

Алі Енверович Бекіров (кандидат технічних наук)

Катерина Андріївна Кругляк

Марія Михайлівна Юзьвяк

Харківський національний університет Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба, Харків, Україна

## СЕЛЕКЦІЯ ВХІДНИХ ПАРАМЕТРІВ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ ПРОГНОЗУВАННЯ ВІДМОВ БОРТОВОГО ОБЛАДНАННЯ

Стаття присвячена дослідженню актуального питання прогнозування відмов бортового обладнання. Ефективність виконання бойових завдань екіпажами повітряних суден Збройних Сил України залежить в тому числі від оперативної і якісної підготовки бортового обладнання до польотів. Великий термін експлуатації існуючого парку літальних апаратів потребує постійного аналізу технічного стану обладнання для попередження відмов. Існуючі методи прогнозування пов'язані зі аналізом статистичних даних та метриками вірогідності. Можливим альтернативним способом контролю працездатності обладнання є використання нейронних мереж. Проблематика побудови топології нейронної мережі прогнозування відмов пов'язана з необхідністю селекції значимих факторів, які впливають на обладнання в процесі експлуатації. В статті розглядаються найбільш важливі фактори впливу з позиції умов застосування, якості та умов експлуатації. Виявляються залежності між параметрами для одного об'єкту дослідження та параметрами об'єктів одного типу при різних умовах застосування. Здійснюється вибір наступних параметрів обладнання для використання при побудові нейронної мережі: загальний час напрацювання обладнання, час напрацювання обладнання після останнього відновлення, загальна кількість циклів включення вимикання та коефіцієнт циклічності відмови. Для кожного з параметрів наводяться вирази, які сформульовані з врахування особливостей технічної та льотної експлуатації повітряних суден. Так, значення напрацювання об'єкту розраховується як сумарний час роботи обладнання в польоті і на землі при виконанні всіх видів робіт. Кількість циклів включення-вимикання пропонується розраховувати на основі обліку мінімальної кількості разів застосування обладнання в процесі експлуатації. Також вводиться коефіцієнт циклічності відмови, який пропонується обчислювати на основі частотного аналізу порядкового номеру відмови та часу напрацювання об'єкту до конкретної відмови.

**Ключові слова:** нейронна мережа; працездатність обладнання; прогнозування відмов.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Якісне та своєчасне технічне обслуговування повітряних суден авіації Повітряних Сил Збройних Сил України безпосередньо пов'язано з ефективним виконанням бойових завдань. Одним із напрямків роботи інженерно-авіаційної служби є заходи по підтриманню та підвищенню надійності авіаційної техніки. Під надійністю тут розуміють властивість об'єкта зберігати значення всіх параметрів в межах встановлених показників. Працездатність обладнання повітряного судна характеризується зміною технічного стану під впливом конструктивно-виробничих та експлуатаційних факторів [1,2].

Не дивлячись на те, що метрики, які характеризують вплив конструктивно-виробничих факторів, для однакового обладнання приблизно еквівалентні, фактично обладнання має різний технічний стан навіть в умовах однакового напрацювання або календарного строку служби. Це пов'язано зі зміною технічного стану обладнання під неоднорідним впливом експлуатаційних факторів. Крім факторів, які піддаються

математичному опису та моделювання існує цілий спектр впливів, які мають слабо прогнозований характер, наприклад дії інженерно-технічного складу [2,3].

Велика кількість факторів, не монотонність та вибірковість їх впливу ускладнює роботу інженерно-технічного складу з утримання бортового радіоелектронного обладнання у справності і постійній готовності до ведення бойових дій. Тут актуальним напрямком досліджень є розробка способів та математичних методів виявлення закономірностей зміни параметрів обладнання під впливом експлуатаційних факторів, які потенційно можуть призвести до непрацездатного стану обладнання [2,4].

Одним із можливих напрямків вирішення задачі прогнозування є використання нейронних мереж [9-12]. Нейронна мережа уявляє собою сукупність елементів, які поєднані між собою та з зовнішнім середовищем зв'язками, які характеризуються ваговими коефіцієнтами. Залежність вихідних параметрів нейронної мережі від вхідних

характеризується її побудовою та навчанням. З математичної точки зору етап навчання нейронної мережі уявляє собою багатопараметричну задачу нелінійної оптимізації. Тут фактично відбувається поступова зміна вагових коефіцієнтів зв'язків вхідного шару з вихідним шаром на основі навчальної вибірки до моменту досягнення ступеню найбільшої схожості [13-16].

Ефективне вирішення нейронною мережею задачі прогнозування обумовлено помилками функціонування внаслідок неякісної вибірки та оптимізації вхідних параметрів, нераціональної побудови топології нейронної мережі та обмеженої кількістю навчальної вибірки.

**Метою статті** є вибір та оптимізація вхідних параметрів при побудові нейронної мережі прогнозування відмов бортового радіоелектронного обладнання з позиції умов застосування.

**Виклад основного матеріалу дослідження**

**Аналіз впливу умов застосування на працездатність об'єкту.** Весь спектр експлуатаційних факторів можна умовно поділити на два класи: суб'єктивні та об'єктивні. До

суб'єктивних відносяться фактори, які пов'язані з впливом обслуговуючого персоналу, а саме:

повнота, своєчасність та правильність технічного обслуговування та ремонту обладнання;

кваліфікація технічного персоналу, досвід роботи;

умови роботи обслуговуючого персоналу;

укомплектованість підрозділів особовим складом фахівців інженерно-авіаційної служби [3,4].

Серед основних об'єктивних факторів можна виділити наступні:

умови роботи об'єкту, значення та періодичність повторення експлуатаційних навантажень;

температурні режими;

фізико-хімічні властивості робочих рідин;

вплив навколишнього середовища (температура, вологість, тиск) [2,3].

Іншою можливою класифікацією експлуатаційних факторів є розгляд їх з наступних позицій: з позиції умов експлуатації, якості експлуатації та умов застосування (рис. 1) [2,3].

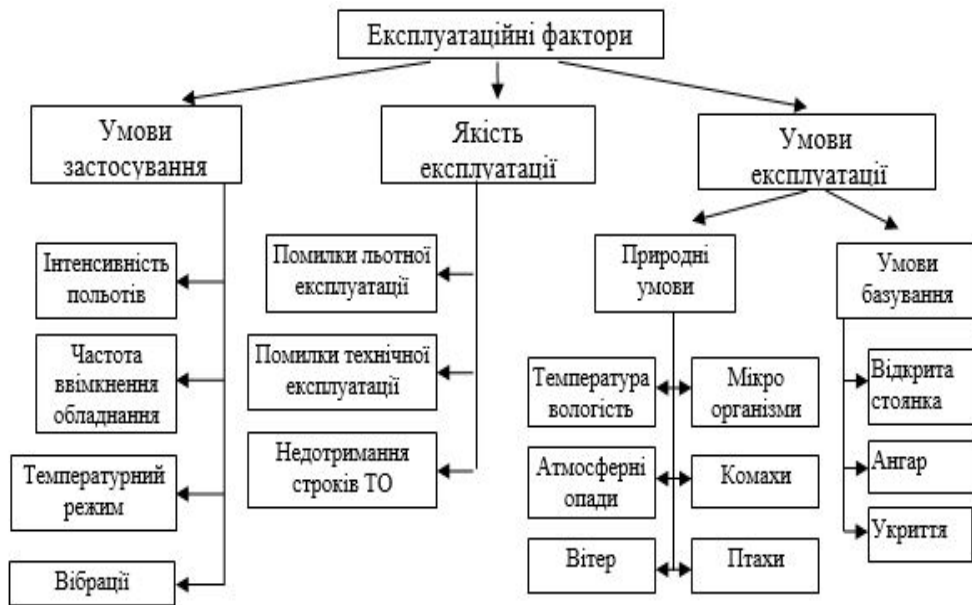


Рис 1. Варіант класифікації експлуатаційних факторів

Розглянемо життєвий цикл об'єкту А з позиції умов застосування від моменту  $Q_0 = 0$  прийняття в експлуатацію до моменту  $Q_N$ , який описує

момент життєвого циклу об'єкту при кількості N відмов (рис. 2).

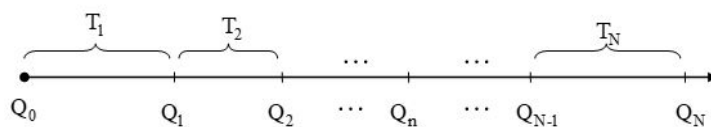


Рис 2. Графічна інтерпретація життєвого циклу об'єкту

Реальне напрацювання  $T_n$  об'єкту,  $n = \overline{1; N}$ , дорівнює проміжку часу між моментом життєвого циклу  $Q_{n-1}$ , у який було відновлена працездатність об'єкту після  $n-1$  відмови та

моментом часу  $Q_n$  в який відбулася  $n$ -та зміна технічного стану об'єкту (відмова). Враховуючи не рівномірність впливу експлуатаційних факторів

на об'єкт, імовірність  $P(T_{n-\xi} = T_n)$  того що напрацювання між моментами  $Q_{n-\xi-1}$ ,  $Q_{n-\xi}$  та  $Q_{n-1}$ ,  $Q_n$  життєвого циклу об'єкту  $A$  є однаковим буде приймати мінімальне значення, а саме  $P(T_{n-\xi} = T_n) \rightarrow \min$ .

Так само розглянемо напрацювання  $T_n^{(1)}$  та  $T_n^{(2)}$  для двох різних об'єктів  $A_1$  та  $A_2$ , які належать до одного типу обладнання (рис. 3).

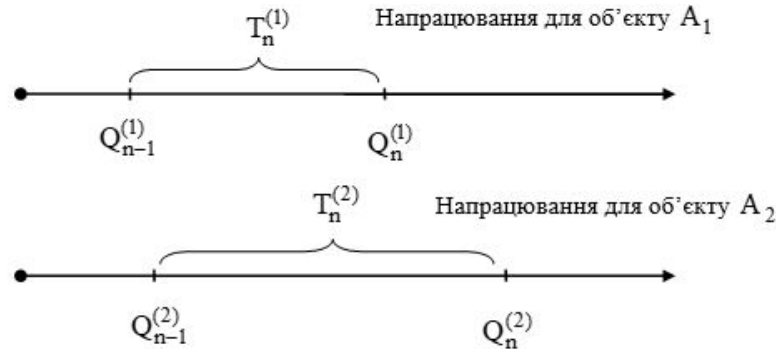


Рис 3. Графічна інтерпретація напрацювання для двох об'єктів

Імовірність  $P(T_n^{(1)} = T_n^{(2)})$  того, що напрацювання для двох об'єктів при однаковій кількості  $n$  попередніх відмов буде рівним так само буде приймати мінімальне значення:

$$P(T_n^{(1)} = T_n^{(2)}) \rightarrow \min.$$

В обох варіантах, як для випадку порівняння подій життєвого циклу одного об'єкту, так і для різних об'єктів, імовірність отримання однакових значень незначно мала. Іншими словами потік відмов об'єкту є ординарним.

Якщо розглядати вплив факторів на об'єкт  $A_1$  в період життєвого циклу від моменту  $Q_{n-1}^{(1)}$  до моменту  $Q_n^{(1)}$ , то значення  $T_n^{(1)}$  фактичного напрацювання може бути описано на основі функціонального перетворення  $f(\bullet)$ :

$$T_n^{(1)} = f_1(x_1^{(T_n^{(1)})}, \dots; x_j^{(T_n^{(1)})}, \dots; x_M^{(T_n^{(1)})}), \quad j = \overline{1, M},$$

де  $f_1(\bullet)$  - умовне функціональне перетворення для отримання напрацювання  $T_n^{(1)}$  об'єкту  $A_1$  до відмови  $Q_n^{(1)}$ ;  $x_j^{(T_n^{(1)})}$  -  $j$ -й експлуатаційний фактор, який впливає на об'єкт  $A_1$  в період часу від  $Q_{n-1}^{(1)}$  до  $Q_n^{(1)}$ ,  $j = \overline{1, M}$ .

У випадку, коли напрацювання для об'єктів  $A_1$  та  $A_2$  не еквівалентно, для функціонального перетворення  $f(\bullet)$  справедливим є наступне твердження:

$$\begin{aligned} T_n^{(1)} &= f(x_1^{(T_n^{(1)})}, \dots; x_j^{(T_n^{(1)})}, \dots; x_M^{(T_n^{(1)})}) \neq \\ &\neq f(x_1^{(T_n^{(2)})}, \dots; x_j^{(T_n^{(2)})}, \dots; x_M^{(T_n^{(2)})}) = T_n^{(2)} \end{aligned}$$

Звідси випливає, що фактори  $x_j^{(T_n^{(1)})}$  та  $x_j^{(T_n^{(2)})}$  з великою імовірністю приймають різні значення, тобто

$$x_j^{(T_n^{(1)})} \neq x_j^{(T_n^{(2)})}; \quad j = \overline{1, M}; \quad n = \overline{1, N}.$$

Значить для проектування нейронної мережі прогнозування відмов обладнання необхідно визначити вектор вхідних параметрів, як сукупність кількісних або якісних експлуатаційних факторів  $X = (x_1; \dots; x_j; \dots; x_M)$  з позиції умов застосування обладнання.

**Формування вектору вхідних параметрів нейронної мережі з позиції умов застосування.** Загальне напрацювання об'єкту до відмови. включає сумарне напрацювання об'єкту від моменту початку життєвого циклу  $Q_0^{(1)}$  до моменту  $Q_{n-1}^{(1)}$   $n$ -ої відмови об'єкту і визначається на основі виразу:

$$T_{com}^{(1)} = \sum_{n=0}^N T_n^{(1)} = \sum_{n=0}^N Q_n^{(1)} - Q_{n-1}^{(1)}.$$

Показник  $T_{com}^{(1)}$  вимірюється у одиницях часу, як правило годинах. Відповідно до нормативної документації інженерно-авіаційної служби напрацювання визначається за лічильниками, у разі наявності, або за загальним напрацюванням повітряного судна у повітрі [7,8]. Але даний варіант обліку напрацювання не завжди якісно враховує реальне навантаження на об'єкт. Крім роботи при виконанні польоту повітряним судном, функціонування об'єкту відбувається на землі під час технічного обслуговування. Обсяги та час періодичного обслуговування при якому об'єкт піддається циклу включення-вимикання визначається єдиним регламентом технічного обслуговування для типу повітряного судна. В загальному випадку час  $T_n$  напрацювання можна визначити на основі виразу:

$$T_n = T_{ПС} + T_{підг} + T_{регл} + T_{нпрд},$$

де  $T_{ПС}$ - час напрацювання об'єкту під час виконання польоту повітряним судном;  $T_{підг}$ - час

напрацювання об'єкту при виконанні видів підготовок повітряного судна до польоту;  $T_{\text{регл}}$  - час напрацювання об'єкту під час виконання періодичних та регламентних робіт;  $T_{\text{нпрд}}$  - час напрацювання під час виконання робіт по зберіганню, контрольно-відновлювальних робіт, робіт по бюлетеням.

Розглянемо кожну складову виразу для визначення часу  $T$  напрацювання окремо.

Час напрацювання  $T_{\text{ПВ}}$ , як правило, визначається з високою точністю на основі аналізу результатів роботи бортової системи реєстрації польотних даних. Це пов'язано з необхідністю обліку ресурсу повітряного судна [4,5].

Час  $T_{\text{підг}}$  характеризується сукупним значенням напрацювання об'єкту під час попередньої підготовки повітряного судна, підготовки до повторного вильоту та післяпольотної підготовки, а саме:

$$T_{\text{підг}} = T_{\text{ПП}} + T_{\text{ПдП}} + T_{\text{ПВ}} + T_{\text{ПсП}}.$$

Тут  $T_{\text{ПП}}$  - сукупне напрацювання об'єкту під час виконання попередньої підготовки повітряного судна за календарний строк  $Z_n$ ;  $T_{\text{ПдП}}$  - час роботи об'єкту в процесі виконання передпольотних підготовок до льотних змін за час  $Z_n$ ;  $T_{\text{ПВ}}$  - сумарне значення часу роботи об'єкту під час підготовки повітряного судна до повторного вильоту за період  $Z_n$ ;  $T_{\text{ПсП}}$  - загальний час функціонування об'єкту в процесі виконання всіх післяпольотних підготовок за строк  $Z_n$ .

Середнє значення часу  $t$  роботи об'єкту під час кожної перевірки визначається відповідними технічними картами видів підготовок. Сукупне значення часу роботи залежить від кількості льотних змін та їх напруженості за календарний строк  $Z_n$  і може бути визначено на основі наступних виразів:

- загальний час  $T_{\text{ПП}}$  та  $T_{\text{ПдП}}$  напрацювання об'єкту під час виконання відповідно попередньої та перед польотної підготовки за календарний строк експлуатації  $Z_n$ :

$$T_{\text{ПП}} = T_{\text{ПдП}} = \sum_{\rho=1}^P t_{\rho}^{(\text{ПП})},$$

де  $t_{\rho}^{(\text{ПП})}$  - напрацювання об'єкту під час попередньої (передпольотної) підготовки повітряного судна до  $\rho$ -ої льотної зміни, який визначається відповідно до технічної документації,  $\rho = \overline{1; P}$ ;  $P$  - кількість льотних змін за період  $Z_n$ ;

- час  $T_{\text{ПВ}}$ , який характеризує період функціонування об'єкту під час виконання всіх підготовок до повторного вильоту за період  $Z_n$  і визначається на основі виразу:

$$T_{\text{ПВ}} = \sum_{\rho=1}^P t_{\rho}^{(\text{ПВ})} \cdot k_{\rho}^{(B)} - 1,$$

де  $t_{\rho}^{(\text{ПВ})}$  - час напрацювання об'єкту за одну підготовку до повторного вильоту  $\rho$ -ої льотної зміни,  $\rho = \overline{1; P}$ ;  $k_{\rho}^{(B)}$  - кількість вильотів за  $\rho$ -ту льотну зміну;

- напрацювання  $T_{\text{ПсП}}$  об'єкту під час післяпольотної підготовки за період  $Z_n$ :

$$T_{\text{ПсП}} = \sum_{\rho=1}^P t_{\rho}^{(\text{ПсП})},$$

де  $t_{\rho}^{(\text{ПсП})}$  - напрацювання об'єкту під час післяпольотної підготовки по виконанню  $\rho$ -ої льотної зміни,  $\rho = \overline{1; P}$ .

Тепер перепишемо формулу для напрацювання  $T_{\text{підг}}$  об'єкту з врахуванням сформульованих виразів. В цьому випадку отримаємо:

$$T_{\text{підг}} = 2 \cdot \sum_{\rho=1}^P t_{\rho}^{(\text{ПП})} + \sum_{\rho=1}^P (t_{\rho}^{(\text{ПВ})} \cdot k_{\rho}^{(B)} - 1) + \sum_{\rho=1}^P t_{\rho}^{(\text{ПсП})},$$

$$\rho = \overline{1; P}.$$

Наступний етап розрахунку напрацювання  $T_{\text{підг}}$  об'єкту під час підготовки передбачає оцінку часу роботи при виконанні регламентних та періодичних робіт. Проаналізуємо напрацювання  $T_{\text{регл}}$  об'єкту, яке включає сумарний час роботи об'єкту в процесі циклу включення-вимкнення при виконання регламентних або періодичних робіт через термін  $R$  і визначається за формулою:

$$T_{\text{регл}} = \sum_{\eta=1}^N t_{\eta}^{(\text{регл})}, \quad N = \left[ \frac{R}{Z_n} \right].$$

Тут  $t_{\eta}^{(\text{регл})}$  - час напрацювання об'єкту в процесі виконання перевірки під час  $\eta$ -х періодичних робіт;  $N$  - кількість періодичних робіт за календарний строк  $Z_n$ ,  $\eta = \overline{1; N}$ .

Для врахування часу функціонування об'єкту під час неперіодичних робіт на авіаційній техніці у разі відсутності лічильника напрацювання використовується величина  $T_{\text{нпрд}}$ , яка описує тривалість роботи під час робіт по зберіганню, робіт по сезонному обслуговуванню, робіт за бюлетенями, робіт по відновленню встановлених показників та інших нециклічних обслуговувань. Виконання визначених робіт відбувається відповідно до розпорядження посадових осіб інженерно-авіаційної служби або при виконанні умов щодо необхідності їх проведення. Тому завдання аналітичного опису величини  $T_{\text{нпрд}}$  є достатньо складним. Облік напрацювання при цьому виконується за фактичним часом функціонування обладнання.

Час напрацювання  $T_n^{(1)}$  об'єкту від моменту

життєвого циклу  $Q_{n-1}$ , у який відбулося відновлення працездатності об'єкту  $A^{(1)}$ . На відміну від параметра  $T_{com}^{(1)}$ , показник  $T_n^{(1)}$  показує реальне напрацювання об'єкту не за весь строк експлуатації  $Q_N$ , а від моменту відновлення працездатності до відмови  $n$ , яка аналізується. Залежність між параметрами  $T_{com}^{(1)}$  та  $T_n^{(1)}$  має наступний вигляд:

$$T_n^{(1)} = T_{com}^{(1)} - \sum_{i=0}^{n-1} T_i^{(1)} = \sum_{i=0}^{n-1} Q_i^{(1)} - Q_{i-1}^{(1)} - Q_n^{(1)} - Q_{n-1}^{(1)}.$$

При цьому справедливою є система нерівностей:

$$\begin{cases} T_n^{(1)} \ll T_{com}^{(1)}, & n \rightarrow \max; \\ T_n^{(1)} = T_{com}^{(1)}, & n = 1. \end{cases}$$

Іншими словами, для випадку коли відбулась перша зміна технічного стану об'єкту з моменту початку життєвого циклу, тобто  $n = 1$  реальний час напрацювання до відмови та загальне напрацювання об'єкту приймають однакове значення [8,9].

Необхідність врахування загальної кількості  $H_{com}^{(1)}$  циклів включення-вимикання об'єкту пов'язана з появою перехідних процесів в електричних колах та напівпровідниках в результаті зміни їх стаціонарних станів в результаті включення або вимикання. В процесі технічної та льотної експлуатації повітряних суден не визначається порядок обліку кількості циклів включення-вимикання. Але в той же, час для розробки нейронної мережі прогнозування відмов обладнання, врахування впливу перехідних процесів на працездатність є важливим фактором забезпечення точності прогнозування. При цьому для забезпечення виявлення закономірностей на етапі навчання нейронної мережі значимим є не фактична кількість циклів включення-вимикання обладнання, а розраховане на основі єдиної методики значення  $H_{com}^{(1)}$  для всіх об'єктів одного типу для формування навчальної вибірки.

Як один з можливих варіантів пропонується порядок розрахунку величини  $H_{com}^{(1)}$  на основі обліку мінімальної можливої кількості циклів включення-вимикання обладнання в процесі технічної та льотної експлуатації об'єкту  $A^{(1)}$  за календарний строк  $Z_{com} = \{Z_n\}$  від моменту початку експлуатації та до моменту  $n$ -ї зміни стану об'єкту. Сумарне значення  $H_{com}^{(1)}$  в цьому випадку буде визначатись на основі виразу

$$H_{com}^{(1)} = \sum_{n=1}^N H_n^{(1)}.$$

Тут під значенням  $H_n^{(1)}$  розуміється кількість циклів включення вимикання з моменту відновлення стану об'єкту до наступної  $n$ -ї відмови за календарний період  $Z_n$ .

В свою чергу значення  $H_n^{(1)}$  розраховується на

основі обчислення мінімальної можливої кількості  $H_n^{(TO)}$  циклів в процесі технічного обслуговування та експлуатації та кількості  $H_n^{(LE)}$  циклів включення вимикання об'єкту під час льотної експлуатації повітряного судна:

$$H_n^{(1)} = H_n^{(TO)} + H_n^{(LE)}.$$

Розглянемо кожен складову виразу для отримання значення  $H_n^{(1)}$  окремо. Кількість циклів включення-вимикання  $H_n^{(TO)}$  об'єкту в процесі технічного обслуговування та експлуатації включає цикли роботи об'єкту під час приведення його в установлений ступінь готовності, підтримання справності чи працездатності і в загальному випадку може визначатись за допомогою виразу:

$$H_n^{(TO)} = h_n^{(ПП)} + h_n^{(ПдП)} + h_n^{(ПВ)} + h_n^{(ПсП)} + h_n^{(регл)} + h_n^{(нпрд)}.$$

Тут  $h_n^{(ПП)}$  - сумарна кількість циклів включення-вимикання об'єкту під час попередньої підготовки повітряного судна до польоту за календарний період  $Z_n$ ;  $h_n^{(ПдП)}$  - сумарна кількість циклів включення-вимикання об'єкту під час підготовки обладнання до повторного вильоту за календарний час  $Z_n$ ;  $h_n^{(ПВ)}$  - загальна кількість циклів під час виконання підготовки обладнання до повторного вильоту за період календарного строку  $Z_n$ ;  $h_n^{(ПсП)}$  - кількість циклів включення-вимикання об'єкту під час виконання всіх післяпольотних підготовок повітряного судна за період  $Z_n$ ;  $h_n^{(регл)}$  - кількість циклів включення-вимикання під час проведення регламентних та періодичних робіт за період часу  $Z_n$  експлуатації об'єкту;  $h_n^{(нпрд)}$  - кількість циклів включення-вимикання при виконанні неперіодичних робіт за період часу  $Z_n$ .

Порядок виконання та об'єм операцій при здійсненні видів підготовок визначається на основі регламенту технічного обслуговування. Звідси при обчисленні кількості  $h_n$  необхідно враховувати кількість циклів включення-вимикання об'єкту при виконанні однієї підготовки. У випадку, якщо підготовка обладнання вимагає одного циклу включення-вимикання об'єкту, величина  $h_n$  може бути обчислена з використанням загальної кількості  $P$  льотних змін за період календарного строку  $Z_n$ . Тоді кількість  $h_n$  циклів для кожного виду робіт буде визначатись наступним чином:

- кількість  $h_n^{(ПП)}$ ,  $h_n^{(ПдП)}$  та  $h_n^{(ПсП)}$  відповідно для всіх попередніх підготовок, передпольотних підготовок та післяпольотних підготовок буде визначатись на основі рівняння:

$$h_n^{(ПП)} = h_n^{(ПдП)} = h_n^{(ПсП)} = P,$$

де  $P$  - кількість виконаних льотних змін або окремих вильотів за календарний строк  $Z_n$ ;

- кількість  $h_n^{(ПВ)}$  циклів включення-вимикання об'єкту при виконанні підготовки до повторних вильотів за період  $Z_n$  розраховується наступним чином:

$$h_n^{(ПВ)} = \sum_{\rho=1}^P k_{\rho}^{(B)} - 1,$$

де  $k_{\rho}^{(B)}$  - кількість вильотів за  $\rho$ -ту льотну зміну;

- кількість  $h_n^{(регЛ)}$  циклів включення-вимикання при проведенні регламентних та періодичних робіт за календарний строк  $Z_n$

$$h_n^{(регЛ)} = \left[ \frac{R}{Z_n} \right],$$

де  $R$  - термін виконання періодичних або регламентних робіт;

- кількість  $h_n^{(нпрд)}$  циклів включення-вимикання під час неперіодичних робіт (роботи по зберіганню, роботи за бюлетенями, роботи по сезонному обслуговуванню і т.д.) розраховується за фактичною кількістю.

Перепишемо формулу для отримання  $H_n^{(ТО)}$  з врахуванням розглянутих виразів. В цьому випадку отримаємо:

$$H_n^{(ТО)} = 3 \cdot P + \sum_{\rho=1}^P (k_{\rho}^{(B)} - 1) + \left[ \frac{R}{Z_n} \right] + h_n^{(нпрд)}.$$

Розрахунок кількості  $H_n^{(ЛЕ)}$  циклів включення-вимикання об'єкту під час льотної експлуатації повітряного судна можливо здійснити за рахунок обліку кількості вильотів повітряного судна за період  $Z_n$ , в яких здійснювалось вмикання обладнання. Для випадку, коли вмикання обладнання здійснювалось у кожному вильоті кількість  $H_n^{(ЛЕ)}$  буде розраховуватись по формулі:

$$H_n^{(ЛЕ)} = P.$$

Розраховане на основі запропонованого правила значення  $Hcom^{(1)}$  об'єкту  $A^{(1)}$  може відрізнитись від реального значення  $Hcom'^{(1)}$  кількості циклів включення-вимикання. Тоді величина  $D(Hcom; Hcom')$ , яка характеризує ступінь відмінності реальної кількості  $Hcom'^{(1)}$  та кількості  $Hcom^{(1)}$ , розрахованої на основі запропонованого правила, буде приймати значення  $0 \leq D(Hcom; Hcom') \leq 1$  і розраховується

наступним чином:  $D(Hcom; Hcom') = \frac{Hcom}{Hcom'}$ .

Фізичний сенс метрики  $D(Hcom; Hcom')$  полягає в тому, що показується яку частину складає величина  $Hcom$  від реальної кількості  $Hcom'$  циклів за період часу  $Z_n$ . У якості прикладу можна привести значення метрики

$D(Hcom; Hcom')$  для випадку, коли

$$Hcom^{(1)} = Hcom'^{(1)} \text{ та } Hcom^{(1)} = \frac{Hcom'^{(1)}}{2} :$$

$$D(Hcom; Hcom') = \begin{cases} 1, & \rightarrow Hcom^{(1)} = Hcom'^{(1)}, \\ 0,5 & \rightarrow Hcom^{(1)} = \frac{Hcom'^{(1)}}{2}. \end{cases}$$

Особливістю визначеної метрики є те, що для кількості циклів  $Hcom$  та  $Hcom'$  різних об'єктів значення  $D(Hcom; Hcom')$  буде еквівалентним, а саме:

$$D(Hcom^{(1)}; Hcom'^{(1)}) \approx D(Hcom^{(2)}; Hcom'^{(2)}).$$

Це обумовлено тим, що метрика  $D(Hcom; Hcom')$  може розглядатись в тому числі, як показник, який характеризує точність та адекватність запропонованого правила визначення кількості  $Hcom$  і прийматиме однакове значення для різних об'єктів з однаковими умовами застосування.

Також пропонується при формуванні вектору вхідних параметрів враховувати коефіцієнт циклічності відмов  $\epsilon_n$ . Коефіцієнт  $\epsilon_n$  формується на основі спектрального аналізу залежності напрацювання до відмову  $T_n$  типу обладнання від порядкового номеру відмови  $n$ ,  $n = 1; \bar{N}$ . На основі коефіцієнт  $\epsilon_c$  можливо виявити періодичність при кожній  $n$ -ій відмові. Іншими словами коефіцієнт  $\epsilon_c$  можна інтерпретувати спектральну щільність напрацювання  $T$  через кожні  $n$ -ті відмови. Коефіцієнт  $\epsilon_c$  розраховується на основі наступного виразу:

$$\epsilon_n = \sum_{i=1}^N T_n \left[ \cos\left(\frac{2\pi n}{N} n\right) - i \sin\left(\frac{2\pi n}{N} n\right) \right],$$

де  $T_n$  - напрацювання об'єкту за період від моменту часу до  $Q_{n-1}$  моменту  $Q_n$ ;  $n$  - порядковий номер відмови.

Подальші дослідження щодо виявлення значущих факторів умов експлуатації обладнання з позиції умов експлуатації пов'язані з врахування можливості роботи одного типу обладнання на різних типах повітряних суден.

### Висновки і перспективи подальших досліджень

На основі проведеного аналізу порядку технічної експлуатації в умовах виконання бойових завдань виявлено, що для своєчасної підготовки повітряних суден питання прогнозування відмов бортового обладнання набуває актуального значення. Як один із можливих варіантів для забезпечення розрахунку напрацювання конкретного об'єкту до відмови пропонується використовувати нейронні мережі.

Для виявлення значущих факторів, які впливають на працездатність обладнання, розглянуто класифікацію експлуатаційних факторів з позицій умов застосування, якості та

умов експлуатації. Розглянуті особливості впливу об'єктивних факторів на об'єкт дослідження. Проведено аналіз функціонування двох об'єктів одного типу в умовах еквівалентного впливу експлуатаційних факторів. Одними із складових вектору вхідних параметрів нейронної мережі запропоновано використовувати наступні параметри та показники обладнання: загальний час напрацювання об'єкту з моменту введення в експлуатацію, напрацювання з моменту останнього відновлення працездатності, загальна кількість циклів включення-вимикання об'єкту.

В основі розрахунку загального напрацювання об'єкту та напрацювання з моменту останнього відновлення працездатності об'єкту покладено облік напрацювання під час кожного вильоту повітряного судна, а також на землі при виконання робіт, які виконуються на авіаційній техніці

### Література

1. **Фененко О.О., Борисенко В.С., Трошин О.Н.** Аналіз підготовки та застосування повітряних суден Збройних Сил України в антитерористичній операції. Харків. 2017. С. 3. 2. **Соловійов В.І.** Організація експлуатації військової авіаційної техніки :С-60 підруч. / [В. І. Соловійов, І. П. Коровін, С. М. Коротін та ін.]; за ред. В. І. Соловійова. - К. : НУОУ ім. Івана Черняховського. С. 2016. С. 196. 3. Правила інженерно-авіаційного забезпечення державної авіації України, затверджених наказом Міністерства оборони України від 05 липня 2016 № 343, зареєстрованим в Міністерстві юстиції України 08 серпня 2016 року за № 1101/29231; 4. **Методичні рекомендації державної авіації** з питань організації та виконання заходів інженерно-авіаційного забезпечення польотів та інших робіт на авіаційній техніці (МРДА-07/17) – наказ Начальника Управління регулювання діяльності державної авіації України (з основної діяльності) 08.09.2017 м. Київ № 40. 5. **Павлюк О** Прогнозування ймовірності роботи та відмови за заданої умови готовності симетричних ієрархічних систем, галужених до 4-го рівня, за допомогою штучних нейронних мереж. Львів. 2014. С. 2 6. **Калініна І.О.** Дослідження алгоритмів навчання

відповідно до документації інженерно-авіаційної служби.

Кількість циклів включення вимикання запропоновано розраховувати шляхом обліку мінімальної кількості вмикавання обладнання під час льотної та технічної експлуатації.

Аналіз значень напрацювання об'єкту показав можливість виявлення циклічності при кожній відмові. Для цього пропонується розраховувати коефіцієнт циклічності відмови на основі спектрального аналізу вектору напрацювання об'єктів для кожної конкретної відмови.

Наступний аналіз, щодо виявлення значущих факторів при побудові вектору вхідних параметрів нейронної мережі пов'язаний з виявленням особливостей застосування об'єктів одного типу.

нейронних мереж у задачах прогнозування. Київ. 2009. С. 2. 7. **Кириченко А.А.** Нейропакеты – современный интеллектуальный инструмент исследователя, 2013. С. 183. 8. **Хайкин С.** Нейронные сети: полный курс, 2-е изд., испр. : Пер. с англ. : ООО "И.Д. Вильямс", 2006. С. 1104. 9. **Шмідхубер Дж.** Глибоке навчання в нейронних мережах: огляд // Нейрові мережі. 2015. Вип. 61. С. 85–117. 10. **Міколов Т., Карафіат М., Бургет Л., Чернокі Дж., Худанпур С.** Мовна модель, що базується на нейромережевій мережі // 11-а щорічна конференція Міжнародної асоціації мовного спілкування. Японія. 2010. С. 1045–1048. 11. **Даніл В. Прохоров.** Нейронні мережі. 2008. № 21. С. 458–465. 12. **Чернодуб А.Н.** Оптична пам'ять та нейронні мережі (інформаційна оптика). 2012. № 2. С. 126-131. 13. **Хайкін С.** Нейронні мережі та навчальні машини. Prentice Hall. Нью-Йорк. 2009. №3 С. 936. 14. **Нік Бостром.** Суперінтелект: Шляхи, Небезпеки, Стратегії. Оксфорд University Press, 2014. 15. **Рохас Р.** Нейронні мережі: систематичний вступ. Спрингер. 2006. С. 113. 16. **Барский, А.Б.** Логічні нейронні мережі: Учебное пособие / А.Б.Барский: Біном, 2013. С. 352.

## СЕЛЕКЦИЯ ВХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОТКАЗОВ БОРТОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ

*Али Энверович Бекиров (кандидат технических наук)*

*Екатерина Андреевна Кругляк*

*Мария Михайловна Юзьвяк*

*Харьковский национальный университет Воздушных Сил им. Ивана Кожедуба, Харьков, Украина*

*Статья посвящена исследованию актуального вопроса прогнозирования отказов бортового оборудования. Эффективность выполнения боевых задач экипажами воздушных судов Вооруженных Сил Украины зависит, в том числе от оперативной и качественной подготовки бортового оборудования к полетам. Большой срок эксплуатации существующего парка летательных аппаратов требует постоянного анализа технического состояния оборудования для предупреждения отказов. Существующие методы прогнозирования связаны с анализом статистических данных и метриками вероятности. Возможным альтернативным способом контроля работоспособности оборудования является использование нейронных сетей. Проблематика построения топологии нейронной сети прогнозирования отказов связана с необходимостью селекции значимых факторов, влияющих на оборудование в процессе эксплуатации. В статье рассматриваются наиболее важные факторы влияния с позиции условий применения, качества и условий эксплуатации. Выявляются зависимости между параметрами для одного объекта исследования и параметрами объектов одного типа при различных условиях применения. Осуществляется выбор следующих параметров оборудования для использования при построении нейронной сети: общее время наработки оборудования, время наработки оборудования*

после последнего восстановления, общее количество циклов включения выключения и коэффициент цикличности отказа. Для каждого из параметров приводятся выражения, которые сформулированы с учетом особенностей технической и летной эксплуатации воздушных судов. Так, значение наработки объекта рассчитывается как суммарное время работы оборудования в полете и на земле при выполнении всех видов работ. Количество циклов включения-выключения предлагается рассчитывать на основе учета минимального количества применения оборудования в процессе эксплуатации. Также вводится коэффициент цикличности отказа, который предлагается вычислять на основе частотного анализа порядкового номера отказа и времени наработки объекта до конкретного отказа.

**Ключевые слова:** нейронная сеть, работоспособность оборудования, прогнозирование отказов.

## SELECTION OF INPUT PARAMETERS OF THE NEURAL NETWORK FOR FORECASTING ONBOARD EQUIPMENT FAILURES

*Ali Bekirov (Doctor of philosophy)  
Kateryn Kruhliak  
Mariia Yuzviak*

*Kharkiv National University of Air Force named after Ivan Kozhedub, Kharkiv, Ukraine*

The article is devoted to the study of the urgent issue of forecasting onboard equipment failures. The effectiveness of combat missions by aircraft crews of the Armed Forces of Ukraine depends on the operational and high-quality preparation of on-board equipment for flights. The long life of the existing fleet of aircraft requires constant analysis of the technical condition of the equipment to prevent failures. Existing forecasting methods are associated with the analysis of statistical data and probability metrics. A possible alternative way to monitor the health of equipment is to use neural networks. The problems of constructing the topology of the failure forecasting neural network is associated with the need to select significant factors affecting the equipment during operation. The article discusses the most important factors of influence in terms of application conditions, quality and operating conditions. Dependencies between the parameters for one object of study and the parameters of objects of the same type under various conditions of application are revealed. The following equipment parameters are selected for use in the construction of a neural network: total equipment operating time, equipment operating time after the last restoration, total number of on-off cycles and a failure cycle coefficient. For each of the parameters, expressions are given that are formulated taking into account the characteristics of the technical and flight operation of aircraft. So, the value of the operating time of the facility is calculated as the total time of the equipment in flight and on the ground when performing all types of work. The number of on-off cycles is proposed to be calculated based on the minimum amount of equipment used during operation. A failure cyclicity factor is also introduced, which is proposed to be calculated on the basis of a frequency analysis of the serial number of the failure and the operating time of the object to the specific failure.

**Key words:** neural network, equipment performance, failure forecasting.

### References

- 1. Fenenko O.O., Borisenko V.S., Troshin O.N.** (2017). Analysis of the preparation and use of aircraft of the Armed Forces of Ukraine in the anti-terrorist operation – Kharkiv. 3 p.
- 2. Soloviev V.I.** (2016). Organization of operation of military aviation equipment: C-60 textbook. / [V. I. Solovyov, IP Korovin, SM Korotin, etc.]; in a row. VI Solovyov. - K.: NGOs them. Ivan Chernyakhovsky. S.196 p.
- 3. The rules of engineering and aviation support** of the State Aviation of Ukraine, approved by the order of the Ministry of Defense of Ukraine dated July 05 (2016), No. 343, registered at the Ministry of Justice of Ukraine on August 08, 2016 under No. 1101/29231;
- 4. State Aviation Methodological Recommendations** on the Organization and Implementation of Aviation Engineering and Aviation Measures (MRDA-07/17) - Order of the Head of the State Aviation Regulatory Authority of Ukraine (Main Activity) (08.09.2017), Kyiv No. 40
- 5. Pavliuk. O.** (2014). Prediction of probability of failure and failure under a given condition of readiness of symmetric hierarchical systems, branching up to level 4, using artificial neural networks. Lviv. 2 p.
- 6. Kalinina I.O.** (2009). Investigation of neural network training algorithms in forecasting tasks. Kiev. 113 p.
- 7. Kirichenko A.A.** (2013) Neuropackages - a modern intellectual tool of a researcher. 183 p.
- 8. Khaykin S.** (2006). Neural networks: a complete course, 2nd ed., Ispr. : Trans. with English. - M.: ID Williams LLC, 1104 p.
- 9. Schmidhuber J.** (2015). Deep Learning in Neural Networks: An Overview // Neural Networks. Vol. 61. 85–117 p.
- 10. Mikolov T., Karafiat M., Burget L.** (2010). Cernocky J., Khudanpur S. Recurrent neural network based language model // 11th Annual Conference of the International Speech Communication Association. Japan. 1045–1048 p.
- 11. Danil V. Prokhorov.** Neural Networks. (2008). № 21. 458-465 p.
- 12. Chernodub A.N.** (2012). Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). № 2. 126-131 p.
- 13. Haykin S.** (2009). Neural Networks and Learning Machines, Third Edition. New York: Prentice Hall. 936 p.
- 14. Nick Bostrom.** (2014). SuperIntelligence: Paths, Dangers, Strategies. Oxford University Press.
- 15. Rojas R.** (2006). Neural Networks: A Systematic Introduction. Springer.
- 16. Barsky A.B.** (2013). Logical neural networks: Textbook / AB Barsky: Binom, 352 p.