

## МЕТОДИ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ФІГУР ПІЛОТАЖУ МАНЕВРУЮЧИХ ЛІТАКІВ

*Наводиться порівняльний аналіз існуючих методів ідентифікації фігур пілотажу, вказуються недоліки та переваги. Пропонується використання сучасного математичного апарату для вирішення завдань цього класу.*

Загальновідомо, що практичній підготовці військових льотчиків завжди приділяється особлива увага, оскільки від її рівня безпосередньо залежать як результати виконання цільових завдань авіації, так і безпека людей і раціональна витрата ресурсів. Однак на сучасному етапі в умовах суттєвих матеріальних, технічних, фінансово-економічних обмежень у державі існує **проблема** якісної підготовки льотчиків при мінімальній кількості тренувальних польотів. У цих умовах виникає **завдання** більш ретельного контролю за діями пілотів при виконанні ними різноманітних маневрів, зокрема передбачених програмою бойової підготовки фігур пілотажу.

При цьому вагомим роль у виявленні відхилень і помилок, яких припустився льотчик у польоті з тих чи інших причин, відіграють засоби об'єктивного контролю (ЗОК). Однак реалізація цих можливостей у даний час стикається з необхідністю виконання трудомісткої роботи фахівцями високої кваліфікації. Тому під час тренувальних польотів аналіз матеріалів ЗОК зазвичай зводиться до виявлення відмов бортової апаратури та випадків виходу параметрів руху літального апарату за межі заданих допусків.

Використання існуючих програмних продуктів для автоматизованого аналізу польотної інформації дозволяє значно пришвидшити процес обробки, але такі системи забезпечують проведення лише експрес-аналізу, тому постає **актуальне завдання** щодо розширення спектра результатів, отриманих при обробці польотної інформації, наслідком якого має бути отримання відомостей як про факт виконання елементів польоту (фігур пілотажу), так і їх якісна оцінка.

Огляд **відомих публікацій** показав, що в теперішній час розв'язання задачі ідентифікації виконаних фігур пілотажу при наземній обробці запропоновані фахівцями Державного науково-випробувального центру (ДНВЦ) [1], Державного науково-дослідного інституту авіації (ДНДІА) та інших наукових організацій [2]. При цьому пропонуються різні підходи.

**Метою статті** є проведення порівняльного аналізу існуючих методів ідентифікації фігур пілотажу та подання пропозиції використання сучасного математичного апарату для усунення недоліків, притаманних існуючим методам.

У *першому випадку* (метод, запропонований фахівцями ДНВЦ) ідентифікація зводиться до перегляду фізичних параметрів польоту, одержаних при обробці даних ЗОК. Для розпізнавання більшості фігур пілотажу аналізуються характер зміни висоти літака  $H$  і кут його курсу  $\psi$ . При цьому для розпізнавання фігур пілотажу використовується низка певних ознак, наприклад:

- а)  $\Delta H > 0$  – траєкторія з набором висоти;

- б)  $\Delta H = 0$  – траєкторія з постійною висотою;  
 в)  $\Delta\psi = 0$  – траєкторія без зміни напрямку (курсу) польоту.  
 г)  $\Delta\psi > 0$  – траєкторія зі зміною напрямку польоту;  
 д)  $\Delta\psi = 180^\circ$  – траєкторія зі стрибкоподібною (миттєвою) зміною напрямку на протилежний.

Крім наведеного переліку ознак, можуть використовуватися додаткові ознаки: величина і характер зміни нормального перевантаження, кута атаки, тангажа та ін. Спрощений алгоритм розпізнавання виконаних фігур пілотажу за наведеними ознаками зображено на рис. 1 [1].

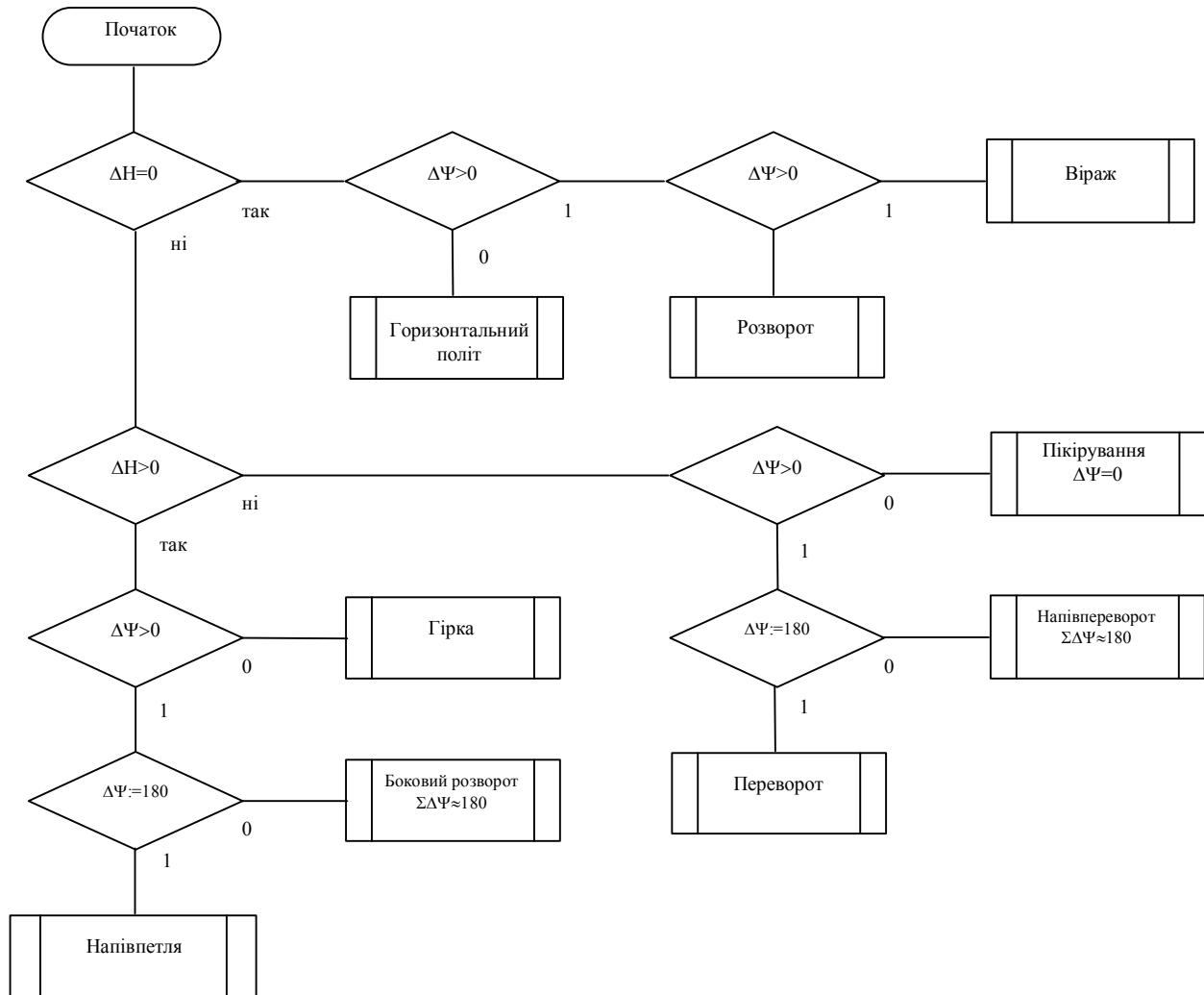


Рис. 1. Алгоритм розпізнавання етапів польоту і фігур пілотажу

Перевагами застосування цього методу є відносна простота алгоритмів та невеликий час обробки, що дозволяє використовувати його на борту літака. Недоліком є те, що під час реалізації алгоритмів, коли обробляється велика кількість еталонних файлів, необхідно вносити багато поправок. Це зумовлено необхідністю корегувати певні шаблони для кожної окремої фігури пілотажу, що збільшує час на розробку відповідних програм та сприяє внесенню суб'єктивних похибок в їх роботу.

У другому випадку (метод, запропонований фахівцями ДНДІА) використовуються еталонні зображення фігур пілотажу [2]. При цьому побудова самих еталонів

здійснюється шляхом застосування тригонометричної функції  $y = \sin x$  до значень кутів тангажа  $\vartheta$  і крену  $\gamma$  на фазовій площині  $O \sin \gamma \sin \vartheta$ .

Побудова таких еталонів здійснюється в такій послідовності:

а) для кожної визначеної фігури у фіксовані моменти часу  $t_i, i = \overline{1, I}$  знаходяться відповідні значення синусів крену  $\sin \gamma_n(t_i)$  і тангажа  $\sin \vartheta_n(t_i)$ ;

б) у прямокутній системі координат проставляються точки з координатами  $A(\sin \gamma \sin \vartheta)$ ;

в) процес триває до моменту закінчення виконання фігури або маневру.

Вигляд зображень деяких фігур пілотажу надано на рис. 2.



Рис. 2. Зображення кутів крену і тангажа при виконанні фігур пілотажу

Перевагою цього методу є те, що одержані зображення мають тільки індивідуальний стійкий вигляд для кожної фігури незалежно від варіацій їх виконання. Недоліком є те, що під час обробки необхідно застосовувати тригонометричні функції, а також додатково використовувати підпрограму обробки зображень, що в цілому збільшує час обробки. Тому для систем, в яких критичним є цей показник, застосовувати розглянутий метод недоцільно.

Третій варіант ідентифікації фігур пілотажу, запропонований фахівцями ДНВЦ, являє собою використання математичного апарату дискретних бінарних зображень [3]. У цьому випадку еталони фігур пілотажу надаються у вигляді графіка, розкладеного на три площини.

Наприклад, графічне зображення фігури пілотажу „віраж” (рух літака по колу в горизонтальній площині) можна розкласти на три площини  $OXY$ ,  $OYZ$  і  $OZX$ , як показано на рис. 3.

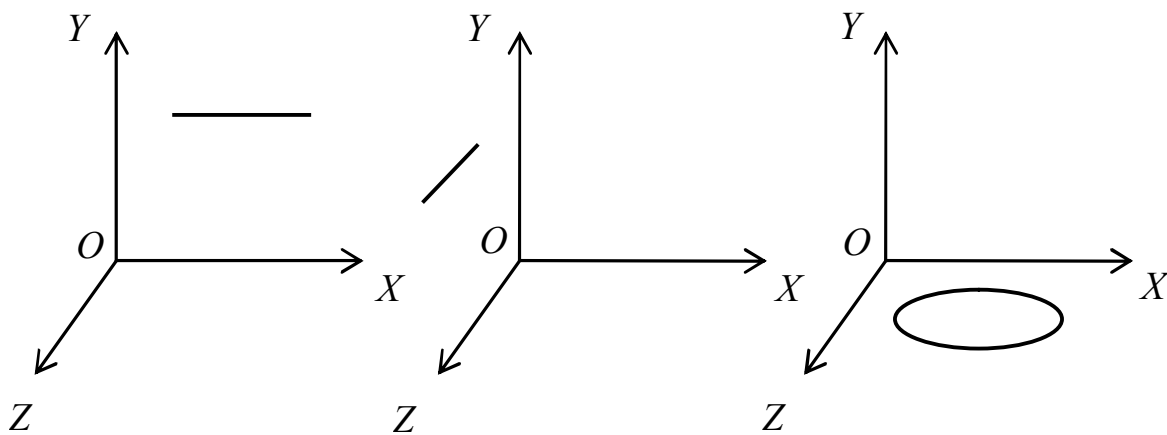


Рис. 3. Зображення віражу, розкладене на три площини

Відтворимо проекцію фігури на площині  $OXZ$  (рис. 4, а) у вигляді дискретного бінарного зображення (рис. 4, б), яке розглядається послідовно, рядок за рядком подібно руху електронного променя в телевізійних трубках.

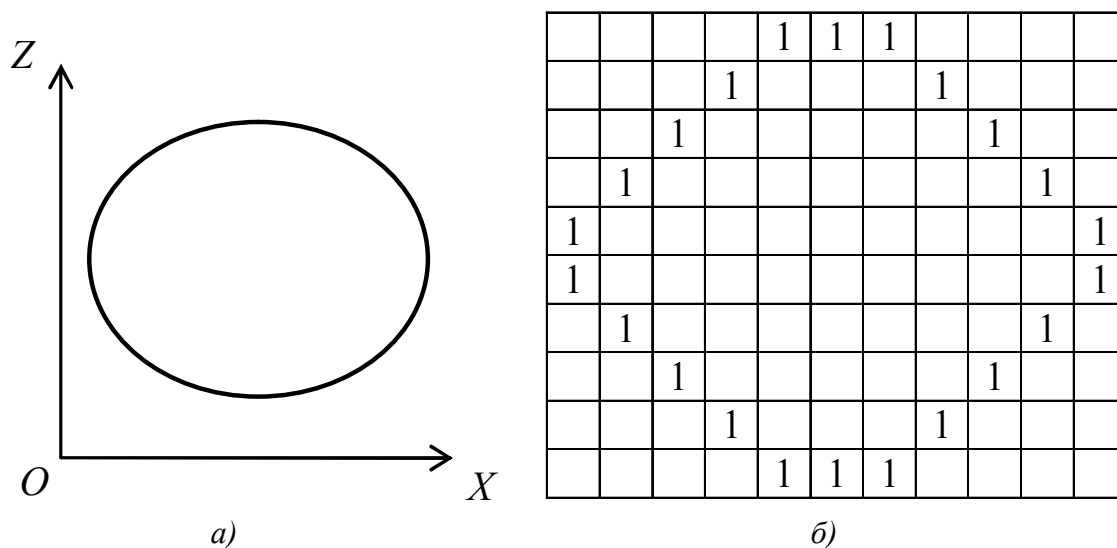


Рис. 4. Проекція фігури віражу на площину  $OXZ$  (а) і її дискретне зображення (б)

При цьому, як тільки зчитане зображення не дорівнює 0, до чарунки записується значення 1. Далі підраховують загальну кількість знаків у кожному рядку за двома осями, ці значення підсумовують і проставляють для кожного окремого рядка і стовпця. Рис. 5 ілюструє підсумовування значень одиниць за віссю  $OX$  у вигляді кодових послідовностей.

Далі проводиться відповідна обробка одержаних кодових послідовностей, наприклад, застосовується кодування зі змінною довжиною. Для кожної фігури визначається своя індивідуальна кодова послідовність. Цей метод носить лише теоретичний характер, тому не розглядаються його переваги або недоліки.

				1	1	1					3		
			1				1				1	0	1
		1						1			1	0	1
	1								1		1	0	1
1										1	1	0	1
1										1	1	0	1
	1								1		1	0	1
		1							1		1	0	1
			1				1				1	0	1
				1	1	1					3		

Рис. 5. Кодове зображення фігури пілотажу

Не дивлячись на те, що розглянуті вище методи вирішують окремі завдання, вони унікальні для кожного випадку, їм властиві як певні переваги, так і низка недоліків. Наприклад, характерним для них є використання жорсткої прив'язки до алгоритму ідентифікації (шаблонів) певного типу. При цьому сам шаблон визначається людиною-експертом (фахівцем у даній галузі) і закладається в логіку роботи програми, призначеної

для обробки. Тому за наявності вхідного файлу, що містить інформацію, яка не підходить під дію шаблону, система, найімовірніше, дасть збій. При цьому, якщо критичними є час обробки й апаратні характеристики ПЕОМ (обчислювач на літаку), то бажано було б застосувати універсальний математичний апарат, який би дозволив повністю або частково уникнути зазначених недоліків.

Одним із *шляхів розв'язання даної проблеми* є використання математичного апарату теорії нейронних мереж. Як правило, для вирішення завдань, пов'язаних з ідентифікацією, застосовується алгоритм зворотного розповсюдження помилки, який є одним із найбільш ефективних і вживаних на даний час алгоритмів навчання мережі [4]. Приклад структури нейрона, що бере участь у навчанні мережі, яка складається з вхідного, прихованого і вихідного шарів, наведено на рис. 6.

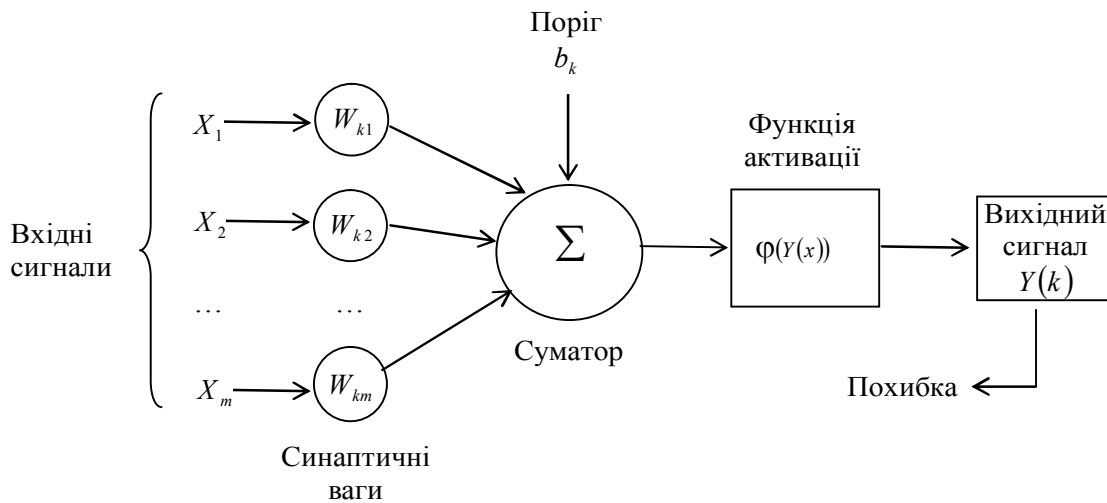


Рис. 6. Приклад структури нейрона

Мережу для ідентифікації фігур пілотажу зображено на рис. 7. Для спрощення візуального сприйняття на цьому рисунку не показані похибки для кожного нейрона шарів мережі, а також зображено не всі синаптичні ваги між нейронами.

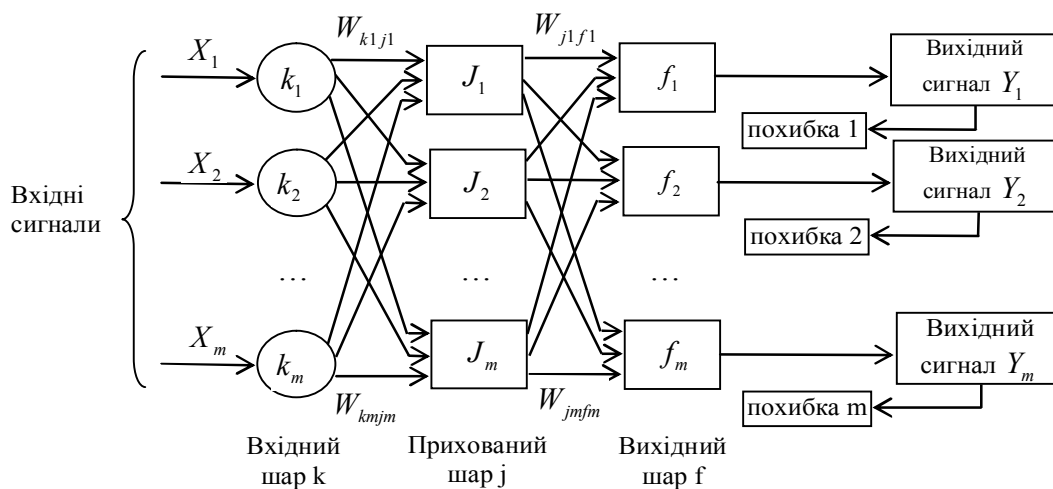


Рис. 7. Структура нейронної мережі

Вхідними даними  $[X]$  для нейронної мережі є відомості, які отримують від первинної обробки даних ЗОК. Вони становлять собою фізичні значення параметрів польоту: час, висоту, швидкість, перевантаження, кут атаки тощо. Вихідними даними  $[Y(x)]$  є найменування фігур пілотажу, наприклад: віраж, бочка, гірка, петля тощо.

Завдання алгоритму зводиться до підбору синаптичних ваг  $W_k$  нейронів кожного шару мережі так, щоб при заданому вхідному векторі  $[X]$  одержати на виході значення сигналів  $[Y(k)]$  заданої точності.

Відповідно до методу найменших квадратів мінімізованою цільовою функцією помилки нейронної мережі є величина:

$$E(w) = \frac{1}{2} \sum_{j,p} (y_{j,p}^{(N)} - d_{j,p})^2, \quad (1)$$

де  $y_{j,p}^{(N)}$  – реальний вихідний стан нейрона  $j$ -го вихідного шару  $N$ -ої нейронної мережі при подачі на її входи  $p$ -го зразка;

$d_{jp}$  – ідеальний (потрібний) вихідний стан цього нейрона.

Підсумовування ведеться за всіма нейронами вихідного шару. Мінімізація здійснюється методом градієнтного спуску, що забезпечує підстроювання вагових коефіцієнтів таким чином:

$$\Delta w_{ij}^{(n)} = -\eta \cdot \frac{\partial E}{\partial w_{ij}} \quad (2)$$

де  $w_{ij}$  – ваговий коефіцієнт синаптичного зв'язку, який з'єднує  $i$ -й нейрон шару  $n-1$  з  $j$ -м нейроном шару  $n$ ;

$0 < \eta < 1$  – коефіцієнт швидкості навчання.

Як наведено в [5]

$$\frac{\partial E}{\partial w_{ij}} = \frac{\partial E}{\partial y_j} \cdot \frac{d y_j}{d s_j} \cdot \frac{\partial s_j}{\partial w_{ij}}, \quad (3)$$

де  $s_j$  – сума вхідних сигналів, тобто аргумент активаційної функції.

На практиці як активаційну функцію використовують сигмоїд або гіперболічний тангенс, у випадку останнього

$$\frac{dy}{ds} = 1 - s^2; \quad \frac{\partial s_j}{\partial w_{ij}} = y_i^{(n-1)}. \quad (4)$$

Перший множник формули (3) розкладається у такий спосіб:

$$\frac{\partial E}{\partial y_j} = \sum_k \frac{\partial E}{\partial y_k} \cdot \frac{d y_k}{d s_k} \cdot \frac{\partial s_k}{\partial y_j} = \sum_k \frac{\partial E}{\partial y_k} \cdot \frac{d y_k}{d s_k} \cdot w_{jk}^{(n+1)}. \quad (5)$$

Підсумовування за  $k$  виконується серед нейронів шару  $n+1$ .

Якщо ввести нову змінну

$$\delta_j^{(n)} = \frac{\partial E}{\partial y_j} \cdot \frac{d y_j}{d s_j}, \quad (6)$$

то отримаємо рекурсивну формулу для розрахунку параметра  $\delta_j^{(n)}$  шару  $n$  із величини  $\delta_k^{(n+1)}$  більш старшого шару  $n+1$ :

$$\delta_j^{(n)} = \left[ \sum_k \delta_k^{(n+1)} \cdot w_{jk}^{(n+1)} \right] \cdot \frac{dy_j}{ds_j}, \quad (7)$$

для вихідного шару

$$\delta_i^{(N)} = (y_i^{(N)} - d_i) \cdot \frac{dy_i}{ds_i}. \quad (8)$$

Тоді вираз (2) у розгорнутому вигляді можна записати так:

$$\Delta w_{ij}^{(n)} = -\eta \cdot \delta_j^{(n)} \cdot y_i^{(n-1)}. \quad (9)$$

Таким чином, алгоритм роботи нейронної мережі можна описати таким чином:

1. Синаптичні ваги  $W_{km}$  активуються деяким випадковими значеннями (вони, як правило, лежать у діапазоні  $(\pm 0,3...0,5)$ ). При цьому вага може мати як позитивне, так і негативне значення.

2. На вхід мережі подається сигнал  $[X]$ , а розрахунок вихідного значення обчислюється за формулою

$$s_j^{(n)} = \sum_{i=0}^M y_i^{(n-1)} \cdot w_{ij}^{(n)}, \quad (10)$$

де  $M$  – кількість нейронів у шарі  $n-1$  з урахуванням нейрона зі сталим вихідним станом  $+1$ , який задає зсув;

$$y_j^{(n-1)} = x_{ij}^{(n)} - i\text{-тий вхід } j\text{-го нейрона } n\text{-го шару};$$

$$y_j^{(n)} = f[s_j^{(n)}] = \frac{s_j^{(n)}}{|s_j^{(n)}| + \tau} - \text{раціональний сигмоїд};$$

$\tau$  – позитивна константа, яка впливає на поведінку функції активації.

3. Розраховується величина  $\delta_i^{(N)}$  для вихідного шару за формулою (8).

4. Розраховується зміна ваг  $\Delta w_{ij}^{(N)}$  шару  $N$  за формулою (9).

5. Розраховується за формулами (8) і (9) значення  $\delta_i^{(n)}$  і  $\Delta w_{ij}^{(n)}$  відповідно для решти шарів мережі  $n = \overline{1, N-1}$ .

6. Корегуються усі ваги за формулою

$$w_{ij}^{(n)}(t) = w_{ij}^{(n)}(t-1) + \Delta w_{ij}^{(n)}(t). \quad (11)$$

7. Якщо похибка мережі  $E(w)$  суттєва, то перейти до першого кроку.

Складність задачі визначає як кількість шарів нейронної мережі, так і кількість нейронів у кожному шарі. При проектуванні необхідно користуватися принципом необхідної достатності, проте слід враховувати те, що мережа повинна бути „навчена” так, щоб передбачити усі можливі варіанти роботи.

**Висновки.** Не дивлячись на значну громіздкість самого математичного апарату, його застосування не викликає особливих проблем при реалізації на ПЕОМ або бортових обчислювачах. При цьому не висуваються високі вимоги до характеристик самої ПЕОМ або обчислювача. За рахунок цього усувається необхідність застосування певних шаблонів, що призводить до універсальності використання запропонованого математичного апарату.

**СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ**

1. Розробка програмного комплексу оцінки точності виконання польотного завдання і операційного навантаження льотчика : звіт про НДР. – Феодосія : ДАНВЦ, 2003. – 67 с.
2. Єрмолаєв І. Р. Еталонні зображення фігур пілотажа на основі даних засобів об'єктивного контролю / І. Р. Єрмолаєв, В. В. Кулешин // Збірник наукових робіт ХУПС. – Вип. 2 (14), 2007. – С. 44 – 53.
3. Хорн Б. К. П. Зрение роботов / Б. К. П. Хорн . – М. : Мир, 1989. – 487 с.
4. Осовский С. М. Нейронные сети для обработки информации / С. М. Оссовский. – М. – 2002. – 344 с.
5. Короткий С. Нейронные сети: алгоритм обратного распространения [Электронный ресурс] / С. Короткий. – Режим доступа : [http://lii.newmail.ru/kor\\_nn2.htm](http://lii.newmail.ru/kor_nn2.htm).

Подано 24.11.09

**П. В. Фриз, В. Ю. Богданов**

**МЕТОДЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ ФИГУР ПИЛОТАЖА МАНЕВРИРУЮЩИХ САМОЛЁТОВ**

*Приводится сравнительный анализ существующих методов идентификации фигур пилотажа, указываются недостатки и преимущества. Предлагается использование современного математического аппарата для решения задач этого класса.*

**P. V. Frys, V. Y. Bogdanov**

**METHODS OF AUTHENTICATION OF FIGURES OF PILOTAGE OF MANOEUVRINGS AIRPLANES**

*A comparative analysis over of existent methods of authentication of figures of pilotage is brought, failings and advantages are specified. The use of modern mathematical vehicle is offered for the decision of tasks of this class.*