки в роботі очисних споруд. Якщо якість очищеної води не задовольняє встановлені стандарти, то це свідчить про неефективність чи несправність очисних систем, що вимагає подальшого вдосконалення або відновлення.

Також у статті використовувались дослідницькі методи, а саме аналітичний та порівняльний. Аналітичний метод використовувався для розгляду та оцінки різних параметрів та властивостей стічних вод, які були отримані з промислових джерел. Порівняльний метод був використаний для зіставлення ефективності різних підходів та технологій очищення стічних вод. Цей метод включав порівняння результатів досліджень, проведених на різних очисних спорудах або з використанням різних методик очищення.

У цьому дослідженні використовувались два різних типи ШНМ для прогнозування значень параметрів стічних вод. Один з них – багатошаровий перцептрон (MLP), який є окремим випадком нейронної мережі прямого поширення (FFNN), що є дуже популярним типом ШНМ. Простіша конструкція нейронної мережі прямого поширення має переваги машинного навчання. Деякі мережі Feedforward можуть працювати самостійно, з невеликою взаємодією для забезпечення модерації. При виконанні складних завдань мережа потребує співпраці кількох нейронів. Нейронна мережа спрощує обробку та аналіз нелінійних даних і допомагає уникнути проблем прийняття рішень. У цьому типі мережі передача інформації відбувається односторонньо, лише у напрямку вперед. Виходи нейронів прихованого шару послідовно стають входами вихідних нейронів, де вони піддаються різним змінам.

Це дослідження також використовує правило керованого навчання, де вхідні дані та бажані результати використовуються для прогнозування. Прогнозовані значення порівнюються з бажаними вихідними значеннями параметрів і на основі цього порівняння обчислюється величина похибки. Після цього ваги і зміщення коригуються з метою зменшення похибок і процес повторюється. У дослідженні використовувались наступні формули:

1.Рівняння для активації “Purelin” (1):

$$f(n) = n. \quad (1)$$

2.Проведення розрахунку RMSE (2):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (Y_{act_i} - Y_{pred_i})^2}, \quad (2)$$

де m – кількість спостережень або даних, для яких проводилось прогнозування;
 i – індекс, який використовується для ітерації через кожне спостереження;

Y_{act_i} – фактичне значення спостереження i -го випадку;

Y_{pred_i} – прогнозоване значення для i -го випадку.

3.Знаходження коефіцієнта детермінації (3):

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^m (y_{act_i} - y_{pred_i})^2}{\sum_{i=1}^m y_{act_i}^2}. \quad (3)$$

4.Визначення середньої абсолютної помилки (4):

$$MAE = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m |y_{act_i} - y_{pred_i}|. \quad (4)$$

Отримані дані можуть бути використані для подальших досліджень і розробки нових методів очищення, вдосконалення існуючих технологій та створення більш ефективних очисних споруд.

Оптимізація роботи очисних споруд підкреслює важливість точного моделювання специфічних концентрацій і характеристик, які зазвичай зустрічаються у водоочисній промисловості. Дефіцит води широко визнаний критичною проблемою в багатьох країнах [7]. У менш розвинених країнах недостатнє водопостачання та неадекватна санітарія призводять до численних щоденних смертей. І навпаки, у заможних країнах поширене марнотратство води та недостатня кількість септиків і систем очищення стічних вод призводять до забруднення озер, річок і підземних вод. Вода, яка залишається після використання, зазвичай називається стічними водами, хоча існують можливості переробляти і

відновлювати значну її частину для подальшого використання.

У світлі триваючої глобальної водної кризи та прогнозованих майбутніх рівнів дефіциту води, скидання стічних вод з промислових об'єктів швидко набуває визнання як цінне альтернативне джерело придатної для використання води [8]. Викид відходів у навколишнє середовище через воду є критичною проблемою для промислових підприємств. Забруднюючі речовини, присутні у стічних водах, можуть становити ризики для екосистем, здоров'я людей та всіх форм життя. Тому ефективне видалення забруднюючих речовин зі стічних вод перед їхнім потраплянням у навколишнє середовище набуває першочергового значення. Стічні води містять різні типи забруднювачів, зокрема:

1. Водневий потенціал (рН) вимірює кислотність або лужність стічної води. Рівень рН може впливати на ефективність обробки та може бути коригований для досягнення оптимальних умов.

2. Загальний вміст завислих речовин (TSS) вказує на кількість твердих частинок або матеріалів, які перебувають у воді. Це можуть бути пісок, глина, органічні речовини тощо.

3. Загальний вміст розчинених твердих речовин (TDS) відображає кількість речовин, розчинених у воді. Це можуть бути солі, метали, хімічні речовини та інші розчинені речовини.

4. Нафтопродукти та мастила (O&G) представляють нафтопохідні речовини, які

5. можуть бути присутні у стічних водах від промислових процесів або від стічних вод автотранспорту.

6. Біохімічне споживання кисню (БСК) та хімічне споживання кисню (ХСК) вказують на кількість кисню, який використовується для біологічного або хімічного розкладу органічних речовин у воді. Це допомагає визначити органічну забрудненість стічних вод [9].

Забруднюючі речовини, що містяться у стічних водах, можна розділити на різні типи, як показано на рис. 1. З точки зору характеру і ступеня видалення забруднювачів, було запропоновано і застосовується кілька методів очищення води. Оцінка якості стічних вод включає оцінку їх хімічних, фізичних та біологічних характеристик. Хімічні характеристики оцінюють концентрацію різних речовин у стічних водах, таких як розчинені метали, хімічні сполуки та інші забруднюючі речовини. Фізичні характеристики включають такі параметри, як колір, ступінь мутності та температуру стічної води. Біологічні характеристики визначають наявність та концентрацію бактерій, водних водоростей та інших організмів, які можуть бути присутні у стічних водах.

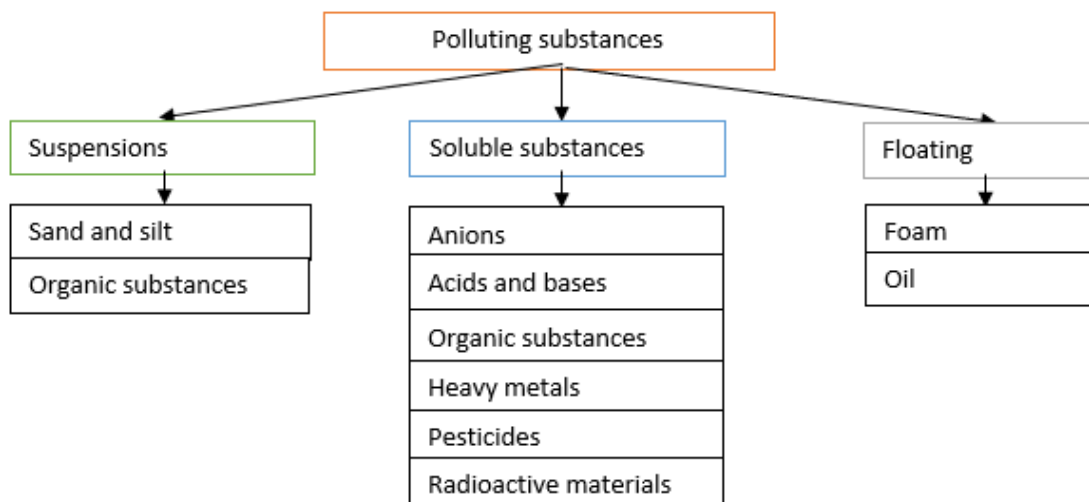


Рис. 1. Типи забруднюючих речовин, присутніх у стічних водах (джерело: О. В. Akpor et al. [10])

Моделювання конкретних концентрацій і характеристик стічних вод допомагає визначити оптимальні методи очищення та забезпечити ефективне видалення забруднюючих речовин. Це може включати фізичні процеси, такі як відстійники, фільтрація або аеробні та анаеробні процеси біологічного очищення. Для досягнення заданих стандартів якості води важливо враховувати конкретні потреби та характеристики стічних вод, що обробляються.

У машинному навчанні (ML) користувачам не потрібно мати детальне розуміння внутрішньої реалізації. Згідно з цією концепцією, початкові набори даних можуть служити як навчальні вибірки для постійного оновлення моделей. Фреймворк використовує методи машинного навчання для створення остаточної прогнозуючої моделі. Існує багато різних алгоритмів машинного навчання з різними теоретичними основами для навчання моделей. Вибір найкращого алгоритму або універсального методу навчання моделей є складним завданням. У даному дослідженні для налаштування моделі були застосовані два методи м'яких обчислень – MLP та SVR [11]. Модель, яка демонструвала найкращу відповідність, була включена в структуру для досягнення кращих результатів.

Оптимізація штучних нейронних мереж (ШНМ) має вирішальне значення для підвищення продуктивності мережі. У цьому дослідженні було використано функцію активації "Purelin" для підвищення точності прогнозування даних за допомогою різних методів навчання ШНМ [12]. Функція активації "Purelin" може бути математично визначена за допомогою рівняння (1).

Зовнішній діапазон функції активації "Purelin" складає $[+1, -1]$. На рис. 2 графічно показано символ цієї функції. У даному дослідженні використовувалась ця функція активації для нормалізації вихідних даних, з метою забезпечити їх значення в межах даного діапазону. Для оптимізації мережі були використані дві моделі штучних нейронних мереж з різними функціями навчання. Для цього оптимізаційного дослідження було

використано алгоритм навчання зворотного поширення помилки Левенберга-Марквардта (LM) для тренування мережевих моделей з 5 прихованими шарами для кожної з навчальних функцій.

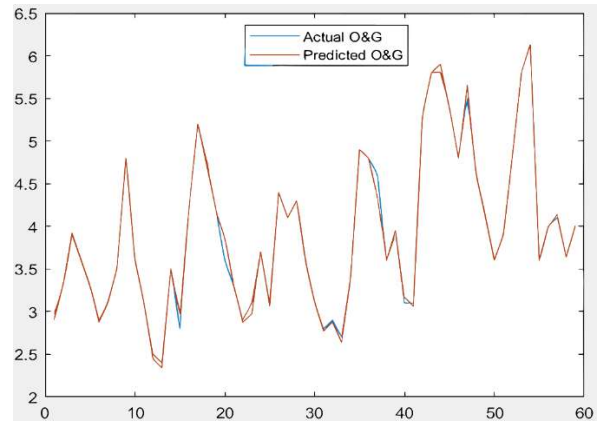


Рис. 2. Фактичний та прогнозований результат через CFNN (джерело: Q. Xinyi [13])

Алгоритм LM виявився найефективнішим і мав найменшу кількість ітерацій серед різних комбінацій функцій активації для апроксимації функцій з менш ніж сотнею поновлюваних ваг. Інші алгоритми зазвичай вимагають більше ітерацій, ніж алгоритм LM, хоча це саме той випадок, який розглядається в цьому дослідженні. Практично, алгоритм LM часто показує кращі результати оптимізації для різних типів задач порівняно з іншими алгоритмами. Усі ці алгоритми відомі своєю швидкою збіжністю на різних типах задач. Оцінка моделей проводиться з використанням тестових даних, порівнюючи отримані результати з прогнозованими значеннями. Крім того, для оцінки ефективності та точності моделей прогнозування використовуються різні метрики, зокрема середньоквадратична помилка (RMSE) та коефіцієнт детермінації (R^2). Розрахунок RMSE можна виконати за допомогою рівняння (2).

Детермінаційний коефіцієнт (R^2) визначається за допомогою рівняння (3) і використовується для оцінки узгодженості між очікуваними та прогнозованими значеннями. Крім того, для оцінки експозиції та продуктивності

прогнозованих моделей застосовується середня абсолютна помилка (MAE), яка визначається рівнянням (4).

У цій роботі досліджується якість прогнозованих моделей, використовуючи ці метри, що дозволяють оцінити їхню точність та надійність. Враховуючи характеристики швидкої збіжності та продуктивності різних типів задач, алгоритми оптимізації, використані в цьому дослідженні, мають відповідні переваги та обмеження. Алгоритм БП Левенберга-Марквардта (LM) є особливо ефективним для апроксимації функцій та забезпечує найкращі результати для даного контексту, оскільки він збігається з меншою кількістю ітерацій порівняно з іншими алгоритмами [14]. Однак, відбувається ітеративна оптимізація моделей, що може зайняти певний час та ресурси.

Під час проведення досліджень важливо враховувати як оцінку точності моделей, так і їхню ефективність. Отримані результати, такі як значення RMSE, R^2 та MAE, можуть бути використані для порівняння різних моделей та оцінки їх відповідності передбачуваним і очікуваним значенням. Модель з меншими значеннями RMSE та MAE відображає вищу точність прогнозування даних. У той же час, модель, де значення R^2 наближається до 1, демонструє більшу узгодженість з даними.

Для оцінки ефективності побудованих моделей використовуються такі показники, як коефіцієнт кореляції (R) і середньоквадратична помилка (MSE). Оптимальною вважається модель з максимальним значенням R і мінімальним значенням MSE. Ці параметри допомагають визначити, наскільки точно модель прогнозує дані.

У результаті було сформульовано дві різні моделі: штучні нейронні мережі (ШНМ) та моделі регресії з опорними векторами (SVR). Для підвищення точності прогнозування для навчання штучних нейронних мереж було використано алгоритм Левенберга-Марквардта (LM). У процесі навчання було використано функцію навчання TRAINLM та функцію адаптивного навчання LEARNGDM [15].

Мережева модель була створена шляхом налаштування ваг та зсувів нейронів, які з'єднують різні шари мережі. Кількість прихованих нейронів у прихованому шарі було визначено шляхом ітеративного експерименту, оцінюючи продуктивність моделі для різних кількостей прихованих нейронів.

Статистичні дані ефективності моделей штучних нейронних мереж для прогнозування різних показників якості стічних вод, таких як БСК, ХСК, TSS, TDS та O&G, були розраховані окремо для кожного показника. Це дозволило адекватно оцінити вплив кожного параметра і отримати значення для стічних вод. Таким чином, розглядалися та порівнювалися різні моделі залежно від їхньої ефективності у прогнозуванні різних показників якості стічних вод.

Для оцінки продуктивності розроблених моделей використовуються значення, які порівнюються з передбаченими результатами, отриманими за допомогою двох алгоритмів – штучних нейронних мереж (ANN) і алгоритму SVR [16]. Під час оцінки роботи моделей також враховуються похибки, що виникають при обчисленні відхилень між прогнозованими та цільовими результатами. Для оцінки точності роботи моделей проводиться візуальний огляд та аналіз низьких значень похибок.

Моделювання з використанням методів навчання нейронних мереж дає регресійні значення. В усіх випадках значення коефіцієнта кореляції (R) дуже близьке до 1, що свідчить про гарний дизайн моделі з точки зору параметрів. Помилки для кожної моделі також враховуються, і цей метод надає важливі дані для побудови моделей.

Під час моделювання з використанням методу CFNN були отримані значення регресії, і всі значення коефіцієнта кореляції (R) регресійних моделей були близькими до 1 [17]. Це свідчить про високу якість моделей, що були навчені за допомогою цього методу. Таким чином, використання цього нового підходу до машинного навчання дозволило

успішно прогнозувати дані та створювати ефективні моделі (рис. 3-5).

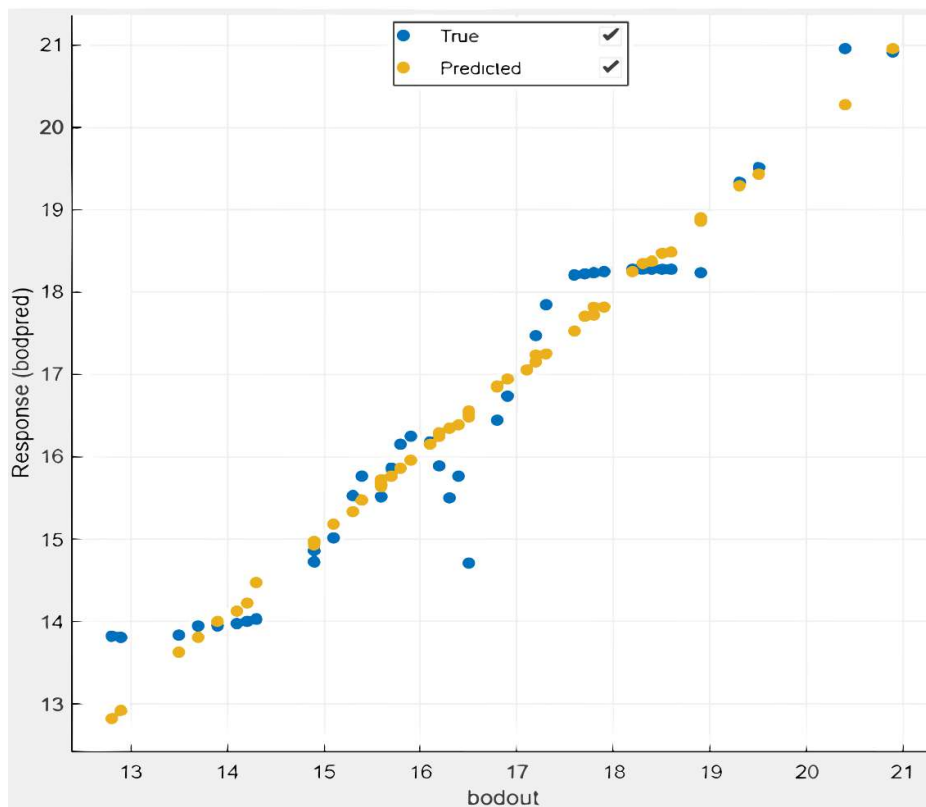


Рис. 3. Фактичний та прогнозований результат БСК через SVR (джерело: D. K. Jana et al. [18])

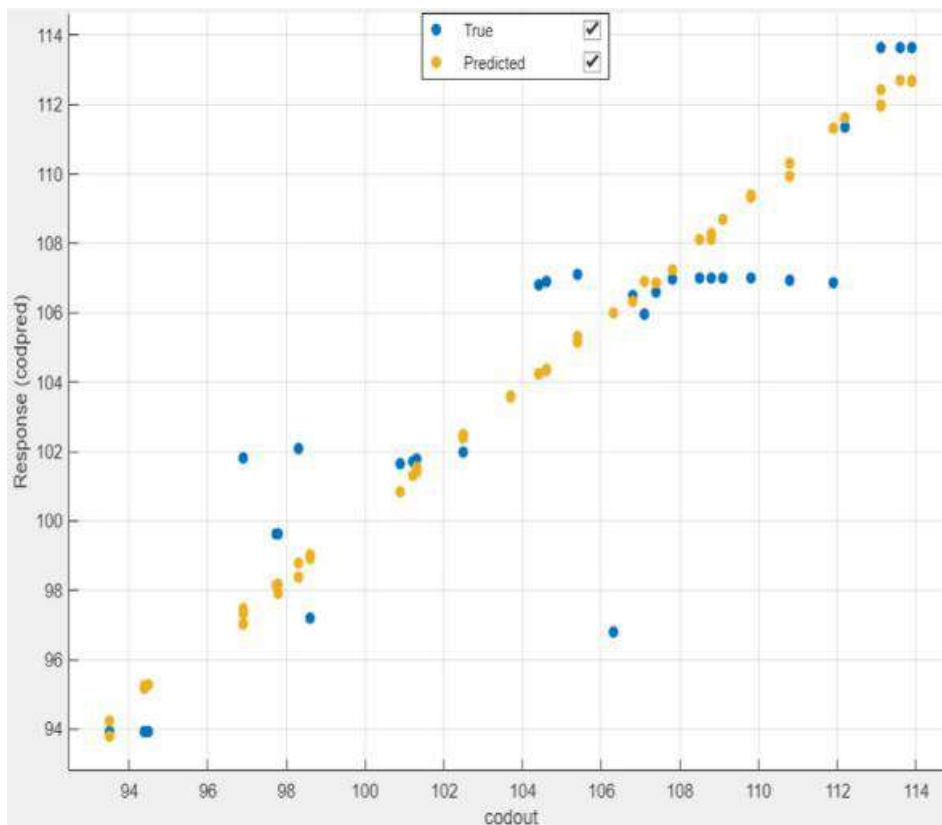


Рис. 4. Фактичний та прогнозований результат ХСК через SVR (джерело: D. K. Jana et al. [18])

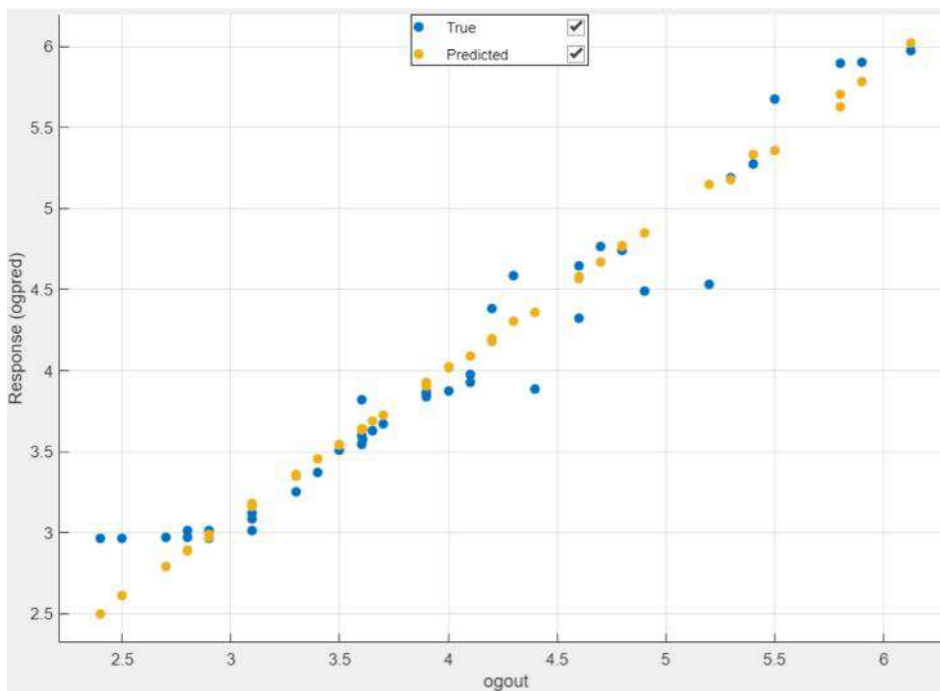


Рис. 5. Фактичний та прогнозований результат TSS через SVR (джерело: D. K. Jana et al. [18])

Порівняння вихідних значень стічних вод з прогнозованими значеннями параметрів БСК, ХСК, та TSS, отриманими за допомогою алгоритму SVR, зображено на рис. 3, 4 та 5, відповідно. Візуальний огляд та менші значення похибок свідчать про успішну розробку моделі. Коефіцієнт детермінації (R^2), середня абсолютна похибка (MAE), середня квадратична похибка (MSE) та середньоквадратична похибка (RMSE) були розраховані для кожного параметра та методу навчання. Представлено комплексний порівняльний аналіз цих результатів разом з оцінкою продуктивності моделі для кожного типу вхідних-вихідних даних.

Таблиця 1 містить стислий огляд результатів моніторингу. Цей регресійний аналіз досліджує відповідність між очікуваними та вимірними значеннями даних. Результати показують, що всі методи навчання, використані в цьому дослідженні, демонструють високу точність у прогнозуванні даних. Однак, якщо порівнювати, то штучна нейронна мережа (ШНМ) демонструє вищу ефективність з точки зору продуктивності моделі порівняно з методом регресії на основі опорних векторів (SVR).

На рис. 6 представлено графічне порівняння результатів моніторингу для всіх параметрів, що були взяті з відкритих даних інших досліджень [18]. Графічний аналіз однозначно підтверджує, що модель ANN є найефективнішою у досягненні високої відповідності між даними для всіх параметрів. Залежно від наявних даних, метод навчання штучних нейронних мереж може бути змінений, щоб забезпечити оптимальну відповідність між вимірними параметрами та прогнозованими значеннями.

Отже, засновуючись на проведених дослідженнях, можна зробити висновок, що всі використані методи навчання дали високоякісні прогнозовані дані, проте ANN виявилася найефективнішою з точки зору продуктивності моделі. Представлені графіки та аналіз показують, що розроблені моделі забезпечують точність і відповідність даним. Враховуючи характеристики доступних даних, може бути вибраний відповідний метод навчання для найкращих результатів.

Таблиця 1. Результати моніторингу (джерело: K. Sharma [19])

Предмет моніторингу	Метод	R ²	MAE	MSE	RMSE
БСК	Пряме зворотне розповсюдження (MLP)	0.99914	0.33251	0.23816	0.48801
	Каскадне зворотне поширення	0.99845	0.21291	0.42838	0.65451
	SVR	0.92	0.34729	0.24948	0.49948
ХСК	Пряме зворотне розповсюдження (MLP)	0.99949	1.60832	5.55047	2.35595
	Каскадне зворотне поширення	0.99999	0.006	0.00031	0.01771
	SVR	0.85	1.5873	5.0358	2.2441
ТСС	Пряме зворотне розповсюдження (MLP)	0.99919	0.46111	0.36018	0.60015
	Каскадне зворотне поширення	0.99994	0.11892	0.02743	0.16562
	SVR	0.89	0.38755	0.29855	0.5464
ТДС	Пряме зворотне розповсюдження (MLP)	0.99997	2.85359	36.30566	6.02542
	Каскадне зворотне поширення	0.99992	8.00436	110.00656	10.48841
	SVR	1	6.1056	76.129	8.7252
О&Г	Пряме зворотне розповсюдження (MLP)	0.9978	0.12155	0.03571	0.18898
	Каскадне зворотне поширення	0.99973	0.03509	0.00433	0.06582
	SVR	0.96	0.12371	0.03133	0.17701

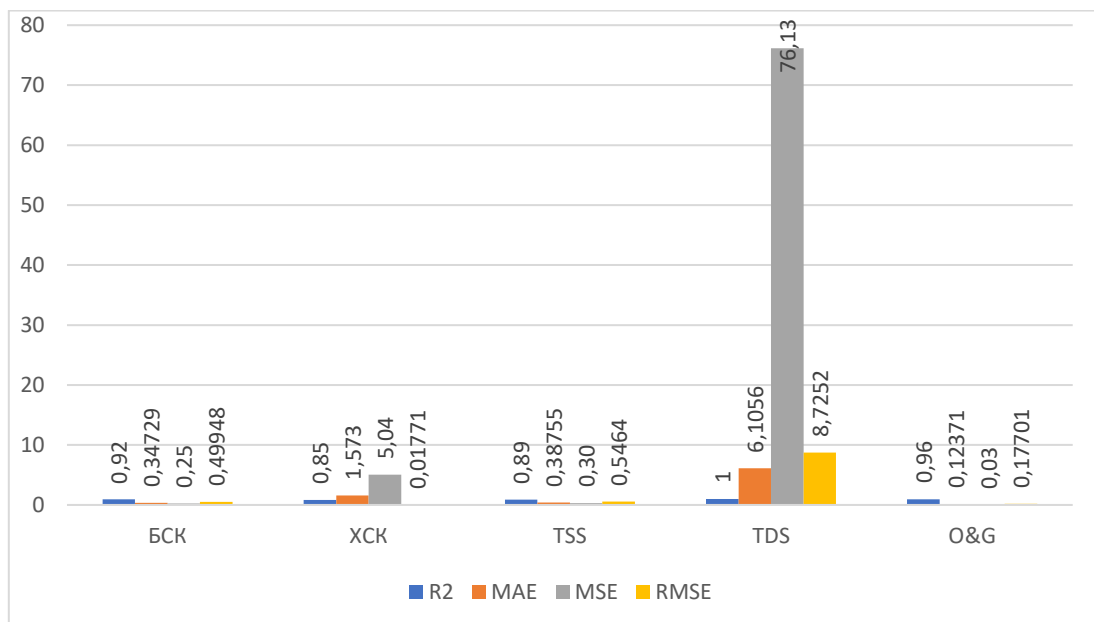


Рис. 6. Графічне представлення вимірних значень різних параметрів стічних вод

Враховуючи результати проведеного дослідження, можна сказати, що використання нейронної мережі може значно покращити показники виміру якості стічних вод та оцінки продуктивності роботи очисних споруд. Також додатково варто проаналізувати інші дані деяких вчених, які також вивчали особливості використання нейронних мереж у даній сфері.

Дослідники N. D. Singh et al. [20] провели експеримент, спрямований на розробку моделі очищення стічних вод з використанням штучного інтелекту. У

своїй статті вони продемонстрували перевагу прогнозування ХСК (хімічної споживаності кисню) за допомогою ШНМ (штучних нейронних мереж) порівняно зі стандартним математичним моделюванням. Дослідники використали штучні нейронні мережі, які є одним з основних інструментів штучного інтелекту, для прогнозування ХСК у процесі очищення стічних вод. Вони порівняли результати прогнозування, отримані за допомогою ШНМ, з результатами, отриманими з використанням стандартної математичної моделі. Виявилось, що

використання ШНМ у моделюванні прогнозу ХСК призвело до кращих результатів порівняно зі стандартною математичною моделлю. Це означає, що штучний інтелект може бути ефективним інструментом для прогнозування і контролю якості очищення стічних вод. Хоча дослідження, спрямоване на розробку моделі очищення стічних вод з використанням штучного інтелекту, може мати свої переваги, воно також має деякі недоліки, які можна врахувати. Деякі з таких недоліків включають: для ефективного навчання моделей штучного інтелекту необхідні великі обсяги якісних та репрезентативних даних; вибір правильного алгоритму та архітектури штучної нейронної мережі є важливою задачею при розробці моделі очищення стічних вод; штучні нейронні мережі часто вважаються “чорними скриньками”, оскільки їх рішення можуть бути складними для пояснення; використання штучного інтелекту у сфері очищення стічних вод також викликає питання етики та безпеки.

S. Pezhhanfar et al. [21] провели дослідження, що включало застосування нейронних мереж, ізотерм та кінетичних вимірювань для очищення стічних вод з використанням обрізаного матеріалу *Populus alba*. Це дослідження виявило, що обрізана тирса твердої деревини дерева *Populus alba* має високу адсорбційну здатність, яка може бути використана в процедурах очищення стічних вод. Аналіз отриманих даних ізотермічних досліджень показав, що процес адсорбції найкраще пояснюється моделлю ізотерми Ленгмюра з високим коефіцієнтом кореляції. Крім того, під час проведення дослідження використовувалась нейронна ANN-модель, яка змогла провести додатковий аналіз отриманих результатів. Проте, було виділено декілька недоліків, а саме: обмеженість у використанні аналогових речовин для очищення стічних вод, можливість варіацій результатів очищення в залежності від умов проведення очистки, економічні витрати досить високі для постійного використання під час очищення води, у дослідженні не враховані негативні

впливи на навколишнє середовище тощо. Враховуючи ці недоліки, дослідження вносять важливий внесок у розуміння можливостей використання штучного матеріалу для очищення стічних вод. Для подальшого розвитку цієї галузі дослідники можуть зосередитися на вирішенні виявлених недоліків та розширенні можливостей застосування штучного матеріалу для очищення стічних вод.

B. Yang et al. [22] провели дослідження, використовуючи глибоке навчання для прогнозування якості стічних вод у водно-болотних угіддях. Використовуючи нейронну мережу глибокого навчання, вони змогли успішно прогнозувати якість стічних вод наступного дня для великомасштабних комплексів водно-болотних угідь та встановити зв'язок між зібраними наборами даних з різних джерел і якістю стічних вод. Порівнявши чотири моделі для прогнозування трьох показників якості стічних вод, дослідники дійшли кількох висновків. У випадках, коли вхідні дані демонструють значні коливання, метод ковзного середнього може ефективно усунути високочастотний шум, тим самим підвищуючи точність прогнозування, особливо в реальних великомасштабних додатках. У порівнянні з методом множинної лінійної регресії (MLR), нейронною мережею прямого поширення та нейронною мережею, оптимізованою за допомогою генетичного алгоритму, нейронна мережа глибокого навчання LSTM продемонструвала чудову ефективність прогнозування для даних часових рядів, таких як якість води. Використовуючи свою здатність враховувати попередні результати навчання, мережа LSTM виявилася придатною для точного прогнозування якості води. Цей підхід дозволяє робити швидкі прогнози в реальних сценаріях, використовуючи великий набір легкодоступних показників якості води. Крім того, використання нейронної мережі LSTM усуває необхідність проведення дорогих експериментів для отримання різних параметрів для моделювання КС (кінетичної схеми). Отже, це дослідження

висвітлює потенціал методів глибокого навчання, зокрема LSTM, у сфері прогнозування якості стічних вод, пропонуючи багатообіцяючі перспективи для майбутніх застосувань. Ці висновки підкреслюють важливість врахування змінних факторів, використання відповідних алгоритмів та збору якісних даних для поліпшення точності та ефективності прогнозування. Далі дослідження в цій галузі можуть сприяти розробці більш точних та надійних моделей для управління якістю стічних вод і збереження водних ресурсів.

Проведене дослідження показало, що модель ANN демонструє високу точність та надійність у визначенні оптимальних параметрів для очищення промислових стічних вод. Вона може враховувати багато факторів, таких як фізико-хімічні характеристики стічних вод, режими роботи очисних споруд, об'ємні навантаження та інші вхідні параметри. Завдяки здатності нейронних мереж до самонавчання та адаптації до змінних умов, модель ANN може оптимізувати процес очищення стічних вод шляхом автоматичного вибору оптимальних налаштувань системи. Це дозволяє досягати ефективного видалення забруднюючих речовин та знижувати експлуатаційні витрати. Крім того, модель ANN забезпечує широкий спектр можливостей для аналізу та прогнозування впливу промислових стічних вод на довкілля та екосистеми. Вона дозволяє оцінити ризики забруднення водних ресурсів та визначити оптимальні стратегії для зменшення негативного впливу на навколишнє середовище.

У цій темі можливі подальші дослідження, спрямовані на розширення знань і покращення ефективності очищення стічних вод. Ось декілька напрямків досліджень, які можуть бути корисними: вивчення і розробка нових методів очищення стічних вод, включаючи високоефективні фільтраційні системи, процеси відновлення ресурсів та інноваційні методи обробки стічних вод; дослідження можуть бути спрямовані на використання нових матеріалів для

покращення очищення стічних вод, наприклад, впровадження наноматеріалів для видалення забруднюючих речовин або розробка спеціальних мембран для фільтрації; поліпшення ефективності та оптимізацію різних процесів очищення стічних вод, що включає оптимізацію режимів роботи, використання розумних систем керування, моделювання та прогнозування процесів; дослідження можливостей використання альтернативних джерел води, таких як дощова вода, відходи харчової промисловості або відпрацьовані води, для подальшого використання, що сприятиме економії прісної води та зменшенню використання водних ресурсів; розробка нових методів аналізу та моніторингу стічних вод, що може включати використання сучасних аналітичних інструментів, сенсорів та датчиків для визначення конкретних характеристик і забруднюючих речовин у стічних водах; з урахуванням зростання кліматичних змін, дослідження можуть зосередитися на вивченні впливу змін клімату на якість та характеристики стічних вод; розробка ефективних систем повторного використання та утилізації стічних вод, що включає вивчення технологій очищення стічних вод для подальшого використання у промислових процесах, сільському господарстві, а також розробку методів обробки стічних вод для отримання ресурсів, таких як енергія, добрива або питна вода.

Висновки

Це дослідження було зосереджене на вивченні управління стічними водами, що утворюються на підприємствах. Для розв'язання проблеми утилізації стічних вод та відходів виробництва миючих засобів було досліджено різні методи очищення. Ці методи включають повітряну флотацію, хімічну коагуляцію, відстоювання та комплексний підхід до біологічного очищення з використанням ретельно перемішаного активного мулу. У цьому дослідженні використовувався підхід SVR для прогнозування параметрів стічних вод. Ці параметри включають

хімічне споживання кисню (ХСК), біологічне споживання кисню (БСК), загальну кількість розчинених речовин (TDS), загальну кількість завислих речовин (TSS), а також органічні речовини і мул (O&G). Для цього дослідження використовувався набір даних, що охоплює шестимісячний період.

Моделі штучних нейронних мереж (ANN) та алгоритму SVR були піддані оптимізації за допомогою відповідних методів. Результати свідчать, що більш точні прогнози можна отримати при наявності більшої кількості вхідних даних. Зокрема, модель, яка використовує метод прямого зворотного поширення (MLP), показала найкращі результати (значення $R^2 = 0.99$, MAE = 0.33, MSE = 0.24 і RMSE = 0.49) для показника БСК порівняно з іншими методами машинного навчання. Отримані моделі можуть застосовуватися для оптимізації роботи очисних споруд у наступних дослідженнях.

Найкраща модель показала високу кореляцію ($r = 0.99$). Порівнюючи ці результати з попередніми дослідженнями, було помічено, що прогнозовані результати перевищили результати попередніх досліджень ($N = 0.74$), незважаючи на використання мінімальних параметрів. Це підтверджує валідність і достовірність отриманих даних та практичну цінність моделі з інженерними рекомендаціями. Валідність моделі, розробленої в цьому дослідженні, буде перевірено в довгострокових прогнозах, коли стануть доступними додаткові дані.

Запропонований метод може бути розширений до використання моделей нечіткої логіки 2-го типу та simulink-моделей у майбутніх дослідженнях. Це відкриває перспективи для подальшого розвитку та удосконалення методології очищення стічних вод у мийній промисловості. Очищення стічних вод є важливою задачею для збереження довкілля та забезпечення питної води. Використання нейронних мереж у методології очищення стічних вод може привести до подальшого розвитку та удосконалення процесу. Ось кілька напрямків, які можна розглянути для

досягнення цих цілей: прогнозування якості стічних вод на основі вхідних параметрів, таких як концентрація речовин, температура, рН тощо; оптимізація різних етапів процесу очищення стічних вод, таких як фізико-хімічне оброблення, біологічне очищення та фільтрація; виявлення аномалій у процесі очищення стічних вод.

References

1. UNESCO. 2022. *The United Nations World Water Development Report 2022: Groundwater: Making the invisible visible*. Paris: UNESCO. <https://www.undp.org/publications/united-nations-world-water-development-report-2022-groundwater-making-invisible-visible>
2. Filipchuk, V.L., Drevetskiy, V.V., Filipchuk, L.V., Klepach, M.I. 2017. *Automated management of environmental protection systems for the treatment of metal-containing wastewater*. Rivne: NUVHP. <http://surl.li/jjwew>
3. Tymkiv, M.M. 2021. *Optimization of the well network of the hydrogeoecological monitoring system (on the example of the Pripjat River basin)*. Kyiv: Institute of Environmental Geochemistry of the National Academy of Sciences of Ukraine. https://www.igns.gov.ua/wp-content/uploads/2021/05/dysertatsiya_tymkiv.pdf
4. Shtepa, V.M. 2020. *Scientific and theoretical foundations of environmentally safe industrial wastewater treatment technologies*. Sumy: Sumy State University. <https://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/78079>
5. Predzymirska, L.M. 2015. *Cavitation purification of natural and waste waters from organic and biological contaminants*. Lviv: Lviv Polytechnic National University. <http://elar.nung.edu.ua/bitstream/123456789/8976/1/an2520.pdf>
6. Xie, Y., Chen, Y., Lian, Q., Yin, H., Peng, J., Sheng, M., Wang, Y. 2022. Enhancing real-time prediction of effluent water quality of wastewater treatment plant based on improved feedforward neural network coupled with optimization algorithm. *Water*, 14(7), 1053. <https://doi.org/10.3390/w14071053>
7. Kumari, U., Swamy, K., Gupta, A., Karri, R.R., Meikap, B.Ch. 2021. Global water challenge and future perspective. In: *Green Technologies for the Defluoridation of Water* (pp. 197-212). London: Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85768-0.00002-6>
8. Tzanakakis, V.A., Paranychianakis, N.V., Angelakis, A.N. 2020. Water supply and water scarcity. *Water*, 12(9), 2347. <https://doi.org/10.3390/w12092347>
9. Thongam, D.D., Chaturvedi, H. 2021. Nanomaterials for climate change and water pollution mitigation. In: *Water Conservation in the Era of Global*

Climate Change (pp. 277-314). London: Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820200-5.00005-1>

10. Akpor, O.B., Otohinyi, D.A., Olaolu, T.D., Aderiye, B.I. 2014. Pollutants in wastewater effluents: impacts and remediation processes. *International Journal of Environmental Research and Earth Science*, 3(3), 50-59.

http://eprints.lmu.edu.ng/1023/1/IJERES_2014.pdf

11. Elsayed, A., Siam, A., El-Dakhkhni, W. 2022. Machine learning classification algorithms for inadequate wastewater treatment risk mitigation. *Process Safety and Environmental Protection*, 159, 1224-1235. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.01.065>

12. Tarafdar, A., Shahi, N.Ch., Singh, A., Sirohi, R. 2018. Artificial neural network modeling of water activity: a low energy approach to freeze drying. *Food and Bioprocess Technology*, 11(1), 164-171. <https://doi.org/10.1007/s11947-017-2002-4>

13. Xinyi, Q. 2023. The application of artificial intelligence – artificial neural networks – in wastewater treatment. *E3S Web of Conferences*, 393, 03003. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202339303003>

14. Yadav, A., Chithaluru, P., Singh, A., Joshi, D., Elkamouchi, D.H., Pérez-Oleaga, C.M., Anand, D. 2023. An enhanced feed-forward back propagation Levenberg–Marquardt algorithm for suspended sediment yield modeling. *Water*, 14(22), 3714. <https://doi.org/10.3390/w14223714>

15. Ali, S., Riaz, Sh., Safoora, Xiangryong, L., Wang, G. 2023. A Levenberg-Marquardt based neural network for short-term load forecasting. *Computers, Materials and Continua*, 75(1), 1783-1800. <https://doi.org/10.32604/cmc.2023.035736>

16. Malekian, A., Chitsaz, N. 2021. Concepts, procedures, and applications of artificial neural network models in streamflow forecasting. In: *Advances in Streamflow Forecasting* (pp. 115-147). London: Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820673-7.00003-2>

17. Le, T.H., Dai, L., Jang, H., Shin, S. 2022. Robust process parameter design methodology: A new

estimation approach by using feed-forward neural network structures and machine learning algorithms. *Applied Sciences*, 12(6), 2904.

<https://doi.org/10.3390/app12062904>

18. Jana, D.K., Bhunia, P., Adhikary, S.D., Bej, B. 2022. Optimization of effluents using artificial neural network and support vector regression in detergent industrial wastewater treatment. *Cleaner Chemical Engineering*, 3, 100039.

<https://doi.org/10.1016/j.clce.2022.100039>

19. Sharma, K. 2022. *A comparative study of different technologies of sewage treatment plant*. Delhi: Delhi Technological University.

<http://dspace.dtu.ac.in:8080/jspui/bitstream/repository/19613/1/KESHAV%20SHARMA%20M.Tech.pdf>

20. Singh, N.D., Murugamani, C., Kshirsagar, P., Tirth, V., Islam, S., Qaiyum, S., Suneela, B., Duhayyim, M.A., Waji, Y.A. 2022. IOT based smart wastewater treatment model for industry 4.0 using artificial intelligence. *Scientific Programming*, 2022, 5134013. <https://doi.org/10.1155/2022/5134013>

21. Pezhhanfar, S., Zarei, M., Shekaari, T., Khalilzadeh, M. 2021. Neural network, isotherm, and kinetic study for wastewater treatment using *populus alba*'s pruned material. *Iranian Journal of Chemistry & Chemical Engineering*, 40(6), 1868-1881. <https://doi.org/10.30492/IJCCE.2020.43472>

22. Yang, B., Xiao, Z., Meng, Q., Yuan, Y., Wang, W., Wang, H., Wang, Y., Feng, X. 2023. Deep learning-based prediction of effluent quality of a constructed wetland. *Environmental Science and Ecotechnology*, 13, 100207. <https://doi.org/10.1016/j.ese.2022.100207>

The article has been sent to the editors 11.08.23.

After processing 15.08.23.

Submitted for printing 20.08.23.

Copyright under license CCBY-SA4.0.

AUTHORS / АВТОРИ

1.	Ашур Ілля Зін-Еддінович	Аспірант Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна.
	Achour I.	Postgraduate student, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine.
2.	Вітюк Альона Євгенівна	Аспірантка, асистентка кафедри інформаційних систем та технологій факультету інформатики та обчислювальної техніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна.
	Vitiuk A.	Post-graduate student, assistant of the Department of Information Systems and Technologies, Faculty of Informatics and Computer Engineering, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine.
3.	Дорошенко Анатолій Юхимович	Доктор фізико-математичних наук, професор, завідувач відділу «Теорія комп'ютерних обчислень» Інституту програмних систем Національної академії наук України, м. Київ, Україна. Професор кафедри інформаційних систем та технологій факультету інформатики та обчислювальної техніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна.
	Doroshenko A.	Doctor of physics and mathematics, professor, head of department, Institute of Software Systems of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine. Professor of the Department of Information Systems and Technologies, Faculty of Informatics and Computer Engineering, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine.
4.	Зінченко Ольга Валеріївна	Докторка технічних наук, доцентка, завідувачка кафедрою штучного інтелекту Державного університету інформаційно – комунікаційних технологій, м. Київ, Україна.
	Zinchenko O.	Doctor of technical sciences, associate professor, head of the artificial intelligence department of the State University of Information and Communication Technologies, Kyiv, Ukraine.
5.	Каложняк Анастасія Вікторівна	Аспірантка, асистентка кафедри комп'ютерних наук математичного факультету Запорізького національного університету, м. Запоріжжя, Україна.
	Kaliuzhniak A.	Postgraduate student, assistant of the Department of Computer Sciences, Faculty of Mathematics, Zaporizhzhia National University, Zaporizhzhia, Ukraine.
6.	Кисіль Тетяна Миколаївна	Старша викладачка кафедри штучного інтелекту Державного університету інформаційно – комунікаційних технологій, м. Київ, Україна.
	Kysil T.	Senior lecturer of the Department of Artificial Intelligence of the State University of Information and Communication Technologies, Kyiv, Ukraine.
7.	Ковалевська Олена Сергіївна	Кандидат технічних наук, доцент кафедри обробки металів тиском Донбаської державної машинобудівної академії (м.Краматорськ), Україна.
	Kovalevska O.	Candidate of technical sciences, associate professor of the department of pressure metal processing of the Donbas State Machine-Building Academy (Kramatorsk), Ukraine.
8.	Ковалевський Сергій Вадимович	Доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інноваційних технологій і управління Донбаської державної машинобудівної академії, м. Краматорськ, Україна.
	Kovalevskyy S.	Doctor of Technical Sciences, professor, head of the department of innovative technologies and management of the Donbas State Machine-Building Academy, Kramatorsk, Ukraine.
9.	Коляса Олена Василівна	Кандидатка філологічних наук, доцентка кафедри філології навчально – наукового морського гуманітарного інституту Одеського національного морського університету, м. Одеса, Україна. Доцентка кафедри англійської мови та перекладу факультету української та іноземної філології Дрогобицького державного педагогічного університету імені Івана Франка, м. Дрогобич Львівської області, Україна.
	Koliasa O.	PhD, Assistant Professor, Assistant Professor Department of the English Language and Translation Drohobych Ivan Franko State Pedagogical University, Ukraine. Assistant Professor, Philology Department Odesa National Maritime University, Ukraine.

10.	Кунічік Олександр Васильович	Аспірант факультету комп'ютерних наук та кібернетики Київського національного університету імені Тараса Шевченка, м. Київ, Україна.
	Kunichik O.	Postgraduate student of the Faculty of Computer Science and Cybernetics, Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine..
11.	Матвійчук Мирослав Вікторович	Аспірант кафедри комп'ютерних наук та прикладної математики Навчально-наукового інституту автоматизації, кібернетики та обчислювальної техніки Національного університету водного господарства та природокористування, м. Рівне, Україна.
	Matviichuk M.	PhD, Student Department of Computer Sciences and Applied Mathematics Institute of Automation, Cybernetics and Computer Engineering National University of Water and Environmental Engineering (Rivne), Ukraine.
12.	Москаленко Наталія Володимирівна	Старша викладачка кафедри штучного інтелекту Державного університету інформаційно – комунікаційних технологій, м. Київ, Україна.
	Moskalenko N.	Senior lecturer of the Department of Artificial Intelligence of the State University of Information and Communication Technologies, Kyiv, Ukraine.
13.	Никоненко Андрій Олександрович	Аспірант кафедри комп'ютерних наук факультету інформаційних технологій і систем Черкаського державного технологічного університету, м. Черкаси, Україна.
	Nykonenko A.	Postgraduate student of the Department of Computer Sciences, Faculty of Information Technologies and Systems, Cherkasy State University of Technology, Cherkasy, Ukraine.
14.	Пашко Сергій Володимирович	Доктор фізико-математичних наук, завідувач відділу Інституту програмних систем Національної академії наук України, м. Київ, Україна.
	Pashko S.	Doctor of physical and mathematical sciences, head of the department of the Institute of Software Systems of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine.
15.	Сидюк Дар'я Миколаївна	Аспірантка кафедри інноваційних технологій і управління Донбаської державної машинобудівної академії, м. Краматорськ, Україна.
	Sidyuk D.	Post-graduate student of the Department of Innovative Technologies and Management of the Donbas State Machine-Building Academy, Kramatorsk, Ukraine.
16.	Сініцин Ігор Петрович	Доктор технічних наук, директор Інституту програмних систем Національної академії наук України, м. Київ, Україна.
	Sinitsyn I.	Doctor of technical sciences, director, Institute of Software Systems of the National Academy of Sciences of Ukraine, Ukraine.
17.	Терещенко Василь Миколайович	Доктор фізико-математичних наук, професор, завідувач кафедрою математичної інформатики факультету комп'ютерних наук та кібернетики Київського національного університету імені Тараса Шевченка, м. Київ, Україна.
	Tereshchenko V.	Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of the Department of Mathematical Informatics, Faculty of Computer Science and Cybernetics, Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine.
18.	Фесенко Максим Анатолійович	Кандидат технічних наук, доцент кафедри штучного інтелекту Державного університету інформаційно – комунікаційних технологій, м. Київ, Україна. Провідний науковий співробітник Державного науково – дослідного інституту Міністерства внутрішніх справ України, м. Київ, Україна.
	Fesenko M.	Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Artificial Intelligence of the State University of Information and Communication Technologies, Kyiv, Ukraine. Leading researcher of the State Research Institute of the Ministry of Internal Affairs of Ukraine, Kyiv, Ukraine.
19.	Черних Олександр Сергійович	Аспірант, адвокат Державної установи «Інститут економіко-правових досліджень імені В. К. Макутова Національної академії наук України», м. Київ, Україна.
	Chernykh O.	Postgraduate, State institution "V.K. Mamutov Institute of Economic and Legal Research of the National Academy of Sciences of Ukraine" (Kyiv), advocate.
20.	Шевченко Віктор Леонідович	Доктор технічних наук, заступник директора з наукової роботи Інституту програмних систем Національної академії наук України, м. Київ, Україна.
	Shevchenko V.	Doctor of technical sciences, deputy director for scientific work, Institute of Software Systems of the National Academy of Sciences of Ukraine, Ukraine.

21.	Юхимець Світлана Юріївна	Кандидатка педагогічних наук, доцентка кафедри філології навчально – наукового морського гуманітарного інституту Одеського національного морського університету, м. Одеса, Україна.
	Yukhymets S.	PhD, Assistant Professor, Assistant Professor Philology Department, Odesa National Maritime University, Ukraine.
22.	Яценко Олена Анатоліївна	Кандидатка фізико-математичних наук, старша наукова співробітниця Інституту програмних систем Національної академії наук України, м. Київ, Україна.
	Yatsenko O.	Ph.D., senior researcher, Institute of Software Systems of the National Academy of Sciences of Ukraine, Ukraine.

AUTHOR'S INDEX - АВТОРСЬКИЙ ПОКАЖЧИК

	Стор.		Pg.
А		A	
Ашур І. З.	66	Achour I.	66
В		V	
Вітюк А. Є.	56	Vitiuk A.	56
Д		D	
Дорошенко А. Ю.	56, 66	Doroshenko A.	56, 66
З		Z	
Зінченко О. В.	77	Zinchenko O.	77
К		K	
Калюжняк А. В.	88	Kaliuzhniak A.	88
Кисіль Т. М.	77	Kysil T.	77
Ковалевська О. С.	94	Kovalevska O.	94
Ковалевський С. В.	94	Kovalevskyy S.	94
Коляса О. В.	33	Koliasa O.	33
Кунічік О. В.	42	Kunichik O.	42
М		M	
Матвійчук М. В.	107	Matviichuk M.	107
Москаленко Н. В.	77	Moskalenko N.	77
Н		N	
Никоненко А. О.	10	Nykonenko A.	10
П		P	
Пашко С. В.	16	Pashko S.	16
С		S	
Сидюк Д. М.	94	Sidyuk D.	94
Сініцин І. П.	16, 66	Sinitsyn I.	16, 66
Т		T	
Терещенко В. М.	42	Tereshchenko V.	42
Ф		F	
Фесенко М. А.	77	Fesenko M.	77
Ч		Ch	
Черних О. С.	27	Chernykh O.	27
Ш		Sh	
Шевченко В. Л.	66	Shevchenko V.	66
Ю		Yu.	
Юхимець С. Ю.	33	Yukhymets S.	33
Я		Y	
Яценко О. А.	66	Yatsenko O.	66

A NOTE TO AUTHORS

«Shtuchnyi Intelekt» («Artificial Intelligence») is a scientific periodical publication recommended by the Ministry of Education and Science of Ukraine intended to publish the main results of scientific research in the fields of «Physical and Mathematical Sciences» and «Technical Sciences» in order to cover new scientific and practical results not previously published in the free press.

Manuscripts submitted for consideration may only concern the following areas:

- conceptual and theoretical problems of artificial intelligence and modelling;
- biocybernetic and physical foundations of intelligence;
- intelligent technologies in communication systems;
- intelligent learning systems;
- natural language processing systems;
- visual object recognition and perception systems;
- software and hardware tools of intelligent systems;
- intelligent decision technologies;
- theory and means of computational intelligence;
- applied intelligent technologies and systems;
- conferences, discussions.

Languages: English, Ukrainian. Papers are published twice a year in the original language. It is preferable to submit articles written in English.

Manuscripts should be carefully edited and formatted in accordance with the requirements (URL: <http://jai.in.ua/images/pdf/SampleArticleUA.pdf>):

- number of pages: 10-15 pages in length, including figures, tables, graphs, bibliographic sources and UDC index;
- last name, first name, patronymic of the author(s), title of the article, name and address of the institution in English if the article is written in Ukrainian the information should be provided in Ukrainian as well;
- annotation (a brief note on the obtained results) should contain 1800 characters in English (if the article is written in Ukrainian, the annotation should be written in Ukrainian as well);
- keywords: 6-8 words (phrases) in English (if the article is written in Ukrainian, the keywords should be provided in Ukrainian as well);
- ORCID identifier;
- bibliography (should include at least 15 sources) is the list of sources that should be alphabetized and placed at the end of the paper (text references should be indicated by Arabic numerals in square brackets) in the original language;
- reference list should be formatted in accordance with the APA guidelines; APA format example is available at: <http://liu.cwp.libguides.com/citapa>;
- article citations should include the digital object identifier (DOI) (You can look for a DOI using the website: www.crossref.org);
- transliterated bibliography (if the article is written in Ukrainian) is completely identical to the one in Ukrainian; the text is converted to Latin script; English references should not be transliterated (it is recommended to use automatic transliteration: <http://translit.net>);
- the article should be formatted in Microsoft Word (font Times New Roman, size 12 pt, line spacing 1.5 pt, indentation 1 cm), UDC, title - 14 pt, annotation and keywords - 10 pt, text - 12 pt, subheadings - 12 pt, page margins - 2 cm; formulas, as well as individual formula elements in Microsoft Equation Editor 3.0; tables, figures and graphs are arranged in the order as they were mentioned in the text; black and white pictures should be grouped;
- author(s) should provide two separate signed copies of the manuscript (single-sided printing, A4 paper size) according to the template (article template is available at: <http://www.ipai.net.ua>).

For submission:

- paper manuscript (two copies) is to be sent on publication e-mail (see webcontent of “Contacts” publication);
- cover letter from the organization (recommendation for publication) on the official letterhead of the organization;
- opinion of the article performed by an expert in the corresponding field;
- a letter to the editor with the request to publish the article;
- information about the author(s): Last name, first name, patronymic, academic rank and degree, ORCID, place of work (education) and position, address of the organization, place of residence of the author, telephone number, e-mail, etc.;
- license agreement authorizing the use of the work signed by the author (sample license agreement is available at: <http://jai.in.ua/images/pdf/LicDogovirUA2.pdf>);
- under the terms of a Creative Commons «Attribution-NonCommercial-NoDerivs» License, the founder of the journal («Licensor») grants a worldwide, royalty-free, non-exclusive, irrevocable license with no right to sublicense to use works in accordance with federal laws on free use for various needs (personal use, printing, downloading, quotations, etc.). In Ukraine users have the right to freely use the work, in accordance with Articles 21-25 of the Law of Ukraine «On Copyright and Related Rights», users have no right to distribute derivative works. Users must indicate the authorship by including the full URL for the website.

Author-Editor Collaboration:

- papers can be sent via e-mail (e-mail is available at the website of the periodical), directly through the website of the periodical, as well as through the post office («Ukrposhta» and «Nova Poshta»);
- all papers should be reviewed; the final decision on publication rests with the editorial board. If the manuscript is rejected, one copy is returned to the author(s) (review method is available at: <http://jai.in.ua/index.php/redaktsiina-kolehiia?id=29>);
- the manuscript not conforming to the submission guidelines will not be registered and considered for publication, but immediately returned to the author(s) for revision;
- the author(s) of the article enter into an agreement with the editorial office and pay for printing (see the publication's web content: "Publication Regulations"), receive a paper copy of the publication number in which their article is printed and an electronic copy of the article.

ДО УВАГИ АВТОРІВ

Журнал «Штучний інтелект» («Artificial Intelligence») є періодичним науковим виданням, рекомендованим МОН України для опублікування основних результатів наукових досліджень за галузями «Фізико-математичні науки» та «Технічні науки» з метою висвітлення отриманих нових наукових і практичних результатів, що не публікувалися раніше у відкритій пресі.

До розгляду приймаються рукописи за науковими напрямками:

- концептуально-теоретичні проблеми штучного інтелекту і моделювання;
- біоінформатичні та фізичні основи інтелекту;
- інтелектуальні технології в комунікаційних системах;
- інтелектуальні системи навчання;
- природномовні системи;
- системи розпізнавання і сприйняття образів;
- програмно-технічні засоби інтелектуальних систем;
- інтелектуальні технології прийняття рішень;
- теорія та засоби обчислювального інтелекту;
- прикладні інтелектуальні технології та системи;
- конференції, дискусії.

Робочі мови: англійська, українська. Статті публікуються 2 рази на рік мовою оригіналу. Бажаємо надсилати статті англійською мовою.

Рукописи мають бути ретельно відредаговані й оформлені згідно з вимогами

(вебресурс наукового видання «Штучний інтелект»: <http://jai.in.ua/index.php/інформація-для-авторів?f=46>):

- обсяг статті 10-15 сторінок, включаючи рисунки, таблиці, графіки, бібліографічний опис джерел та індекс УДК;
- прізвище, ім'я, по-батькові автора (-ів), назва статті, назва та адреса установи англійською мовою у разі україномовної статті дублюється українською мовою;
- анотація (коротка інформація про отримані результати) має налічувати 1800 друкованих знаків з пробілами англійською мовою (у разі україномовної статті дублюється українською мовою);
- ключові слова: 6–8 слів (словосполучень) англійською мовою (у разі україномовної статті дублюється українською мовою);
- ORCID кожного з авторів статті;
- опис бібліографічних джерел надається загальним списком наприкінці статті у алфавітному порядку мовою оригіналу (посилання у тексті позначаються арабськими цифрами у квадратних дужках);
- перелік посилань надається згідно з вимогами APA (American Psychological Association), зразки оформлення за форматом APA дивіться на сторінці «Інформація для авторів» вебконтенту видання;
- до посилання в бібліографічному описі обов'язково надається ідентифікатор DOI (ідентифікатор можна перевірити за посиланням www.crossref.org);
- транслітеровані опис джерел (у разі україномовної статті) є повним аналогом бібліографічного опису українською мовою і виконується латиницею, посилання на англійські джерела не транслітеруються (рекомендується використовувати автоматичні засоби транслітерації (<http://translit.net>));
- стаття має бути підготовлена за допомогою текстового редактора Microsoft Word (шрифт Times New Roman, кегль 12 пт, інтервал 1,0 пт, відступ 1 см), УДК, назва статті - 14 пт, анотація та ключові слова - 10 пт, підзаголовки - 12 пт, параметри полів сторінки - всі по 2 см; формули, а також окремі елементи формул в Microsoft Equation Editor 3.0; таблиці, рисунки та графіки розташовуються у порядку згадування в тексті; рисунки – згруповані (у вигляді одного цілого), у чорно-білому варіанті;
- рукопис підписаний автором (-ами), у двох примірниках (однобічний друк) на папері формату А4, відповідно до шаблону (шаблон статті розміщується у вебконтенті видання: <http://www.ipai.net.ua>).

До редакції подаються:

- рукопис у паперовому варіанті (2 шт.) та надсилається на e-mail видання (див. вебконтент видання «Контакти»);
- супровідний лист від організації (рекомендація до публікації) на офіційному бланку організації;
- рецензія фахівця з тематики, яка розглядається у запропонованій статті;
- заява авторів на опублікування статті;
- відомості про автора (-ів): прізвище, ім'я, по-батькові, науковий ступінь та звання, ORCID, місце роботи (навчання) і посада, адреса організації, телефон, адреса електронної пошти та ін. (надається укр. та англ. мовами);
- ліцензійна угода на використання твору, підписана автором (зразок ліцензійної угоди: <http://jai.in.ua/images/pdf/LicDogovirUA2.pdf>);
- засновник журналу (ліцензіар), у відповідності з умовами ліцензії Creative Commons “Attribution-NonCommercial-NoDerivs” надає користувачам безоплатну ліцензію на використання творів, відповідно до національного законодавства країни щодо вільного використання творів для власних потреб (читати, друкувати, завантажувати, цитувати тощо). В Україні користувачі мають право здійснювати вільне використання твору, відповідно до статей 21 – 25 Закону України «Про авторське право і суміжні права». Користувачі не мають право розповсюджувати похідні твори, використовуючи твір, вони мають вказати його авторство шляхом розміщення посилання на відповідний матеріал.

Робота редакції з авторами:

- матеріали можуть бути надіслані електронною поштою, а також з використанням послуг відділень «Укрпошта» та «Нова пошта» (e-mail та адресу вказано у вебсторінці видання «Контакти»);
- всі статті проходять рецензування, остаточне рішення про публікацію приймає редакційна колегія, у разі відхилення рукопису, один примірник повертається автору (-ам), методика рецензування: <http://jai.in.ua/index.php/redaktsiina-kolehiia?id=29>;
- рукопис, оформлений з порушенням зазначених правил, не реєструється та не розглядається, а одразу повертається автору (-ам) для доопрацювання;
- автор (и) статті укладають угоду з редакцією та здійснюють оплату щодо друку (див. вебконтент видання: «Положення про видання»), одержують паперовий примірник номеру видання, в якому надруковано їх статтю та електронну копію статті.

CONTENT / ЗМІСТ

International editorial board. Міжнародна редакційна колегія.....	1
<u>Chapter 1. Conceptual and theoretical problems of artificial intelligence and modeling.</u> <u>Розділ 1. Концептуально-теоретичні проблеми штучного інтелекту і моделювання</u>	9
Nykonenko A. The impact of artificial intelligence on modern education: prospects and challenges. Никоненко А. О. Вплив штучного інтелекту на сучасну освіту: перспективи та виклики	10
Pashko S., Sinitsyn I. Optimal solutions in systems consisting of rational agents. Пашко С. В., Сініцин І. П. Оптимальні рішення в системах, що складаються з раціональних агентів	16
Chernykh O. Problems of legal regulation of the use of artificial intelligence technologies in court procedures within the framework of the ukraine-eu action plan. Черних О. С. Проблеми правового регулювання використання технологій штучного інтелекту в судових процедурах в рамках виконання плану дій Україна-ЄС	27
<u>Chapter 2. Intelligent learning systems.</u> <u>Розділ 2. Інтелектуальні системи навчання</u>	32
Yukhymets S., Koliasa O. Training of translators and implementation of ai in the educational process: challenges and prospects. Юхимець С.Ю., Коляса О.В. Підготовка перекладачів та впровадження штучного інтелекту в навчальний процес: виклики та перспективи	33
<u>Chapter 3. Pattern recognition and perception systems.</u> <u>Розділ 3. Системи розпізнавання і сприйняття образів</u>	41
Kunichik O., Tereshchenko V. Improving the accuracy of landmine detection using data augmentation: a comprehensive study. Кунічик О., Терещенко В. Підвищення точності виявлення наземних мін за допомогою аугментації даних: комплексне дослідження	42
<u>Chapter 4. Hardware and software of intelligent systems.</u> <u>Розділ 4. Програмно-технічні засоби інтелектуальних систем</u>	55
Vitiuk A., Doroshenko A. Use of neuroevolution for neural network policies search for robotic arm. Вітюк А.Є., Дорошенко А.Ю. Використання нейроеволюції при пошуку політик в формі нейромереж для управління робочою кінцівкою	56
<u>Chapter 5. Computational intelligence: theory and tools.</u> <u>Розділ 5. Теорія та засоби обчислювального інтелекту</u>	65
Doroshenko A., Sinitsyn I., Shevchenko V., Yatsenko O., Achour I.	

Integration of the methods of algebra of algorithms and computational intelligence for automation of program systems design. Дорошенко А.Ю., Сініцин І.П., Шевченко В.Л., Яценко О.А., Ашур І.З. Інтеграція методів алгебри алгоритмів та обчислювального інтелекту для автоматизації проектування програмних систем	66
Chapter 6. Applied intelligent technologies and systems. Розділ 6. Прикладні інтелектуальні технології та системи	76
Zinchenko O., Fesenko M., Kysil T., Moskalenko N. Global experience in the application of intelligent systems and technologies in the military sphere. Зінченко О.В., Фесенко М.А., Кисіль Т.М., Москаленко Н.В. Світовий досвід застосування інтелектуальних систем і технологій у військовій сфері	77
Kaliuzhniak A. Artificial intelligence application in the forecasting of economic model. Калюжняк А.В. Застосування штучного інтелекту в прогнозуванні економічної моделі	88
Kovalevskyy S., Kovalevska O., Sidyuk D. Resonance diagnostics of production space of generative systems of artificial intelligence. Ковалевський С.В., Ковалевська О.С., Сидюк Д.М. Резонансна діагностика виробничого простору генеративних систем штучного інтелекту	94
Matviichuk M. Optimization of effluents using a neural network in the treatment of industrial wastewater. Матвійчук М.В. Оптимізація стоків з використанням нейронної мережі при очищенні промислових стічних вод	107
Authors. Автори	121
Author's index. Авторський покажчик	124
Information for authors. До уваги авторів	125