

УДК 515.2

М.О. ХОДАК, В.В. СИТНИЧЕНКО, Т.С. ПАНКРАТОВА

*Київський національний авіаційний університет, Україна***ГРАФОАНАЛІТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ОБ'ЄМІВ І ПЛОЩ ПОВЕРХОНЬ
ПРЯМОТОЧНИХ ПОВІТРОЗАБІРНИКІВ АВІАЦІЙНИХ ГТД
З ЕЛІПТИЧНИМ ВХОДОМ**

У роботі розглядаються питання моделювання об'ємів і площ поверхонь прямоточних повітрязбірників (ПЗ) авіаційних газотурбінних двигунів (ГТД) з еліптичним перерізом на вході і круговим перерізом на виході при проміжних закономірно змінних перерізах. Наведено застосування отриманих об'ємних математичних моделей та номограм при визначенні проміжних значень об'ємних геометричних параметрів від їх взаємних поєднань.

графоаналітичне моделювання об'ємів і площ поверхонь, життєвий цикл виробу, автоматизація проектування, повітрязбірники авіаційних двигунів, компоновання поверхонь в загальній конструкції, блок-схема, алгоритм, програма, номографування

Загальна постановка проблеми та її зв'язок з науково-практичними задачами

При проектуванні силової установки (СУ) літака важливе місце відводиться питанням проектування повітрязбірників (ПЗ) авіаційних двигунів (АД), так як вони впливають значною мірою на його економічність, стійку роботу, лобовий опір літального апарату (ЛА). При геометричному моделюванні (ГМ) поверхонь ПЗ ГТД ЛА необхідно вирішувати дві задачі, а саме, задачу ГМ зовнішніх поверхонь та задачу ГМ внутрішніх каналових поверхонь.

Для оптимального розв'язання компоновочних задач необхідно вміти моделювати розподілення об'ємів простору складових частин і елементів каркаса ЛА між загальним об'ємом конструкції в цілому.

Об'ємно-геометричні параметри складових каркасних частин ЛА, в свою чергу, являються вихідними даними для виконання уточнених аеродинамічних, вагових, міцнісних, економічних та інших розрахунків, являються основою для ув'язки в подальшому конструктивних параметрів з експлуатаційними.

Крім цього, при завданні і розподілі об'ємів складових ЛА конструкторські групи з конструювання різних частин і систем літака повинні вписа-

тися в них зі своїм обладнанням та конструктивними рішеннями. Для цього необхідно вміти моделювати як зовнішні, так і внутрішні геометричні форми складових частин каркасу ЛА, в тому числі і ПЗ ГТД.

Профілювання зовнішнього обводу ПЗ повинно забезпечити ЛА мінімальний лобовий опір, а оптимальне профілювання внутрішніх обводів в характерних перерізах (ХП) повітряного каналу повинно забезпечувати високі значення коефіцієнта відновлення повного тиску ($\sigma_{ex} = 0,97 \dots 0,98$) і рівномірне поле швидкостей на вході в компресор ГТД, що досягається за рахунок безвідривного протікання повітря в його каналовій поверхні [1].

Відомо, що в процесі розв'язання компоновочних питань повинні також бути витримані окремі компоновочні вимоги: неперетинання з поверхнями інших агрегатів літака; визначення мінімально допустимих проміжків між оточуючими поверхнями інших агрегатів.

Таке формулювання приводить до необхідності вирішення якісно нових задач, а саме – можливості автоматизованої об'ємно-просторової компоновки каналових поверхонь ПЗ авіаційних ГТД складних геометричних форм. Розв'язання таких задач досить

трудомістке і важко вирішуване без застосування сучасних комп'ютерних технологій. Цього можливо досягти тільки за рахунок переходу на технологію проектування і виробництва через впровадження систем CAD/CAE/CAM [2, 3].

CAD-системи (computer aided design – комп'ютерна підтримка проектування) – системи автоматизованого проектування (САПР). CAE-системи (computer aided engineering – комп'ютерна підтримка інженерних розрахунків) – системи інженерного аналізу. CAM-системи (computer aided manufacturing – комп'ютерна підтримка виробництва) – системи технологічної підготовки виробництва, які призначені для проектування технологічного обладнання, обробки деталей і їх виготовлення на верстаках з числовим програмним управлінням (ЧПУ) та випуску програм до них.

В сучасних умовах CAE-системи розпочинають інтенсивніше застосовувати при технологічних процесах, здобуваючи нові області впровадження. На першому етапі область застосування систем інженерного аналізу обмежувалась умовно формою деталі та підрахунку його ваги, геометричних характеристик перерізів та деталі в цілому. В подальшому при інженерних розрахунках почали використовуватися характеристики матеріалів деталей, з'явилась можливість розрахунку багат шарових виробів з композиційних матеріалів, були розроблені CAE-системи з попередньої оцінки характеристик втомлюваності деталей і конструкцій та динамічного відгуку конструкцій на зовнішній вплив. Основна мета розвитку CAE-систем – це повне супроводження життєвого циклу виробу комплексом інженерних розрахунків.

Сьогодні ситуація на світовому ринку наукоємної продукції розвивається в сторону повного переходу на безпаперову електронну технологію проектування, виготовлення та збуту виробу.

В зв'язку з цим світ інтенсивно впроваджує нову концепцію інформаційної підтримки промислових технологій, що отримали назву CALS-концепції,

яка, по суті, є системою міждержавних стандартів, що формує єдиний інформаційний простір, де протікають процеси взаємодії всіх суб'єктів глобальної економіки.

CALS-технологія має на увазі використання єдиного інформаційного простору на всіх етапах життєвого циклу виробу – від початку проектування до виготовлення, експлуатації і до списання.

Компонентами цієї технології являються:

- системи САПР різних рівнів;
- повний електронний пакет виробу;
- система управління пакетними даними (PDM);
- система технічного електронного документообертання (TDM);
- автоматизована система технологічної підготовки виробництва;
- обчислювально-вимірвальна система;
- система управління виробництвом.

Огляд публікацій і виділення невирішених задач

Існує значна кількість публікацій з питань як математичного, так і геометричного моделювання поверхонь авіаційних конструкцій, поверхонь архітектурно-будівельних споруд різного призначення. При цьому недостатньо досліджені питання моделювання об'ємів і площ поверхонь різних кривих форм, геометричні розміри яких необхідно знати конструктору для вирішення питань оптимального компонування, розрахунку вагових характеристик складових елементів конструкцій. Крім цього, елементи ГТД зазнають впливу імпульсних навантажень, інтенсивність яких зростає із збільшенням одиничної і питомої потужності ГТД. У зв'язку з цим виникає необхідність моделювати елементи корпусу і визначити їх необхідні геометричні характеристики.

В багатьох роботах такого напрямку поверхні технічних форм задаються в дискретному вигляді, лінійчатим каркасом, точковим каркасом або пред-

ставляються оболонковими моделями. [4 – 8].

Взагалі, область застосування оболонкових конструкцій надзвичайно широка: машинобудування, авіація, ракетобудування, архітектурно-будівельні конструкції та ін.

Конструкції з оболонкових поверхонь знаходяться в різних умовах навантаження, а тому актуальними являються розрахунки на міцність, стійкість, акустично-шумові та резонансні коливання, де фігурують також геометричні характеристики елементів конструкцій [2, 3].

У загальному вигляді обводи як внутрішніх, так і зовнішніх форм поверхонь ЛА і повітрязабірників ГТД мають складні геометричні форми, але більшість з них піддаються геометричному моделюванню кривими другого порядку (КДП), а тому метод КДП в літакобудуванні знайшов широке застосування [9 – 11]. Але його можливості вивчені далеко не повністю, наприклад, не досліджені питання, які пов'язані із розробкою САПР на основі КДП і інших графічних прийомів в ГМ кривих поверхонь; питання, пов'язані із застосуванням комп'ютерних технологій для аналітичного всебічного їх розрахунку; не досліджені питання оптимального ГМ кривих поверхонь та інше. На сьогодні відсутні довідкові відомості про різні способи і прийоми побудови КДП і про інші прийоми графічних побудов складних поверхонь, які дають найменшу кількість команд при застосуванні системи, наприклад, AutoCAD, що має важливе значення для реалізації САПР на всіх її етапах, не досліджені питання розробки номограм та їх застосування при проектуванні [12 – 13].

Визначення маси складових частин літака в значній мірі залежить від їх зовнішніх і внутрішніх форм, розмірів та взаємного розташування. Зовнішні форми впливають на всі величини коефіцієнтів лобового опору C_x і під'ємної сили C_y . Від величин C_x і C_y залежить тяга або потужність двигунів і, як наслідок, маса силової установки і палива, а повітрязабірники являються складовою частиною силової

установки.

На сьогодні відсутні моделі, які б давали можливість в повній мірі спрощено моделювати поверхні складних форм ПЗ ГТД та проводити обчислювальний експеримент для дослідження таких поверхонь і впливу на них геометричних параметрів та навантажень.

Результати досліджень

Задачі автоматизованих розрахунків поверхонь, включаючи визначення їх метричних і диференційованих характеристик, завжди були і залишаються актуальними при проектуванні ПЗ авіаційних ГТД. При цьому розрахункові алгоритми і складені за ними програми повинні володіти максимальною швидкістю, точністю та мати максимально спрощений вигляд, що в значній мірі впливає на термін їх доведення і впровадження.

У зв'язку з викладеним в роботі розглядається задача графоаналітичного моделювання для визначення об'єму і площ каналових поверхонь прямокутних повітрязабірників газотурбінних двигунів (ПЗ ГТД) з еліптичним входом, що необхідні для розрахунку маси такої поверхні, як складової до визначення всієї маси силової установки, і задача переходу від звичайного графоаналітичного моделювання до проектного „комп'ютерного” моделювання.

Схема ПЗ з еліптичним входом показана на рис. 1.

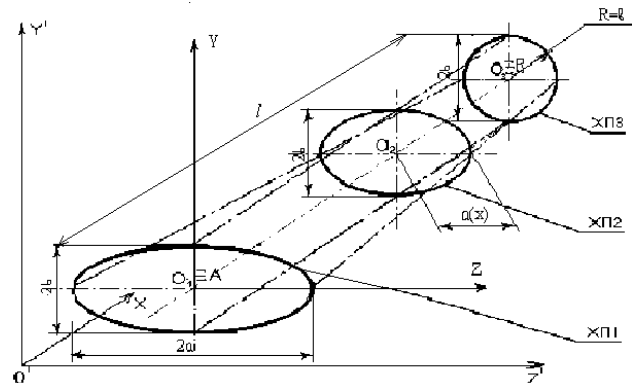


Рис. 1. Схема ПЗ з еліптичним входом

В загальному вигляді формула для визначення об'єму ПЗ може бути записана як

$$V_{ПЗ} = \int_0^l S_{ПЗ} dx . \quad (1)$$

Площа еліптичного перерізу ПЗ на вході обчислюється за формулою(2):

$$S_{ПЗ(A)} = \pi a \cdot b , \quad (2)$$

де $a(x)$ – більша піввісь еліпса, яка змінюється в залежності від x ; b – мала піввісь перерізу еліпса і паралельна осі ОУ. При цьому розглянемо задачу, коли мала вісь еліпса $2b$ залишається сталою на протязі всієї довжини l ПЗ. Виходячи з цих умов проведемо дослідження зміни площі поперечного перерізу внутрішньої поверхні ПЗ ГТД від еліптичного перерізу на вході до кругового перерізу на виході. Тоді формула (2) приймає вигляд (3), де $2b$ залишається сталою на протязі всієї довжини l ПЗ (рис. 1); $a(x)$ – більша піввісь еліпса змінюється в залежності від x ;

$$S_{ПЗ(A)} = \pi a(x) \cdot b . \quad (3)$$

Якщо в першому наближенні прийняти, що $a(x)$ змінюється на відрізку $(0; l)$ лінійно, то з урахуванням крайових умов (4) для $a(x)$:

$$\begin{cases} a(0) = a; \\ a(l) = b, \end{cases} \quad (4)$$

можна знайти закон зміни для $a(x)$, який має вигляд (5):

$$a(x) = \frac{(l-x)(a-b)}{l} + b = a + \frac{x(b-a)}{l} . \quad (5)$$

Тоді об'єм перехідного каналу ПЗ з еліптичним входом з врахуванням (1), (3) і (5) після перетворень визначиться за формулою (6):

$$\begin{aligned} V_{ПЗ \text{ Ел.вх.}} &= \int_0^l S_{ПЗ(A)} \cdot dx = \pi \int_0^l a(x)b \cdot dx = \\ &= \pi b \int_0^l \left[\frac{(l-x)(a-b)}{l} + b \right] dx = \frac{\pi b l}{2} (a+b). \end{aligned} \quad (6)$$

В процесі розробки і конструювання ПЗ крім математичних моделей об'ємів важливо мати унагляднені представлення по взаємозв'язку їх основних геометричних параметрів. Для швидкого і наочного визначення взаємного зв'язку між об'ємом і змінними параметра-

ми a , b і l рівняння (6) пропонується використовувати графічно-номограмні представлення функції зміни об'єму ПЗ від a , b і l , які показані на рис. 2 для ПЗ з еліптичним входом, тобто характер зміни об'єму в залежності від різних значень a і l при $b = const$.

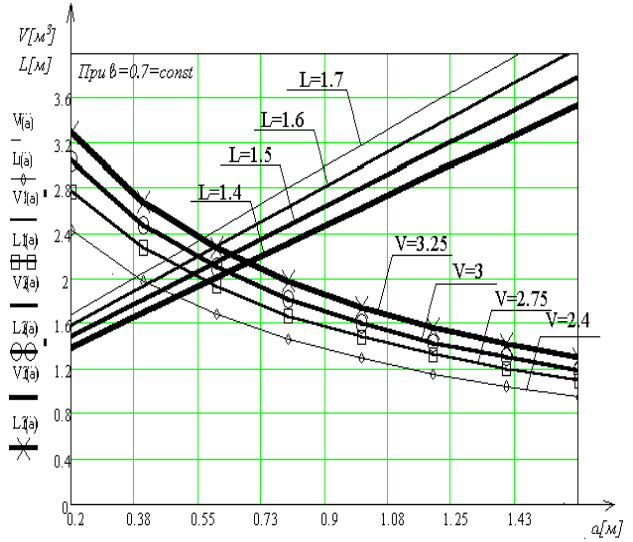


Рис. 2. Графічно-номограмні залежності зміни об'єму ПЗ для еліптичного входу

Сумісний розгляд набору аналогічних графічних залежностей при $b = 0,8$, $b = 0,9$ і аналітичних алгоритмів розв'язання задач компоновання ПЗ дозволяє більш глибоко вникнути в суть задачі, уникнути помилок або неточностей за рахунок наочності отриманих номограмних результатів, які завжди були притаманні при інженерному проектуванні та геометричному моделюванні.

Другою важливою розрахунковою характеристикою при проектуванні ПЗ є визначення площі внутрішньої каналової поверхні ПЗ, яка стосується середньої (теоретичної) поверхні оболонки без врахування її товщини та інших параметрів, що визначаються при розрахунках на міцність і інших вагових розрахунках.

В загальному вигляді формула для визначення площі поверхні ПЗ по області D може бути записана формулою (7) [14]:

$$S_{ПЗ} = \iint_D \sqrt{1 + (y'_z)^2 + (y'_x)^2} dz dx . \quad (7)$$

Для цієї задачі граничні умови на вході і виході в ПЗ згідно рис. 1 можна записати і позначити як такі, що $A(a_0, 0)$, $B(b, x_0)$, $a_0 > b$, де a – велика піввісь еліпса, b – мала піввісь еліпса, яка дорівнює радіусу кола на виході, а характерні перерізи змінюються за лінійним законом від еліпса на вході до кола на виході, який має вигляд (8) згідно прийнятих змінених позначень

$$a(x) = a_0 + \frac{x(b - a_0)}{x_0}. \quad (8)$$

Канонічне рівняння еліпса для даного випадку має вигляд (9):

$$\frac{z^2}{a^2(x)} + \frac{y^2}{b} = 1, \quad (9)$$

тоді

$$y = \frac{b\sqrt{a^2(x) - z^2}}{a(x)}. \quad (10)$$

Зміна параметрів для області D має вигляд (11):

$$D: \begin{cases} 0 \leq x \leq x_0; \\ 0 \leq z \leq a(x) + \frac{x(b - a_0)}{x_0}. \end{cases} \quad (11)$$

Визначимо частинні похідні функції y по z і x від (10) та похідну від (8).

Тоді

$$y'_z = \frac{bz}{a(x)\sqrt{a^2(x) - z^2}}; \quad (12)$$

$$y'_x = \frac{bz^2 a'(x)}{a^2(x)\sqrt{a^2(x) - z^2}}; \quad (13)$$

$$a'(x) = \frac{b - a_0}{x_0}. \quad (14)$$

Якщо в (13) підставити вираз (14), то отримаємо вираз (15):

$$y'_x = \frac{bz^2(b - a_0)}{x_0 a^2(x)\sqrt{a^2(x) - z^2}}. \quad (15)$$

Підставивши вирази (12), (14), (15) до формули (7), отримаємо формулу (16) для визначення $1/4$ внутрішньої площі каналу ПЗ, яка має вигляд:

$$\frac{1}{4} S_{ПЗ} = \int_0^{x_0} dx \int_0^{a(z)} \sqrt{1 + \frac{b^2 z^2}{a^2(x)(a^2(x) - z^2)} + \frac{b^2 z^4 (b - a_0)^2}{x_0^2 a^4(x)(a^2(x) - z^2)}} dz. \quad (16)$$

Обчислення подвійного інтегралу (16) отримаємо наближено за програмою, блок-схема якої показана на рис. 3 [15].

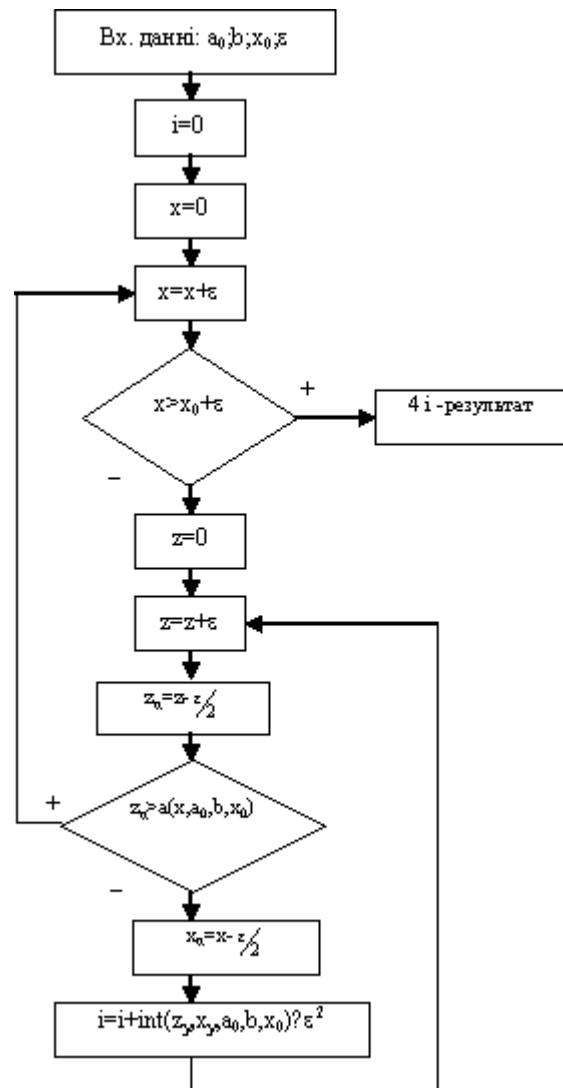


Рис. 3. Блок-схема наближеного обчислення подвійного інтегралу (16)

Висновки

Запропоновані графічно-номограмні залежності об'єму ПЗ як функції $V = f(a, b, l)$ значно розширюють початкові розрахунки, дозволяють достатньо швидко вибирати проміжні значення параметрів функції $V = f(a, b, l)$ при різних варіантах їх поєднання, а також дозволяють перевіряти точність вибору параметрів, необхідних для управління геометричною формою ПЗ, розробляти загальні рекомендації

по вибору геометричних параметрів ПЗ для оптимального вирішення компоновочних задач по взаємній ув'язці об'ємів поверхонь ЛА, які функціонально зв'язані з об'ємами прямокутних ПЗ.

За схемою, представленою на рис. 2, проводяться обчислювальні експерименти для розробок номографічних моделей по визначенню внутрішніх площ каналових поверхонь ПЗ і дослідження в цьому напрямку необхідно продовжити.

Література

1. Проектирование самолётов / Под ред. С.М. Егера – М.: Машиностроение, 1983. – 616 с.
2. Балабуев П.В., Бычков С.А. и др. Основы общего проектирования самолётов с газотурбинными двигателями. Часть 2. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2003. – 390 с.
3. Кучер О.Г., Харитон В.В. Розрахунок на міцність авіаційних конструкцій методом кінцевих елементів із застосуванням систем комп'ютерного інжинірингу // Збірник наукових праць V МНТК «АВІА 2003». – К.: НАУ, 2003. – Т. 3. – Секція 34. – С. 34.11 – 34.16.
4. Найдиш А.В. Моделирование кривых линий и поверхностей зданий и сооружений аэропортов. Сборник научных трудов КИИГА // Геометрическое моделирование в авиационном и аэродромном проектировании. – К., 1994. – С. 77 – 81.
5. Пугачов Е.В. Дискретна згладжуюча апроксимація дискретно представлених осцилюючих поверхонь // Прикладна геометрія та інженерна графіка. – К.: КДТУБА, 1996. – Вип. 60. – С. 46 – 49.
6. Павлов А.В., Власик Г.Г. Конструювання поверхні носової частини літака з використанням графічної системи INS // Прикладна геометрія та інженерна графіка. – К.: КДТУБА, 2000. – Вип. 67. – С. 114 – 117.
7. Михайленко В.Е., Черніков О.В. Сучасний стан методів геометричного та комп'ютерного моделювання та напрямки їх розвитку // Прикладна геометрія та інженерна графіка. – К.: КДТУБА, 2000. – Вип. 68. – С. 3 – 6.
8. Борисенко В.Д., Устенко С.А. Впровадження досліджень з геометричного моделювання у практику створення проточних частин турбомашин // Прикладна геометрія та інженерна графіка. – К.: КДТУБА, 2003. – Вип. 73. – С. 72 – 77.
9. Бабаков В.В. Проектирование поверхностей кривыми второго порядка в самолетостроении. – М.: Машиностроение, 1969. – 124 с.
10. Котов И.И., Утишев Е.Г. Обвод кривых с общими кривизнами. – Темат. сб. научн. тр. – М.: МАИ. – Вып. 414. – 1977.
11. Фирсов В.А. Воспроизведение обводов самолета в системе автоматизированного проектирования. – М.: МАИ, 1978.
12. Ходак М.О., Ситниченко В.В., Вишневский О.А. Застосування номографування до геометричного моделювання обводів перерізів повітрязабірників авіадвигунів параболо-еліптичних форм // Авіаційно космічна техніка і технологія. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2003. – Вип. 40/5 – С. 121 – 125.
13. Ходак М.О., Ситниченко В.В. Вибір оптимальної комп'ютерної візуалізації при геометричному моделюванні обводів складних форм характерних перерізів повітрязабірників авіаційних ГТД // Праці Таврійської державної агротехнічної академії. – Мелітополь, 2001. – Вип.4. Прикладна геометрія та інженерна графіка. Том 12. – С. 83 – 89.
14. Дубовик В.П., Юрик І.І. Вища математика. – К.: А.С.К., 2001 – С. 578 – 579.
15. Ходак М.О., Давидов С.О., Ситниченко В.В., Панкратова Т.С. Моделювання площ поверхонь прямокутних повітрязабірників авіаційних ГТД з еліптичним входом // Збірник наукових праць VI МНТК „АВІА-2004” – К.: НАУ, 2004. – Т. III. – Секція 32. – С. 32.35 – 32.38.

Надійшла до редакції 7.06.2005

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.П. Юрчук, Національний технічний університет України „КПІ”, Київ.