

**БАГАТОВИМІРНА СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ АВІАЦІЙНИМ ДВИГУНОМ ТВ3-117 НА БАЗІ НЕЙРОМЕРЕЖЕВОГО РЕГУЛЯТОРА****С. І. Владов, Н. П. Назаренко, Н. В. Тугова, В. М. Москалик, А. В. Пономаренко**Кременчуцький льотний коледж Харківського національного університету внутрішніх справ  
вул. Перемоги, 17/6, м. Кременчук, 39605, Україна. E-mail: ser26101968@gmail.com

Розроблено багатовимірну систему автоматичного управління авіаційним двигуном ТВ3-117 на базі нейромережевого регулятора із застосуванням рекурентної нейронної мережі архітектури перцептрон. Це дозволило забезпечити виконання широкого комплексу вимог до процесів управління (астатизм – нульова статична помилка, фізична реалізація нейромережевого регулятора, стійкість і задану якість процесів управління на фіксованій множині режимів роботи двигуна, мінімальна складність багатовимірного нейромережевого регулятора) за принципом мінімальної складності регулятора, що формує можливість вибору мінімальної за складністю системи автоматичного управління при заданому рівні якості процесів управління. Згідно з принципом мінімальної складності регулятора успішне управління авіаційним двигуном можливо лише в тому випадку, коли керуючий пристрій має різноманітність того ж порядку, що і керуюча система. Тим самим складність регулятора повинна відповідати складності об'єкта управління – авіаційного двигуна ТВ3-117. При цьому застосовано метод нейроінформатики при розробці нейронної мережі нейромережевого регулятора системи автоматичного управління та градієнтний метод з адаптивним кроком під час навчання нейронної мережі. Ініціалізація нейронної мережі проведена з метою отримання одиничних коефіцієнтів передачі за всіма каналами управління з використанням векторів значень витрати палива й повітря для досліджуваних режимів роботи авіаційного двигуна ТВ3-117. Проведено моделювання системи автоматичного управління авіаційним двигуном ТВ3-117 із синтезованим нейромережевим регулятором, результати якого свідчать про те, що перехідні процеси в системі управління задовольняють поставленим вимогам, а їх відмінність від еталонних значень не перевищує декількох відсотків. Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що набув подальшого розвитку метод мінімальної складності інтелектуальних систем управління складними технічними об'єктами. Він відрізняється від існуючих тим, що за рахунок використання рекурентної нейронної мережі архітектури перцептрон у нейромережевому регуляторі створено систему автоматичного управління авіаційним двигуном ТВ3-117 з високою точністю відтворювання перехідних процесів у двигуні.

**Ключові слова:** авіаційний двигун, нейромережевий регулятор, система автоматичного управління, перцептрон.

**МНОГОМЕРНАЯ СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ АВИАЦИОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ ТВ3-117 НА БАЗЕ НЕЙРОСЕТЕВОГО РЕГУЛЯТОРА****С. И. Владов, Н. П. Назаренко, Н. В. Тугова, В. М. Москалик, А. В. Пономаренко**Кременчугский летный колледж Харьковского национального университета внутренних дел  
ул. Победы, 17/6, г. Кременчук, 39605, Украина. E-mail: ser26101968@gmail.com

Разработана многомерная система автоматического управления авиационным двигателем ТВ3-117 на базе нейросетевого регулятора с использованием рекурентной нейронной сети архитектуры перцептрон. Это позволило обеспечить выполнение широкого комплекса требований к процессам управления (астатизм – нулевая статическая ошибка, физическая реализация нейросетевого регулятора, стойкость и заданное качество процессов управления на фиксированном множестве режимов работы двигателя, минимальная сложность многомерного нейросетевого регулятора) по принципу минимальной сложности регулятора, формирующего возможности выбора минимальной по сложности системы автоматического управления при заданном уровне качества процессов управления. В соответствии с принципом минимальной сложности регулятора успешное управление авиационным двигателем возможно в том случае, когда управляющее устройство имеет различие того же порядка, что и управляющая система. Поэтому сложность регулятора должна соответствовать сложности объекта управления – авиационным двигателем ТВ3-117. При этом применен метод нейроинформатики при разработке нейронной сети нейросетевого регулятора системы автоматического управления и градиентный метод с адаптивным шагом при обучении нейронной сети. Инициализация нейронной сети проведена с целью получения единичных коэффициентов передачи по всем каналам управления с использованием векторов значений расхода топлива и воздуха для исследуемых режимов работы авиационного двигателя ТВ3-117. Проведено моделирование системы автоматического управления авиационным двигателем ТВ3-117 с синтезированным нейросетевым регулятором, результаты которого свидетельствуют о том, что переходные процессы в системе управления удовлетворяют предъявляемым требованиям, а их отличие от эталонных значений не превышает нескольких процентов. Научная новизна полученных результатов заключается в том, что получил дальнейшее развитие метод минимальной сложности интеллектуальных систем управления сложными техническими объектами. Он отличается от существующих тем, что за счет использования рекурентной нейронной сети архитектуры перцептрон в нейросетевом регуляторе создана система автоматического управления авиационным двигателем ТВ3-117 с высокой точностью воспроизведения переходных процессов в двигателе.

**Ключевые слова:** авиационный двигатель, нейросетевой регулятор, система автоматического управления, перцептрон.

**АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ.** Процес забезпечення стабільності параметрів роботи авіаційного двигуна ТВ3-117 шляхом дозування подачі палива в камеру згоряння завжди був непростою задачею. Особливу складність становлять режими запуску і перехідні режими роботи двигуна з урахуванням зовнішніх чинників (вплив атмосферних умов і режимів польоту повітряного судна). Зважаючи на це, для регулювання двигуна використовуються системи автоматичного управління [1, 2].

Необхідні для польоту повітряного судна значення термогазодинамічних параметрів двигуна, надійна і стійка робота силової установки у всьому діапазоні зміни умов експлуатації забезпечуються при відповідному регулюванні двигуна, що здійснюється системою автоматичного управління. Вона встановлює і підтримує певні зв'язки між параметрами двигуна. Це регулювання, що формується з урахуванням вимог до питомої витрати палива й інших термогазодинамічних параметрів, обмежень за міцністю, необхідної точності підтримки параметрів та інших чинників [3, 4].

На даний час до систем автоматичного управління авіаційними газотурбінними двигунами, що реалізують задані закони управління, висуваються досить жорсткі вимоги як щодо допустимих відхилень параметрів на сталих режимах роботи, так і стосовно динамічних похибок при перехідних процесах [5]. Не є виключенням і система автоматичного управління авіаційним двигуном ТВ3-117.

Натепер нейронні мережі досить успішно застосовуються для синтезу систем управління динамічними об'єктами, до яких належить і авіаційний двигун ТВ3-117 [6, 7]. Нейронні мережі мають низку унікальних властивостей, що роблять їх потужним інструментом для створення систем управління: здатністю до навчання на прикладах і узагальнення даних, здатністю адаптуватися до зміни властивостей об'єкта управління та зовнішнього середовища, придатністю для синтезу нелінійних регуляторів, високою стійкістю до пошкоджень своїх елементів у силу спочатку закладеного в нейромережеву архітектуру паралелізму. Усе більш широкого використання в системі автоматичного управління набувають регулятори на базі нейромережевих технологій – нейромережеві регулятори.

На підставі всього викладеного вище успішне управління тією чи іншою системою можливо лише в тому випадку, коли керуючий пристрій має різноманітність того ж порядку, що і керуюча система. Тим самим складність регулятора повинна відповідати складності об'єкта управління. Суть даного принципу базується на можливості вибору мінімальної за складністю системи автоматичного управління при заданому рівні якості процесів управління [8, 9].

Отже, метою роботи є розв'язок задачі синтезу багаторежимного нейромережевого регулятора авіаційного двигуна ТВ3-117 на основі принципу мінімальної складності.

**МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.** Розглянемо формалізовану постановку задачі синтезу багаторежимного нейромережевого регулятора в

режимі on-line при виконанні заданих вимог до точності, стійкості та якості перехідних процесів на заданій множині режимів роботи авіаційного двигуна ТВ3-117 [10]. Для синтезу багаторежимного нейромережевого регулятора необхідно вибрати:

- тип (архітектуру) нейронної мережі, що використовується в регуляторі;
- місце включення нейронної мережі в структурі системи управління двигуна;
- необхідний рівень складності нейромережевого регулятора;
- склад навчальної вибірки та її розмірність;
- алгоритм навчання нейромережевого регулятора в режимі on-line.

Приймається, що динамічні властивості авіаційного двигуна ТВ3-117 як багатовимірного об'єкта управління описуються такими диференціальними рівняннями «вхід–вихід»:

$$\varphi = \left( \mathbf{Y}^{(n)}, \mathbf{Y}^{(n-1)}, \dots, \mathbf{Y}; \mathbf{U}^{(n)}, \mathbf{U}^{(n-1)}, \dots, \mathbf{U} \right); \quad (1)$$

де  $\mathbf{U} = (u_1(t), u_2(t), \dots, u_N(t))^T$ ,  $\mathbf{Y} = (y_1(t), y_2(t), \dots, y_N(t))^T$  – відповідно вектори входів (керуючих впливів) і виходів (керованих змінних);  $m$  і  $n$  – максимальні порядки похідних  $u_k^{(i)}$ ,  $y_e^{(j)}$  для вхідних і вихідних змінних  $u_k(t)$  і  $y_e(t)$ , ( $m \leq n$ );  $N$  – число каналів управління двигуна, тобто розмірність системи автоматичного управління;  $\varphi(\cdot)$  – нелінійна вектор-функція.

Також вважається, що для авіаційного двигуна ТВ3-117 виконується умова спостереження та управління [11].

Потрібно побудувати такий регулятор (у класі нейромережевих структур), який забезпечував би управління об'єктом (1) при дотриманні наступних вимог до синтезованої системи автоматичного управління:

- астатизм (нульова статична помилка);
- фізична реалізація нейромережевого регулятора;
- стійкість і задану якість процесів управління на фіксованій множині режимів  $M = \{M_1, \dots, M_R\}$  роботи двигуна;
- мінімальна складність багатовимірного нейромережевого регулятора.

Вимога астатизму багатовимірної системи автоматичного управління зводиться до включення в систему  $N$  інтеграторів (I) – по одному в кожному з  $N$  каналів системи управління. Тоді для схеми на рис. 1 можна прийняти:

$$V_i(z) = \frac{T_0}{1-z^{-1}} E_i(z); \quad (2)$$

де  $i = 1, 2, \dots, N$ ;  $z^{-1}$  – оператор часового зсуву, затримки на один такт  $T_0$ ;  $\frac{T_0}{1-z^{-1}}$  – дискретна передавальна функція інтегратора.

Вимога фізичної можливості нейромережевого регулятора бути реалізованим виконується з припущення, що в якості нейронної мережі на рис. 1 приймається динамічна рекурентна нейронна мережа на базі персептрона.

На рис. 2 зображений фрагмент цієї мережі, що пов'язує  $i$ -й вихід  $u_i[k]$  і  $j$ -й вхід  $v_j[k]$  нейронної мережі.



Рисунок 1 – Структурна схема багатовимірної системи автоматичного управління авіаційного двигуна ТВ3-117

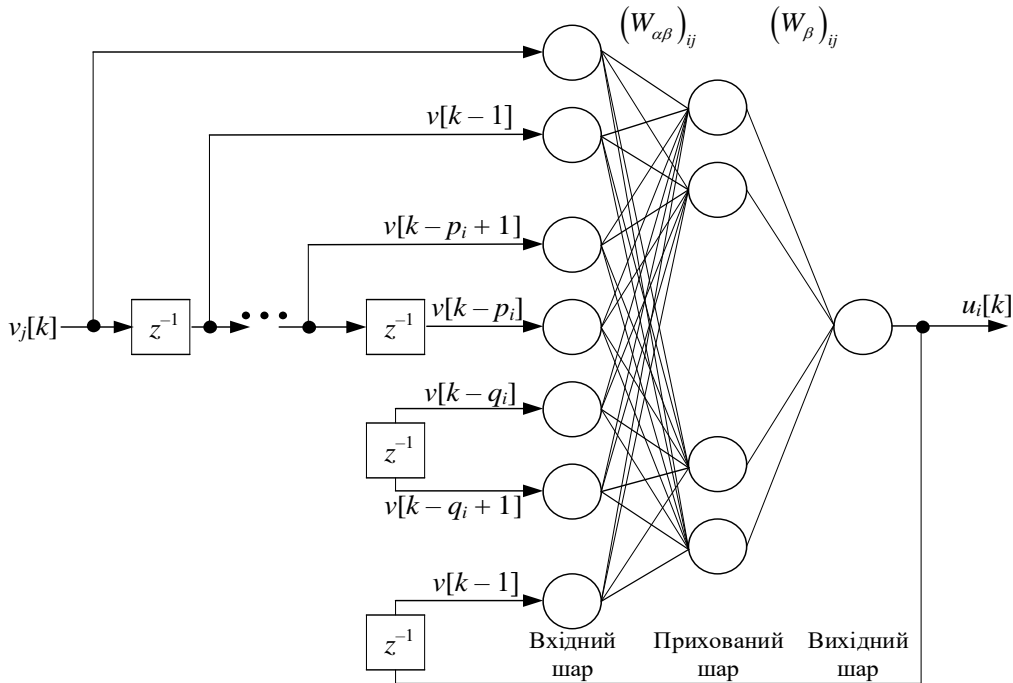


Рисунок 2 – Багаторежимний нейромережвий регулятор на базі персептрона

Досліджуваний нейромережвий регулятор має  $N$  входів і  $N$  виходів, включаючи в себе  $N + \sum_{i=1}^N (p_i + q_i)$  нейронів у входньому шарі,  $\sigma$  нейронів у загальному прихованому шарі і  $N$  нейронів у вихідному шарі, зв'язки між якими здійснюються за допомогою налаштовувальних (учнів) ваг  $W_{\alpha\beta}$ ,  $W_{\beta}$  ( $\alpha = 1, 2, \dots, N + \sum_{i=1}^N (p_i + q_i)$ ;  $\beta = 1, 2, \dots, N_{\sigma}$ ).

Очевидно, що кількість нейронів у прихованому шарі  $\sigma$  має задовольняти обмеження  $\sigma > N$  (в іншому випадку не можна забезпечити незалежне формування керуючих впливів  $u_1, u_2, \dots, u_N$  при зміні входів нейронної мережі  $v_1, v_2, \dots, v_N$ ).

Загальна кількість невідомих параметрів нейромережвого регулятора, тобто число ваг нейронної мережі, що налаштовуються, при цьому складає:

$$K_{II} = \sigma \left( 2N + \sum_{i=1}^N (p_i + q_i) \right). \quad (3)$$

Для забезпечення стійкості на заданій множині  $M_1, \dots, M_R$  режимів роботи системи автоматичного управління авіаційного двигуна ТВ3-117 необхідно виконання наступного співвідношення між величинами  $p_i, q_i, \sigma, n, R$  і  $N$ :

$$\sigma \left( 2N + \sum_{i=1}^N p_i \right) + (\sigma - R) \sum_{i=1}^N q_i \geq R(N + n); \quad (4)$$

з якого можна визначити невідомі цілочислові значення  $p_i, q_i$  і  $\sigma$ , що визначають структуру нейромережвого регулятора.

Для виконання вимоги критерію мінімальної складності покладається, що складність нейромережвого регулятора визначається кількістю нейромережвих параметрів, що настроюються ( $K_{II}$ ), шуканим розв'язком задачі структурного синтезу на основі критерію мінімальної складності повинен вважатися нейромережвий регулятор, описуваний набором чисел  $\langle p_1, \dots, p_N; q_1, \dots, q_N; \sigma \rangle$ , що мінімізують значення цільової функції (3) при виконанні обмеження (4).

Вектор входів (керуючих впливів) для авіаційного двигуна ТВ3-117 має вигляд

$$\mathbf{U} = (G_T, F_C)^T,$$

де  $G_T$  – витрата палива;  $G_B$  – витрата повітря, а вектор стану і вектор виходів (керованих змінних) двигуна записуються відповідно як  $\mathbf{X} = (n_1, n_2)^T$  і  $\mathbf{Y} = (n, T_3^*)$ , де  $n$  – частота обертання ротора турбокомпресора;  $T_3^*$  – температура газів за турбіною компресора.

Структурна схема системи автоматичного управління авіаційного двигуна ТВ3-117 приведена на рис. 3, де  $D_n$  і  $D_T$  – датчики частоти обертання ротора турбокомпресора  $n$  і температури газів за турбіною

компресора  $T_3^*$ ;  $BM_{G_T}$  і  $BM_{G_B}$  – виконавчі механізми, що забезпечують формування дій по координатам  $\bar{G}_T$  і  $\bar{G}_B$ ;  $\mathbf{G} = \left( \bar{n}^0, \bar{T}_3^{*0} \right)^T$  – вектор уставок (зада-

них впливів);  $\bar{n}^0$  і  $\bar{T}_3^{*0}$  – необхідні (задані) значення частоти обертання ротора турбокомпресора і температури газів за турбіною компресора. Усі координати на рис. 3 приведені до відносних (безрозмірних) значень відповідно до методики, наведеної у [12].

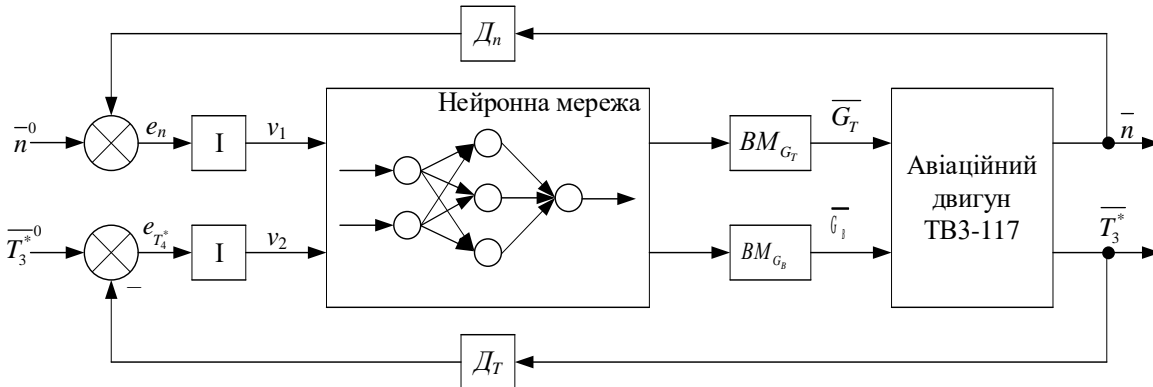


Рисунок 3 – Структурна схема синтезованої системи автоматичного управління авіаційного двигуна ТВ3-117

Прийmemo в якості базових сталі режими роботи двигуна, наведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Режими роботи авіаційного двигуна ТВ3-117

Режими роботи двигуна	$\bar{n}$	$\bar{T}_3^*$	$\bar{G}_T$	$\bar{G}_B$
$M_1$ (номінальний режим)	0,762	0,083	0,096	0,097
$M_2$ (надзвичайний режим)	1,358	0,217	0,334	0,341

Метою синтезу є побудова нейромережевого регулятора мінімальної складності, який забезпечив би виконання наступних вимог: астатизм (нульова статична помилка); фізична реалізація; стійкість і необхідну якість процесів управління «в малому» на безлічі режимів  $M = \{M_1, M_2\}$  роботи двигуна. З огляду

на, що в даному випадку:  $N = n = R = 2$ , можна переписати умова (4) таким чином:

$$\sigma(4 + p_1 + p_2) + (\sigma - 2)(q_1 + q_2) \geq 8.$$

Легко бачити, що розв'язок даної нерівності, яке мінімізує значення цільової функції (3), набуває вигляду  $p_1 = p_2 = q_1 = q_2 = 0, \sigma = 2$ .

Відповідна структура нейромережевого регулятора мінімальної складності, має в своєму складі  $K_{II} = 8$  параметрів, що настраюються, зображена на рис. 4, а. Зауважимо, що якщо відмовитися від вимоги повноти набору зв'язків між сусідніми шарами нейронної мережі, то замість отриманої структури регулятора можна скористатися аналогічною їй за складністю структурою, наприклад, структурою з трьома нейронами у вхідному шарі (рис. 4, б), що також має вісім параметрів, що настраюються.

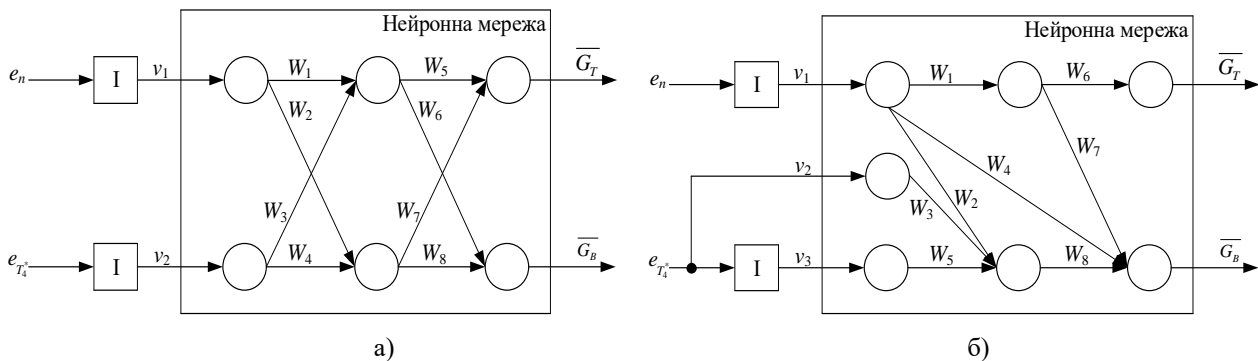


Рисунок 4 – Багатомірний нейромережевий регулятор мінімальної складності

При переході до етапу навчання параметрів нейромережевого регулятора, відзначимо, що цього етапу також повинна передувати процедура ініціалізації, тобто призначення попередніх значень ваг нейронної мережі. Ініціалізацію нейронної мережі можна проводити таким чином, щоб отримати, наприклад, одиничні коефіцієнти передачі за всіма

каналами управління:  $(v_1)_0 \rightarrow (u_1)_0, (v_2)_0 \rightarrow (u_2)_0$ . В якості  $(v_1)_0$  і  $(u_1)_0$  може використовуватися величина витрати палива  $\bar{G}_T$  для режиму  $M_1$  (див. табл. 1); в якості  $(v_2)_0$  і  $(u_2)_0$  – величина  $\bar{G}_B$  для режиму  $M_2$ .

На рис. 5 приведені результати моделювання системи автоматичного управління авіаційного двигуна ТВ3-117 з синтезованим нейромережним регулятором (структура на рис. 5, а), з яких випливає, що перехідні процеси в системі управління задовольняють поставленим вимогам.

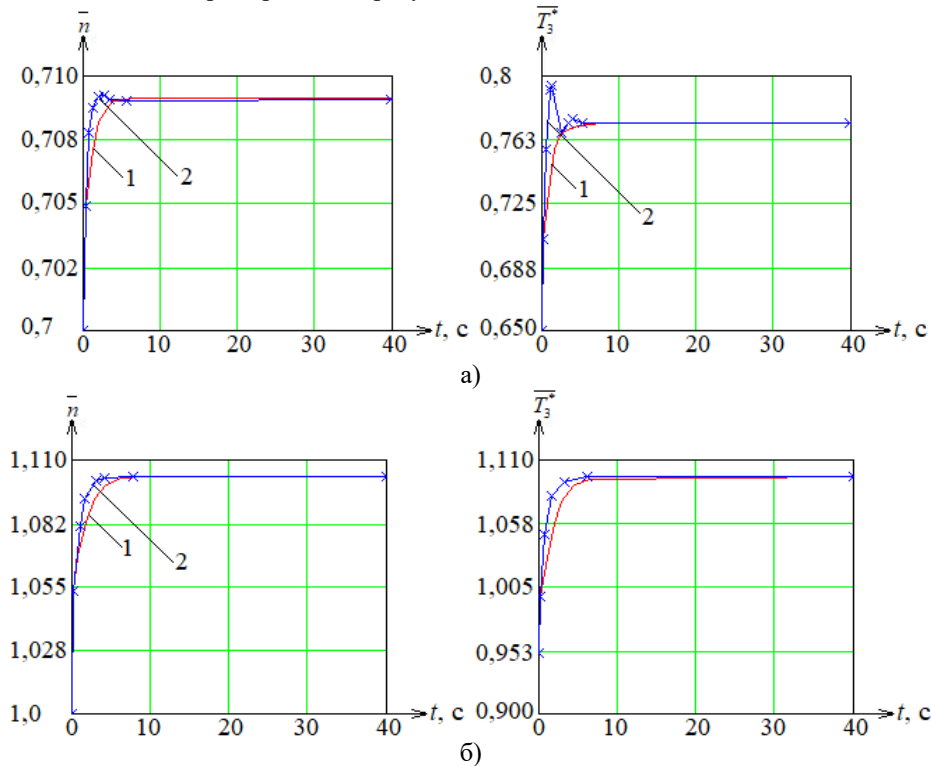


Рисунок 5 – Результати моделювання системи автоматичного управління авіаційного двигуна ТВ3-117 з нейромережним регулятором: а – режим  $M_1$ ; б – режим  $M_2$ ; 1 – еталонна модель; 2 – досліджувана модель

**ВИСНОВКИ.** Розроблено алгоритм структурного синтезу багатомірною багаторежимного нейромережевого регулятора авіаційного двигуна ТВ3-117, що забезпечує виконання широкого комплексу вимог до процесів управління (астатизм, стійкість і задану якість процесів управління) при мінімальній складності регулятора. В якості універсального підходу при синтезі нелінійної багаторежимної системи автоматичного управління авіаційного двигуна ТВ3-117 можливо використання багатопарових нейронних мереж з навчанням їх параметрів на базі стандартних алгоритмів оптимізації.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Ntantis E. L., Li Y. G. The impact of measurement noise in GPA diagnostics analysis of a gas turbine engine. *International Journal of Turbo & Jet Engine*. 2013. Vol. 30 (4). P. 401–408.
2. Bagwan L. J., Raibhole V. N., Meshram C. B. Full authority digital engine control: overall system, function and its application. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering* (6th National Conference RDME 2017, 17th-18th March 2017). 2017. Vol. 3. P. 01–04. URL: <https://www.iosrjournals.org/iosr-jmce/papers/Conf.RDME%202017/Volume-3/1.%2001-04.pdf> (дата звернення: 05 березня 2020)
3. Kuznetsova T. A. Parametric diagnosis of the adaptive gas path in the automatic control system of the aircraft engine. *Journal of Physics: Conference Series*. 2017. Series 803. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/803/1/012088> (дата звернення: 02 березня 2020)
4. Liu X., Shi J., Qi Y., Yuan Y. Design for aircraft engine multi-objective controllers with switching characteristics. *Chinese Journal of Aeronautics*. 2014. Vol. 27. Issue 5. P. 1097–1110.
5. Tudose A.-N. Aircraft dual-shaft jet engine with indirect action fuel flow controller. *AIP Conference Proceedings*. 2017. Vol. 1836, iss. 1. URL: <https://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.4982004> (дата звернення: 05 березня 2020)
6. Жернаков С. В. Применение технологии нейронных сетей для диагностики технического состояния авиационных двигателей. *Интеллектуальные системы в производстве*. 2006. № 2. С. 70–83.
7. Васильев В. И., Жернаков С. В. Контроль и диагностика технического состояния авиационных двигателей на основе интеллектуального анализа данных. *Вестник УГАТУ*. 2006. Т. 7, № 2 (12). С. 71–81.
8. Эшби У. Р. Введение в кибернетику ; пер. с англ. М. : КомКнига, 2005. 432 с.
9. Солодовников В. В., Тумаркин В. Н. Теория сложности и проектирования систем управления. М. : Наука, 1990. 168 с.
10. Vasilyev V. I., Valeyev S. S., Shilonosov A. A. Design of neurocontroller for gas turbine engine multi-mode control. *Proceedings of the 8th International Conference on Neural Information Processing (ICONIP-2001)*. 2001. Vol. 2. P. 746–750.
11. Васильев В. И., Валеев С. С., Шилоносов А. А. Синтез многосвязной адаптивной системы управ-

ления ГТД на основе нейронных сетей. *Авиакосмическое приборостроение*. 2003. № 7. С. 36–41.

12. 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 /

Vladov S., Kotliarov K., Hrybanova S., Husarova O., Chyzhova L. *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*. 2019. Iss. 6/2019 (119). P. 91–98.

## MULTI-DIMENSIONAL TV3-117 AIRCRAFT ENGINE AUTOMATIC CONTROL SYSTEM BASED OF THE NEURAL NETWORK REGULATOR

S. Vladov, N. Nazarenko, N. Tutova, V. Moskalyk, A. Ponomarenko

Kremenchuk Flight College of Kharkiv National University of Internal Affairs

vul. Peremogy, 17/6, Kremenchuk, 39605, Ukraine. E-mail: ser26101968@gmail.com

**Purpose.** The purpose of this work is to develop of a multidimensional for TV3-117 aircraft engine automatic control system based on a neural network controller using a perceptron recurrent neural network, which makes it possible to ensure the fulfillment of a wide range of requirements for control processes (astatism – zero static error, physical implementation of a neural network controller, stability and specified quality of control processes on a fixed set of engine operating modes, minimum complexity of a multidimensional neural network controller) according to the principle of minimum complexity of the controller, which makes it possible to choose the minimum complexity of the automatic control system for a given level of quality control processes. **Methodology.** The work is based on neuroinformatics method in the development of a neural network of a neural network controller of an automatic control system and a gradient method with an adaptive step in training a neural network. **Results.** An algorithm has been developed for the structural synthesis of the multidimensional multimode neural network controller of TV3-117 aircraft engine, which ensures the fulfillment of a wide range of requirements for control processes (astatism, stability and a given quality of control processes) with minimal complexity of the controller. As a universal approach to the synthesis of a nonlinear multimode TV3-117 aircraft engine automatic control system it is possible to use multilayer neural networks with training in their parameters based on standard optimization algorithms. **Originality.** The scientific novelty of the results is that the method of minimal complexity of intelligent control systems for complex technical objects was further developed. It differs from the existing ones in that due to the use of the perceptron architecture neural network in the neural network controller, a TV3-117 aircraft engine automatic control system with high fidelity of transient processes in the engine is created. **Practical value.** The developed method is a component of the intelligent system of control and diagnostics of TV3-117 aircraft engine technical state in flight modes. References 12, table 1, figure 5.

**Key words:** aircraft engine, neural network controller, automatic control system, perceptron.

### REFERENCES

1. Ntantis, E. L., Li, Y. G. (2013), “The impact of measurement noise in GPA diagnostics analysis of a gas turbine engine”, *International Journal of Turbo & Jet Engine*, vol. 30 (4), pp. 401–408.
2. Bagwan, L. J., Raibhole, V. N., Meshram, C. B. (2017), “Full authority digital engine control: overall system, function and its application”, *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, Vol. 3. pp. 01–04. URL: <https://www.iosrjournals.org/iosr-jmce/papers/Conf.RDME%202017/Volume-3/1.%2001-04.pdf>
3. Kuznetsova, T. A. (2017), “Parametric diagnosis of the adaptive gas path in the automatic control system of the aircraft engine”, *Journal of Physics: Conference Series*, series 803, URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/803/1/012088>
4. Liu, X., Shi, J., Qi, Y., Yuan, Y. (2014), “Design for aircraft engine multi-objective controllers with switching characteristics”, *Chinese Journal of Aeronautics*, vol. 27, issue 5, pp. 1097–1110.
5. Tudosie, A. N. (2017), “Aircraft dual-shaft jet engine with indirect action fuel flow controller”, *AIP Conference Proceedings*, Vol. 1836, iss. 1. URL: <https://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.4982004>
6. Gernakov, S. (2006), “The use of neural network technology to diagnose the technical condition of aircraft engines”, *Intelligent Systems in Manufacturing*, № 2, pp. 70–83.
7. Vasiliev, V., Gernakov, S. (2006), “Monitoring and diagnostics of the technical condition of aircraft engines based on data mining”, *Bulletin of USATU*, vol. 7, № 2 (12), pp. 71–81.
8. Ashby, W. R. (2005), *Vvedenie v kibernetiku [Introduction to Cybernetics]*, Moscow, 432 p.
9. Solodovnikov, V. V., Tumarkin, V. N. (1990), *Teoriya slozhnosti i proektirovaniya sistem upravleniya [Theory of complexity and design of control systems]*, Moscow, 168 p.
10. Vasilyev, V. I., Valeyev, S. S., Shilonsov, A. A. (2001), “Design of neurocontroller for gas turbine engine multi-mode control”, *Neural Information Processing (ICONIP-2001), Proceedings of the 8th International Conference*, vol. 2, pp. 746–750.
11. Vasilyev, V. I., Valeyev, S. S., Shilonsov, A. A. (2003), “Synthesis of gas turbine engines multiply connected adaptive control system based on neural networks”, *Aerospace Instrument-Making*, № 7, pp. 36–41.
12. 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 (119), pp. 91–98.

Стаття надійшла 13.03.2020.