

Список літератури

1. Лобанов Н.А. Основы расчета и конструирования парашюта. – М.: Машиностроение, 1965. – 363 с.
2. Иванов П.И. Летные испытания парашютных систем. – Феодосия: Гранд-С, 2001. – 332 с.
3. ГОСТ 4401-81. Атмосфера стандартная. Параметры. – М.: Изд-во стандартов, 1981. – 179 с.
4. Бардонов В.В. Парашютные системы для спасения летного состава скоростных самолетов // Сб. докл. НТК. – 1972. – Вып. 4. – М.: НИИ АУ. – 288 с.
5. Северин Г. Катапультное кресло для боевых самолетов // Авиапанорама: Междунар. авиационно-космический журн. – М., 1999. – Май – июнь. – 82 с.

Стаття надійшла до редакції 01.07.02.

0551.410-011.48641.0
УДК 629.735(045)

ГТД, процесс рабочий АД,
параметр термов АД,
модельрование математическое,
математическое, программное обеспечение

О.С. Якушенко, канд. техн. наук, старш. науч. співроб.
(Національний авіаційний університет)

ОПТИМИЗАЦИЯ АЛГОРИТМУ ТА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ ГАЗОТУРБІННОГО ДВИГУНА

Розглянуто методи оптимізації алгоритму та програмного забезпечення математичних моделей робочого процесу газотурбінного двигуна. Наведено результати використання цих методів.

Математичні моделі робочого процесу (ММРП) газотурбінного двигуна (ГТД) знаходять широке використання при проектуванні двигунів, створенні систем визначення їхнього технічного стану, вирішенні питань оптимізації процесу експлуатації та технічного обслуговування і т.д. Якщо виникає потреба застосування такої моделі в задачах, критичних до часу їхнього виконання, повстає питання оптимізації її обчислювального процесу, наприклад, при використанні ММРП в алгоритмах верифікації та корегування польотної інформації, коли необхідно провести верифікацію десятків, а іноді сотень тисяч інформаційних кадрів, зареєстрованих за один польотний цикл. Іншим прикладом задачі, при якій час роботи ММРП є суттєвим параметром, є проблема генезису та прогнозу зміни експлуатаційних характеристик ГТД та міцнісних характеристик його найбільш навантажених деталей [1; 2]. Для цього необхідно виконати великий обсяг розрахунків параметрів робочого процесу ГТД, технічний стан вузлів і відповідно функціональні характеристики якого у загальному випадку можуть суттєво відрізнятися від середньостатистичних і змінюватися у часі.

Для вирішення зазначених задач широко використовують поелементні імітаційні ММРП [3; 4]. Найбільш часто застосовують нелінійні ММРП, що мають другий рівень складності. У таких моделях математичні моделі вузлів ГТД подано формальним описом їхніх характеристик, які не розкривають фізичної природи процесів, що протікають в окремих елементах, розглядуваних в цьому випадку як “чорні ящики”.

Алгоритми математичної моделі функціонування ГТД досить складні і трудомісткі, можуть спиратися на ітераційні та інтерполяційні процедури. При цьому середній час виконання необхідної кількості розрахунків навіть на сучасних ПЕОМ може становити залежно від необхідного рівня точності та використовуюваного алгоритму до 2–5 с.

Оптимізація роботи ММРП ГТД може проводитися на етапі створення універсальної математичної моделі та на етапі її пристосування до умов вирішення конкретної задачі.

Методи оптимізації, використовувані на етапі створення ГТД, залежать від типу моделі. Оптимізація роботи спрощеної ММРП, яка спирається на лінії робочих режимів елементів проточної частини і має нерозривний математичний опис, досить проста. При цьому необхідно виключити з процесу розрахунку математичні дії з константами, замінивши їх заздалегідь розрахованим результатом та виключити з алгоритму розрахунок параметрів, що не впливають на загальні результати розрахунку (наприклад, переведення потужності з ватів до кінських сил і т. д.).

Під час розробки програмного забезпечення, якщо використана мова програмування дозволяє, необхідно зменшувати обсяги даних, що передаються між процедурами (функціями, підпрограмами) за значенням, замінюючи їх передачею за адресою. Це дозволить зменшити час роботи програми за рахунок того, що при виклику відповідних процедур не будуть створюватися копії їхніх аргументів та значень, які повертаються. При виборі мови написання моделі слід також віддавати перевагу мовам-компіляторам (C++, Паскаль, Fortran та ін.) перед мовами-інтерпретаторами (деякі реалізації Бейсика, Clipper), які зазвичай у 100–500 разів повільніше виконують математичні операції. Крім того, необхідно зменшити до мінімуму обсяги обміну інформацією між жорстким диском та програмою.

Під час створення ММРП, яка використовує двовимірні характеристики елементів проточної частини і не має нерозривного математичного опису, крім зазначених, можна рекомендувати, в першу чергу, використання методів, пов'язаних з оптимізацією процедури балансування моделі (рис. 1).

Така модель має близько 1000–1500 операторів. При роботі моделі параметри робочого процесу елементів проточної частини розраховуються, виходячи з параметрів на вході до каскаду та відповідних компонентів вектора [Hz] внутрішніх режимних параметрів ММРП. При цьому значення одних і тих же параметрів, розраховані для різних каскадів (наприклад, витрата робочого тіла на виході та вході двох послідовно розташованих лопаткових машин), у загальному випадку не збігаються. На базі пар значень таких параметрів формується вектор [Hb] відхилів моделі.

При балансуванні ММРП такого типу необхідно вирішити систему нелінійних рівнянь, підбираючи значення компонентів вектора [Hz] так, щоб компоненти вектора [Hb] дорівнювали нулю з заданою точністю [3; 4]. Розмірність цієї системи залежить від об'єкта моделювання і для турбореактивного двигуна (турбореактивного двоконтурного двигуна) з нерегульованою проточною частиною може бути розрахована за залежністю

$$n = 3m_1 + m_2,$$

де m_1 – кількість роторів двигуна; m_2 – кількість контурів проточної частини.

Для двигуна Д-36 $n = 11$ при $m_1 = 3$, $m_2 = 2$.

У разі побудови таких ММРП, як алгоритм розв'язання системи нелінійних рівнянь, досить часто використовують метод Ньютона. При цьому для балансування моделі з заданою точністю системі необхідно виконати 10–30 ітерацій. На кожній ітерації потрібно розрахувати якобієву матрицю (матрицю частинних похідних), для чого необхідно, в свою чергу, виконати $n+1$ разів розрахунок робочого процесу основних елементів проточної частини ГТД. Отже, оптимізації саме цього алгоритму необхідно приділити як найбільше уваги. При цьому можуть бути використані такі способи прискорення розрахунку.

1. З аналізу алгоритму розрахунку ММРП випливає, що елементи вектора [Hz] впливають на розрахунок параметрів робочого процесу не всіх елементів проточної частини. Вважаючи на цю обставину, деякі відрізки алгоритму розрахунку відхилів при побудові якобієвої матриці можуть бути опущені. Для цього під час побудови якобієвої матриці розрахунок треба починати зі зміни внутрішніх режимних параметрів, що визначають робочий процес першої лопаткової машини (наприклад, вентилятора) і продовжувати далі відповідно до газодинамічної схеми ГТД. При цьому може бути випущено частини алгоритму, які використовуються для розрахунку параметрів у попередніх каскадах або на вході до ГТД.

2. Другий спосіб прискорення розрахунку пов'язаний з оптимізацією самого методу Ньютона. Враховуючи ту обставину, що кожному значенню векторів [Hz] та [b] відповідає тільки один режим роботи ГТД, немає істотної різниці з погляду скінченного результату, який метод розв'язання системи нелінійних рівнянь буде обрано. При цьому елементи якобієвої матриці суттєво змінюються тільки на початковому етапі ітераційного процесу, коли компоненти вектора [Hz] змінюються на значну величину. Тому можна рекомендувати проводити розрахунок якобієвої матриці не на кожному кроці ітераційного процесу, а, наприклад, на перших двох

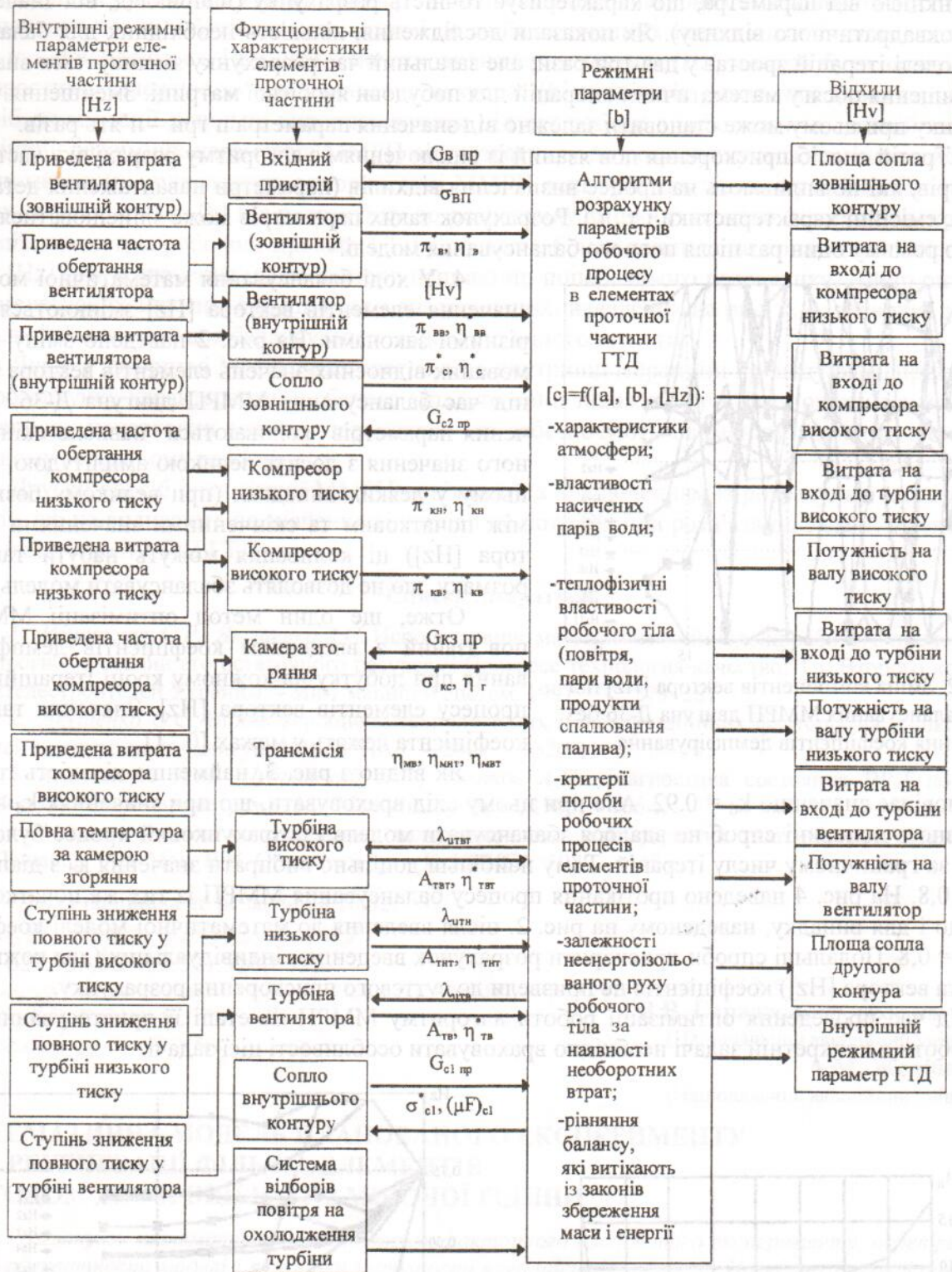


Рис. 1. Спрощена схема розрахунку параметрів робочого процесу в елементах проточної частини двигуна Д-36:

G, A – витрата та параметр витрати робочого тіла на вході до лопаткової машини; σ – коефіцієнт втрати повного тиску; π^*, η^* – ступінь підвищення (зниження) тиску та коефіцієнт корисної дії лопаткової машини за параметрами гальмування; λ_U – лінійна швидкість на середньому радіусі турбіни; η_r – повнота згоряння палива

кроках і далі через два-три кроки або зробити періодичність повтору розрахунку ніобієвої матриці функцією від параметра, що характеризує точність розрахунку (наприклад, від значення середньоквадратичного відхилення). Як показали дослідження, кількість необхідних для балансування моделі ітерацій зростає у два-три рази, але загальний час розрахунку зменшується внаслідок зменшення обсягу математичних операцій для побудови якобієвої матриці. Зменшення часу розрахунку при цьому може становити залежно від значення параметра n три – п'ять разів.

3. Третій спосіб прискорення пов'язаний із виключенням з алгоритму розрахунку частини параметрів, які не впливають на процес визначення відхилів (параметри навантаження деталей двигуна, емісійні характеристики і т. д.). Розрахунок таких параметрів може здійснюватися для кожного режиму один раз після повного балансування моделі.

4. У ході балансування математичної моделі значення елементів вектора $[Hz]$ змінюються за різними законами. На рис. 2 наведено зміну нормованих відносних значень елементів вектора $[Hz]$ під час балансування ММРП двигуна Д-36. Значення параметрів коливаються навколо скінченного значення з досить великою амплітудою. При цьому у деяких випадках (при великому розкиді між початковим та скінченними значеннями вектора $[Hz]$) ці коливання можуть набути такого розмаху, що не дозволять збалансувати модель.

Отже, ще один метод оптимізації ММРП пов'язаний з введенням коефіцієнтів демпфірування при добутку на кожному кроці ітераційного процесу елементів вектора $[Hz]$. Значення такого коефіцієнта лежать у межах $[0...1]$.

Як видно з рис. 3, найменша кількість ітерацій відповідає значенню $k_d = 0,92$. Але при цьому слід враховувати, що при значеннях $k_d > 0,9$ приблизно в половині спроб не вдалося збалансувати модель і розрахунковий процес було зупинено за граничному числу ітерацій. Тому найбільш доцільно вибирати значення k_d з діапазону $0,6...0,8$. На рис. 4 наведено протікання процесу балансування ММРП із тих же початкових умов, що і для випадку, наведеному на рис. 2, після введення до математичної моделі коефіцієнта $k_d = 0,8$. Подальші спроби прискорити розрахунок введенням індивідуальних (для кожного елемента вектора $[Hz]$) коефіцієнтів не призвели до суттєвого прискорення розрахунку.

Під час проведення оптимізації роботи алгоритму ММРП на етапі її пристосування до умов роботи в конкретній задачі необхідно враховувати особливості цієї задачі.

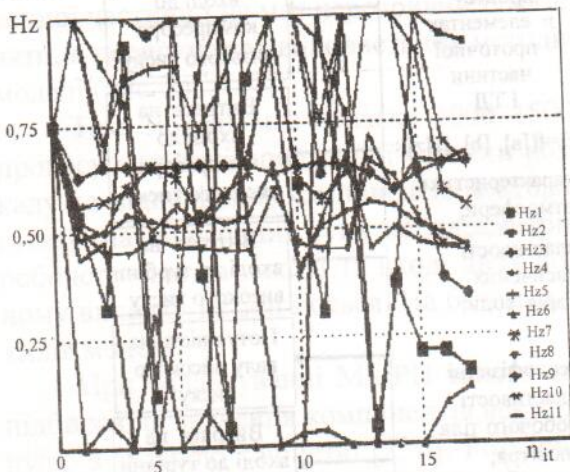


Рис. 2. Зміна компонентів вектора $[Hz]$ під час балансування ММРП двигуна Д-36 без введення коефіцієнтів демпфірування

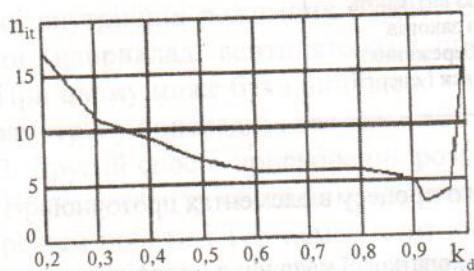


Рис. 3. Залежність кількості ітерацій n_{it} при введенні для всіх елементів вектора $[Hz]$ загального коефіцієнта демпфірування k_d

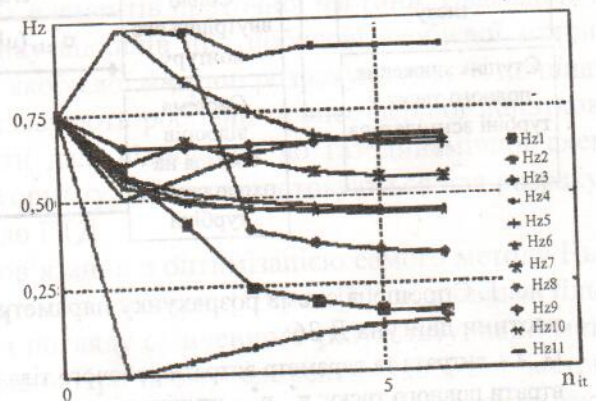


Рис. 4. Зміна компонентів вектора $[Hz]$ під час балансування ММРП двигуна Д-36 при введенні коефіцієнта демпфірування $k_d = 0,8$

Аналіз алгоритму ММРП показує, що є, принаймні, два способи такої оптимізації. Перший спосіб пов'язаний з вибором оптимальних початкових компонентів вектора [Hz]. Ці значення повинні бути якомога ближчі до своїх скінченних значень для більшої частини даних, що обробляються. При цьому початкові значення вектора [Hz] можуть бути задані відносно простими залежностями від значення вектора [b] зовнішніх режимних параметрів. Такий спосіб оптимізації доцільно використовувати під час роботи з інформацією, в якій значення зовнішніх режимних параметрів ММРП від розрахунку до розрахунку може змінюватися в широких межах (наприклад, при використанні ММРП в алгоритмах діагностування). При обробці даних, в яких вектор [b] від розрахунку до розрахунку змінюється мало (наприклад, при верифікації параметрів робочого процесу ГТД у польоті), більш доцільно за початкове значення вектора [Hz] брати значення цього вектора наприкінці попереднього розрахунку. Вибір оптимальних початкових значень, як впливає з аналізу даних, наведених на рис. 2, 4, дозволяє зменшити кількість ітерацій для балансування моделі від одного до п'яти.

Якщо в алгоритмі ММРП використовують внутрішні ітераційні процедури (наприклад, під час розрахунку характеристик робочого тіла), то вони також можуть бути оптимізовані внаслідок вибору початкових значень параметрів, що забезпечують найменшу кількість ітерацій на обраному середньому режимі.

Другий спосіб оптимізації ММРП пов'язаний з виключенням із розрахунку частини параметрів, які не впливають на значення відхилів і не потрібні при розв'язанні задачі, у контур якої буде включено ММРП ГТД.

Список літератури

1. *Игнатович С.Р., Якушенко А.С.* Использование математической модели рабочего процесса ГТД при прогнозировании его остаточного ресурса // Прогресс-технология-качество: Тр. Второго конгресса двигателестроителей Украины. – Ин-т машин и систем, 1997. – С. 279–281.
2. *Якушенко О.С.* Вплив виробничо-технологічних і експлуатаційних факторів на пошкодження деталей газотурбінного двигуна // Вісн. НАУ. – 2001. – №2(9). – С. 34–38.
3. *Ахмедзянов А.М., Дубравский Н.Г., Тунаков А.П.* Диагностика состояния ВРД по термодинамическим параметрам. – М.: Машиностроение, 1983. – 206 с.
4. *Математическое моделирование эксплуатационных характеристик газотурбинных двигателей / А.П. Тунаков, Э.В. Мац, В.И. Орланов и др.* – К: КИИГА, 1989. – 148 с.

Стаття надійшла до редакції 28.10.02.

0565-082.205.3-01-07
УДК 629.735.064.33:621.928(045)

фільтр дезорбційний, регенерація фільтра, очистка
десорбція газу

В.В. Гаража, канд. техн. наук, проф.
(Національний авіаційний університет)

А.М. Желіба, асист.
(Національний авіаційний університет)

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПЛАНОВАНОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ ДЛЯ РЕГЕНЕРАЦІЇ ФІЛЬТРОЕЛЕМЕНТІВ МЕТОДОМ ДЕСОРБЦІЇ ГАЗУ З МІЮЧОЇ РІДИНИ

Розглянуто математичну модель восьмифакторного планованого експерименту, перевірку адекватності моделі і перевірку значущості коефіцієнтів регресії. Наведено значущі фактори, матрицю і план факторного експерименту.

Для очищення робочих рідин від механічних забруднень у функціональних системах повітряних суден і технологічних стендах на підприємствах цивільної авіації найбільш широке застосування одержали механічні фільтри.

За статистичними даними експлуатаційного забруднення механічних фільтрів в умовах експлуатації, виробництва і ремонту за час напрацювання на повітряному судні до 50 год рівень забруднення фільтроелементів може перевищуватися в 3,75 рази [1]. З цієї причини виникає не-