

АВТОМАТИЧНЕ КЕРУВАННЯ І ДІАГНОСТИКА

УДК 621.45.026

С.В. Єніфанов, О.В. Бондаренко

МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ ТУРБОРЕАКТИВНОГО ДВОКОНТУРНОГО ДВИГУНА ПРИ АНАЛІЗІ Й СИНТЕЗІ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ

Процеси проектування, доведення та експлуатації систем автоматичного керування (САК) та діагностування авіаційних двигунів засновані на використанні математичних моделей (ММ). Двигун є складним технічним об'єктом, що складається з багатьох вузлів, спільна робота яких забезпечує робочий процес та визначає параметри робочого процесу (частоти обертання роторів, температуру та тиск у різних перерізах проточної частини, витрату палива й повітря, тягу, потужність та ін.).

Використовувані ММ можна поділити на два класи: статичні й динамічні. Статичні моделі забезпечують визначення параметрів робочого процесу на ustalених режимах роботи двигуна. Основною статичною моделлю є нелінійна повузлова ММ, що базується на розв'язанні рівнянь робочого процесу. Динамічні моделі забезпечують визначення параметрів робочого процесу в перехідних режимах, обумовлених зміною зовнішніх та керуючих впливів, а також інших факторів. Областями застосування динамічних моделей є: визначення характеристик прискорення та скидання режиму при проектуванні двигуна; імітація динамічних властивостей двигуна при аналізі систем автоматичного керування; алгоритми керування двигуном; алгоритми визначення невимірюваних параметрів двигунів для керування та контролю технічного стану, а також моніторингу ресурсу; моделювання параметрів двигуна у складі напівнатурних стендів та тренажерних комплексів.

Багато з перелічених областей вимагають застосування динамічних моделей у реальному часі. Це зумовлює такі вимоги до відповідних динамічних моделей:

1. Вхідними параметрами повинні бути керуючі впливи на двигун (витрата основного та форсажного палива, площа критичного перерізу реактивного сопла, положення регульованих направляючих апаратів та клапанів перепускання повітря та ін.), відбори повітря та потужності, параметри атмосферного повітря, швидкість польоту та інші параметри, що впливають.

2. Вихідними параметрами мають бути:

– регульовані та вимірювані параметри двигуна, що обмежуються (частоти обертання роторів, температура газу на виході з турбіни або між її каскадами, тиск на виході з компресора і вентилятора, температура на вході до компресора високого тиску, тиск на виході з турбіни, крутильний момент у випадку турбовального або турбогвинтового двигуна);

– тяга (для турбореактивних двигунів), потужність (для турбовальних двигунів) або еквівалентна потужність (для турбогвинтових двигунів);

– обмежувані параметри, що не вимірюються (температура газу перед турбіною, коефіцієнти надлишку повітря в основній і форсажній камерах згоряння, запаси стійкості каскадів компресора).

3. ММ повинна забезпечувати статичну точність, рівень якої визначається сферою застосування ММ. Так, наприклад, при використанні ММ в алгоритмах керування похибка моделювання повинна бути істотно меншою за необхідну похибку керування на сталих режимах. При використанні ММ для розрахунку невимірюваних параметрів складова похибки визначення невимірюваного параметра на сталих режимах, обумовлена похибкою моделі, повинна бути істотно меншою за допустиму похибку визначення цього параметра.

4. ММ повинна забезпечувати динамічну точність, рівень якої визначається сферою застосування ММ. Так, наприклад, при використанні ММ в алгоритмах керування динамічна похибка моделювання повинна бути суттєво меншою за необхідну похибку керування на перехідних режимах. При використанні ММ для розрахунку параметрів, що не вимірюються, складова похибки визначення невимірюваного параметра на перехідних режимах, обумовлена похибкою моделі, повинна бути істотно меншою за допустиму динамічну похибку визначення цього параметра.

5. ММ повинна мати просту структуру, що забезпечує можливість її використання в системах реального часу, в тому числі й у бортових системах.

6. ММ повинна мати супроводжуючі програмно-методичні засоби, що забезпечують її зв'язок і вихідною нелінійною повузловою моделлю й дозволяють коригувати параметри динамічної ММ при зміні вихідної ММ. Це особливо важливо тому, що при супроводі розробки, випробувань та експлуатації двигуна його розробник використовує саме нелінійну повузлову ММ і змінює її відповідно до змін, що вносяться в двигун.

7. ММ повинна мати здатність до адаптації, тобто зміни (налаштування) її параметрів за зміни режиму роботи двигуна, зовнішніх умов, технічного стану й інших факторів.

8. Програмна реалізація ММ для імітації двигуна має виконуватися за допомогою універсальних програмних засобів, що використовуються в галузі.

9. Програмна реалізація ММ для бортового застосування у складі алгоритмів керування та діагностування повинна мати захист від некоректного функціонування, яке може бути обумовлене введенням некоректних вхідних параметрів.

Запропоновано формувати модель на основі структури, до складу якої входять статична й динамічна підмоделі. Статична підмодель легко адаптується до індивідуальних особливостей двигуна. Динамічна підмодель має лінійну структуру, а її коефіцієнти залежать від режиму роботи двигуна.

Розглянуто деталі формування статичної й динамічної підмоделей ТРДД. Для урахування впливу положення КПП і РНА компресора виокремлено ділянки області робочих режимів, на яких локалізовано статичну й динамічну підмоделі. Як параметр, що визначає режим, обрана частота обертання ротора ВТ. Для урахування впливу польотних умов використано формули зведення, які розповсюджуються як на статичні параметри, так і на коефіцієнти лінійної динамічної підмоделі.

Розроблено деталізовану структуру ММ, яка ураховує перелічені особливості, а також необхідність завдання початкових умов при ініціалізації моделювання.

Виконано програмну реалізацію ММ ТРДД із використанням засобів Matlab Simulink.

Порівняння отриманих за її допомогою результатів моделювання перехідного процесу по витраті палива з результатами, отриманими із використанням нелінійної повузлової динамічної моделі, показало високий ступінь відповідності запропонованої швидкодійної моделі й базової нелінійної повузлової моделі двигуна.

Верифікацію розробленої ММ на реальних даних виконано з використанням результатів стендових випробувань двигуна. Установлено, що наявні статичні похибки пов'язані з індивідуальними відмінностями конкретного екземпляру двигуна та можуть бути усунені шліхом налагодження статичної підмоделі.

Модель адекватно описує характер перехідних процесів. Наявні динамічні похибки зумовлені більш повільним початком перехідних процесів у реальному двигуні, що зумовлює сповільнення зміни частоти обертання ротора ВТ на 0.2 с, частоти обертання ротора НТ і тиску на виході з компресора на 0.3-0.4 с, а тяги на 1 с.

Можливими причинами зазначеного сповільнення зміни параметрів є: затримка тепловідділення в камері згоряння; газодинамічна інерція внаслідок накопичування маси й енергії в об'ємах проточної частини; втрати енергії на нагрівання конструктивних елементів; затримка в зміні радіальних зазорів між робочими лопатками компресора й турбіни під час перехідних

процесів порівняно зі статичними зазорами, які відповідають режимам роботи двигуна, що розглядаються.