

УДК 681.2

О.М. Безвесільна, д.т.н, проф.

**ВИКОРИСТАННЯ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ У КОМПЛЕКСІ ОРІЄНТАЦІЇ І НАВІГАЦІЇ АВІАЦІЙНОЇ ГРАВІМЕТРИЧНОЇ СИСТЕМИ**

Національний технічний університет України "КПІ"

*Розглянуто можливості використання нейромережевого підходу у задачах розробки алгоритмів функціонування і комплексування навігаційної системи) авіаційної гравіметричної системи, призначеної для вимірювання аномалій гравітаційного поля Землі.*

**Ключові слова:** авіаційна гравіметрична система.

**Галузь використання. Актуальність вирішеної у статті задачі**

Відомості про гравітаційне поле Землі та гравітаційні аномалії  $\Delta g$  необхідні в аерокосмічній галузі для корекції інерціальних навігаційних систем (ІНС), у геології та геофізиці для розвідки корисних копалин (це особливо актуально для України при розвідці покладів газу, нафти, золота та інших корисних копалин), у картографії для вимірювань форми Землі та у інших галузях. Для досліджень гравітаційних аномалій доцільно використовувати авіаційну гравіметричну систему (АГС), основним компонентом якої є ІНС. Від точності визначення ІНС параметрів руху рухомого об'єкта, на якому розміщено АГС, великим чином залежить точність визначення  $\Delta g$ .

**Стан вирішеної проблеми**

Сьогодні практично досягнута межа можливостей підвищення точності сучасних ІНС на базі відомих традиційних алгоритмів функціонування. При цьому, у відомій літературі практично не розглянуто можливості використання нейромережевого підходу у задачах розробки алгоритмів функціонування і комплексування навігаційної системи авіаційної гравіметричної системи, використання якого призводить до збільшення точності АГС.

**Мета даної статті** – розглянути можливості використання нейромережевого підходу у задачах розробки алгоритмів функціонування і комплексування навігаційної системи авіаційної гравіметричної системи.

**Викладення основного матеріалу статті**

Задача забезпечення системи управління і забезпечення високоточною навігаційною інформацією в умовах складної динамічної обстановки пов'язана з низкою проблем, що виникають при розробці нових та удосконаленні ІНС, що експлуатуються.

Серед цих проблем є наступні:

- розробка високоточних моделей ІНС, що враховують збурюючі фактори, які активізуються у складних динамічних умовах експлуатації рухомих об'єктів. Для найбільш часто використовуваних лінійних систем це означає збільшення їх розмірності до декількох десятків компонент;
- розробка стійких алгоритмів оцінювання похибок ІНС високого порядку;
- адаптація моделей ІНС до умов, що змінюються.

У даній статті показано підхід до побудови ІНС, який використовує апроксимуючі можливості нейронних мереж. Нейронні структури використані як для представлення моделі похибок ІНС, так і для повного функціонального алгоритму ІНС, який включає і алгоритм компенсації інструментальних похибок чутливих елементів (ЧЕ): гравіметрів та акселерометрів. Такий підхід є особливо актуальним до АГС, яка є комплексом орієнтації і навігації, що включає у себе ІНС, виконану на основі акселерометрів і гіроскопів.

Для високоточних ІНС використання нейронних мереж дозволяє якісно покращувати модель стану інструментальних похибок, оскільки дозволяє врахувати нелінійності у перетворенні вимірювань.

Розглянемо комплексну систему, що складається із ІНС та приймача, супутникової навігаційної системи (СНС). Як правило, ІНС є ядром такої комплексної системи, а приймач СНС – коректором, який використовується для оцінювання і компенсації похибок ІНС. У структурі загального алгоритму ІНС виділимо алгоритм визначення навігаційних параметрів (навігаційний алгоритм) і визначення параметрів орієнтації (алгоритм орієнтації).

Дослідимо варіанти використання нейромереж у задачі апроксимації нелінійних рівнянь визначення навігаційних координат ІНС. На рис. 1 та рис. 2 наведено дві схеми використання і моделювання роботи нейромережі, призначеної для апроксимації визначення координат ІНС.

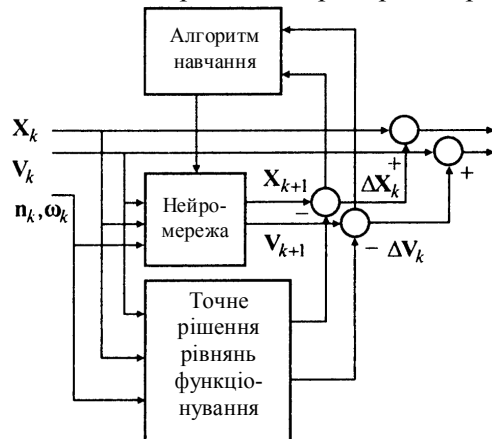


Рис. 1. Блок-схема нейромережі, апроксимуючої алгоритм функціонування ІНС

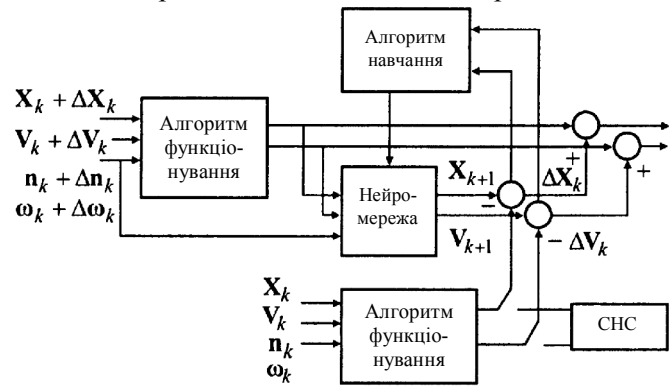


Рис. 2. Модель інструментальних похибок блока акселерометрів, представлена нейромережою прямого розповсюдження

Перша із схем реалізує алгоритм ідеальної роботи ІНС, друга – алгоритм функціонування, що враховує і сигнали, які компенсують вплив похибок ІНС на її вихідні навігаційні параметри.

Загальна структура взаємодії алгоритмів ІНС приведена на рис.3.

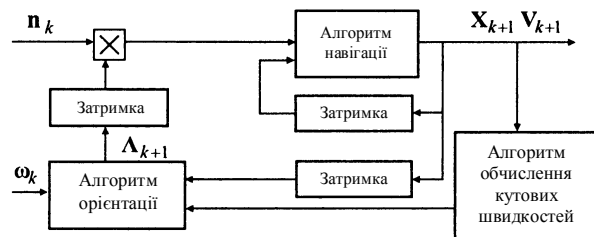


Рис. 3. Блок – схема взаємодії алгоритмів ІНС: Δ - кватерніон орієнтації

У першому випадку (рис. 1) нейромережа апроксимує перехідну матрицю, що відповідає рівнянням інерціальної навігації. Функціонування нейромережі у режимі настройки відбувається наступним чином. На вхід нейромережі поступають вектори, що складаються з навігаційних координат  $X_k, Y_k$ , параметрів орієнтації та вимірювань акселерометрів  $n_k$  і гіроскопів  $\omega_k$  без врахування похибок вимірювання (ідеальних значень проєкцій кажущогося прискорення і абсолютної кутової швидкості) на момент часу  $t$ . Вихід нейромережі (навігаційні параметри) порівнюється з точним рішенням рівнянь руху ІНС для моменту часу  $t+\Delta t$ . Алгоритм навчання нейромережі настраює її параметри таким чином, щоб мінімізувати нев'язку  $\Delta X_k, \Delta Y_k$  між виходом нейромережі і точним значенням, заданим на відповідній сітці, створеній можливими значеннями навігаційних координат і вимірюваних величин. В основному режимі роботи на вхід нейромережі поступають навігаційні параметри і сигнали вимірювань, на виході нейромережі – навігаційні параметри і параметри орієнтації на наступний момент часу. Таким чином, нейромережа апроксимує алгоритм ідеальної роботи ІНС.

У другому випадку (рис. 2) при навчанні нейромережі на її вхід подаються вектори, сформовані не з ідеальних значень параметрів, а з вимірюваних  $X_k + \Delta X_k, Y_k + \Delta Y_k, n_k + \Delta n_k, \omega_k + \Delta \omega_k$ , що включають похибки вимірювання. Вихід нейромережі підстроюється під ідеальні значення параметрів навігації і орієнтації. У цьому випадку параметри нейромережі будуть враховувати і похибки вимірювачів. Ця схема може бути використана в АГС для прогнозування навігаційних параметрів у періоди зникання сигналу СНС. При цьому процес настройки нейромережі буде мати місце безперервно, доки СНС виробляє точні координати і швидкості.

При декомпозиції загальної нейромережі на нейромережі орієнтації і навігації (рис. 3), отримаємо блок – схеми на рис. 4 і рис. 5.

Можливі схеми, в яких нейромережа апроксимує не алгоритм обчислення координат ІНС, а нелінійні рівняння похибок ІНС. Тобто виходами нейромережі є похибки визначення координат. У цьому випадку інструментальні похибки виготовлення елементів ІНС можна інтерпретувати, як настроюванні параметри нейромережі: величини синаптичних зв'язків або зрушення.

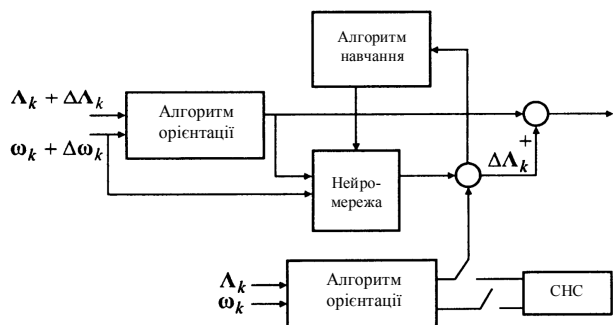


Рис. 4. Блок – схема нейромережі, апроксимуючої алгоритм орієнтації ІНС

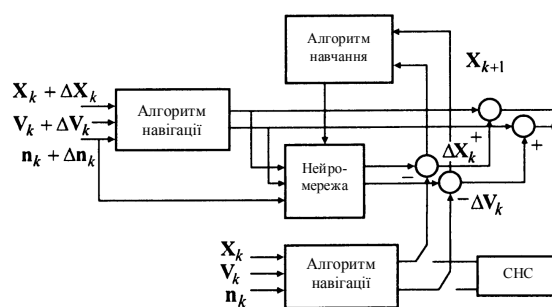


Рис. 5. Блок – схема нейромережі, апроксимуючої алгоритм навігації ІНС

Часто використовувана лінійна модель інструментальних похибок блоку гіроскопів має вигляд:

$$\Delta\omega = \begin{pmatrix} B_{x0} \\ B_{y0} \\ B_{z0} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} B_{xx} & B_{xy} & B_{xz} \\ B_{yz} & B_{yy} & B_{yz} \\ B_{zx} & B_{zy} & B_{zz} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{yz} & K_{yy} & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_{zz} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{pmatrix}, \quad (1)$$

$$\Delta n = \Delta n = \begin{pmatrix} A_{x0} \\ A_{y0} \\ A_{z0} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} A_{xx} & A_{xy} & A_{xz} \\ A_{yz} & A_{yy} & A_{yz} \\ A_{zx} & A_{zy} & A_{zz} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{pmatrix}, \quad (2)$$

де  $B_{i0}$ ,  $A_{i0}$  – систематичні похибки дрейфу;  $B_{ij}$ ,  $A_{ij}$  – похибки виставки осей чутливості;  $K_{ij}$  – коефіцієнти дрейфів гіроскопів, що залежать від перевантажень;  $w_i$ ,  $n_i$  – проекції абсолютної кутової швидкості і кажущогося прискорення на осі;  $i, j = x, y, z$ .

Така модель може бути представлена нейромережею прямого розповсюдження (структура мережі повністю відповідає структурі моделі). На рис. 6 зображено нейромережу, що апроксимує модель інструментальних похибок блоку акселерометрів, а на рис. 7 – модель інструментальних похибок блоку гіроскопів.

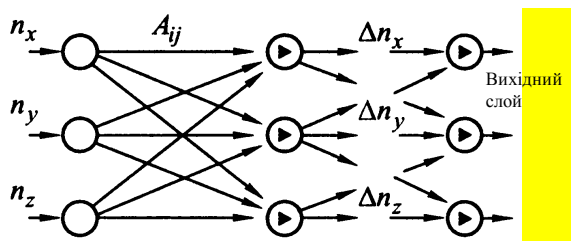


Рис. 6. Модель інструментальних похибок блоку акселерометрів, представлена нейромережею прямого розповсюдження

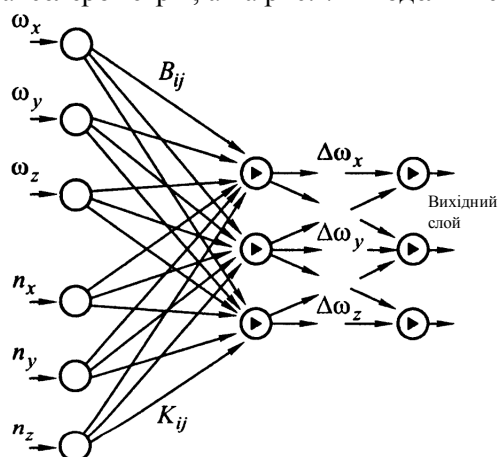


Рис. 7. Модель інструментальних похибок блоку гіроскопів, представлена нейромережею прямого розповсюдження

У загальному випадку, структура моделі інструментальних похибок ускладнюється завдяки не стаціонарності (нестабільності) окремих складових.

У якості функцій збудження нейронів цієї мережі використовуються лінійні залежності вхід-вихід. Зміщеннями нейронів у цьому випадку будуть систематичні компоненти дрейфів блоку гіроскопів та зміщення нульового сигналу акселерометрів.

На рис. 6 та рис. 7 синаптичними зв'язками є інструментальні похибки: похибки масштабних коефіцієнтів гіроскопів ( $B_{ii}$ ) і акселерометрів ( $A_{ii}$ ), похибки виставки осей чутливості гіроскопів ( $B_{ij}$ ) і акселерометрів ( $A_{ij}$ ) відносно осей блока.

Продовженням уточнення моделі інструментальних похибок є врахування у ній нелінійних компонент. Цьому сприяє введення у мережу замість нейронів з лінійними функціями активації, нейронів з тангенціальними і сигмоїдними функціями активації. Можливим є уточнення моделі похибок збільшенням числа внутрішніх шарів.

Особливо небезпечним є наявність у структурі похибок складових, період кореляції яких є близьким до періоду зникання сигналу приймача СНС ( від 10 до 300 с). У цих умовах ефективність використання параметричної моделі похибок надзвичайно знижується.

У зв'язку з цим, доцільно у якості моделі ІНС (що включає у себе і модель похибок) використовувати настроювану нейромережу, яка постійно відслідковує змінну структуру моделей похибок.

У цьому випадку, використовують адаптивні властивості нейромережі, а саме, властивість нейромережі апроксимувати, а потім екстраполювати вхідні сигнали досить складної форми. При цьому, задаючи структуру нейромережі, можливо варіювати складність моделі похибок.

У процесі навчання нейромережа може адаптуватись до сигналів, які описуються як лінійними, так і нелінійними динамічними моделями.

На вхід нейромережі подаємо вимірювані гравіметрами, гіроскопами та акселерометрами сигнали. На виході нейромережі отримуємо координати місце розташування і швидкості об'єкта для врахування компонент, що змінюються у часі.

Структура мережі може включати кількість вхідних нейронів, що перевищує число вимірюваних параметрів. Нейромережа постійно підстроює свої параметри таким чином, щоб мінімізувати різницю свого вихідного сигналу (координат і швидкостей) і вимірюваних приймачем СНС координат і швидкостей.

При зникненні сигналу СНС нейромережа виробляє координати на основі вимірюваних прискорень і абсолютних кутових швидкостей, надаючи як алгоритм визначення (счислення) координат, так і алгоритм компенсації похибок ІНС.

**Функціональні алгоритми ІНС, побудовані на базі нейронних мереж.**

Розглянемо комплексну навігаційну систему, яка включає ІНС та СНС, причому в алгоритмах ІНС включені нейромрежеві структури. У цьому випадку зручно застосувати представлення рівнянь орієнтації у кватерніонах і рівнянь навігації. Модель алгоритмів, яку будемо розглядати у наступному, використовує дві нейронні мережі прямого розповсюдження (рис. 8).

На рис. 8 позначено  $V_{xrk}, V_{yrk}$  – проекції швидкості об'єкта на осі географічної навігаційної системи координат (СК) на  $k$  кроку інтегрування;  $\varphi_k, \lambda_k$  – координати об'єкта на  $k$  кроку інтегрування,  $n_k, n_{rk}$  – кажущіся прискорення у приладовій та у навігаційній

СК;  $\omega_k$  – абсолютна кутова швидкість у приладовій СК,  $\Lambda_k$  – кватерніон орієнтації об'єкта на  $k$  кроку інтегрування,  $m_k$  – кватерніон довороту на  $k$  кроку інтегрування;  $\Psi_{k+1}, \theta_{k+1}, \gamma_{k+1}$  – кути орієнтації об'єкта ( курсу, тангажу, крену відповідно).

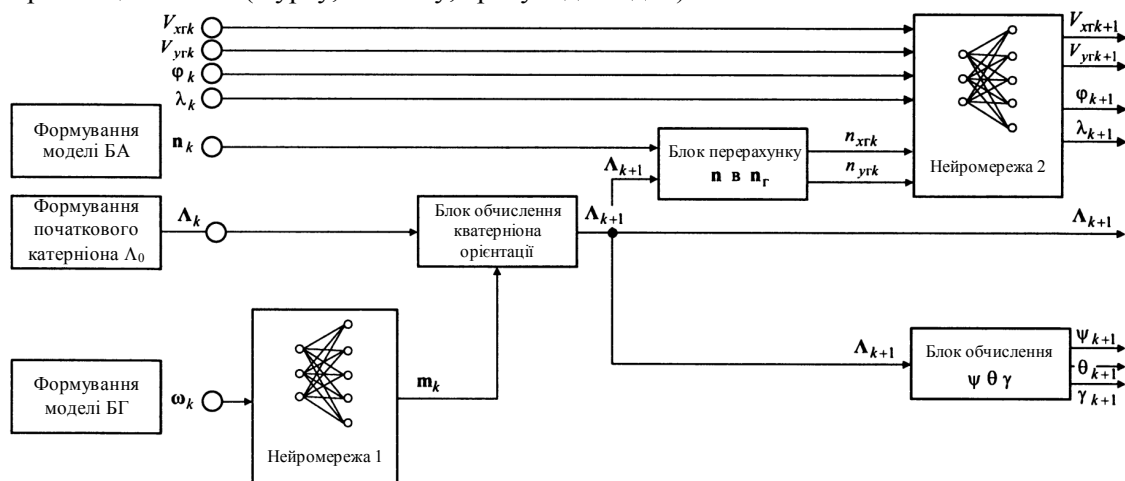


Рис. 8. Блок – схема навігаційної системи, побудовані з використанням нейронних мереж

Перша нейронна мережа апроксимує рішення рівнянь орієнтації навігаційної системи. Друга - робить апроксимацію рішення рівнянь навігації на одному кроку інтегрування.

У процесі настройки нейромережі на її вхід подається навчаюча вибірка: сукупність векторів – стовпців, кожний з яких містить одну з можливих комбінацій значень навігаційних параметрів. При цьому область можливих значень кожного параметра представляється

декількома вузловими точками, розмежованими рівними інтервалами. Можна реалізувати два способи організації нейромережі.

У першому способі у процесі настройки на вхід нейромережі поступають значення кватерніона орієнтації  $A_{k-1}$  на попередньому кроку та виміряні блоком гіроскопів значення кутових швидкостей  $\omega_k$ , що містять значення інструментальних похибок.

На вхід нейромережі пред'являється поточний кватерніон орієнтації  $A_k$ , розрахований на основі ідеальних значень кутових швидкостей.

Таким чином, нейронна мережа налаштовується на перетворення вимірних значень кутових швидкостей, що містять похибки, у дійсні значення кватерніона орієнтації. При цьому зменшується вплив інструментальних похибок гіроскопів на параметри орієнтації, що використовуються надалі у блоку перерахунку кажущогося прискорення із при борної СК у навігаційну СК.

У цьому способі число компонент навчаючого вектора буде рівним  $n^6$ , де  $n$  – число параметрів ( $\omega_{xk-1}$ ,  $\omega_{yk-1}$ ,  $\omega_{zk-1}$ ,  $A_2$ ,  $A_3$ ,  $A_4$ ). Тут  $A_2$ ,  $A_3$ ,  $A_4$  – складові кватерніона орієнтації. Скалярна частина кватерніона  $A_1$  знаходиться з умови нормування кватерніона:

$$A_1 = \sqrt{1 - \sum_{i=2}^4 A_i^2}.$$

У другому способі організації нейромережі орієнтації на її вхід поступають виміри блока гіроскопів – компоненти абсолютної кутової швидкості. На вихід першої нейромережі поступає послідовність, отримана рішенням рівнянь орієнтації на кроку інтегрування при ідеальних значеннях показів гіроскопів (рис. 9).

Таким чином, вихід нейромережі настроюється на значення кватерніона довороту між попереднім і поточним кроком інтегрування  $m_k$ .

Далі розраховується кватерніон орієнтації на поточному кроку по відомій формулі  $A_k = A_{k-1} \circ m_k$ , де  $\circ$  – знак множення кватерніонів,  $A_i$  – кватерніон орієнтації на поточному кроку,  $A_{k-1}$  – кватерніон орієнтації на попередньому кроку.

У цьому випадку довжина навчаючого вектора дорівнює  $n^2$ , що є перевагою цього варіанта перед першим.

У процесі настройки нейромережі №2, апроксимуючої рівняння навігації, на вхід нейромережі подаються значення навігаційних параметрів на попередньому кроку і отримані після перерахунку на осі географічної СК значення кажущогося прискорення  $n_{ri}$ , що містять інструментальні похибки акселерометрів. На вхід мережі подаються значення навігаційних параметрів на наступному кроку, розраховані для ідеальних значень лінійних прискорень (рис. 10).

Нейромережа реалізує перетворення вимірних з похибками кажущихся значень прискорень в ідеальні значення приростів швидкостей і координат на кроку інтегрування. Таким чином, під час роботи мережі зменшується вплив інструментальних похибок акселерометрів на вихідні навігаційні параметри.

Число компонент навчаючої вибірки для другої нейромережі буде рівним  $n^6$ , де  $n$  – число вузлових точок кожного параметра;  $b$  – розмірність навчаючого вектора, рівна Числу вхідних навігаційних параметрів і вимірів акселерометрів.

На вхід нейромережі №2 поступає послідовність, отримана рішенням диференціальних рівнянь навігації на кроку інтегрування при ідеальних значеннях показів акселерометрів.

Таким чином, при роботі нейромережі їх вхідними сигналами є виміри, які включають ідеальні значення у сумі з похибками. Нейромережі перетворюють їх у вихідні параметри, наближені до ідеальних значень.

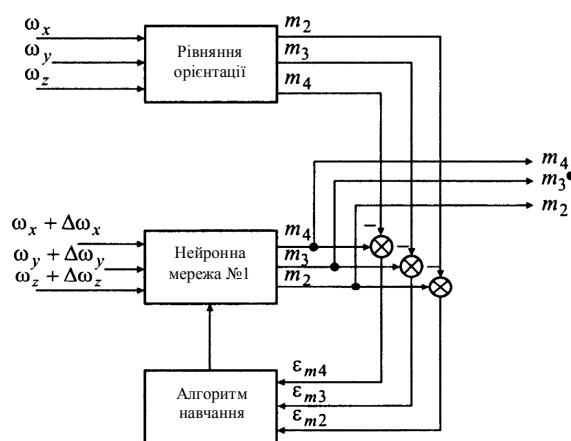


Рис. 9. Блок-схема роботи нейромережі №1 по другому способу:  $\omega_x$ ,  $\omega_y$ ,  $\omega_z$  – проекції абсолютної кутової швидкості на осі приладової СК;  $m_j, j = 2, 3, 4$  – елементи кватерніона довороту на кроку інтегрування;  $\varepsilon_{mj}, j$  – нев'язки нейромережі;  $\Delta\omega_x$ ,  $\Delta\omega_y$ ,  $\Delta\omega_z$  – інструментальні похибки гіроскопів

У розглянутому випадку передбачається, що інструментальні похибки ІНС є постійними величинами. Для врахування змінних у часі компонент похибок, вхідний шар мережі може включати кількість нейронів, яка більше числа вимірних сигналів. Тоді обсяг навчаючої вибірки буде більше розрахованих вище величин.

Так як навчання має місце до якої – не будь заданої точності, то на виході також будуть мати місце похибки, але значно менші похибок некорегуємої навігаційної системи.

При зміні інструментальних похибок інерціальних чутливих елементів (ІЧЕ) з плином часу або при зміні умов функціонування, необхідно змінити перетворення, яке реалізує нейромережа. Це здійснюється шляхом підстройки нейромережі з використанням для цього інформації СНС у стандартних умовах або під час руху.

Функціонування комплексної системи з нейронними мережами, можливе у трьох режимах. Під час підготовчого етапу нейромережа настроюється на виміри гіроскопів і акселерометрів, що містять інструментальні похибки, с заданою точністю. Під час руху нейромережа працює в основному режимі, коли на її вхід подаються реальні виміри гіроскопів і акселерометрів, а на виході пройшовший через нейромережу сигнал буде близьким до ідеального, якщо інструментальні похибки ІЧЕ близькі до тих, при яких проводилась настройка нейромережі. При цьому нейромережа емулює алгоритм роботи ІНС з врахуванням компенсації постійних інструментальних похибок ІЧЕ. Однак у цьому випадку накопичується похибка, пропорційна похибці навчання нейромережі.

Під час руху при наявності сигналу з приймача СНС здійснюється корекція показів ІНС шляхом навчання нейронної мережі. При цьому на вхід мережі подається сукупність можливих значень параметрів навігації і показів ІЧЕ, які містять похибки. На вихід мережі у якості еталонних поступають значення навігаційних параметрів, отримані від приймача СНС. Після до навчання нейрона мережа буде виробляти скореговані значення навігаційних параметрів.

### Висновки

Розглянуто можливості використання нейромережевого підходу у задачах розробки алгоритмів функціонування і комплексування навігаційної системи авіаційної гравіметричної системи.

Встановлено, що функціонування комплексної системи АГС з нейронними мережами, можливе у трьох режимах. Під час підготовчого етапу нейромережа настроюється на виміри гіроскопів і акселерометрів, що містять інструментальні похибки, с заданою точністю. Під час руху нейромережа працює в основному режимі, коли на її вхід подаються реальні виміри гіроскопів і акселерометрів, а на виході пройшовший через нейромережу сигнал буде близьким до ідеального, якщо інструментальні похибки ІЧЕ близькі до тих, при яких проводилась настройка нейромережі. При цьому нейромережа емулює алгоритм роботи ІНС з врахуванням компенсації постійних інструментальних похибок ІЧЕ.

Під час руху при наявності сигналу з приймача СНС здійснюється корекція показів ІНС шляхом навчання нейронної мережі. На вхід мережі подається сукупність можливих значень параметрів навігації і показів ІЧЕ, які містять похибки. На вихід мережі у якості еталонних поступають значення навігаційних параметрів, отримані від приймача СНС. Після навчання нейрона мережа буде виробляти скореговані значення навігаційних параметрів.

### Список літературних джерел

1. Безвесільна О.М. Авіаційні гравіметричні системи та гравіметри: Монографія. - Житомир: видавництво ЖДГУ, 2007р. - 604с.

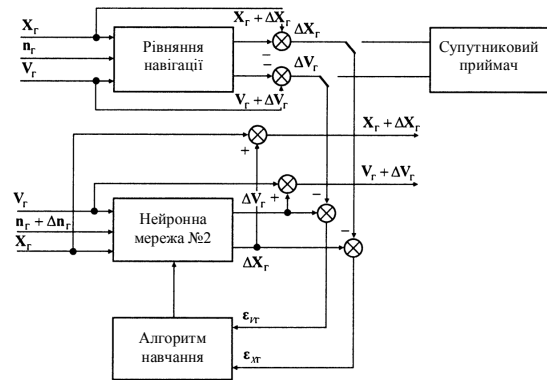


Рис. 10. Блок-схема роботи нейронної мережі №2:  $X_r$  – вектор координат об'єкту ( $\varphi, \lambda$ );  $V_r$  – вектор швидкості об'єкту;  $\varepsilon_{xr}, \varepsilon_{yr}$  – нев'язки нейромережі;  $\Delta V_r, \Delta X_r$  – прирости параметрів на кроку;  $\Delta n_r$  – вектор інструментальних похибок датчиків