

УДК 515.2

М.О. Ходак, В.Г. Демидко, В.В. Ситниченко

ОПТИМАЛЬНЕ ГЕОМЕТРИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ОБВОДІВ ПЕРЕРІЗІВ ПОВІТРОЗАБІРНИКІВ АВІАЦІЙНИХ ДВИГУНІВ ГІПЕРБОЛО-ЕЛІПТИЧНИХ ФОРМ В СИСТЕМІ AutoCAD

Наведено результати дослідження оптимального геометричного моделювання обводів гіперболо-еліптичних форм характерних перерізів повітрязбірників авіаційних газотурбінних двигунів за критерієм мінімізації їх команд в системі AutoCAD та робочі формули їх аналітичного розрахунку.

Одним із традиційних методів проектування аеродинамічних поверхонь літальних апаратів (ЛА) і їх силових установок (СУ) є метод батоксів (вертикальних поздовжніх перерізів) і горизонталей (горизонтальних поздовжніх перерізів). Суть цього чисто графічного метода зводиться до побудови великої кількості поперечних та поздовжніх перерізів поверхонь у трьох проекціях. Контури цих перерізів взаємно корегуються по проекціям великої кількості окремих точок для одержання плавних ліній. Відстані між площинами поперечних перерізів, площинами батоксів та горизонталей вибираються в залежності від величини поверхні та її кривизни. Чим більше перерізів, тим точніше задана крива поверхня своїми обводами. Однак, метод батоксів і горизонталей (ортогональних перерізів) об'єктивної оцінки плавності поверхні не дає, так як розбіжність з оригіналом при повторній побудові за табличними даними досягає 10 мм, а методики аналітичного розрахунку методу ортогональних перерізів на сьогодні нема [1].

Більшість важливих і значних технологічних процесів збирання в літако- і ракетобудуванні виходять із геометрії аеродинамічних зовнішніх та внутрішніх обводів, проектування і відтворення яких є найбільш складним і відповідальним процесом, оскільки задавати, розраховувати і відтворювати аеродинамічні обводи є основою з точки зору подальшого проектування всіх інших технологічних процесів виробництва ЛА і СУ в цілому та їх окремих конструкцій.

При проектуванні СУ літака важливе місце відводиться питанням проектування повітрязбірників авіаційних двигунів, так як вони впливають значною мірою на його економічність, стійку роботу, лобовий опір ЛА. При геометричному моделюванні (ГМ) поверхонь повітрязбірників газотурбінних двигунів (ГТД) ЛА необхідно вирішувати дві задачі: задачу ГМ зовнішніх поверхонь та задачу ГМ внутрішніх каналових поверхонь. Профілювання зовнішнього обводу повітрязбірників повинно забезпечити ЛА мінімальний лобовий опір, а оптимальне профілювання внутрішніх обводів в характерних перерізах повітряного каналу повинно забезпечувати високі значення коефіцієнта відновлення повного тиску ($\sigma_{вх} = 0,97...0,98$) і рівномірне поле швидкостей на вході в компресор ГТД, що досягається внаслідок безвідривного протікання повітря в його каналовій поверхні.

В основі сучасного проектування авіаційних конструкцій все більшого значення набувають методи ГМ поверхонь ЛА та їх обводів з широким застосуванням комп'ютерних технологій та створення на їх базі систем автоматизованого проектування (САПР).

У загальному вигляді обводи як внутрішніх, так і зовнішніх форм ЛА і повітрязбірників ГТД мають складні геометричні форми, але більшість з них піддаються ГМ кривими другого порядку (КДП). Метод КДП твердо увійшов в практику літакобудування, але його можливості вивчені далеко не повністю, наприклад, не досліджені питання, які пов'язані з роботою САПР на основі КДП та інших графічних прийомів в ГМ кривих поверхонь із застосуванням комп'ютерних технологій для аналітичного всебічного їх розрахунку; питання оптимального ГМ кривих поверхонь та ін. На сьогодні відсутні довідкові відомості про різні способи і прийоми побудови КДП і про інші прийоми графічних побудов складних повер-

хонь, які дають найменшу кількість команд, що має важливе значення для створення САПР, в свою чергу, значно спрощує систему програмування на всіх етапах реалізації САПР.

Дослідження побудови КДП проведено, виходячи з кількості команд на побудову п'яти точок кривої, які забезпечують повну достатність для визначення КДП, що доводиться теоремами Паскаля і Бріансона [1].

На рис.1, *a* показаний спосіб побудови еліпса в системі AutoCAD-14: за двома його вісями, на рис.1, *б* – за двома його вісями і фокусами, на рис.1, *в* – за двома його вісями з використанням двох проєктивних пучків прямих, на рис.1, *г* – за двома його вісями та трикутника “ключа пропорційності” [2]. Для першого способу побудови еліпса в системі AutoCAD-14 потрібно було виконати 18 команд, для другого – 11 команд, для третього – 12 команд, для четвертого – 22 команди [3].

На рис.1, *д* показано спосіб побудови гіперболи в системі AutoCAD-14: за заданими фокусною відстані $F_1F_2=2c$ і відстані між вершинами $AB=2a$, на рис.1, *е* – за заданими асимптотами і довільній точці M . Для першого способу побудови гіперболи потрібно було виконати 18 команд, а для другого – 17 команд.

Для того, щоб виконати ГМ обводу, який складається, наприклад, з ділянки еліпса і гіперболи, і його відтворення на комп'ютері, показано на рис.2, потрібно застосувати зазначені прийоми та графічні способи побудови еліпса і гіперболи. З аналізу можливих варіантів побудов, оптимальний прийом побудови обводу потребує загальної кількості команд 28, тобто 11 по еліпсу і 17 по гіперболі, а в порівнянні з прийомом побудови, який потребує найбільшої кількості команд – 40, тобто 22 по еліпсу і 18 по гіперболі; в процентному відношенні оптимальний прийом зменшує кількість команд на 30%.

Другою важливою розрахунково-геометричною характеристикою характерного перерізу повітрязабірника ГТД є визначення площі його перерізу, що являє інтерес для інженерної практики, бо знання конкретних значень площ характерного перерізу необхідно для розрахунків по визначенню витрати повітря, епюр полів швидкостей течій повітря в них, забезпечення стійкої роботи авіаційного ГТД.

Геометричні параметри вхідної частини каналу повітрязабірника визначаються необхідною витратою маси повітря через площу входу за формулою [4]

$$F_{\text{вх}} = m_{\text{п}} / v_{\text{вх}} \rho_{\text{вх}}, \quad (1)$$

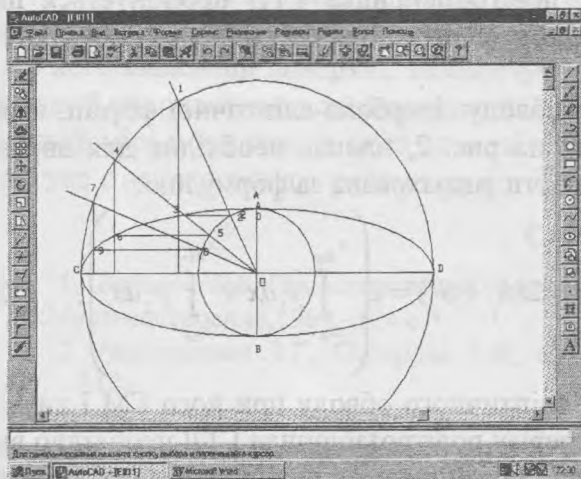
де $F_{\text{вх}}$ – площа входу; $m_{\text{п}}$ – секундна витрата повітря через двигун; $v_{\text{вх}}$ – швидкість повітря на вході; $\rho_{\text{вх}}$ – щільність повітря на вході.

При проектуванні дозвукових повітрязабірників ГТД їх параметри вибираються для основного режиму польоту [4].

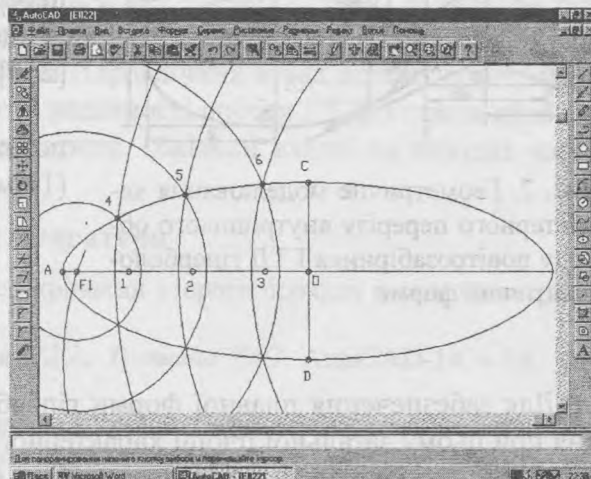
На рис.2 показано типовий приклад складної форми обводу характерного перерізу каналової поверхні повітрязабірника авіаційного ГТД, який має гіперболо-еліптичну форму.

Оскільки проєктований контур має складну геометричну форму, то для забезпечення його ГМ і розрахунку, пропонується комбінований спосіб його апроксимації. Він полягає в тому, що складна крива обводу за наперед заданими формами розбивається на окремі ділянки, найбільш близькі до того чи іншого закону розподілу кривини профілю, що описується комбінацією кускових КДП, а ступінь їх випуклості і тип кривої визначається за дискримінантом d : якщо $d > 0.5$, то маємо дугу гіперболи; якщо $d < 0.5$ – дугу еліпса.

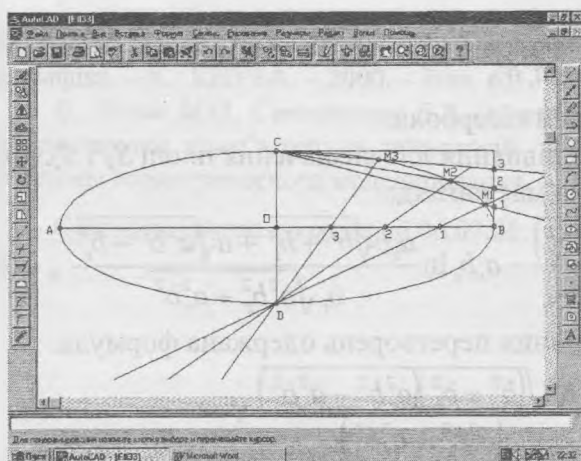
При цьому зрощування окремих ділянок виконується зі збереженням похідної (дотична t_E до обох кривих у точці зрощування має бути спільною) або з додержанням одного і того ж радіуса кривини в місці зрощування. Після цього з врахуванням встановлених значень дискримінанта d і виду КДП для підвищення точності ГМ обводу пропонується ці окремо взяті ділянки КДП перебудувати з використанням того чи іншого відомого геометричного способу або прийому їх побудови.



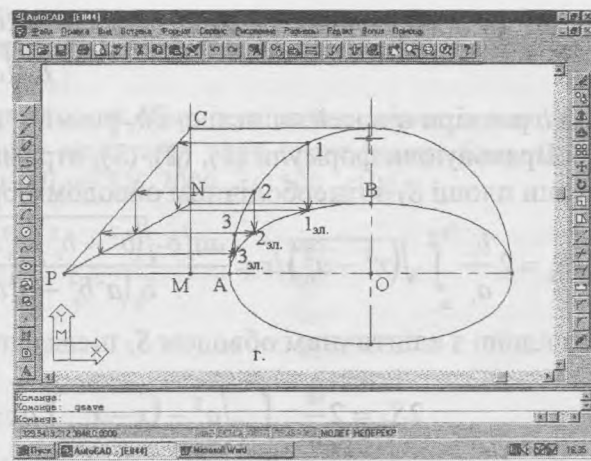
a



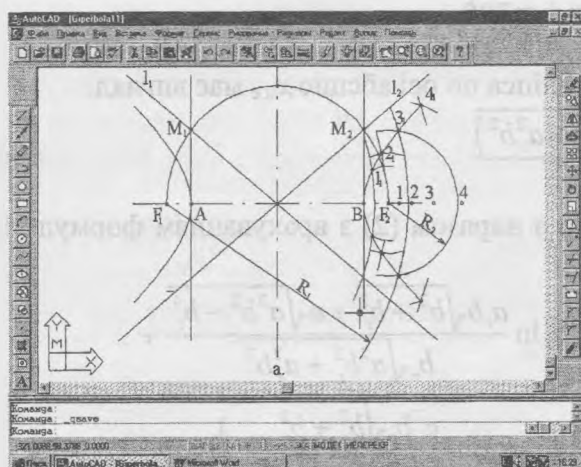
б



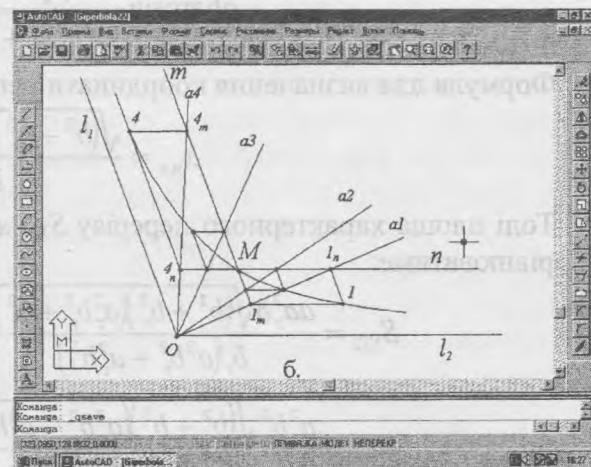
в



г



д



е

Рис. 1. Способи побудови еліпса (*a, б, в, г*) і гіперболи (*д, е*) в системі AutoCAD-14

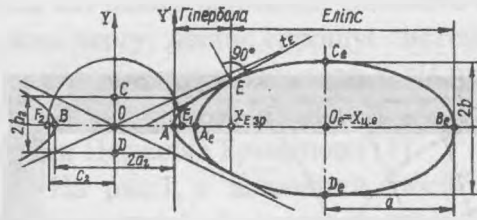


Рис. 2. Геометричне моделювання характерного перерізу внутрішнього обводу повітрязабірника ГТД гіперболо-еліптичної форми

З метою скорочення часу і підвищення точності викреслювання обводів характерних перерізів повітрязабірника ГТД пропонується цю процедуру проводити із застосуванням AutoCAD-14 [2; 3].

Для обводу гіперболо-еліптичної форми, який показаний на рис. 2, площа, необхідна для виразу (1), може бути розрахована за формулою:

$$S_{ХП} = 2(S_1 + S_2) = 2 \left(\int_{x_A}^{x_{Esp}} y_1 dx + \int_{x_{Esp}}^{x_{B.e}} y_2 dx \right). \quad (2)$$

Для забезпечення плавної форми гіперболо-еліптичного обводу при його ГМ і визначення при цьому загальної площі характерного перерізу повітрязабірника ГТД необхідно визначити x_{Esp} – координату точки зрощування гіперболи з еліпсом, в якій вони мають спільну дотичну t_E . Її визначаємо із розв'язку системи рівнянь за формулою

$$x_{Esp} = \frac{a_r^2 b \sqrt{b^2 + b_r^2}}{b_r \sqrt{a^2 b_r^2 + a_r^2 b^2}}, \quad (3)$$

де a і b розміри півосей еліпса; a_r і b_r розміри півосей гіперболи.

Враховуючи формули (1), (2), (3), отримаємо рівняння для визначення площ S_1 і S_2 . Для частини площі S_1 з гіперболоїчним обводом формула має вигляд:

$$2S_1 = 2 \frac{b_r}{a_r} \int_{a_r}^{x_{Esp}} \sqrt{x^2 - a_r^2} dx = \frac{a a_r^2 b \sqrt{(b^2 + b_r^2)(a_r^2 b_r^2 + b_r^2)}}{b_r (a^2 b_r^2 + a_r^2 b^2)} - a_r b_r \ln \frac{a_r b \sqrt{b^2 + b_r^2} + a \sqrt{a^2 b^2 - b_r^4}}{b_r \sqrt{a^2 b_r^2 + a_r^2 b^2}}, \quad (4)$$

а для площі з еліптичним обводом S_2 після алгебричних перетворень одержана формула:

$$2S_2 = 2 \frac{a}{b} \int_{x_{Esp}}^{x_{ц.е} + a} \sqrt{a^2 - (x - x_{ц.е})^2} dx = \frac{a^2 b_r^2 \sqrt{(b^2 + b_r^2)(a_r^2 b^2 - a^2 b_r^2)}}{b (a^2 b_r^2 + a_r^2 b^2)} + ab \arcsin \frac{a^2 b_r \sqrt{b^2 + b_r^2}}{b \sqrt{a^2 b_r^2 + a_r^2 b^2}} + \frac{1}{2} \pi ab. \quad (5)$$

Формула для визначення координати центра еліпса по осі абсцис $x_{ц.е}$ має вигляд:

$$x_{ц.е} = \frac{\sqrt{(b^2 + b_r^2)(ab_r^2 + a_r^2 b^2)}}{bb_r} \quad (6)$$

Тоді площа характерного перерізу $S_{ХП}$ згідно з виразом (2) з врахуванням формул (4), (5) дорівнюватиме:

$$S_{ХП} = \frac{a a_r^2 b \sqrt{(b^2 + b_r^2)(a_r^2 b_r^2 + b_r^2)}}{b_r (a^2 b_r^2 + a_r^2 b^2)} - a_r b_r \ln \frac{a_r b \sqrt{b^2 + b_r^2} + a \sqrt{a^2 b^2 - b_r^4}}{b_r \sqrt{a^2 b_r^2 + a_r^2 b^2}} + \frac{a^2 b_r^2 \sqrt{(b^2 + b_r^2)(a_r^2 b^2 - a^2 b_r^2)}}{b (a^2 b_r^2 + a_r^2 b^2)} + ab \arcsin \frac{a^2 b_r \sqrt{b^2 + b_r^2}}{b \sqrt{a^2 b_r^2 + a_r^2 b^2}} + \frac{1}{2} \pi ab.$$

У загальному випадку підрахунок площ за формулою (1) і (2), коли обводи описуються КДП і іншими видами функцій [5], необхідно мати конкретні підінтегральні функції зі своїми коефіцієнтами, що відповідають апроксимованим ділянкам обводу. Методика визначення конкретних видів підінтегральних функцій для відповідних ділянок обводу викладена в роботах [5; 6].

Оскільки для загального випадку підінтегральні функції формули (2) з урахуванням виразів (3) і (6) мають складний вигляд, то обчислення пропонується проводити на комп'ютері.

Наведений аналітичний розрахунок для забезпечення плавності при ГМ обводів повітрярозабірників та керування їхньою формою дає можливість краще організувати потік повітря в його каналовій поверхні, забезпечує зниження гідравлічних втрат потоку повітря, спрямований на підвищення загальної економічності й надійності роботи ГТД, а також дозволяє в значній мірі понижувати його шумові характеристики, оскільки вхідні та вихідні частини двигуна є основними джерелами шумів ЛА.

Список літератури

1. *Бабаков В.В.* Проектирование поверхностей кривыми второго порядка в самолётостроении. – М.: Машиностроение, 1969. – 124 с.
2. *Романчычева Э.Т., Сидорова Т.М., Сидоров С.Ю., Трошина Т.Ю.* AutoCAD-14. – М.: ДМК, 1999. – 510 с.
3. *Ходак М.О., Ситниченко В.В.* Вибір оптимального прийому геометричного моделювання обводів складних форм в системі AutoCAD // Прикладна геометрія та інженерна графіка. – К.: КНУБА. – 2001. – Вип. 68. – С. 125 – 130.
4. *Проектирование самолётов* / Под ред. С.М. Егера. – М.: Машиностроение, 1983. – 616 с.
5. *Ходак М.О., Ситниченко В.В.* Апроксимація і розрахунок складних геометричних форм обводів характерних перерізів повітрярозабірників авіаційних двигунів // Прикладна геометрія та інженерна графіка. – К.: КНУБА. – 2000. – Вип. 67. – С. 157 – 161.
6. *Ходак М.О., Ситниченко В.В.* Проектування плоских обводів складних геометричних форм з використанням комп'ютерних технологій // Тез. докл. междунар. науч.-практ. конф. Современные проблемы геометрического моделирования. – Донецк: ДонГТУ, 2000. – С. 100 – 101.

Стаття надійшла до редакції 06.07.01.