

## **АВІАЦІЙНА ТА РАКЕТНО-КОСМІЧНА ТЕХНІКА**

УДК 629.7.01

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.2-1/06>

**Бойко С.М.**

Криворізький національний університет

**Олійник Ю.Л.**

Кременчуцький льотний коледж  
Харківського національного університету внутрішніх справ

**Журід В.І.**

Кременчуцький льотний коледж  
Харківського національного університету внутрішніх справ

**Ємець В.В.**

Кременчуцький льотний коледж  
Харківського національного університету внутрішніх справ

**Москалик В.М.**

Кременчуцький льотний коледж  
Харківського національного університету внутрішніх справ

**Гусарова О.В.**

Кременчуцький льотний коледж  
Харківського національного університету внутрішніх справ

### **АСПЕКТИ ВИКОРИСТАННЯ ШТУЧНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ У СУЧАСНИХ ТРЕНАЖЕРНИХ СИСТЕМАХ «ЕКІПАЖ-ВЕРТОЛІТ-СЕРЕДОВИЩЕ»**

*Авіаційний транспорт позитивно впливає на розвиток туристичного бізнесу та міжнародної торгівлі. Сьогодні більше 52% міжнародних туристичних подорожей здійснюються саме повітряним транспортом. Розвинена авіаційна галузь сприяє підвищенню інвестиційної привабливості країни і розширенню можливостей для діяльності на її території міжнародних компаній. Авіаційний транспорт також забезпечує надзвичайно швидку доставку цінних та швидкопсувних товарів до місця призначення, чим зумовлюється його широке використання великими провідними міжнародними логістичними компаніями. В рамках Авіаційної стратегії мають бути вирішені, серед інших, завдання за такими основними напрямками: підвищення рівня безпеки авіаційного транспорту, розвиток аеронавігаційної системи, професійна підготовка кадрів, науково-дослідна робота. Причина виникнення особливої ситуації зазвичай пов'язана з порушенням або невиконанням вимог нормативних документів, що регламентують льотну роботу. Однак безпосередня причина події в більшості авіаційних пригод зумовлена помилковими діями екіпажу в процесі розвитку особливої ситуації. З цього можна зробити висновок, що видаються рекомендації, спрямовані в основному на підвищення рівня професійної підготовки льотного складу, не досягають мети, оскільки орієнтуються на недосконалі методи підготовки пілотів вертольотів і слабку тренажерну базу. Тому є необхідним та актуальним питання покращення тренажерної бази для підготовки та підвищення кваліфікації пілотів вертольотів. Між тим, режими роботи авіаційних тренажерів, а особливо тренажерних систем «екіпаж-вертоліт-середовище», мають дуже складну і розгалужену структуру, а технологічні процеси дуже складні і залежать від багатьох факторів. Запропоновано використання штучних нейронних мереж у сучасних тренажерних системах «екіпаж-вертоліт-середовище».*

**Ключові слова:** нейронні мережі, тренажерні системи, підготовка пілотів, безпека польотів, людський фактор.

**Постановка проблеми.** Значення авіаційного транспорту в світовій економіці постійно зростає, чому сприяє як технологічний розвиток і новітні розробки в авіаційній галузі, так і глобалізація і все тісніші ділові та культурні зв'язки між різними країнами світу [1].

Авіаційний транспорт позитивно впливає на розвиток туристичного бізнесу та міжнародної торгівлі. Сьогодні більше 52% міжнародних туристичних подорожей здійснюються саме повітряним транспортом. Розвинена авіаційна галузь сприяє підвищенню інвестиційної привабливості країни і розширенню можливостей для діяльності на її території міжнародних компаній. Авіаційний транспорт також забезпечує надзвичайно швидко доставку цінних та швидкопсувних товарів до місця призначення, чим зумовлюється його широке використання великими провідними міжнародними логістичними компаніями.

Регулярні польоти між Україною та країнами світу здійснюють 10 вітчизняних авіакомпаній до 42 країн світу та 28 іноземних авіакомпаній до 27 країн світу. Регулярні внутрішні пасажирські перевезення між 9 містами України виконують 5 вітчизняних авіакомпаній [1].

Перевезення вантажів та пошти виконують 18 вітчизняних авіакомпаній, більша частина перевезень – це перевезення чартерними рейсами в інших державах в рамках гуманітарних та миротворчих програм ООН, а також згідно з контрактами та угодами з іншими замовниками.

Державне підприємство обслуговування повітряного руху обслуговує більше 200 тис. польотів. При цьому кількість польотів, виконаних літаками та вертольотами авіакомпаній України, збільшується, а іноземними авіакомпаніями – скорочується [1].

Реалізація Авіаційної стратегії сприяє наближенню України до ЄС, поступовій інтеграції України у внутрішній європейський ринок ЄС та спільному авіаційному простору [1].

У рамках Авіаційної стратегії мають бути вирішені, серед інших, завдання за такими основними напрямками: підвищення рівня безпеки авіаційного транспорту, розвиток аеронавігаційної системи, професійна підготовка кадрів, науково-дослідна робота.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Створення нових систем «людина-вертоліт-середовище», як показано в цілому ряді вітчизняних і зарубіжних досліджень, пов'язане з винахідницькою діяльністю і ергономічними технологіями

для досягнення поставленої мети в конкретних умовах середовища [1–7].

Дослідження показали, що використання подвійних, а тим більше потрійних джерел різнокодової інформації призводить до роздвоєння предмета трудової діяльності, ускладнення процесу переробки інформації та прийняття рішення людиною-оператором [7–9].

Як свідчать численні дослідження, причиною багатьох труднощів в складних системах, в тому числі і авіаційних, є неузгодженість технічних характеристик засобів праці з характеристиками людини [1–11].

**Постановка завдання.** Метою дослідження є обґрунтування необхідності впровадження штучних нейронних мереж під час побудови та модернізації сучасних тренажерних систем «екіпаж-вертоліт-середовище».

**Виклад основного матеріалу.** За даними Міжнародної групи з безпеки польотів вертольотів (IHST), простежується тенденція підвищення рівнів безпеки польотів гелікоптерів: зменшується як кількість авіаційних подій, так і число пригод з людськими жертвами [2].

Дослідження показують, що авіаційні події з вертольотами відрізняються високою ймовірністю загибелі людей – 47%.

Більшість авіаційних подій з вертольотами за останні 5 років відбувалося під час виконання транспортно-зв'язкових польотів – найбільш поширеного виду польотів гелікоптерів [3].

Серед факторів, що впливають на катастрофи, виділяють помилки наземного персоналу – 18,3%, і помилки екіпажу – 65%, при цьому переважна кількість авіаційних подій (65%), пов'язаних з помилками екіпажу, зумовлена трьома логічно пов'язаними групами причин: неправильні оцінки під час пілотування і навігації – 7%; неправильні рішення – 41%; неправильні дії під час пілотування і навігації – 29% [4].

Аналіз показав, що основними причинами авіаційних подій, пов'язаних з помилками екіпажу, є недостатній рівень підготовки екіпажу, допущення зайвої самовпевненості, що в результаті стає причиною розвитку факторів неправильної оцінки під час пілотування і навігації.

Причина виникнення особливої ситуації зазвичай пов'язана з порушенням або невиконанням вимог нормативних документів, що регламентують льотну роботу. Однак безпосередня причина події в більшості авіаційних пригод зумовлена помилковими діями екіпажу в процесі розвитку особливої ситуації [5].

З цього можна зробити висновок, що видаються рекомендації, спрямовані в основному на підвищення рівня професійної підготовки льотного складу, не досягають мети, оскільки орієнтуються на недосконалі методи підготовки пілотів вертольотів і слабку тренажерну базу.

Тому є необхідним та актуальним питання покращення тренажерної бази для підготовки та підвищення кваліфікації пілотів вертольотів.

Між тим, режими роботи авіаційних тренажерів, а особливо тренажерних систем «екіпаж-вертоліт-середовище», мають дуже складну і розгалужену структуру, а технологічні процеси дуже складні і залежать від багатьох факторів. Зокрема, прогнозування є важкою і складною задачею, оскільки похибка прогнозу не може перевищувати 4%. Тому в умовах тренажерних систем доцільно використання для одержання прогнозу та імітування різних режимів роботи штучних нейронних мереж (ШНМ), які передбачають наявність суттєвих зв'язків між окремими факторами.

Найпростіша ШНМ складається з певної кількості ШНМ, які об'єднують у групи, які утворюють шари, нейрони яких ваговими зв'язками з'єднуються із вхідними сигналами від інших нейронів, попередніх шарів.

В результаті перетворень вхідних сигналів у нейронах певних слоїв на виході із ШНМ одержують сигнал OUT [8].

Вагові коефіцієнти можна записати у вигляді матриці, яка має  $m$  рядків та  $n$  стовпчиків:

$$W = \begin{pmatrix} \omega_{11} & \omega_{12} & \dots & \omega_{1n} \\ \omega_{21} & \omega_{22} & \dots & \omega_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \omega_{m1} & \omega_{m2} & \dots & \omega_{mn} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

де  $m$  – кількість входів,  $n$  – кількість нейронів ШНМ.

Тоді вихідний вектор  $\vec{B}$ , елементами якого є виходи сигналів OUT із вихідних нейронів, обчислюють як матричний добуток матриці-рядка  $\vec{X}$ -вихідних елементів на матрицю  $\vec{W}$  вагових коефіцієнтів:

$$\vec{B} = \vec{X}\vec{W}, \quad (2)$$

де  $\vec{B}$  – вектор-рядок.

Якщо потрібний вихід із  $i$ -го нейрона позначити  $y_i$ , а реальний вихід із  $i$ -го нейрона позначити  $\hat{y}_i$ , тоді похибку для  $k$ -го зразка можна обчислити за формулою:

$$\Delta E_k = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2, \quad i = \overline{1, n}. \quad (3)$$

Тоді загальна похибка для всієї виборки:

$$\Delta E_{\Sigma} = \sum_{k=1}^n E_k, \quad k = \overline{1, m}. \quad (4)$$

Комбінований (сумарний) вхід до даного нейрона визначає його збудженість (активність), тобто сумарне значення вагових зв'язків, які впливають на цей нейрон, визначає реальний стан нейрона [9].

Для одного зразка, за лінійної функції активації сигналу у нейроні, похибку можна визначити за формулою:

$$E = \frac{1}{2} (y_i - \hat{y})^2 = \frac{1}{2} (y_i - NET)^2. \quad (5)$$

Перетворивши цей вираз, одержимо:

$$E = 0,5(y_i^2 - 2y_i\hat{y} + \hat{y}^2) = 0,5[y_i^2 - 2y_i(NET) + (NET)^2].$$

Оскільки  $\hat{y} = (NET) = (x_1\omega_1 + x_2\omega_2)$  для двох вагових зв'язків, тоді

$$\begin{aligned} E &= 0,5[y_i^2 - 2y_i(x_1\omega_1 + x_2\omega_2) + (x_1\omega_1 + x_2\omega_2)^2] = \\ &= 0,5[y_i^2 - 2y_ix_1\omega_1 - 2y_ix_2\omega_2 + (x_1\omega_1)^2 + 2x_1\omega_1x_2\omega_2 + (x_2\omega_2)^2] = \\ &= 0,5[y_i^2 - 2y_ix_1\omega_1 - 2y_ix_2\omega_2 + x_1^2\omega_1^2 + 2x_1\omega_1x_2\omega_2 + x_2^2\omega_2^2]. \end{aligned}$$

Знайдемо залежність похибки  $E$  від  $\omega_1$ .

$$\begin{aligned} E(\omega_1) &= 0,5[x_1^2\omega_1^2 + (2x_1x_2\omega_2 - 2y_ix_1)\omega_1 + (y_i - 2y_ix_2\omega_2 + \omega_2^2x_2^2)] = \\ &= 0,5x_1^2\omega_1^2 + (x_1x_2\omega_2 - y_ix_1)\omega_1 + (0,5y_i - y_ix_2\omega_2 + 0,5\omega_2^2x_2^2). \end{aligned}$$

Позначивши  $0,5x_1^2 = a$ ,  $x_1x_2\omega_2 - y_ix_1 = b$ ,  $0,5y_i - y_ix_2\omega_2 + 0,5\omega_2^2x_2^2 = c$ , отримуємо:

$$E(\omega_1) = a\omega_1^2 + b\omega_1 + c. \quad (6)$$

Тобто залежність похибки  $E$  від  $\omega_1$  є параболічною, аналогічно залежність похибки  $E$  від  $\omega_2$  також буде параболічною. Оскільки  $a = 0,5x_1^2 > 0$ , то вітки параболи направлені вгору (в додатному напрямку вісі  $E$ ). А це означає, що графік залежності  $E(\omega_1)$  має локальний мінімум, який співпадає із вершиною параболи, яка є графіком залежності  $E(\omega_1)$  [10].

Оскільки вагові коефіцієнти на початковому етапі навчання ШНМ набирають деяких випадкових значень, точка, що характеризує початкове положення ШНМ у площині  $E, \omega_1$  може бути у довільному місці і мало ймовірно, що буде знаходитись в точці локального мінімуму.

Для корегування вагових коефіцієнтів можна застосувати правило Відроу-Хоффа або дельта-правило, яке в загальному вигляді має такий математичний запис:

$$\Delta \omega_{ij} = \eta \delta_j x_i, \quad i = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, m}, \quad (7)$$

де  $\delta_j = y_j - \hat{y}_j$  – потрібний вихід із нейтрона  $j$ , а  $y_j$  – фактичний (реальний) вихід із  $j$ -нейтрона,

$x_i$  – сигнал, який прийшов від  $i$ -нейтрона,  $\eta$  – коефіцієнт зміни вагових коефіцієнтів (норма навчання),  $\Delta\omega_{ij}$  – величина зміни вагового коефіцієнта зв'язку між  $i$  та  $j$  нейтроном.

В загальному вигляді дельта правило можна записати у вигляді:

$$\Delta\omega_{ij} = \eta\delta_j x_i = \eta(y_j - \hat{y}_j)x_i = \eta(y_j - \sum_{j=1}^m x_i\omega_{ij})x_i, \quad i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}. \quad (8)$$

Швидкість зміни похибки  $\frac{\partial E}{\partial \hat{y}_j}$  відносно зміни реального виходу із  $j$ -нейтрона чисельно рівна:

$$\frac{\partial E}{\partial \hat{y}_j} = \hat{y}_j - y_j = -\delta_j, \quad j = \overline{1, m}, \quad (9)$$

а швидкість зміни виходу  $\hat{y}_j$  із  $j$ -нейтрона від зміни вагових коефіцієнтів  $\Delta\omega_{ij}$  можна записати у вигляді:

$$\frac{\partial \hat{y}_j}{\partial \omega_{ij}} = x_i, \quad i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}. \quad (10)$$

Тоді швидкість зміни похибки від зміни вагових коефіцієнтів можна записати:

$$\frac{\partial E}{\partial \omega_{ij}} = \frac{\partial E}{\partial \hat{y}_j} \frac{\partial \hat{y}_j}{\partial \omega_{ij}}, \quad i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}, \quad (11)$$

$$-\frac{\partial E}{\partial \omega_{ij}} = -\delta_j x_i, \quad i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}, \quad (12)$$

$$\frac{\partial E}{\partial \omega_{ij}} = \delta_j x_i, \quad i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}, \quad (13)$$

де  $\frac{\partial E}{\partial \omega_{ij}}$  – похідна по поверхні похибок залежно від зміни вагових коефіцієнтів.

Розглянемо реакцію скритих нейронів на вхід і вихід із вихідного шару ШНМ на вхідні дані для НМ із двома вхідними, двома скритими і одним нейроном вихідного шару за використання порогової функції із числовим значенням порогу  $T=0,4$  при зміщеннях  $\Theta_{1(1)}=1,2$  для одного нейрона,  $\Theta_{2(1)}=0,8$  – для другого нейрона прихованого шару,  $\Theta_{1(2)}=-0,2$  – для вихідного шару; із матри-

цями вихідних коефіцієнтів  $W_1 = \begin{pmatrix} 1,2 & 0,8 \\ -0,5 & -0,5 \end{pmatrix}$  – для прихованого шару,  $W_2 = \begin{pmatrix} -0,2 \\ 0,7 \\ -0,3 \end{pmatrix}$  – для вихідного шару, якщо на нейрони входу будуть подавати сигнали  $x_1$  та  $x_2$ , напрямки яких утворюють наступний кортеж:

$$\{(1;1), (1;0), (0;1), (0;0)\}$$

Вхідні значення зразків перетворюються під дією вагових коефіцієнтів матриці  $W_1$  та зміщень  $\Theta_1$  та  $\Theta_2$  у суміруючому блоці нейронів прихованого шару, а після активації пороговою функцією у блоці активації (БА) нейронів прихованого шару одержуємо числові значення виходів із нейронів прихованого шару  $NET_1$  та  $NET_2$ . Потім у нейроні вихідного шару під дією вагових коефіцієнтів матриці  $W_2$  та зміщення  $\Theta_3$  та активації пороговою функцією у БА вихідного нейрона одержуємо вихідне числове значення OUT для кожного зразка вхідних сигналів  $x_1, x_2$ .

Під час застосування алгоритму зворотного поширення в процесі навчання ШНМ мінімізує похибку на навчальній множині, а не ту похибку, яку одержали від ШНМ під час обробки абсолютно нових спостережень. ШНМ із великою кількістю вагових коефіцієнтів можуть розв'язувати більш складні задачі, водночас вони більш схильні до перенавчання, а із такою кількістю вагових коефіцієнтів ШНМ недостатньо гнучкі, щоб розв'язувати певні типи задач. ШНМ без проміжних слоїв можуть розв'язувати (моделювати) лише задачі із звичайного лінійною залежністю. Водночас ШНМ із більш складною структурою дають на виході похибку, але це може бути переваженням мережі, запобігти якого можливо у разі застосування механізму контрольної перевірки (крос-перевірки) резервування частини навчаючих спостережень з метою невикористання їх у процесі навчання. Важливим показником якості роботи ШНМ є контрольна похибка. За майже однакових значень контрольних похибок необхідно вибирати ШНМ із більш простою моделлю. У разі багаторазових експериментів над ШНМ контрольна помилка є визначальною під час вибору моделі майбутньої ШНМ. З метою підтвердження правильного вибору моделі її тестують на тестовій множині спостережень, яке використовується лише один раз. Тобто всі стани навчання на алгоритму зворотного поширення передбачають використання таких множин: 1) навчальна; 2) контрольна; 3) тестова, які повинні бути репрезентативними із точки зору змісту задачі, а також окремо взяті ці множини повинні бути репрезентативними. Якщо навчальна множина не репрезентативна, то модель ШНМ буде неякісною, або й зовсім (непотрібною) не придатною для розв'язання задач [11].

Основні причини, які погіршують якість навчальної множини: 1) вибір історичних даних закономірність, в яких не мають місця у май-

бутньому розвитку процесу, тобто майбутнє не завжди схоже на минуле; 2) недостатній рівень врахування властивостей даних ШНМ (враховані не всі можливості нейромережі); 3) недостатньо глибоко проаналізовані вибрані всі можливі властивості об'єкта аналізу ШНМ (нейромережа навчається всьому тому, де простіше і швидше навчатись); 4) незбалансованість набору даних

навчальної множини, тобто нерівномірність підбору даних спостережень різних типів.

**Висновки.** У статті обґрунтовано необхідність покращення тренажерної бази для підготовки та підвищення кваліфікації пілотів вертольотів.

Запропоновано використання штучних нейронних мереж у сучасних тренажерних системах «екіпаж-вертоліт-середовище».

#### Список літератури:

1. Бабак В.П., Харченко В.П., Максимов В.О. та ін. Безпека авіації Київ, 2004. 584 с.
2. Офіційний сайт Міжнародної групи з безпеки польотів вертольотів (IHST). URL: <http://ihstf.aero/> (дата звернення: 02.04.2021).
3. Дергачев К.В., Кузьменко А.А., Спасенников В.В. Анализ взаимосвязи объекта и парадигмы исследования в эргономике с использованием информационных технологий. Москва, 2019. № 1 (03). С. 12–22.
4. Чунтул А.В. Человек в вертолете: психофизиология профессиональной деятельности экипажей современных и перспективных вертолетов. Москва, 2018. 320 с.
5. Эргономические технологии разработки и испытаний вертолетов «МИ» / Под ред. А.Г. Самусенко, Г.П. Ступакова, А.В. Чунтула. Москва, 2012. 288 с.
6. Meister D. The history of human factors and ergonomics NJ, 1999. 588 p.
7. Chuntul A.V., Lapa V.V., Davidov V.V. Spatial orientation of pilot using a cockpit exterior surveillance system. *Human psychology*. 2015. vol. 41, № 7, P. 728–731.
8. Jesse Russell Искусственная нейронная сеть. Москва, 2012. 200 с.
9. Jesse Russell Нейрон. М., 2012. 200 с.
10. Бунаков В.Е., Краснов Л.В. Нейронная физика. Учебное пособие: моногр. Москва, 2015. 200 с.
11. Татузов А.Л. Нейронные сети в задачах радиолокации. М., 2009. 432 с.

#### **Boiko S.M., Oliinyk Yu.L., Zhurid V.I., Yemets V.V., Moskalyk V.M., Husarova O.V. ASPECTS OF USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS IN MODERN TRAINING SYSTEMS “CREW-HELICOPTER-ENVIRONMENT”**

*Air transport has a positive impact on the development of tourism business and international trade. Today, more than 52% of international tourist travel is carried out by air. The developed aviation industry contributes to increasing the investment attractiveness of the country and expanding opportunities for international companies to operate in its territory. Air transport also provides extremely fast delivery of valuable and perishable goods to the destination, which is why it is widely used by large leading international logistics companies. Within the framework of the Aviation Strategy, tasks should be solved, among others, in the following main areas: improving the level of air transport safety, development of the air navigation system, professional training, research. The reason for the occurrence of a special situation, as a rule, is related to the violation or non-compliance with the requirements of regulations governing flight operations. However, the immediate cause of the accident in most aviation accidents is due to the erroneous actions of the crew in the development of a special situation. From this we can conclude that the issued recommendations, aimed mainly at improving the level of professional training of flight crew, do not achieve their goal, as they focus on imperfect methods of training helicopter pilots and a weak training base. Therefore, it is necessary and urgent to improve the training base for training and retraining of helicopter pilots. Meanwhile, the modes of operation of aircraft simulators, and especially training systems "crew-helicopter-environment", has a very complex and branched structure, and technological processes are very complex and depend on many factors, forecasting, which is a difficult and difficult task. The use of artificial neural networks in modern training systems "crew-helicopter-environment" is proposed.*

**Key words:** neural networks, training systems, pilot training, flight safety, human factor.