

УДК 681.51:621.452.3

С. С. ТОВКАЧ

Національний авіаційний університет «НАУ», Київ, Україна

## ПРОГНОЗУВАННЯ МІЖЕЛЕМЕНТНОЇ ВЗАЄМОДІЇ В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ АВІАЦІЙНИХ ДВИГУНІВ

Стаття присвячена розробці сучасних моделей і алгоритмів обробки інформації для задач прогнозування, діагностування та технічного обслуговування міжелементної взаємодії в системах автоматичного керування авіаційними газотурбінними двигунами. Розглядається модель міжвузлової взаємодії з визначенням енергетично активних точок і їх нейронних структур із візуалізацією у вигляді скейлограм. На основі алгоритму керування процесами прогнозування та діагностики за даними опитування систем наведено графік зміни вузлових енергетичних характеристик САК ГТД та гістограми розподілу практично справних станів та несправних із властивостями дефекту на шкалі коефіцієнтів впевненості.

**Ключові слова:** модель міжвузлової взаємодії, ідентифікація, система автоматичного керування, газотурбінний двигун, прогнозування, енергетичні характеристики, коефіцієнт впевненості.

### Вступ

Одним із засобів підвищення якості і надійності керування авіаційними двигунами є застосування в програмно-алгоритмічному забезпеченні сучасних цифрових САК бортових математичних моделей двигуна (БММД). В теперішній час в таких САК використовуються, як правило, прості кусково-лінійні моделі [1], для функціонування яких не вимагається великих обчислювальних затрат, що є суттєвим для бортових обчислювачів. При обмеженому обсязі використовуваної обчислювальної потужності за допомогою таких моделей вдається забезпечити проведення розрахунків в реальному масштабі часу, що є необхідною умовою для застосування БММД в складі САК.

Найбільш складним при використанні таких моделей є забезпечення точності розрахунків у всій області експлуатації двигуна, а також при зміні характеристик його вузлів. Це вимагає достатньо складної процедури ідентифікації моделі, для реалізації якої необхідні затрати обчислювальної потужності, які суттєво перевищують необхідні для реалізації самої БММД. У зв'язку з цим коло задач, які розв'язуються за допомогою таких бортових моделей, вельми обмежений і в основному зводиться до заміни показів несправних датчиків вимірюваних параметрів двигуна даними розрахунку за допомогою БММД.

Збільшення обчислювальної потужності електронних цифрових систем керування створює можливості для застосування в САК газотурбінного двигуна (ГТД) математичних моделей високого рівня із збереженням можливості розрахунку в реальному часі. Роботи в цьому напрямку виконуються

в рамках проекту OBIDICOTE (On Board Identification, Diagnosis and Control of gas Turbine Engines – бортова ідентифікація, діагностика, контроль і керування турбореактивними двигунами) [2] фірмами SNECMA, Rolls-Royce, MTU (рис. 1) [2, 3]. Один з напрямків є використання в якості БММД «повних термогазодинамічних моделей» двигуна, інший – розробка методів керування двигуном за параметрами, які детальніше характеризують робочий процес і властивості двигуна, але не доступні для вимірювання.

Так, в ЦІАМІ проводяться роботи із застосуванням повузлової динамічної моделі двигуна в якості вбудованої в САК для підвищення надійності і якості керування [3]. В САК з цією моделлю можуть бути розв'язані наступні задачі:

- компенсація відмов датчиків параметрів робочого процесу у двигуні і параметрів, які характеризують режим польоту;
- керування двигуном за параметрами не доступним для вимірювання, такими як запаси газодинамічної стійкості (ГДС) компресора, температура газу перед турбіною і тяга двигуна.
- ідентифікація бортової моделі в процесі її функціонування.

### 1. Постановка проблеми

При переході на експлуатацію вузлів ГТД за технічним станом для забезпечення експлуатаційної надійності є прогнозування їх технічного стану, що дозволяє раціонально використовувати потенціальну довговічність елементів за рахунок правильної побудови системи технічного обслуговування і ремонту в складі системи автоматичного керування ГТД.

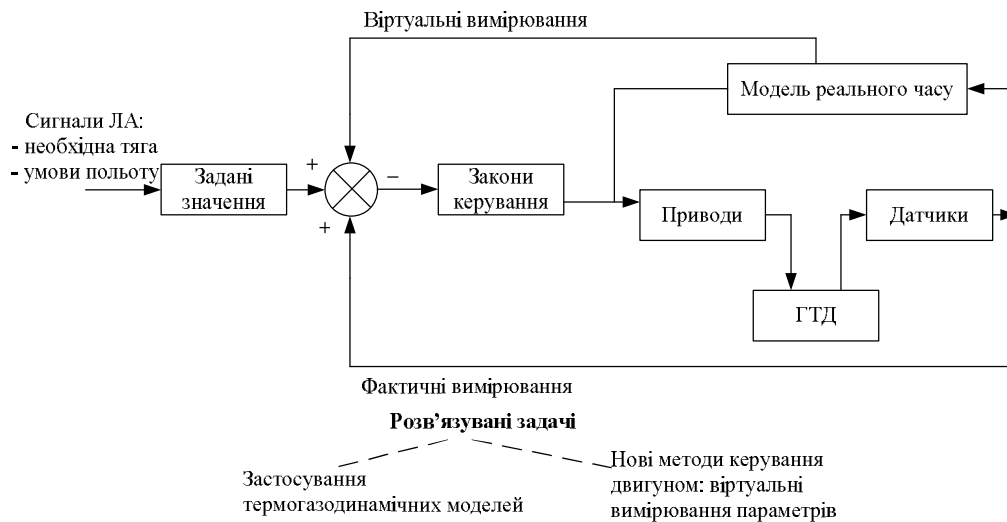


Рис. 1. Напрямки роботи в проекті OBIDICOTE [1]

Задача прогнозування залишкового ресурсу зводиться до визначення часу до досягнення діагностичним параметром свого порогового значення.

Методологія повинна включати наступні етапи:

1. Встановлення зв'язку складових вектора діагностичних ознак (ДО) з конструктивними параметрами, які впливають на ресурс.

2. Встановлення гранично допустимих значень для кожної складової вектора діагностичних ознак

$$X_{гр} = \{x_{1гр}, x_{2гр}, \dots, x_{igr}, \dots\}.$$

3. Визначення початкових значень діагностичних параметрів ( $x_{i0}$ ), як функції технологічного процесу виготовлення конкретного вузла.

4. Формування тренду діагностичних параметрів в процесі наступного (після контролю) напрацювання.

5. Розрахунок залишкового ресурсу.

У зв'язку з цим актуальною є задача визначення раціональної технології побудови архітектури вузлів в системах автоматичного керування авіаційних двигунів, що дозволить створити високоефективні системи нового покоління з гнучкою, легко змінною структурою, підвищити надійність та довговічність експлуатації САК ГТД.

## 2. Модель міжвузлової взаємодії САК ГТД

В теорії прогнозування для вибору раціонального вузла взаємодії доцільно використовувати графові моделі, методика синтезу яких запропонована в роботах [3]. Використання таких моделей дозволяє візуально оцінити енергетичний стан вузла взаємодії (меридіану) та визначити раціональний, який, з однієї сторони, дозволяє здійснювати одночасно корекцію міжелементної взаємодії системи керування

ГТД, а з іншої, забезпечувати можливість аналізу відповідних дефектів. Така інформація дозволяє обрати такий порядок і режим взаємодії, який не навантажує інші менш функціональні системи із можливістю одночасною позитивною реакцією.

На рис. 2 наведені моделі взаємодії елементів САК, на яких блок формування номінального енергетичного стану (ФНЕС) вузла моделює період функціонування активних вузлів. Якщо, з допустимою похибкою прийняти, що період зміни енергетики вузлів близькі до кусочно-лінійної залежності, то графік роботи ФНЕС визначається на рис. 3.

Тут по осі часу  $t$  відкладається час від початку області мінімальної активності вузлів  $h(t_{h1})$ . По осі ординат відкладається величина параметру, яка характеризує енергетичний стан вузла  $h - E_h$ .

Аналітичний вираз, який описує поведінку графіка (рис. 3), має наступний вигляд:

$$E_h = \begin{cases} E_{h \min}, & \text{якщо } t_{h1} \leq t < t_{h2}, \\ K_1 t - K_2, & \text{якщо } t_{h2} \leq t < t_{h3}, \\ E_{h \max}, & \text{якщо } t_{h3} \leq t < t_{h4}, \\ -K_1 t + K_3, & \text{якщо } t_{h3} \leq t_{h4} < t_{h5} = t_{h1}, \end{cases}$$

$$K_1 = K_2 = 0,1(E_{h \max} - E_{h \min}); K_3 = 2,3(E_{h \max} - E_{h \min}).$$

Зручно розглядати вузол маршрутизації як початкову точку відліку, оскільки він має мінімальну активність у визначені періоди роботи САК ГТД. Точку керування активності інших вузлів зручно організувати шляхом організації часових затримок на величину  $nt$ , де  $n$  визначає віддаленість досліджуваних вузлів відносно вузла маршрутизації.

Вплив на енергетику вузлів таких суттєвих факторів регулювання енергетичного балансу центральних керуючих структур  $E_{ц}$  (включаючи ЕОМ) та

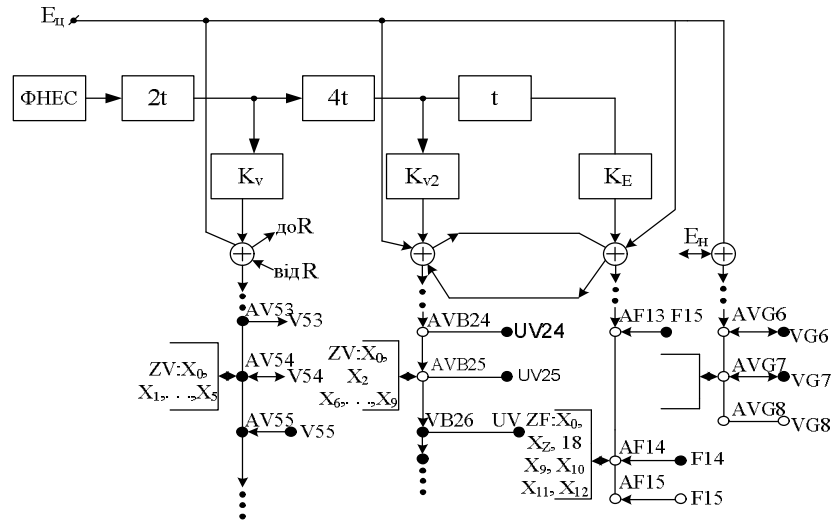


Рис. 2. Моделі взаємодії елементів САК ГТД

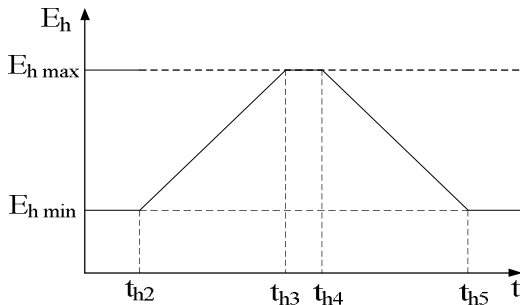


Рис. 3. Графік зміни вузових енергетичних характеристик САК ГТД

спряжено працюючих (парних) вузлів на моделях умовно визначено через мультиплексор. Тут враховано, що вузол VG не знаходиться в загальному часовому циклі.

На моделях рис. 2 показані тільки активні точки вузлів (АТВ) і їх нейронні структури (асоціації першого рівня), які зв'язані з досліджуваною ситуацією ( $X_0$  - механічний дефект). В комп'ютерному варіанті графові моделі використовуються разом із блоком кольорової візуалізації моделей, які визначають зображення (скейлограми) АТВ, спряжені з ними асоціації і ситуації, в різні кольори відповідно до їх енергетичного стану: надмірна енергетична перенапруга - білий колір; дефектна нестача енергії - світло коричневий колір; нормальний стан - темно коричневий колір. Проміжні стани позначаються проміжною кольоровою гамою.

## 2. Алгоритм керування процесами навчання, прогнозування та діагностики в системі підтримки прийняття рішень САК ГТД

При розробці відповідної системи міжелементної взаємодії в САК ГТД виникає можливість отри-

мання навчальної і контрольної вибірки для підтримки прийняття рішень, перевірка достовірності спрацьовування отриманих правил та при необхідності може бути реалізована процедура навчання для покращення точності класифікації за навчальними і контрольними вибірками.

3 вищеописаного, алгоритм керування процесами прийняття рішень за вибраним класом дефектів наступний (рис. 4):

1. В якості початкових умов роботи алгоритму приймаються правила та їх параметри отримані в ході роботи інженера за знаннями і висококваліфікованих експертів [3]. Якщо у розробників відповідної системи прийняття рішень є можливість сформулювати контрольні і навчальні вибірки за правилами прийнятими в теорії розпізнавання образів, то доцільно організувати процес навчання (блок 1), який включає в себе процедуру перевірки якості роботи отриманих правил

2. Якщо розв'язується задача прогнозування (блок 2), то за відібраними для дослідження об'єктами здійснюється отримання необхідної інформації із розрахунком відповідних коефіцієнтів впевненості (блок 3).

3. В залежності від того чи заданий один фіксований час  $T_0$  або декілька інтервалів  $T_{ok}$  відбувається очікування результатів впливу середовища на досліджувані об'єкти (блок 4) і формуються дві контрольні вибірки об'єктів (блок 6), які залишилися практично справними, незважаючи на можливу наявність у них факторів ризику ( $w_0$ ) і несправних об'єктів із властивостями дефекту ( $w_1$ ).

Таким чином, формуються дві вибірки, які на вісі  $KB_{w_1}$  можуть бути представлені двома гістограмами  $h_{w_0}(KB_{w_1})$  і  $h_{w_1}(KB_{w_1})$  (рис. 5).

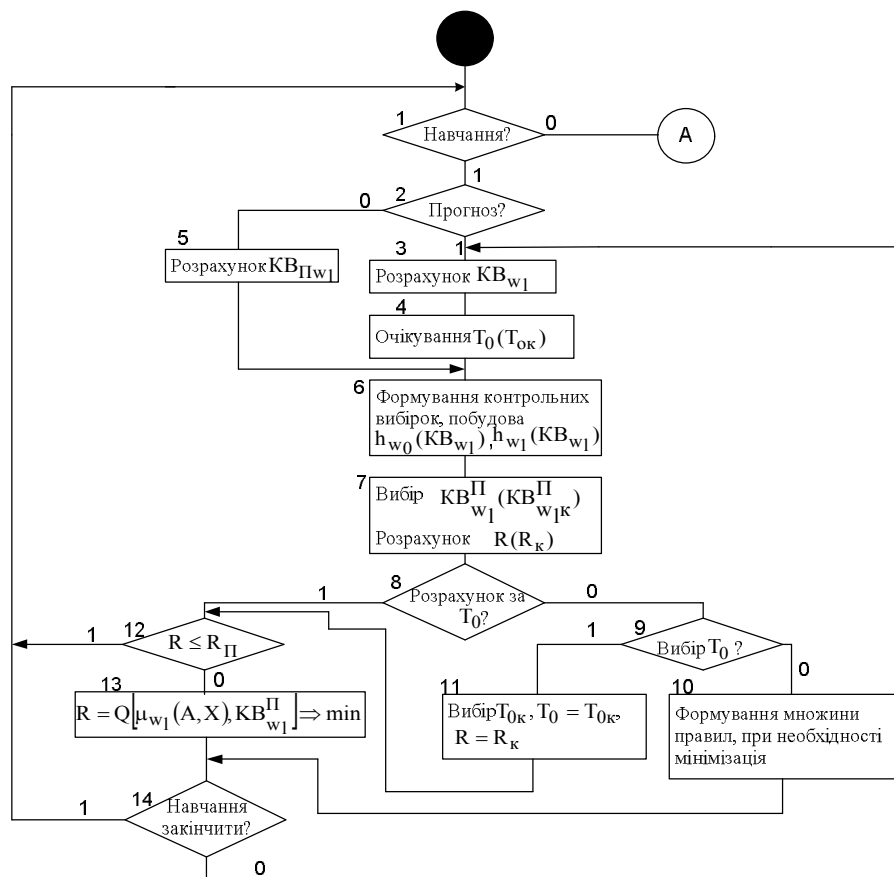
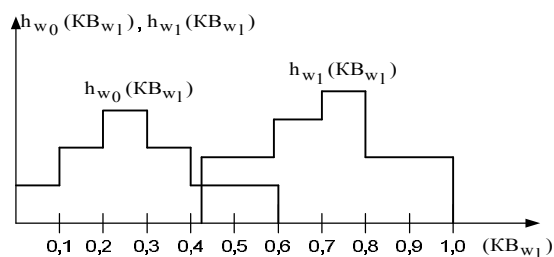


Рис. 4. Алгоритм керування процесами прийняття рішень міжелементної взаємодії САК ГТД

Рис. 5. Гістограма розподілу ( $w_0$ ) і ( $w_1$ ) на шкалі ( $KB_{w1}$ )

### Висновок

В процесі дослідження процесу прогнозування міжелементної взаємодії в САК ГТД запропонована модель вузлової взаємодії дозволить з високою роздільною здатністю прогнозувати появу активних точок передачі інформації та, в свою чергу, уточнювати ступені ризику появи дефектів, а також створювати раціональні схеми процесів діагностування та технічного обслуговування в САК ГТД.

Розроблений алгоритм керування прийняття рішень дозволить здійснювати корекцію параметрів нечітких правил з метою покращення показників якості класифікації, забезпечувати процедури прогнозування виникнення, збільшення і діагностуван-

ня дефектів, а також вирішувати задачі оптимізації технічного обслуговування і ремонту САК ГТД.

### Література

1. Гуревич, О. С. Системы автоматического управления авиационными газотурбинными двигателями [Текст] / О. С. Гуревича. – М. : ТОРУ ПРЕСС, 2010. – 264 с.
2. Kreiner, A. The use of onboard real-time models for jet engine control [Text] / A. Kreiner, K. Lietzau // MTU Aero Engines. – Germany. – 2014.
3. Корневский, Н. А. Проектирование систем принятия решений на нечетких сетевых моделях в задачах диагностики и прогнозирования [Текст] / Н. А. Корневский // Вестник новых технологий. – 2016. – Т. 3. №2. – С. 6-10.

### References

1. Gurevich, O. S. Sistemy avtomaticheskogo upravleniya aviatsionnymi gazoturbinnymi dvigatelyami [Automatic control systems of aviation gas turbine engines]. Moscow, Toru Press Publ., 2010. 264 p.
2. Kreiner, A., Lietzau, K., The use of onboard real-time models for jet engine control. Germany, MTU Aero Engines, 2014.

3. Korenevskij, N. A. Proektirovanie sistem making systems designing based on fuzzy network prinjatija reshenij na nechetkih setevyh modeljah v models for diagnosis and prediction tasks]. *Vestnik zadachah diagnostiki i prognozirovanija [Decision- novykh tehnologij*, no. 2, iss. 3, 2016, pp. 6-10.

*Поступила в редакцию 11.04.2018, рассмотрена на редколлегии 27.07.2018.*

### ПРОГНОЗИРОВАНИЕ МЕЖЭЛЕМЕНТНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

*С. С. Товкач*

Статья посвящена разработке современных моделей и алгоритмов обработки информации для задач прогнозирования, диагностирования и технического обслуживания межэлементных взаимодействий в системах автоматического управления авиационными газотурбинными двигателями. Рассматривается модель межузлового взаимодействия с определением энергетически активных точек и их нейронных структур с визуализацией в виде скейлограм. На основе алгоритма управления процессами прогнозирования и диагностики по данным опроса систем приведен график изменения узловых энергетических характеристик САУ ГТД и гистограммы распределения практически исправных состояний и неисправных со свойствами дефекта на шкале коэффициентов уверенности.

**Ключевые слова:** модель межузлового взаимодействия, идентификация, система автоматического управления, газотурбинный двигатель, прогнозирование, энергетические характеристики, коэффициент уверенности.

### PREDICTION OF THE INTER-ELEMENT INTERACTION IN THE AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS OF AVIATION ENGINES

*S. S. Tovkach*

The article is devoted to the development of modern models and algorithms for information processing for the prediction, diagnosing and maintenance tasks of inter-element interaction in automatic control systems of aviation gas turbine engines. Considered the model of inter-node interaction with the definition of power active points and their neural structures with visualization in the form of scalogram. Presented a graph of changes the power node characteristics of the automatic control systems of gas turbine engine and the distribution histograms of practically normal states and faults with defect properties on the scale of confidence coefficients based on the control algorithm the prediction and diagnostics processes according to the data of the system survey.

The decision support system during the research process has two stages of functioning:

1) at the stage of prediction and diagnostics, the measurement of the power characteristics of the active interaction points is determined, and corresponding elements of the models are taken into account the power states formed on the nominal energy state of the nodes;

2) at the stage of maintenance and repair, while observing the painted nodes, determine the type, intensity and duration of influence in order to normalize the power of the nodal active points of interaction (to bring the state to a dark brown colour). At the same time, the dynamics of the correction process is well traced, visually visible to which accompanying situations is directed the impact and how it will affect the functioning of the linked nodes and /or systems.

During the developing an appropriate system of inter-element interaction in automatic control systems of gas turbine engines, it is possible to receive an educational and control sample to support decision-making, check the reliability of the operation of the received rules, and if necessary, a training procedure can be implemented to improve the accuracy of the classification by training and control samples.

The developed rational technology of building the architecture of nodes in the automatic control systems of aviation engines will create high-performance systems of a new generation with a flexible, easily variable structure, increase reliability and durability of operation of automatic control systems of aviation engines.

**Keywords:** inter-node interaction model, identification, automatic control system, gas-turbine engine, prediction, power characteristics, confidence coefficient.

**Товкач Сергій Сергійович** – канд. техн. наук, доцент кафедри автоматизації та енергоменеджменту Навчально-наукового Аерокосмічного інституту Національного авіаційного університету «НАУ», Київ, Україна, e-mail: tcctit7@ukr.net.

**Tovkach Serhii Serhiiovich** – Candidate of Technical Science, Associate Professor of Automation and Power Management Department, Educational and Scientific Aerospace Institute, National Aviation University “NAU”, Kyiv, Ukraine, e-mail: tcctit7@ukr.net.