

С. І. Владов, Я. С. Долударєва, А. С. Сіора, А. В. Пономаренко, А. А. Яніцький

## НЕЙРОМЕРЕЖЕВИЙ ОБЧИСЛЮВАЧ ЗАДЛЯ ВІДНОВЛЕННЯ ВТРАЧЕНОЇ ІНФОРМАЦІЇ ЗІ ШТАТНИХ ДАТЧИКІВ БОРТОВОЇ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ І ДІАГНОСТИКИ АВІАЦІЙНОГО ДВИГУНА ТВ3-117

**Предметом** дослідження в статті є авіаційний двигун ТВ3-117 та методи контролю і діагностики його технічного стану. **Мета** роботи – розробка нейромережевого обчислювача задля відновлення втраченої інформації зі штатних датчиків бортової системи контролю і діагностики технічного стану авіаційного двигуна ТВ3-117 в режимі реального часу. В статті вирішуються наступні **завдання**: відновлення втраченої інформації автоасоціативною нейронною мережею при одиночній відмові датчика, відновлення втраченої інформації «оптимальною» автоасоціативною нейронною мережею у разі одиночних відмов датчиків бортової системи контролю і діагностики, відновлення втраченої інформації автоасоціативною нейронною мережею і бортовою системою контролю і діагностики з датчика реєстрації температури газів перед турбіною компресора у разі його відмови. Використовуються такі методи: методи теорії ймовірностей і математичної статистики, методи нейроінформатики, методи теорії інформаційних систем та обробки даних. Отримано наступні **результати**: Розв'язано актуальну задачу відновлення втраченої інформації зі штатних датчиків в режимі реального часу. Досліджено різні архітектури обчислювачів і алгоритми відновлення. Пропонується інженерна процедура відновлення втраченої інформації з використанням нейрообчислювача. У результаті використання нейрообчислювача забезпечено ефективне і якісне відновлення інформації зі штатних датчиків в умовах бортової системи контролю і діагностики авіаційного двигуна ТВ3-117. **Висновки**: Використання автоасоціативної нейронної мережі у бортовій системі контролю і діагностики для відновлення інформації дозволяє забезпечити відмовостійкість вимірвальних каналів систем управління, зокрема авіаційного двигуна ТВ3-117. Основною перевагою використання нейронних мереж у рамках бортової системи контролю і діагностики є можливість навчання і донавчання у режимі реального часу з урахуванням індивідуальних характеристик конкретного двигуна. Відновлення інформації при відмові датчиків за допомогою автоасоціативної нейронної мережі забезпечує похибку відновлення даних не більше 0,45 % у разі одиночних відмов і не більше 0,6 % у разі подвійних відмов. При цьому час одного циклу відновлення даних становить 1589,544 нс для обчислювача Raspberry Pi NanoPi M1 Plus і 196,246 нс – для спеціалізованого нейропроцесора Intel Neural Compute Stick 2, що задовольняє вимогам бортової реалізації у складі бортової системи контролю і діагностики.

**Ключові слова**: авіаційний двигун; автоасоціативна нейронна мережа; відновлення; датчик.

### Вступ

У процесі управління експлуатацією складного технічного об'єкта здійснюється безперервний контроль і діагностика його параметрів з метою прийняття рішення про його фактичний стан. У процесі польоту вертольоту блок синхронізації даних здійснює безперервний запис і аналіз множини параметрів, що характеризують динаміку силової установки літального апарату (СУЛА) і близько двохсот дискретних параметрів. За годину польоту в бортову базу даних (БД) записується більше 3500 параметрів. У цих умовах суттєвого значення має надійність контрольної-виміральної апаратури, особливо датчиків, відмови яких у системі управління авіаційним двигуном [1], наприклад, двигуном ТВ3-117 у складі силової установки вертольоту Мі-8МТВ, призводять до тяжких наслідків, оскільки це пов'язано із достроковим завершенням польотного завдання або з передчасним зняттям двигуна з борту літального апарату. Відомо, що 15...20 % відмов авіаційних двигунів асоціюється з відмовою датчиків.

Вихід з ладу датчика в одному з вимірвальних каналів – найбільш важка відмова, що може носити короточасний або тривалий характер, наприклад, відмова датчика частоти обертання може призвести до видачі помилкового сигналу регулятору частоти обертання на підвищення витрати палива (паливний насос – дозувальна голка) [1] до камери згоряння двигуна, а це, у свою чергу, – до її руйнування (прогару стінок камери згоряння) або термічного

руйнування лопатей турбіни.

Тому бортова система контролю і діагностики (БСКД) технічного авіаційного двигуна ТВ3-117 повинна мати високу стійкість до відмов, що забезпечується у процесі виконання операцій: виявлення стану відмови; локалізація відмови; відновлення працездатності.

Виявлення відмови системи контролю і діагностики технічного авіаційного двигуна ТВ3-117 здійснюється на основі вимоги максимальної швидкодії. Тому при розробці таких систем одним з питань є аналіз вимірних з двигуна даних.

### Аналіз існуючих джерел та постановка задачі досліджень

Розв'язання даної задачі безпосередньо пов'язане з виявленням відмов датчиків і відновленням втраченої інформації з них на основі використання нейромережевих методів та інженерної методики, що реалізує таку послідовність кроків: статистична обробка даних (етап попередньої обробки); вибір архітектури нейронної мережі (НМ); вибір її структури; вибір алгоритму навчання НМ; навчання НМ; тестування НМ; ефективності роботи НМ.

Одним з нейромережевих методів розв'язання задачі відновлення втраченої інформації є використання НМ як математичної моделі авіаційного двигуна ТВ3-117, отриманої в процесі ідентифікації характеристик авіаційного двигуна.

У [2–6] констатується можливість відновлення

втраченої інформації з датчиків авіаційних газотурбінних двигунів (ГТД), але разом з тим відсутня методика, на основі якої здійснюється відновлення втрачених даних. У [7] була запропонована методика і створено програмне забезпечення для процесу відновлення втраченої інформації з датчиків ГТД у складі бортової системи його контролю і діагностики.

Отже, аналіз сучасних бортових систем показує, що спектр задач, що вирішуються ними, безперервно зростає. Це пояснюється постійним вдосконаленням авіаційного двигуна і, як наслідок, виконуваних ним функцій, а також відповідним збільшенням числа контрольованих і діагностованих параметрів на борту повітряного судна [8]. Однак, разом з тим, при великому різноманітті виконуваних задач, існують певні складності:

- обмежені обчислювальні ресурси (обсяг оперативної пам'яті, швидкодія, точність отриманих результатів);
- труднощі формалізації класичних алгоритмів контролю та діагностики і, як наслідок, їх практичної реалізації;
- необхідність реалізації перерахованих вище алгоритмів на мові низького рівня (асемблер);
- труднощі відновлення інформації при відмові датчиків.

### Розробка автоасоціативної нейронної мережі

Однією з ключових задач, що розв'язуються на борту літального апарату, є виявлення параметричних відмов датчиків (деградації їх характеристик). У цьому випадку може, як правило, використовуватися метод мажоритарного контролю [9]. Сутність методу мажоритарного контролю полягає в тому, що якщо серед датчиків один з них має характеристику, відмінну від еталонної, то введення додаткового каналу вимірювання у вигляді математичної моделі дозволяє обчислювати середнє значення даного виміру (медіану) і тим самим відновлювати втрачену з датчика інформацію. Розв'язок задачі відновлення інформації з використанням нейромережевої моделі двигуна декомпонується на дві підзадачі: задача ідентифікації математичної моделі, задача відновлення інформації. Розв'язання задачі відновлення інформації із використанням нейромережевих технологій за допомогою методу мажоритарного контролю наведено у [8–10].

Іншим альтернативним підходом до відновлення інформації є використання для цих цілей автоасоціативної нейронної мережі (АНМ), що володіє властивістю стиску і подальшого відновлення інформації. Відомі роботи [2, 11], в яких показана можливість використання АНМ для відновлення вимірної інформації за термогазодинамічними параметрами ГТД. Разом з тим в цих роботах відсутні методики їх побудови та рекомендації щодо вибору структури і алгоритмів навчання АНМ.

На рис. 1, а приведена архітектура АНМ [10], що складається з трьох шарів. При цьому АНМ здійснює дзеркальне відображення вектору вхідних даних на самого себе. Стиснення інформації здійснюється у прихованому шарі нейронної мережі, званім «горлом», відновлення інформації здійснюється у вихідному шарі. Принципова можливість використання стиснутого відображення складає основу методу головних компонент. Ключовим моментом у виборі структури АНМ є визначення оптимальної кількості нейронів у «горлі».

На рис. 1, б наведено графік залежності помилки відновлення інформації мережею при відмові одного з датчиків (у даному випадку, датчика частоти обертання ротора компресора) від кількості нейронів у горлі АНМ. По осі абсцис на рис. 1, б відкладений відносний розмір горла – відношення кількості нейронів в горлі до кількості вхідних/вихідних нейронів (4 нейрони). Як видно з рис. 1, б, оптимальний розмір горла у даному випадку дорівнює 0,8, тобто кількість нейронів у горлі (прихованому шарі АНМ) по-винна дорівнювати трьом.

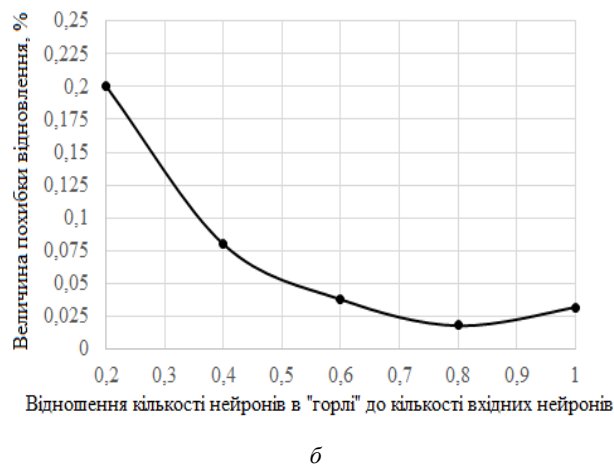
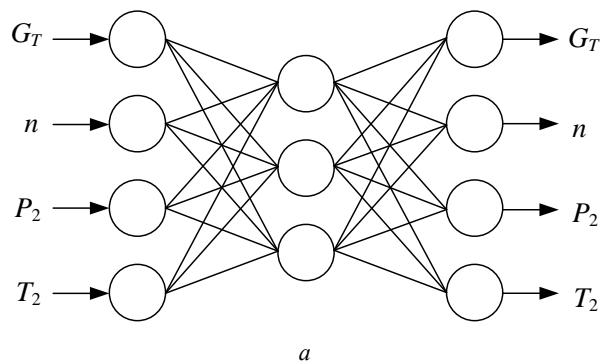


Рис. 1. АНМ: а – архітектура АНМ; б – Графіки залежностей помилки навчання нейронної мережі від числа нейронів прихованого шару [10]

Поряд з питанням вибору структури АНМ, важливим етапом є етап відновлення інформації за результатами функціонування цієї нейронної мережі. У даній роботі використовується підхід, запропонований у [383] і зображений у вигляді функціональної схеми на рис. 2.



Рис. 2. Функціональна схема відновлення інформації на основі АНМ [10]

Сигнали з датчиків одночасно надходять до стеку і системи допускового контролю, що здійснює контроль виміряних значень з датчиків. Якщо сигнали з датчиків знаходяться в полі допуску, то вони безперешкодно передаються далі в систему управління, яка здійснює управління виконавчими механізмами (ВМ), що впливають на двигун. У разі, якщо будь-якого із сигналів датчиків виходить за поле допуску, то система допускового контролю вилучає останнє значення цього сигналу зі стеку і передає його на відповідний вхід АНМ, яка відновлює інформацію і

далі передає її до системи автоматизованого управління (САУ) авіаційним двигуном ТВ3-117.

### Результати досліджень

На рис. 3 показаний процес відновлення інформації з датчиків на основі НМ. Остання включається безпосередньо між датчиками Д1...Дп [7] (або в загальному інформаційному каналі) і системою управління авіаційним двигуном ТВ3-117.

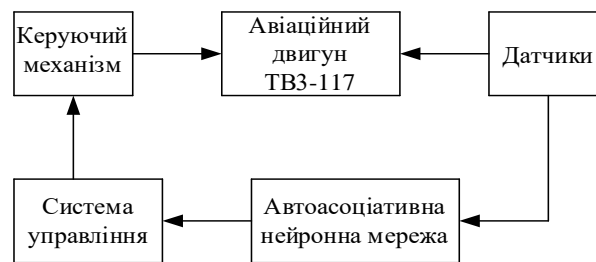


Рис. 3. Функціональна схема управління авіаційним двигуном ТВ3-117 на основі автоасоціативної нейронної мережі (АНС)

Перевагами запропонованої функціональної схеми (рис. 3) є простота її реалізації та прозорість роботи АНМ у складі системи управління. Для обчислення похибки відновлення втраченої з датчиків інформації використовується залежність вигляду:

$$e = \frac{real\_value - nwa\_value}{max\_value - min\_value} \cdot 100\%, \quad (1)$$

де  $real\_value$  – реальне значення параметра;  
 $nwa\_value$  – відновлене значення параметра;

$max\_value, min\_value$  – максимальне і мінімальне значення параметра.

Графік відновлення втраченої інформації АНМ при відмові одного з штатних датчиків авіаційного двигуна ТВ3-117:  $T_r^*$  – температури газів перед турбіною компресора (14 здвоєних термопар Т-102) показаний на рис. 2=4, де 1 – значення параметра, 2 – значення параметра за допомогою нейронної мережі, 3 – значення параметра, отриманого з датчика.

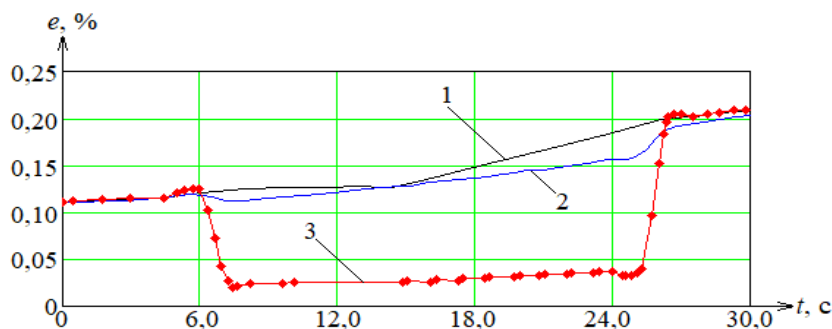


Рис. 4. Відновлення втраченої інформації автоасоціативною нейронною мережею при одиночній відмові датчика температури газів перед турбіною компресора (обриві)

Недоліком даного підходу є висока похибка відновлення одиночних відмов датчиків БСКД: похибка відновлення значення з датчиків у разі обриву складає 4,5...5,0 %, а при поступовій відмові – до 5,5 %.

Іншим підходом до відновлення втраченої інформації з датчиків БСКД на основі АНМ є використання буфера (стека пам'яті) задля збереження останнього правильного значення з відмовив датчика.

Цей підхід був розглянутий у [4, 7, 12]. На відміну від [2–6] у них розглядається метод визначення оптимального розміру горла АНМ, але була відсутня інженерна методика отримання

працюючої АНМ для процесу відновлення втраченої з датчиків БСКД інформації. Дослідження методу головних компонент дозволяє побудувати АНМ оптимальної структури, використання якої для розв'язання даної задачі зменшує похибку відновлення втраченої інформації з датчиків БСКД.

Графік процесу відновлення втраченої інформації з датчиків БСКД «оптимальної» АНМ у разі одиночних відмов датчиків (їх обриві) приведений на рис. 5, де 1 – значення параметра, 2 – значення відновленого сигналу за допомогою нейронної мережі, 3 – значення параметра, отриманого з датчика.

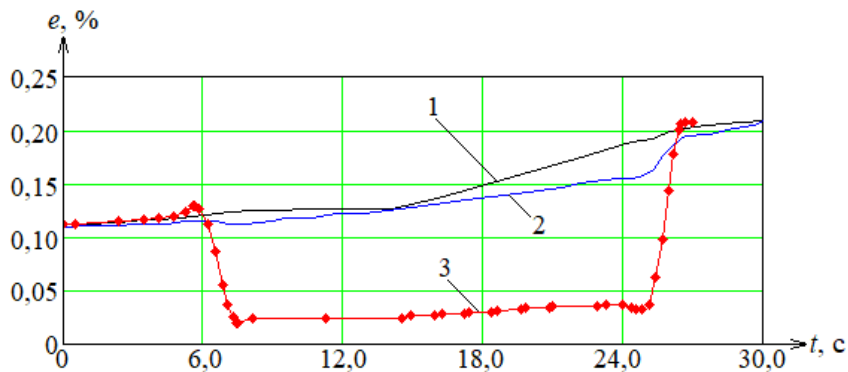


Рис. 5. Відновлення втраченої інформації «оптимальної» АНМ у разі одиночних відмов датчиків БСКД

Експериментальні дослідження з «оптимальною» АНМ свідчать, що похибка відновлення нею втраченої інформації з датчиків БСКД у разі одиночних відмов становить 1,5...2,0 %, а при їх поступових відмовах – не перевищує 2,5 %. Подальше зменшення похибки відновлення втраченої з датчиків БСКД інформації здійснюється на основі використання логіки виявлення відмов, що ідентифікує відмову та ізолює датчик, який відмовив.

Для підвищення ефективності та зменшення похибки відновлення втраченої інформації пропонується таке вдосконалення існуючих раніше підходів:

- запис даних вимірювань до буферу (стек-пам'яті) здійснюється безперервно: якщо датчик справний, то записується показання зі справного датчика, в іншому випадку – його відновлене значення;

- при виявленні відмови датчика нейронна мережа функціонує відповідно до такої послідовності кроків:

1 Отримати вихідні дані з датчиків (замість параметра відмовив датчика його попереднє значення з буфера), задати максимальну кількість обчислень  $d$ , і вже проведених обчислень  $q = 0$ .

2 Обчислити в емуляторі виходи нейронної мережі і збільшити параметр  $q$  на 1 ( $q = q + 1$ ).

3 Записати вихідні дані з датчиків (замість параметра датчика, що відмовив, його попереднє значення з виходу АНМ).

4 Якщо  $q < d$ , то перейти до кроку 1;

5 Інакше завершити обчислення і видати результат системі управління зі збереженням відновленого значення в буфер.

6 Використовувати додаткову нейронну мережу для діагностики (НМД) параметрів авіаційного двигуна ТВ3-117 (в якості діагностичної нейронної мережі використовується перцептрон з одним прихованим шаром) [13, 14].

Удосконалена функціональна схема відновлення втраченої інформації з датчиків БСКД показана на рис. 6, де суцільною лінією наведені канали передачі даних, а пунктирною – сигнали відповідних команд управління.

Так, якщо системою контролю в штатному режимі роботи БСКД не виявлена відмова датчика, то даними виступає поточне значення з датчика. При виявленні відмови датчика запис до буферу (стек-пам'яті) здійснюється на основі обчислень АНМ. При цьому відмова датчика виявляється вбудованою системою допускового контролю, що в разі виходу показів датчика за межі поля допуску оголошує останній несправним і для відновлення його значення використовує останнє значення, що записане в буфер.

Графік процесу відновлення втраченої з датчика  $T_r^*$  інформації АНС на основі запропонованого (модернізованого) підходу зображена на рис. 7, де 1 – значення параметра, 2 – значення відновленого сигналу за допомогою нейронної мережі, 3 – значення параметра, отриманого з датчика.



Рис. 6. Удосконалена функціональна схема відновлення втраченої інформації у БСКД

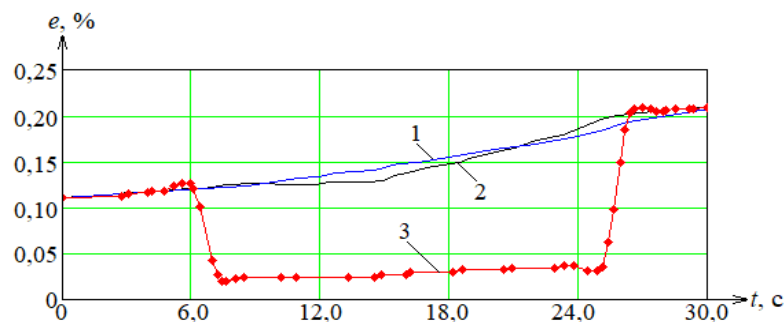


Рис. 7. Відновлення втраченої інформації АНМ і БСКД з датчика  $T_r^*$  у разі його відмови

Похибка відновлення втраченої інформації з відмовив датчика  $T_r^*$  у разі його обриву і при поступовій відмові не досягала до 0,25 %. Тому згідно з [15] пропонується така інженерна методика створення, навчання і тестування нейронних мереж для відновлення втраченої інформації з датчиків БСКД: попередня обробка даних (нормування, калібрування, оцифрування) для навчання НМ: статистична обробка даних для виявлення грубих похибок вимірювання; масштабування даних; вибір архітектури НМ; вибір структури НМ; для АНМ розмір горла вибирається виходячи з результатів коваріаційного аналізу, в основу якого покладено метод головних компонент [4]. Вибір функцій активації було розглянуто у [7]; для несанкціонованого доступу розмір одного прихованого шару вибирається рівним за розмір вхідного шару, функція активації логістична; вибір алгоритму навчання; навчання НМ; тестування; оцінка ефективності розроблених нейронних мереж для процесу відновлення втраченої з датчиків БСКД

інформації.

## Висновки

Використання АНМ у БСКД для відновлення інформації дозволяє забезпечити відмовостійкість вимірювальних каналів систем управління, зокрема авіаційного двигуна ТВ3-117. Основною перевагою використання нейронних мереж у рамках БСКД є можливість навчання і донавчання у режимі реального часу з урахуванням індивідуальних характеристик конкретного двигуна.

Відновлення інформації при відмові датчиків за допомогою АНМ забезпечує похибку відновлення даних не більше 0,45 % у разі одиночних відмов і не більше 0,6 % у разі подвійних відмов. При цьому час одного циклу відновлення даних становить 1589,544 нс для обчислювача Raspberry Pi NanoPi M1 Plus і 196,246 нс – для спеціалізованого нейропроцесора Intel Neural Compute Stick 2 [10], що задовольняє вимогам бортової реалізації у складі БСКД.



**Список літератури**

1. Vladov S. Algorithms for diagnostic and parameter of failures of channels of measurement of TV3-117 aircraft engine automatic control system in flight modes based of neural network technologies. *Proceedings of the National Aviation University*. 2020. No. 3 (84). P. 27–37.
2. Валеев С. С., Васильев В. И., Ильясов Б. Г., Сун Жан-Гуо. Отказоустойчивые системы управления сложными динамическими объектами с использованием искусственных нейронных сетей. *Нейрокомпьютеры: разработка, применение*. 2000. № 1. С. 32–35.
3. Guo T., Musgrave J., Lin C. Neural Networks Based Sensor Validation for Reusable Rocket Engines. *Proceedings of the American Control Conference*. 1995. P. 1367–1372.
4. Guo T., Sans J. Sensor Validation for Turbofan Engines Using an Autoassociative Neural Network. *Proceedings of the AIAA Guidance, Navigation and Control Conference*. 1996. P. 1–7.
5. Kramer M. Autoassociative Neural Networks. *Computers & Chemical Engineering*. 1995. Vol. 16. № 4. P. 313–328.
6. Zedda M., Singh R. Fault Diagnosis of a Turbofan Engine Using Neural Networks: a Quantitative Approach. *Proc. of the 34 th AIAA /ASME/ SAE/ASME. Joint Propulsion Conference & Exhibit*. 1998. P. 1–10.
7. Жернаков С. В., Муслухов И. И. Нейровычислитель для восстановления потерянной информации со штатных датчиков бортовой системы контроля и диагностики. *Нейроинформатика*. 2006. Ч. 3. С. 180–188.
8. Васильев В. И., Жернаков С. В., Муслухов И. И. Бортовые алгоритмы контроля параметров ГТД на основе технологии нейронных сетей. *Вестник УГАТУ*. 2009. Т. 12. № 1 (30). С. 61–74.
9. Жернаков С. В. Алгоритмы контроля и диагностики авиационного ГТД в условиях бортовой реализации на основе технологии нейронных сетей. *Вестник УГАТУ*. 2010. Т. 14. № 3 (38). С. 42–56.
10. Vladov S., Kotliarov K., Hrybanova S., Husarova O., Chyzhova L. On-board information restoring method in case of failure of one of the sensors of the aircraft engine TV3-117 based on neural network technologies. *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*. 2019. Issue 6/2019 (119). P. 91–98.
11. Мерил У. К. Обнаружение отказов датчиков ГТД за счет аналитической избыточности. *Аэрокосмическая техника*. 2004. № 6. С. 28–41.
12. Жернаков С. В., Муслухов И. И. Парирование отказов датчиков газотурбинных двигателей с помощью нейронных сетей. *Вычислительная техника и новые информационные технологии*. 2003. С. 35–41.
13. Vladov S., Kotliarov K., Hrybanova S., Husarova O., Derevyanko I., Gvozdik S. Neuro-mechanical methods of control and diagnostics of the technical state of aircraft engine TV3-117 in film regions. *Visnyk of Kherson National Technical University*. 2020. No. 1 (72). Part 1. P. 141–154.
14. Shmelov Yu., Vladov S., Derevyanko I., Dieriabina I., Chyzhova L. Identification of rear model of TV3-117 aircraft engine based on the basis of neuro-multi-functional technologies. *Innovative technologies and scientific solutions for industries*. 2019. No. 1 (7). P. 43–49. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2019.7.043>
15. Васильев В. И., Жернаков С. В. Контроль и диагностика технического состояния авиационных двигателей на основе интеллектуального анализа данных. *Вестник УГАТУ*. 2006. Т. 7, № 2 (15). С. 84–100.

**References**

1. Vladov, S. (2020), "Algorithms for diagnostic and parameter of failures of channels of measurement of TV3-117 aircraft engine automatic control system in flight modes based of neural network technologies", *Proceedings of the National Aviation University*, No. 3 (84), P. 27–37.
2. Valeev, S. S., Vasiliev, V. I., Iliysov, B. G., Zhan-Guo, S. (2000), "Fault-tolerant control systems for complex dynamic objects using artificial neural networks" ["Otkazoustojchivye sistemy upravleniya slozhnymi dinamicheskimi obektami s ispolzovaniem iskusstvennyh nejronnyh setej"], *Neurocomputers: development, application*, No. 1, P. 32–35.
3. Guo, T., Musgrave, J., Lin, C. (1995), "Neural Networks Based Sensor Validation for Reusable Rocket Engines", *Proceedings of the American Control Conference*, P. 1367–1372.
4. Guo, T., Sans, J. (1996), "Sensor Validation for Turbofan Engines Using an Autoassociative Neural Network", *Proceedings of the AIAA Guidance, Navigation and Control Conference*. P. 1–7.
5. Kramer, M. (1995), "Autoassociative Neural Networks", *Computers & Chemical Engineering*, Vol. 16, No 4, P. 313–328.
6. Zedda, M., Singh, R. (1998), "Fault Diagnosis of a Turbofan Engine Using Neural Networks: a Quantitative Approach", *Proc. of the 34 th AIAA /ASME/ SAE/ASME. Joint Propulsion Conference & Exhibit*, P. 1–10.
7. Zhernakov, S. V., Musluhov, I. I. (2006), "Neurocomputer for recovering lost information from standard sensors of the on-board monitoring and diagnostic system" ["Nejrovychislitel dlya vosstanovleniya poteryannoj informacii so shtatnyh datchikov bortovoj sistemy kontrolya i diagnostiki"], *Neuroinformatics*, Part 3, P. 180–188.
8. Vasiliev, V. I., Zhernakov, S. V., Musluhov, I. I. (2009), "Onboard algorithms for control of GTE parameters based on neural network technology" ["Bortovye algoritmy kontrolya parametrov GTD na osnove tekhnologii nejronnyh setej"], *Bulletin of USATU*, Vol. 12, No. 1 (30), P. 61–74.
9. Zhernakov, S. V. (2010), "Algorithms for monitoring and diagnostics of an aviation gas turbine engine under conditions of onboard implementation based on neural network technology" ["Algoritmy kontrolya i diagnostiki aviacionnogo GTD v usloviyah bortovoj realizacii na osnove tekhnologii nejronnyh setej"], *Bulletin of USATU*, Vol. 14, No. 3 (38), P. 42–56.
10. Vladov, S., Kotliarov, K., Hrybanova, S., Husarova, O., Chyzhova, L. (2019), "On-board information restoring method in case of failure of one of the sensors of the aircraft engine TV3-117 based on neural network technologies", *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*, Issue 6/2019 (119), P. 91–98.

11. Meril, U. K. (2004), "Failure detection of GTE sensors due to analytical redundancy" ["Obnaruzhenie otkazov datchikov GTD za schet analiticheskoy izbytochnosti"], *Aerospace engineering*, No. 6, P. 28–41.
12. Zhernakov, S. V., Musluhov, I. I. (2003), "Parrying sensor failures in gas turbine engines using neural networks" ["Parirovanie otkazov datchikov gazoturbinnykh dvigatelej s pomoshchyu nejronnykh setej"], *Computing technology and new information technologies*, P. 35–41.
13. Vladov, S., Kotliarov, K., Hrybanova, S., Husarova, O., Derevyanko, I., Gvozdik, S. (2020), "Neuro-mechanical methods of control and diagnostics of the technical state of aircraft engine TV3-117 in film regions", *Visnyk of Kherson National Technical University*, No. 1 (72), Part 1, P. 141–154.
14. Shmelov, Yu., Vladov, S., Derevyanko, I., Dieriabina, I., Chyzhova, L. (2019), "Identification of rear model of TV3-117 aircraft engine based on the basis of neuro-multi-functional technologies", *Innovative technologies and scientific solutions for industries*, No. 1 (7), P. 43–49. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2019.7.043>
15. Vasiliev, V. I., Zhernakov, S. V. (2006), "Monitoring and diagnostics of the aircraft engines technical condition based on data mining" ["Kontrol' i diagnostika tekhnicheskogo sostoyaniya aviacionnykh dvigatelej na osnove intellektualnogo analiza dannykh"], *Bulletin of USATU*, Vol. 7, No. 2 (15), P. 84–100.

*Надійшла (Received) 30.11.2020*

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Владов Сергій Ігорович** – кандидат технічних наук, Кременчуцький льотний коледж Харківського національного університету внутрішніх справ, завідувач відділення планування навчального процесу фахової підготовки навчального відділу, викладач циклової комісії природничих дисциплін, Кременчук, Україна; email: [ser26101968@gmail.com](mailto:ser26101968@gmail.com); ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8009-5254>.

**Владов Сергей Игоревич** – кандидат технических наук, Кременчугский летный колледж Харьковского национального университета внутренних дел, заведующий отделением планирования учебного процесса профессиональной подготовки учебного отдела, преподаватель цикловой комиссии естественных дисциплин, Кременчуг, Украина.

**Vladov Serhii** – PhD (Engineering Sciences), Kremenchuk Flight College of Kharkiv National University of Internal Affairs, Head of the Department of Planning the Educational Process of Professional Training of the Educational Department, Teacher of the Department of Natural Disciplines, Kremenchuk, Ukraine.

**Долударева Яна Станіславівна** – кандидат технічних наук, доцент, Кременчуцький льотний коледж Харківського національного університету внутрішніх справ, голова циклової комісії природничих дисциплін, Кременчук, Україна; email: [ztd.nv.klk@gmail.com](mailto:ztd.nv.klk@gmail.com); ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4089-2010>.

**Долударева Яна Станиславовна** – кандидат технических наук, доцент, Кременчугский летный колледж Харьковского национального университета внутренних дел, председатель цикловой комиссии естественных дисциплин, Кременчуг, Украина.

**Doludareva Yana** – PhD (Engineering Sciences), Associate Professor, Kremenchuk Flight College of Kharkiv National University of Internal Affairs, Head of the Department of Natural Disciplines, Kremenchuk, Ukraine.

**Сіора Андрій Сергійович** – Кременчуцький льотний коледж Харківського національного університету внутрішніх справ, викладач циклової комісії природничих дисциплін, Кременчук, Україна; email: [siora.andrey@gmail.com](mailto:siora.andrey@gmail.com); ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2934-7281>.

**Сюра Андрей Сергеевич** – Кременчугский летный колледж Харьковского национального университета внутренних дел, преподаватель цикловой комиссии естественных дисциплин, Кременчуг, Украина.

**Siora Andrii** – Kremenchuk Flight College of Kharkiv National University of Internal Affairs, Teacher of the Department of Natural Disciplines, Kremenchuk, Ukraine.

**Пономаренко Анатолій Володимирович** – Кременчуцький льотний коледж Харківського національного університету внутрішніх справ, викладач циклової комісії технічного обслуговування авіаційної техніки, Кременчук, Україна; email: [sky.ntl.pnmrnk@gmail.com](mailto:sky.ntl.pnmrnk@gmail.com); ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4143-1814>.

**Пономаренко Анатолий Владимирович** – Кременчугский летный колледж Харьковского национального университета внутренних дел, преподаватель цикловой комиссии технического обслуживания авиационной техники, Кременчуг, Украина.

**Ponomarenko Anatolii** – Kremenchuk Flight College of Kharkiv National University of Internal Affairs, Teacher of the Department of Technical Maintenance of Aviation Equipment, Kremenchuk, Ukraine.

**Яницький Анатолій Анатолійович** – Кременчуцький льотний коледж Харківського національного університету внутрішніх справ, викладач циклової комісії технічного обслуговування авіаційної техніки, Кременчук, Україна; email: [smit1003@ukr.net](mailto:smit1003@ukr.net); ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5318-1915>.

**Яницкий Анатолий Анатольевич** – Кременчугский летный колледж Харьковского национального университета внутренних дел, преподаватель цикловой комиссии технического обслуживания авиационной техники, Кременчуг, Украина.

**Yanitskyi Anatolii** – Kremenchuk Flight College of Kharkiv National University of Internal Affairs, Teacher of the Department of Technical Maintenance of Aviation Equipment, Kremenchuk, Ukraine.

## НЕЙРОСЕТЕВОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПОТЕРЯННОЙ ИНФОРМАЦИИ ИЗ ШТАТНЫХ ДАТЧИКОВ БОРТОВОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ АВИАЦИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ТВ3-117

**Предметом** исследования в статье является авиационный двигатель ТВ3-117 и методы контроля и диагностики его технического состояния. **Цель** работы – разработка нейросетевого вычислителя для восстановления потерянной информации из штатных датчиков бортовой системы контроля и диагностики технического состояния авиационного двигателя ТВ3-117 в режиме реального времени. В статье решаются следующие **задачи**: восстановление утраченной информации автоассоциативной нейронной сетью при одиночном отказе датчика, восстановление потерянной информации «оптимальной» автоассоциативной нейронной сетью в случае одиночных отказов датчиков бортовой системы контроля и диагностики, восстановление потерянной информации автоассоциативной нейронной сетью и бортовой системой контроля и диагностики с датчика регистрации температуры газов перед турбиной компрессора в случае его отказа. Используются следующие методы: методы теории вероятностей и математической статистики, методы нейроинформатики, методы теории информационных систем и обработки данных. Получены следующие **результаты**: Решена актуальная задача восстановления потерянной информации со штатных датчиков в режиме реального времени. Исследованы различные архитектуры вычислителей и алгоритмы восстановления. Предлагается инженерная методика восстановления потерянной информации с использованием нейровычислителя. В результате использования нейровычислителя обеспечено эффективное и качественное восстановление информации со штатных датчиков в условиях бортовой системы контроля и диагностики авиационного двигателя ТВ3-117. **Выводы**: Использование автоассоциативной нейронной сети в бортовой системе контроля и диагностики для восстановления информации позволяет обеспечить отказоустойчивость измерительных каналов систем управления, в частности авиационного двигателя ТВ3-117. Основным преимуществом использования нейронных сетей в рамках бортовой системы контроля и диагностики является возможность обучения и обучению в режиме реального времени с учетом индивидуальных характеристик конкретного двигателя. Восстановление информации при отказе датчиков с помощью автоассоциативной нейронной сети обеспечивает погрешность восстановления данных не более 0,45 % при одиночных отказах и не более 0,6 % при двойных отказах. При этом время одного цикла восстановления данных составляет 1589,544 нс для вычислителя Raspberry Pi NanoPi M1 Plus и 196,246 нс – для специализированного нейропроцессора Intel Neural Compute Stick 2, что удовлетворяет требованиям бортовой реализации в составе бортовой системы контроля и диагностики.

**Ключевые слова**: авиационный двигатель; автоассоциативная нейронная сеть; восстановление; датчик.

## NEURAL NETWORK COMPUTER FOR RECOVERING LOST INFORMATION FROM STANDARD SENSORS OF THE ON-BOARD SYSTEM FOR CONTROL AND DIAGNOSTICS OF TV3-117 AIRCRAFT ENGINE

The **subject** matter of the article is TV3-117 aircraft engine and methods for control and diagnostics its technical condition. The **goal** of the work is the development of a neural network computer for recovering lost information from standard sensors of the on-board control and diagnostics system of TV3-117 aircraft engine technical state in real time. The following tasks were solved in the **article**: recovering of lost information by an auto-associative neural network in case of a single sensor failure, recovering of lost information by an «optimal» auto-associative neural network in case of single sensor failures of the on-board control and diagnostic system, recovering the lost information by an auto-associative neural network and an on-board control and diagnostic system from the gas temperature registration sensor before the turbine compressor in case of its failure. The following **methods** were used: methods of probability theory and mathematical statistics, methods of neuroinformatics, methods of the theory of information systems and data processing. The following **results** were obtained: The urgent task of recovering lost information from standard sensors in real time has been solved. Various computer architectures and recovery algorithms were investigated. An engineering technique for recovering lost information using a neurocomputer is proposed. As a result of the use of the neurocomputer, effective and high-quality information recovery from standard sensors was ensured under the conditions of the on-board control and diagnostics system of TV3-117 aircraft engine. **Conclusions**: The use of an auto-associative neural network in the on-board control and diagnostics system for information recovery makes it possible to ensure fault tolerance of the measuring channels of control systems, in particular, the TV3-117 aircraft engine. The main advantage of using neural networks as part of an on-board control and diagnostics system is the possibility of training and learning in real time, taking into account the individual characteristics of a particular engine. Information recovery in case of sensor failure using an auto-associative neural network provides data recovery error of no more than 0.45 % for single failures and not more than 0.6 % for double failures. At the same time, the time of one data recovery cycle is 1589.544 ns for the Raspberry Pi NanoPi M1 Plus calculator and 196.246 ns for the specialized Intel Neural Compute Stick 2 neuroprocessor, which meets the requirements of onboard implementation as part of an onboard control and diagnostic system.

**Keywords**: aircraft engine; auto-associative neural network; recovering; sensor.

### *Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions*

Владов С. І., Долударева Я. С., Сіора А. С., Пономаренко А. В., Яніцький А. А. Нейромережевий обчислювач задля відновлення втраченої інформації зі штатних датчиків бортової системи контролю і діагностики авіаційного двигуна ТВ3-117. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2020. № 4 (14). С. 147–154. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2020.14.147>

Vladov, S., Doludareva, Ya., Siora, A., Ponomarenko, A., Yanitskyi, A. (2020), "Neural network computer for recovering lost information from standard sensors of the on-board system for control and diagnostics of TV3-117 aircraft engine", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 4 (14), P. 147–154. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2020.14.147>