

УДК 681.51:629.7.03 (045)

Товкач С. С.

канд. техн. наук, доцент кафедри автоматизації та енергоменеджменту
Аерокосмічного факультету Національного авіаційного університету
«НАУ», Київ, Україна, e-mail: serhii.tovkach@nau.edu.ua

ГІБРИДНИЙ ГЕНЕТИЧНИЙ ПІДХІД ДО ПОБУДОВИ РОЗПОДІЛЕНОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ АВІАЦІЙНИХ ДВИГУНІВ

Стаття присвячена розробці системних підходів до побудови розподіленої інформаційної системи автоматичного керування (САК) авіаційних газотурбінних двигунів (ГТД). Визначено, що для системи автоматичного керування авіаційного газотурбінного двигуна може бути забезпечено використання комплексу математичних моделей двигуна: динамічну повузлову, багаторежимну спрощену та лінійну модель. Для спрощеної схеми процесу розробки та узгодження математичної моделі системи автоматичного керування газотурбінного двигуна розглянуто використання просторового методу розрахунку розташування вузлів газотурбінного двигуна – гібридного підходу до побудови методів оптимізації систем керування газотурбінних двигунів із застосуванням генетичного алгоритму в якості «скелету» гібридного підходу і адаптивного методу оптимізації для визначеного вузла математичної моделі системи керування авіаційного газотурбінного двигуна. Запропоновано схему генетичного алгоритму: кодування, кодування геномів у вигляді дерев, ініціалізація, оцінювання – функція оцінювання, оцінювання – генетичні оператори, умова завершення (межа популяції та задоволення похибки) та параметри алгоритму (розмір популяції, глибина дерева, частота застосування операторів). За рахунок використання програми *gatool* (optimization tool) розглянуто розв'язок задачі максимізації функції Растрігіна за допомогою гібридної функції *patternsearch* та заданням функції користувача, кількості змінних цільової функції, матриць обмежень. Для графічної інтерпретації наведено результуючі графіки при фіксуванні параметра *Best Fitness* та *Best Individual*, що визначає кращу особину або вузол електронної системи керування авіаційного газотурбінного двигуна та тривимірне представлення функції Растрігіна. Після проведення чисельного експерименту запропоновано використання розподіленої інформаційної системи автоматичного керування газотурбінного двигуна на базі ідеально упорядкованої області та алгоритму формування хромосоми вузла електронної системи керування авіаційного газотурбінного двигуна.

Ключові слова: авіаційний двигун, система автоматичного керування, системний підхід, генетичний алгоритм, методи оптимізації, кодування геномів, хромосома вузла.

Вступ

Авіаційний двигун (АД) є складовою ланкою будь-якого літального апарату, характеристики якого суттєво впливають на льотно-технічні та економічні показники повітряного судна. Вдалий підбір математичної моделі його системи автоматичного керування (САК) дозволяє [1]:

- розпізнавати стан двигуна (погіршення характерних вузлів, виникнення відмов, роботу на сталому або перехідному режимах і т.д.);
- формувати цілі керування відповідно до результатів розпізнавання стану двигуна;
- здійснювати вибір способу керування двигуном, що забезпечує досягнення заданої цілі (вибір комплексу програм керування, оптимальних для даних умов роботи двигуна);
- формувати та здійснювати вибір параметрів алгоритмів керування, що дозволяють забезпечити задану якість управління при використанні обраних програм.

Цикл робіт в області керування може бути забезпечений використанням комплексу із декількох типів моделей газотурбінних двигунів (ГТД) різного рівня складності, який вцілому повинен відповідати основним вимогам [1, 2]:

- можливість моделювання усталених і перехідних режимів роботи при змінюваних умовах польоту в широкому діапазоні зміни режиму роботи двигуна;
- отримання точності моделювання на усталених і перехідних режимах, достатньої для вирішення задач керування;
- допустимий час розрахунку на ЕОМ при використанні моделей високого рівня;
- можливість виконання розрахунків в реальному і прискореному часі при використанні математичних моделей.

Комплекс математичних моделей двигуна для розв'язку задач керування включає в себе моделі трьох типів: динамічну повузлову, багаторежимну спрощену і лінійну [2].

Роботи в напрямку створення комплексу математичних моделей газотурбінних двигунів виконуються в рамках проекту OBIDICOTE (On Board Identification, Dagnosis and Control of Gas Turbine Engines), фірмами SNECMA, Rolls-Royce, MTU [2, 3], які відповідають концепції системи FADEC і стандарту EUROCAE [3].

1. Постановка проблеми

Спрощена схема процесу розробки і узгодження математичної моделі двигуна пред-

ставлена на рис. 1. Спочатку на основі аналізу вихідної інформації (наприклад, характеристик вузлів) на базі типової математичної моделі двигуна створюється апріорна модель (АММД). При цьому вихідна інформація про вузли і елементи ранжується за ступенем достовірності. За допомогою розрахунків за цією моделлю попередньо визначаються параметри робочого процесу і характеристики розглядуваного двигуна в умовах, які відповідають умовам досліджень.

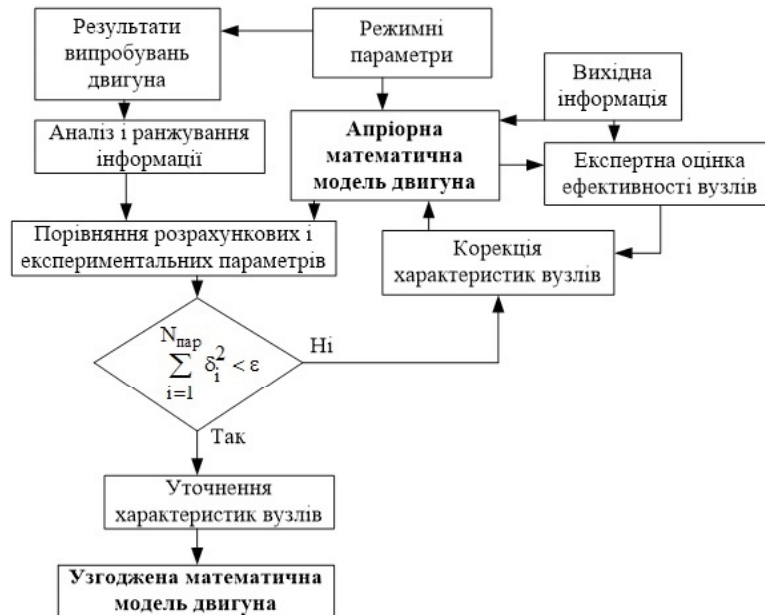


Рис. 1. Спрощена схема процесу розробки і узгодження математичної моделі САК ГТД

В результаті зіставлення попередніх розрахованих результатів з даними досліджень як за окремими вузлами (результати вимірювань температури і тиску в різних перерізах), так і за двигуном в цілому, а також аналізу причин можливого розузгодження випрацьовуються способи корекції деякої частини вихідної інформації (головним чином, розрахункового виникнення). Вибір поправок для характеристик того або іншого вузла відбувається із залученням даних аналізу цього вузла, виконаного відповідними експертами і оснований на існуючому досвіді, а також результатах розрахунків вузла просоторовими методами.

У наукових дослідженнях і практичних розробках [4] з метою поєднання кращих властивостей просторових методів розрахунку вузлів системи автоматичного керування газотурбінного двигуна (САК ГТД) використовується гібридний підхід до побудови методів оптимізації САК ГТД із застосуванням генетичного алгоритму в якості «скелету» гібридного підходу і адаптованого методу оптимізації для визначеного вузла математичної моделі САК ГТД.

У зв'язку з цим актуальною є задача формування оптимальної технології побудови розподіленої системи автоматичного керування газотурбінним двигуном, вузли якої зможуть одночасно функціонувати в межах робочого простору, — так званого, комбінованого (гібридного) підходу щодо способу керуваності ГТД із високоефективними показниками експлуатації.

2. «Скелет» гібридного генетичного підходу

Генетичний підхід (ГП) — застосування генетичної моделі навчання у просторі програм САК ГТД. Індивідуумами, що складають популяцію, є комп'ютерні програми (вузли математичної моделі ГТД), які виступають кандидатами на розв'язання визначеної задачі. Форма, розміри і складність програм не відомі заздалегідь, тобто зазначені атрибути розв'язку не відомі заздалегідь.

Кожна програма оцінюється за допомогою функції придатності, яка показує наскільки добре працює дана програма з точки зору конкретної задачі (наприклад, по-

хибка з точністю до якої програма знаходить розв'язок).

У процесі розв'язку оперують поняттями батьківські програми (parent) та програми-нащадки (offsprings).

Схема генетичного алгоритму:

0) Кодування вводяться множини термінальних і функціональних змінних - Т-термінальні, F - функціональні:

$T = \{\text{проблемно – орієнтовані константи}\};$

$F = \{\text{елементарні функції}\}.$

Кожна програма є композицією функцій із F F та Т. Множини F і Т задовольняють властивості замкненості.

1) Кодування геномів у вигляді дерев:

внутрішні вузли - функціональні змінні;
листя - термінальні символи;

приклад: $T = \{2, x, 4, 7\}, F = \{+, *, /\}$

2) Ініціалізація:

Дві стратегії побудови програм:

- метод росту - з однаковою ймовірністю весь час обираються функціональні і термінальні символи - доки серед листків є функціональні символи;

- метод повноти (повне бінарне дерево) - листки в самому кінці і бінарно розташовані;

- при побудові використовуються 10% термінальних символів і 90% нетермінальних символів - щоб запобігти термінальності дерева.

3) Оцінювання - функція оцінювання залежить від близькості значень особини і бажаних значень.

Береться середньоквадратична похибка:

$$f(x) = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (y_i - t_i)^2} \quad (1)$$

N - розмір вибірки;

y_i - експериментальні дані;

t_i - дані, обраховані програмою.

4) Оцінювання - генетичні оператори

Основний генетичний оператор - схрещування. Батьки обмінюються піддеревами.

Оператор схрещування дерева з самим собою дає новий результат. Поява та накопичення ІНТРОНІВ - ділянок коду, що нічого не роблять.

5) Умова завершення: межа популяції, задоволення похибки.

Параметри алгоритму: розмір популяції, глибина дерева, частота застосування операторів.

3. Гібридний метод побудови САК ГТД

Для більш зручної реалізації гібридного методу, зокрема у комбінації з іншими методами, доцільно використовувати програму gatool (optintool) під час розв'язку задачі максимізації функції Растрігіна від двох змінних:

$$f(x_1, x_2) = 20 + x_1^2 + x_2^2 - 10 \cos(2\pi x_1) - 10 \cos(2\pi x_2). \quad (2)$$

Перед використанням програми gatool в основних полях його робочого вікна потрібно вказати гібридну функцію (patternsearch), функцію користувача, кількість змінних цільової функції та матриці обмежень

Для графічної інтерпретації роботи генетичного алгоритму використовуються параметри розділу Plots, зокрема при фіксуванні параметра Best fitness у вікні Genetic Algorithm буде зображено краще значення цільової функції, а при фіксуванні параметра Best Individual - кращу особину або вузол САК ГТД (наближене значення точки екстремуму) (рис.2).

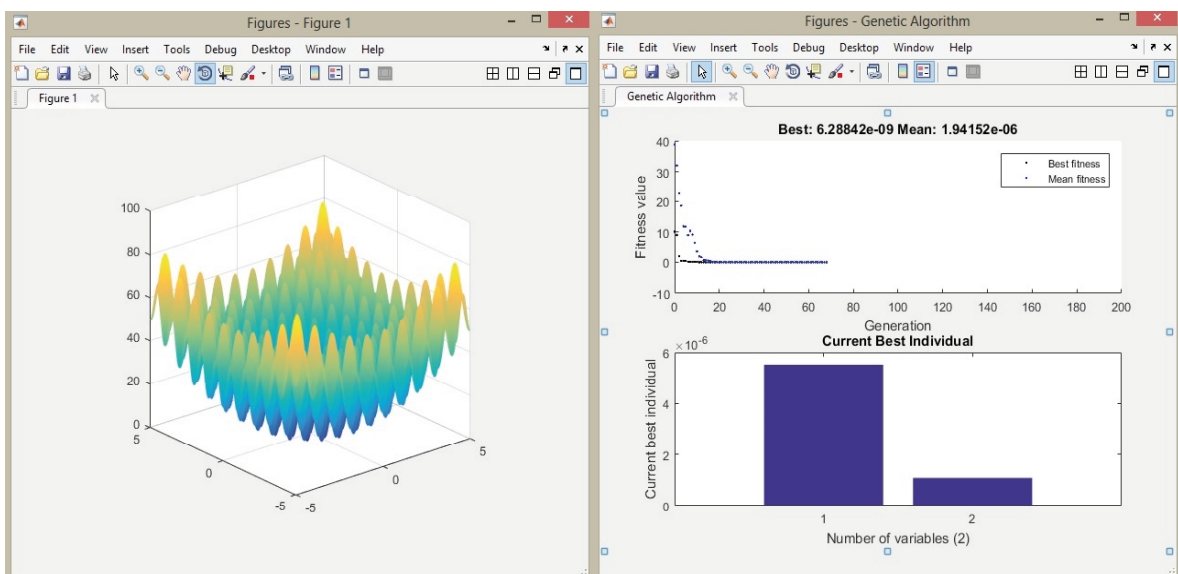


Рис. 2. Графік функції Растрігіна генетичного алгоритму (зліва) та графічна інтерпретація роботи ГА (справа)

4. Модель розподіленої інформаційної системи САК ГТД

При моделюванні САК ГТД розподіл об'єктів в робочій області визначається за допомогою генератора випадкових чисел для формування хромосоми. Так, у випадку (рис. 3), навколо кожного об'єкта на заданій відстані (видимій) повинно знаходитись вісім вузлів.

Можливі напрямки позначають послідовно (починаючи з N) через вісім секторів, формуючи хромосому, де кожному сектору відповідає один або більше сегментів хромосоми, так як в кожному секторі може знаходитись до n мікрооб'єктів (рис.4).

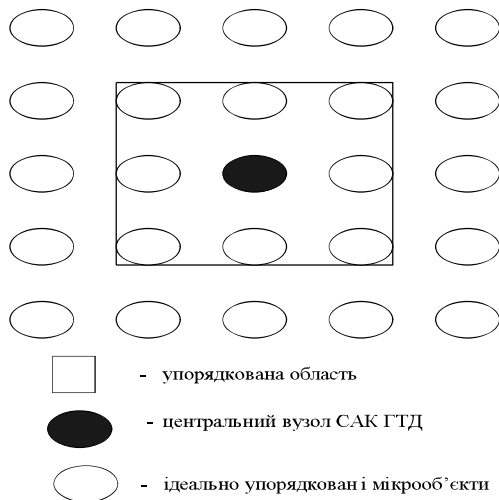


Рис. 3. Ідеально упорядкована область

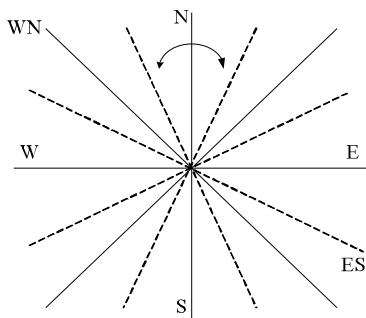


Рис. 4. Алгоритм формування хромосоми

Кількість сегментів визначається кількістю мікрооб'єктів, які знаходяться в цьому секторі (в межах видимості).

Висновок

Актуальність нових технологій в системах керування авіаційними ГТД обумовлена принципом розподілу мікрооб'єктів, який реалізований в генетичному базисі та досягає підвищення швидкодії роботи САК ГТД, а також дозволяє знизити вимоги обчислювача для системи планування локальних переміщень, реалізованих на основі ГА.

Впроцесі дослідження гібридного підходу до побудови розподіленої САК ГТД визначено, що використання гібридних методів на основі генетичних алгоритмів у більшості випадків покращує результат самого генетичного алгоритму та, в основному, при їх використанні обчислювальні ресурси витрачаються саме на реалізацію ГА, що обумовлює більшу точність заданих параметрів ГА, ніж точність параметрів комбінованого методу оптимізації.

Для проведення модельних експериментів, які підтверджують адекватність запропонованого підходу керування мікрооб'єктами в САК ГТД необхідно враховувати основні характеристики алгоритму: розмір популяції, відбір або мутація із середнім порогом, кросингвер - алгоритм пошуку і знищення клонів.

Література

1. ЦИАМ - Центральный институт авиационного моторостроения имени И. П. Баранова. – Режим доступа: <http://www.ciam.ru/>
2. Гуревич О. С. Системы автоматического управления авиационными газотурбинными двигателями [Текст] ; под ред. О. С. Гуревича. – М. : ТОРУ ПРЕСС, 2010. – 264 с.
3. Товкач С. С. Прогнозування міжелементної взаємодії в системах автоматичного керування авіаційних двигунів [Текст] / С. С Товкач // Авиационно-космическая техника и технология. – 2018. – № 8 (152). – С. 113-117.
4. Дмитрієв С. О. Перспективи використання автоматизованих систем діагностування газотурбінних двигунів на основі гібридних генетичних алгоритмів [Текст] / С. О. Дмитрієв, О. В. Попов, В. Е. Потапов // АВІА-2015. – Т. 2, 2015. – С. 20.46-20.49.

Поступила в редакцию 04.06.2019

С.С. Товкач. Гибридный генетический подход к построению распределенной системы автоматического управления авиационных двигателей

Статья посвящена разработке системных подходов к построению распределенной информационной системы автоматического управления (САУ) авиационных газотурбинных двигателей (ГТД). Определено, что для системы автоматического управления авиационного газотурбинного двигателя может быть обеспечено использование комплекса математических моделей двигателя: динамическую поузловую, многорежимную упрощенную и линейную модель. Для упрощенной схемы процесса разработки и согласования математической модели системы автоматического управления газотурбинного двигателя рассмотрено использование пространственного метода расчета расположения узлов газотурбинного двигателя - гибридного подхода к построению методов оптимизации систем управления газотурбинных двигателей с применением генетического алгоритма в качестве «скелета» гибридного подхода и адаптивного метода оптимизации для определенного узла математической модели системы управления авиационного газотурбинного двигателя. Предложена схема генетического алгоритма: кодирование, кодирование геномов в виде деревьев, инициализация, оценка - функция оценки, оценка - генетические операторы, условие завершения (предел популяции и удовлетворение погрешности) и параметры алгоритма (размер популяции, глубина дерева, частота применения операторов). За счет использования программы *gatool* (optimization tool) рассмотрено решение задачи максимизации функции Растргина с помощью гибридной функции *patternsearch* и заданием функции пользователя, количества переменных целевой функции, матриц ограничений. Для графической интерпретации приведены результирующие графики при фиксировании параметра *Best Fitness* и *Best Individual*, что определяет лучшую особь или узел электронной системы управления авиационного газотурбинного двигателя и трехмерное представление функции Растргина. После проведения численного эксперимента предложено использование распределенной информационной системы системы автоматического управления газотурбинного двигателя на базе идеально упорядоченной области и алгоритма формирования хромосомы узла электронной системы управления авиационного газотурбинного двигателя.

Ключевые слова: авиационный двигатель, система автоматического управления, системный подход, генетический алгоритм, методы оптимизации, кодирование геномов, хромосома узла.

S. S. Tovkach. Hybrid genetic approach for building the distributed automatic control system of aviation engines

The article is devoted to the development of system approaches for the construction of a distributed information system of automatic control (ACS) of aviation gas turbine engines (GTE). It has been determined that for the automatic control system of an aviation gas turbine engine, the use of a complex of mathematical models of the engine can be provided: dynamic node-by-node, multi-mode simplified and linear model. For a simplified scheme of the development and coordination of a mathematical model of an automatic control system for a gas turbine engine, the use of a spatial method for calculating the location of gas turbine engine nodes — a hybrid approach to building optimization methods for gas turbine engine control systems using a genetic algorithm as a “skeleton” of a hybrid approach and an adaptive method of optimization for a certain node of the mathematical model of the aviation control system gas turbine engine — is considered. A scheme of a genetic algorithm is proposed: coding, coding genomes in the form of trees, initialization, evaluation — evaluation function, evaluations — genetic operators, termination condition (population limit and error pleasure) and algorithm parameters (population size, tree depth, operator frequency). Through the use of the *gatool* (optimization tool) program, the solution of the problem of maximizing the Rastrigin function using the hybrid function *patternsearch* and setting the user function, the number of variables of the target function, and constraint matrices is considered. For graphical interpretation, the resulting graphs are given when the *Best Fitness* and *Best Individual* parameters are fixed, which determines the best individual or node of the electronic control system of an aviation gas turbine engine and a three-dimensional representation of the Rastrigin function. After carrying out a numerical experiment, the use of a distributed information system of the automatic control system of a gas turbine engine on the basis of a perfectly ordered

area and an algorithm for the formation of a chromosome of an electronic control unit node of an aviation gas turbine engine was proposed.

Keywords: *aviation engine, automatic control system, system approach, genetic algorithm, optimization methods, genome coding, chromosome of a node.*

References

1. CIAM - Central Institute of Aviation Motors named after I.P. Baranov. Available at: <http://www.ciam.ru/>

2. Gurevich O. S. *Sistemy avtomaticheskogo upravleniya aviatsionnyimi gazoturbinnymi dvigatelyami* [Automatic control systems of aviation gas turbine engines]. Moscow, Toru Press, 2010. 264 p.

3. Tovkach S. S., *Prohnozuvannia mizhelementnoi vzaiemodii v systemakh avtomatichnoho keruvannia*

aviatsiinykh dvyhuniv [Prediction of the inter-element interaction in the automatic control systems of aviation engines]. *Avyatsyonno-kosmycheskaia tekhnika i tekhnolohyia Publ.*, 2018, no. 8 (152), pp. 113-117.

4. Dmytriyev S.O., Popov O.V., Potapov V.E. *Perspektyvy vykorystannia avtomatyzovanykh system diahnostuvannia hazoturbinnikh dvyhuniv na osnovi hibrydnykh henetychnykh alhorytmiv* [Prospects for automated automation systems for gas turbine engines using new hybrid genetic algorithms]. *AVIA-2015*, issue 2, 2015, pp. 20.46-20.49.