

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ УКРАЇНИ  
КИЇВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ

На правах рукопису  
УДК 515.2

БІДНИЧЕНКО Олена Галиківна

**ГЕОМЕТРИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ  
ПРОТОЧНИХ ЧАСТИН ВІДЦЕНТРОВИХ  
КОМПРЕСОРІВ**

Спеціальність 05.01.01 — Прикладна геометрія,  
комп'ютерна графіка, дизайн та ергономіка

**А в т о р е ф е р а т**  
**дисертації на здобуття наукового ступеня**  
**кандидата технічних наук**

Київ — 1995



00778413 (U)

До захисту представляється р

Робота виконана на кафедрі інженерної графіки Українського державного морського технічного університету

Науковий керівник - кандидат технічних наук  
доцент Борисенко В.Д.Офіційні опоненти: доктор технічних наук  
професор Молдавський А.А.,  
кандидат технічних наук  
доцент Висоцький А.М.

Провідна організація - ЦНДІП "Тайфун" (м.Миколаїв)

Захист відбудеться 20 Вересня 1995 року о 13 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 04:18.06 в Київському державному технічному університеті будівництва і архітектури за адресою: 252037, Київ - 37, Повітрофлотський проспект, 31, КДТУБА.З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці КДТУБА.  
Автореферат розіслано 18 08 1995р.Вчений секретар  
спеціалізованої ради Д 04:18.06  
кандидат технічних наук доцент

Плюський В.О.

ЛНБ ім. В. Стефаніка  
АН України

AB-32. 294  
3

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. Відцентрові компресори (ВК) знаходять широке застосування у чорній та кольоровій металургії, хімічній, газовій і нафтовій промисловості, у машинобудуванні. Велика їх роль у транспортній енергетиці: авіаційній, космічній, суднової. Поява нових галузей застосування відцентрових машин і поширення меж їх використання (збільшення меж продуктивності, ступеню підвищення тиску, зниження масо-габаритних показників) в ряді випадків не дозволяє застосувати відомі методи їх розрахунків при розробці проточних частин нових ВК, а також при удосконаленні машин, які ще знаходяться в експлуатації. Впровадження нових прогресивних матеріалів, технологічного обладнання дозволяє проектувати та виготовляти лопаточні апарати компресорів складних просторових форм. Це звичайно потребує розробки нових методів та підходів до їх профілювання.

Задача поліпшення аеродинамічної якості елементів проточних частин ВК особливо їх робочих коліс (РК) є актуальною та являє собою теоретичний та практичний інтерес. Робота, що реферується, є складовою частиною комплексних досліджень, які проводяться на кафедрі інженерної графіки Українського державного морського технічного університету (м.Миколаїв) і пов'язані з удосконаленням методів геометричного моделювання лопаточних апаратів турбомашин різного класу та призначення.

М е т а роботи. Розробка методів, алгоритмів і програм геометричного моделювання елементів проточних частин ВК, заснованих на сучасних положеннях аналітичної, прикладної та обчислювальної геометрії.

Для досягнення поставленої мети потрібно розв'язати такі теоретичні та прикладні геометричні задачі:

1. Розвинути теоретичні основи геометричного моделювання кривих та поверхонь, які дозволяють здійснювати локальні впливи на їх форму та враховувати особливості геометрії об'єкту, що досліджується.

2. Розробити методи геометричного моделювання проточної частини ротора ВК, які дозволять керувати формою меридіонального перерізу та профілів лопаток.

3. Розробити методи геометричного моделювання нерухомих елементів проточної частини ВК (стояків, лопаток входного та зворотного напрямного апаратів, дифузорів).

4. Розробити алгоритми та програми геометричного моделювання елементів проточної частини ВК та візуалізації одержаних геометричних результатів стосовно до персональних ЕОМ.

5. Співставити результати геометричного моделювання окремих елементів проточної частини ВК з відомими даними.

6. Дослідити вплив геометричних параметрів елементів проточних частин ВК на форму їх аеродинамічних обводів та поверхонь.

7. Впровадити результати роботи в практику проектування ВК.

Методика досліджень. Розв'язання поставлених в роботі задач здійснюється на основі методів аналітичної, нарисної, диференційної геометрії, методів прикладного програмування, обчислювальної геометрії та комп'ютерної графіки. Дослідження впливу геометричних параметрів вперше виконано з застосуванням теорії планування експерименту, моделювання елементів проточної частини ВК зроблено на базі модифікованих кривих Безьє, раціональних та параметричних кубічних кривих, конхкоїди Нікомеда та інших кривих.

Теоретичною базою проведення досліджень були роботи:

- в галузі проектування лопаточних апаратів турбомашин: В.С.Бекнева, В.Д.Левенберга, С.П.Лівшиця, В.Ф.Ріса, К.П.Селєзньова, Б.С. Стечкіна, К.В. Холщевникова;

- в галузі конструювання поверхонь складних технічних форм: І.Котова, В.Є.Михайленка, В.М.Найдиша, В.С.Обухової, А.В.Павлова, О.Л.Підгорного, І.А.Скидана, С.А.Фролова, В.І.Якуїна;

- в галузі автоматизованого проектування та системного моделювання: В.Є.Михайленка, І.Л.Норенкова, В.А.Осипова, А.І.Петренка;

- в галузі геометричного моделювання та комп'ютерної графіки: Ю.І.Бадасва, С.М.Грибова, С.М.Ковальова, С.М.Колотова, В.Є.Михайленка, В.М.Найдиша, А.В.Павлова.

Наукову новизну роботи складають:

1. Інтерпретація методу Безьє запровадженням вагових коефіцієнтів вершин характеристичної ламаної з метою зробити додатковий локальний вплив на форму кривої.

2. Рівняння параметричної кубічної кривої з двома степенями свободи, яке одержано стосовно до рішення задач моделювання лопаток нерухомих елементів ВК.

3. Дослідження геометричних об'єктів методами теорії планування експерименту, які застосовуються для аналізу функціональної залежності у багатовимірному просторі незалежних змінних.

4. Геометричні методи моделювання елементів статора та ротора ВК на базі модифікованого методу Безьє, а також з використанням кривих, які раніше не застосовувались при проектуванні ВК.

5. Дослідження впливу геометричних параметрів ВК на форму профілів лопаток його ротора та статора.

Практична цінність роботи полягає в розробці ефективного апарату (математичних моделей, алгоритмів, програм розрахунків та візуалізації результатів на екрані монітора ПЕОМ) для розв'язання комплексу задач геометричного моделювання елементів проточних частин ВК.

На захист вносяться основні положення, які складають наукову новизну та практичну цінність роботи.

Впровадження результатів роботи здійснено за планом виконання держбюджетних науково-дослідних тем. Результати роботи передано організаціям НПО "Машпроект" та ЦНДІП "Тайфун" (м.Миколаїв). Вони використовуються при проектуванні перспективних та удосконаленні існуючих зразків ВК різного цільового призначення.

Апробація роботи. Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідались та були схвалені на науково-технічній конференції професорсько-викладацького складу УДМТУ (м.Миколаїв,1994), на науковому семінарі у КДТУБА (м.Київ,1994), на науково-технічній нараді у ЦНДІП "Тайфун" (м.Миколаїв,1994), на міжнародній науково-методичній конференції "Геометричне моделювання. Інженерна та комп'ютерна графіка" (м.Львів,1994).

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається із вступу, 3-х глав, висновка, списку використаної літератури із 128 найменувань. Робота містить 115 сторінок машинописного тексту, 37 рисунків, 14 таблиць.

Основні положення дисертаційної роботи висвітлені в шістьох статтях і одних тезах доповідей.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У першій главі розглянуто питання геометричного моделювання робочих коліс ВК, проточна частина яких обмежується меридіональними обводами втулки та периферії. Лопатки РК формуються лінійчатими твірними, які переміщуються по випуклій та вигнутій частинах профілю, побудованого на розгорнутій циліндричній поверхні зовнішнього радіуса колеса та двох прямих, які паралельні осі колеса. Ці прямі проходять через точки  $\Pi_1$  та  $\Pi_2$ , які називаються центрами фрезерування (рис.1). Розроблений метод моделювання лопатки дозволяє розраховувати координати поверхонь, які обмежують її, в будь-якому перерізі колеса.

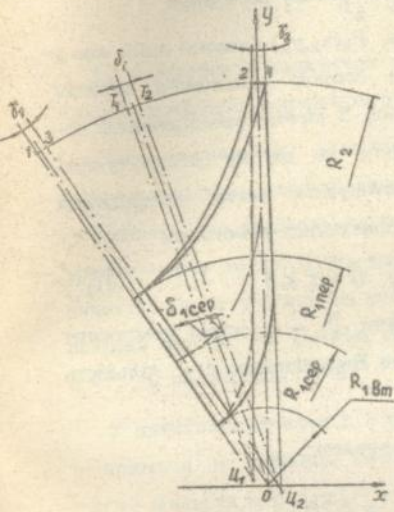


Рис. 1.

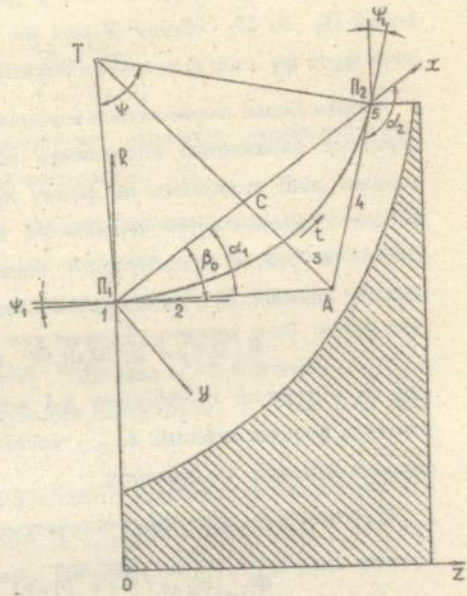


Рис. 2.

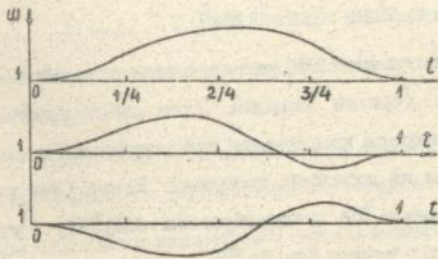


Рис. 3.

Меридіональні межі колеса описуються кривими Безьє, які будуються в системі координат  $x, y$  (рис.2), що проходить через крайні точки  $\Pi_1$  та  $\Pi_2$  обводу. У цих же точках задаються конструктивні кути  $\psi_1$  та  $\psi_2$ , що дозволяють знайти кути нахилу дотичних.

Крива Безьє визначається вершинами  $P_k(x_k, y_k)$  ламаної лінії, яка у першому наближенні апроксимує обвід. Зміною положення вершин ламаної лінії впливають на форму кривої. З метою забезпечення додаткових можливостей локального впливу на форму результуючої кривої в роботі пропонується використовувати вагові коефіцієнти вершин ламаної. При цьому крива Безьє описується різницям

$$B(\bar{P}, t) = \sum_{k=0}^n \omega_k \bar{P}_k \Phi_{k,n}(t), \quad 0 \leq t \leq 1 \quad (1)$$

де  $\omega_k$  - ваговий коефіцієнт  $k$ -ї вершини;  $\bar{P}_k$  - функція компонент векторів вершин ламаної;  $\Phi_{k,n}$  - многочлен Бернштейна;  $n$  - кількість вершин ламаної;  $t$  - параметр.

Многочлен Бернштейна визначається виразом:

$$\Phi_{k,n}(t) = \binom{n}{k} t^k (1-t)^{n-k}, \quad k \in [0, n].$$

Плоска крива описується параметричними співвідношеннями:

$$x(t) = \sum_{k=0}^n \omega_k x_k \Phi_{k,n}(t); \quad y(t) = \sum_{k=0}^n \omega_k y_k \Phi_{k,n}(t),$$

де  $x_k, y_k$  - координати вершин ламаної лінії.

Набутий досвід проектування РК дозволяє досить надійно прогнозувати положення п'яти вершин ламаної. Крім двох крайніх точок, порівняно легко визначаються координати двох суміжних з ними точок 2 та 4. Вони знаходяться на дотичних до кривої Безьє. Середня точка 3 розміщується на діагоналі ТА чотирикутника  $\Delta\Pi_1\Pi_2$ , утвореного дотичними та нормальними у точках  $\Pi_1$  та  $\Pi_2$ .

Для довільних точок ламаної лінії з номерами 2, 3 та 4 введемо коефіцієнти  $m_2, m_3$  та  $m_4$ :

$$m_2 = \frac{R_2 - R_{n_4}}{R_A - R_{n_4}} = \frac{Z_2 - Z_{n_4}}{Z_A - Z_{n_4}}; \quad m_3 = \frac{R_3 - R_c}{R_A - R_c} = \frac{Z_3 - Z_c}{Z_A - Z_c};$$

$$m_4 = \frac{R_4 - R_{n_2}}{R_A - R_{n_2}} = \frac{Z_4 - Z_{n_2}}{Z_A - Z_{n_2}}.$$

Ці коефіцієнти задаються з вихідними даними і варіюються при пошуку потрібної форми проточної частини РК.

Після визначення положення вершин ламаної лінії призначають значення вагових коефіцієнтів  $\omega$ , які описують деяку функціональну залежність, що задовольняє таким умовам. При  $t=0$  крива повинна пройти через точку  $\Pi_1$  та мати кут нахилу дотичної лінії, який визначається конструктивним кутом  $\psi_1$ . Тоді при  $t_1=0$  значення  $\omega_1=1$ , а похідна  $d\omega/dt=0$ . Подібні міркування стосуються і точки 5, в якій  $t_5=1$ ;  $\omega_5=1$  та  $d\omega/dt=0$ .

У проміжних точках 2, 3 та 4 функція  $\omega$  приймає значення, які відрізняються від одиниці, тобто при  $t_2=1/4$  коефіцієнт  $\omega=\omega_2$ ; при  $t_3=2/4$  -  $\omega=\omega_3$  та при  $t_4=3/4$  -  $\omega=\omega_4$ . Можливі варіанти графіків функції  $\omega=\omega(t)$  показано на рис.3. Значення коефіцієнтів  $\omega_2$ ,  $\omega_3$  та  $\omega_4$  задаються з вихідними даними та коректуються у процесі опрацювання проточної частини РК.

Інформації відносно функціональної залежності досить, щоб одержати її у вигляді поліному 6-го степеня:

$$\omega = At^6 + Bt^5 + Ct^4 + Dt^3 + Et^2 + Ft + G.$$

Для визначення невідомих коефіцієнтів полінома розв'язується система лінійних рівнянь.

Аналіз якості здобутих результатів гривої здійснюється за допомогою ешор першої та другої похідних, радіуса кривини кривої.

Перша похідна по параметру  $t$  від (1) визначається виразом:

$$\frac{d\omega}{dt} = n \left[ \sum_{k=0}^{n-1} \bar{p}_{k+1} \Phi_{k,n-1}(t) - \sum_{k=0}^{n-1} \bar{p}_k \Phi_{k,n-1}(t) \right] \omega(t) + \omega'(t) \sum_{k=0}^n \bar{p}_k \Phi_{k,n}(t).$$

Друга похідна:

$$\frac{d^2 B}{dt^2} = n(n-1) \left[ \sum_{k=0}^{n-2} \bar{p}_{k+2} \phi_{k,n-2}(t) - 2 \sum_{k=0}^{n-2} \bar{p}_{k+1} \phi_{k,n-1}(t) + \sum_{k=0}^{n-2} \bar{p}_k \phi_{k,n-2}(t) \right] \omega(t) + \\ + 2n\omega'(t) \left[ \sum_{k=0}^{n-1} \bar{p}_{k+1} \phi_{k,n-1}(t) - \sum_{k=0}^{n-1} \bar{p}_k \phi_{k,n-1}(t) \right] + \omega''(t) \sum_{k=0}^n \bar{p}_k \phi_{k,n}(t).$$

Підстановкою координат  $x_k, y_k$  ламаної замість  $\bar{P}_k$  одержують вирази для похідних  $dx/dt, dy/dt; d^2x/dt^2, d^2y/dt^2$ , а також виявляють першу та другу похідні кривих, та обчислюють її радіус кривини.

Геометрія лопатки визначається профілем її скелетної лінії на розгортці циліндричної поверхні зовнішнього радіуса колеса (рис.4). Профіль цієї лінії складається з двох сегментів раціональної кубічної кривої, яка описується рівнянням

$$R(\bar{p}, t) = \frac{\sum_{k=0}^3 \omega_k \bar{p}_k \phi_{k,3}(t)}{\sum_{k=0}^3 \omega_k \phi_{k,3}(t)}, \quad 0 \leq t \leq 1. \quad (2)$$

де  $\omega_k$  - індивідуальні ваги вершин триланковика;  $\bar{P}_k$  - функція компонент векторів вершин;  $\phi_{k,3}$  - многочлен Бернштейна.

З'єднання сегментів кривої здійснюється на колі горла кавала, що автоматично забезпечує його величину та кут відгину профілю.

Координати проміжних вершин триланковиків сегментів визначаються за допомогою коефіцієнтів  $m_j^{(i)}$  ( $j=1,2; i=2,3$ ), які впроваджуються з вихідними даними.

Аналіз якості зпроектованої кривої здійснюється за допомогою епюр розподілу похідних та кривини лінії. Перша похідна визначається виразом:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{\sum_{k=0}^3 \omega_k \phi_{k,3}(t) \left[ \sum_{k=0}^2 \omega_{k+1} y_{k+1} \phi_{k,2}(t) - \sum_{k=0}^2 \omega_k y_k \phi_{k,2}(t) \right]}{\sum_{k=0}^3 \omega_k \phi_{k,3}(t) \left[ \sum_{k=0}^2 \omega_{k+1} x_{k+1} \phi_{k,2}(t) - \sum_{k=0}^2 \omega_k x_k \phi_{k,2}(t) \right]} - \\ - \frac{\sum_{k=0}^3 \omega_k y_k \phi_{k,3}(t) \left[ \sum_{k=0}^2 \omega_{k+1} \phi_{k,2}(t) - \sum_{k=0}^2 \omega_k \phi_{k,2}(t) \right]}{\sum_{k=0}^3 \omega_k x_k \phi_{k,3}(t) \left[ \sum_{k=0}^2 \omega_{k+1} \phi_{k,2}(t) - \sum_{k=0}^2 \omega_k \phi_{k,2}(t) \right]}$$



Другі похідні по параметру  $t$  від виразу (2) окремо для чисельника та знаменника мають вигляд:

для чисельника

$$\left(\frac{d^2R}{dt^2}\right)_{\text{числ.}} = 6 \left[ \sum_{k=0}^4 \omega_{k+2} \bar{p}_{k+2} \Phi_{k,1}(t) - 2 \sum_{k=0}^4 \omega_{k+1} \bar{p}_{k+1} \Phi_{k,1}(t) + \sum_{k=0}^4 \omega_k \bar{p}_k \Phi_{k,1}(t) \right],$$

для знаменника

$$\left(\frac{d^2R}{dt^2}\right)_{\text{знам.}} = 6 \left[ \sum_{k=0}^4 \omega_{k+2} \Phi_{k,1}(t) - 2 \sum_{k=0}^4 \omega_{k+1} \Phi_{k,1}(t) + \sum_{k=0}^4 \omega_k \Phi_{k,1}(t) \right].$$

Після обчислення похідних визначається радіус кривини кривої. Кривина у точці з'єднання сегментів приймається рівною середньо-геометричним значенням кривини лівої та правої ланки.

Для одержання реального тілесного профілю лопатки задаються товщинами вхідної і вихідної кромки, а також законом зміни товщини профілю уздовж його середньої лінії, яка використовується як геометричне місце центрів кіл, радіус яких дорівнює половині товщини лопатки.

Оцінка якості спрофільованого РК здійснюється аналізом положення ліній току, еквіпотенціалей та квазіортогоналей. Наочне уявлення про форму міжлопаточного каналу дає зображення на екрані монітора ПЕОМ, яке одержується зміщенням сукупності плоских перерізів, перпендикулярних осі компресора.

Для контролю якості отриманого РК розроблені алгоритми розрахунків координат плоских перерізів лопаток, які виконуються при фіксованих значеннях радіальних та осьових координат.

Порівняння результатів моделювання меридіональних обводів РК, створеного на машинобудівному підприємстві, із спрофільованим за розробленим методом свідчать про задовільне їх узгодження.

У другій главі розглянуто питання геометричного моделювання профілів лопаток вхідних напрямних апаратів (ВНА), одержаних згином

симетричного профілю відносно середньої лінії, яка забезпечує задані значення кутів входу  $\alpha_0$  та виходу  $\alpha_1$  потоку, а також стрілки прогину  $f$ , яка віддалена від вхідної кромки на відстань  $x_f$ .

Для середньої лінії профілю лопатки ВНА розроблено метод її моделювання з застосуванням параметричної кубічної кривої з двома степенями свободи:

$$\begin{cases} x(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3; \\ y(t) = b_0 + b_1 t + b_2 t^2 + b_3 t^3. \end{cases} \quad 0 \leq t \leq 1 \quad (3)$$

Коефіцієнти  $a_i, b_i$  ( $i=1,3$ ) системи (3) визначаються з припущенням, що похідні в крайніх точках кривої (рис.5) пропорційні одиничним дотичним векторам:

$$\left(\frac{d\vec{y}}{dx}\right) = \alpha \vec{V}_0 \quad \text{на} \quad \left(\frac{d\vec{y}}{dx}\right) = \beta \vec{V}_1.$$

де  $\alpha$  та  $\beta$  - параметри, які відшукуються в процесі розв'язування конкретної задачі конструювання кривої.

Скориставшись граничними умовами, після перетворення рівнянь маємо:

$$\begin{aligned} x(t) &= x_0 + \alpha(x_m - x_0)t + [3(x_1 - x_0) - 2\alpha(x_m - x_0) - \beta(x_1 - x_m)]t^2 + \\ &\quad + [x_m(\alpha - \beta) + x_1(\beta - 2) - x_0(\alpha - 2)]t^3, \\ y(t) &= y_0 + \alpha(y_m - y_0)t + [3(y_1 - y_0) - 2\alpha(y_m - y_0) - \beta(y_1 - y_m)]t^2 + \\ &\quad + [y_m(\alpha - \beta) + y_1(\beta - 2) - y_0(\alpha - 2)]t^3. \end{aligned}$$

Змінюючи значення параметрів  $\alpha$  та  $\beta$ , можна здобути бажану форму кривої, зокрема, провести її через точку А під кутом нахилу дотичної  $\gamma_A$ . Тангенс кута нахилу дотичної визначається за виразом:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\alpha(y_m - y_0) + 2[3(y_1 - y_0) - 2\alpha(y_m - y_0) - \beta(y_1 - y_m)]t + 3[y_m(\alpha - \beta) - y_1(\beta - 2) - y_0(\alpha - 2)]t^2}{\alpha(x_m - x_0) + 2[3(x_1 - x_0) - 2\alpha(x_m - x_0) - \beta(x_1 - x_m)]t + 3[x_m(\alpha - \beta) - x_1(\beta - 2) - x_0(\alpha - 2)]t^2}.$$

Позначивши через  $t_A$  значення параметру  $t$ , яке задовольняє декартовим координатам  $x_A, y_A$  точки  $A$ , і підставивши його в записані вирази, одержимо систему трьох рівнянь. Ліві частини цих рівнянь дорівнюють відповідно координатам  $x_A, y_A$  та тангенсу кута  $\gamma_A$ . Система рівнянь розв'язується ітераційним шляхом відносно невідомих  $t_A$  та параметрів  $\alpha$  і  $\beta$ .

Остаточні вирази для обчислення параметрів  $\alpha$  та  $\beta$  мають вигляд:

$$\alpha = \frac{[x_A - x_o + (x_i - x_o)t_A^2(2t_A - 3)](y_i - y_m) - [y_A - y_o + (y_i - y_o)t_A^2(2t_A - 3)](x_i - x_m)}{t_A(1 - t_A)^2[(x_m - x_o)(y_i - y_m) - (y_m - y_o)(x_i - x_m)]},$$

$$\beta = \frac{[x_A - x_o + (x_i - x_o)t_A^2(2t_A - 3)](y_m - y_o) - [y_A - y_o + (y_i - y_o)t_A^2(2t_A - 3)](x_m - x_o)}{t_A(1 - t_A)^2[(x_m - x_o)(y_i - y_m) - (y_m - y_o)(x_i - x_m)]}.$$

Параметри  $\alpha$  та  $\beta$  залежать від конкретних умов проектування лопаточного апарата і, в першу чергу, від геометричних кутів входу  $\alpha_0$  та виходу  $\alpha_1$  потоку, величини  $x_f$  розміщення максимуму кривої, а також стрільки прогину  $f$ .

Таким чином, параметри  $\alpha$  і  $\beta$  параметричної кубічної кривої з двома степенями свободи знаходяться в деякій функціональній залежності від чотирьох змінних величин. Ця залежність в багатовимірному просторі змінних описує гіперповерхню, рівняння якої в загальному вигляді невідоме. Тому при дослідженні ця поверхня замінюється новою, рівняння якої являє собою розклад шуканої функції в степенний ряд

$$\alpha = b_0 + \sum_{i=1}^4 b_i x_i + \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 b_{ij} x_i x_j \dots$$

Розв'язанню задачі по знаходженню коефіцієнтів  $b_i, b_{ij}$  рівнянь, які описують гіперповерхні параметрів  $\alpha$  та  $\beta$ , найбільш повно відповідають методи теорії планування: експерименту, які вперше застосовані в даній роботі для вивчення геометричних об'єктів. Коефіцієнти регресії

визначаються з використанням трирівневих планів Бокса-Бенкена, які припускають варіювання незалежних змінних на трьох рівнях -1; 0; +1.

Для побудови поліноміальних моделей  $\alpha$  і  $\beta$  були взяті конкретні числові значення чотирьох геометричних параметрів  $\alpha_0, \alpha_1, \bar{x}_1, \bar{f}$ . Ці моделі мають вигляд:

$$\begin{aligned} \alpha = & 2,430 + 0,654 \bar{\alpha}_0 - 0,452 \bar{\alpha}_1 - 0,734 \bar{x}_1 - 0,074 \bar{f} - 0,023 \bar{\alpha}_0^2 + \\ & + 0,442 \bar{\alpha}_1^2 - 0,065 \bar{x}_1^2 - 0,0004 \bar{f}^2 - 0,0008 \bar{\alpha}_0 \bar{\alpha}_1 + 0,482 \bar{\alpha}_0 \bar{x}_1 - \\ & - 0,027 \bar{\alpha}_0 \bar{f} - 0,438 \bar{\alpha}_1 \bar{x}_1 + 0,050 \bar{\alpha}_1 \bar{f} + 0,057 \bar{x}_1 \bar{f}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \beta = & 3,279 - 0,262 \bar{\alpha}_0 + 1,410 \bar{\alpha}_1 + 0,619 \bar{x}_1 + 0,095 \bar{f} + 0,028 \bar{\alpha}_0^2 - \\ & - 0,030 \bar{\alpha}_1^2 - 0,026 \bar{x}_1^2 + 0,0017 \bar{f}^2 + 0,0865 \bar{\alpha}_0 \bar{\alpha}_1 - 0,057 \bar{\alpha}_0 \bar{x}_1 + \\ & + 0,026 \bar{\alpha}_0 \bar{f} - 0,286 \bar{\alpha}_1 \bar{x}_1 - 0,029 \bar{\alpha}_1 \bar{f} - 0,043 \bar{x}_1 \bar{f}. \end{aligned}$$

Середньозважені похибки апроксимації параметрів  $\alpha$  і  $\beta$  поліноміальними моделями складають відповідно 1,24 та 1,45 відсотки.

Симетричний профіль лопатки ВНА пропонується будувати з використанням конкоїди Нікомеда. Профіль будується в системі координат  $x, y$  (рис.6), центр якої сполучають з центром симетрії конкоїди, що описується рівнянням:

$$(\bar{x}^2 - \bar{y}^2)(\bar{y} - a)^2 = l^2 \bar{y}^2,$$

де  $a$  та  $l$  - параметри кривої, які належить визначити.

У зв'язку з тим, що підібрати єдину конкоїду, яка проходить через точки А, В та С з заданими дотичними, неможливо, то на відрізках АВ і ВС будуються конкоїди зі своїми значеннями параметрів  $a$  і  $l$ . Обидві конкоїди підбираються з умов стикування в точці В.

Записавши рівняння конкоїди для відрізків АВ і ВС та розв'язавши одержані вирази відносно невідомих параметрів  $a$  та  $l$ , маємо:

$$\alpha_{AB} = \bar{r}_1 \cos \bar{\gamma}_1 \left[ 1 + \frac{(\bar{r}_1 \cos \bar{\gamma}_1 - \bar{c}_{max} / 2)(\bar{r}_1 \cos \bar{\gamma}_1 + \sqrt{\bar{x}_A^2 + \bar{r}_1^2 \cos^2 \bar{\gamma}_1})}{\bar{x}_A^2} \right],$$

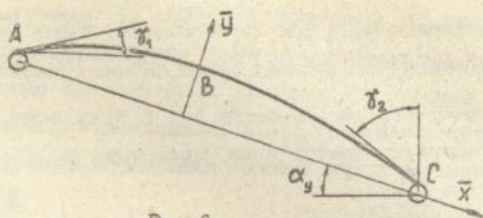


Рис. 6.

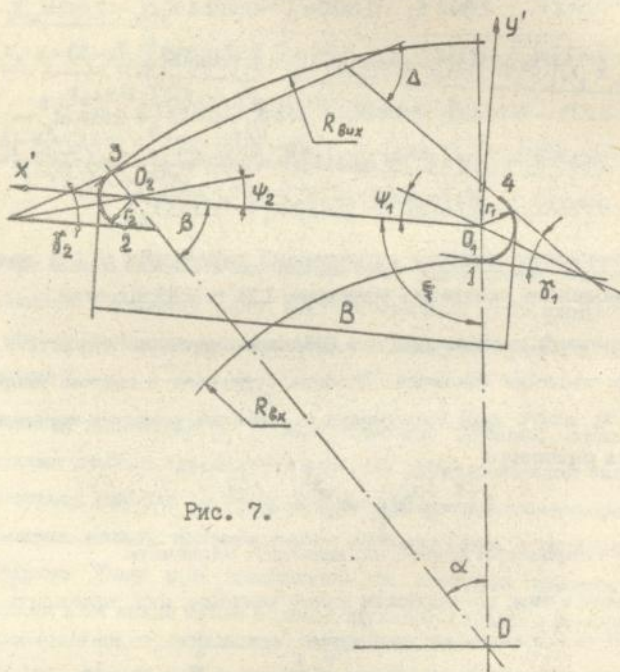


Рис. 7.

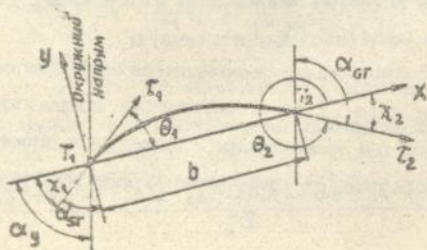


Рис. 8.

$$a_{Bc} = \bar{r}_2 \cos \delta_2 \left[ 1 + \frac{(\bar{r}_2 \cos \delta_2 - \bar{c}_{max}/2)(\bar{r}_2 \cos \delta_2 - \sqrt{\bar{x}_c^2 - \bar{r}_2^2 \cos^2 \delta_2})}{\bar{x}_c^2} \right];$$

$$l_{AB} = \bar{c}_{max}/2 - a_{AB}; \quad l_{Bc} = \bar{c}_{max}/2 - a_{Bc}.$$

В цих виразах кути  $\gamma_1$  і  $\gamma_2$  спочатку приймаються рівними нулю, а потім уточнюються в ітераційному процесі висначення параметрів  $a_{AB}$ ,  $l_{AB}$ ,  $a_{Bc}$  та  $l_{Bc}$  за формулами:

$$\delta_1 = \arctg \left[ \frac{\bar{x}_A (\bar{y}_A - a_{AB})^2}{l_{AB}^2 \bar{y}_A - (\bar{y}_A - a_{AB})(\bar{x}_A^2 + 2\bar{y}_A^2 - a_{AB} \bar{y}_A)} \right];$$

$$\delta_2 = \pi - \arctg \left[ \frac{\bar{x}_c (\bar{y}_c - a_{Bc})^2}{l_{Bc}^2 \bar{y}_c - (\bar{y}_c - a_{Bc})(\bar{x}_c^2 + 2\bar{y}_c^2 - a_{Bc} \bar{y}_c)} \right].$$

Після визначення параметрів конкоїд розраховують координати кривих, які описують контур профілю.

Для отримання реального тілесного профілю, симетричного аеродинамічний профіль, утворений конкоїдами Нікомеда, розтадіається задовж середньої лінії. Товщини аеродинамічного профілю відкладаються задовж перпендикулярів до цієї лінії.

У третій главі розглянуто питання геометричного моделювання меридіональних обводів вхідної та перехідної систем ВК, лопаток дифузорів, зворотного напрямного апарата, стояків, що дозволяє завершити комплексне моделювання елементів проточних частин ВК.

Профільовання меридіональних обводів вхідної системи здійснюється на основі модифікованого методу Безьє. Передбачено моделювання патрубків осевого та радіально-осевого типів.

Перехідна система включає в себе лопаточний дифузор, поворотне коліно, зворотний напрямний апарат. Лопаточний дифузор являє собою кругову решітку, лопатки якої моделюються з застосуванням кубічних сплайнів. Вихідними даними для профільовання є радіуси циліндричних

поверхонь, які торкаються вхідних  $R_{вх}$  та вихідних  $R_{вих}$  кромek лопаток, радіуси  $r_1$  та  $r_2$  їх скруглення, хорда профілю  $B$ , кути загострення вхідної  $\gamma_1$  та вихідної  $\gamma_2$  кромek (рис.7). Задача зводиться до визначення граничних умов для побудови сплайнів, які описують випуклу та ввігнуту частини профілю.

Для побудови середньої лінії лопатки зворотного напрямного апарата використовується дволанкова крива, яка складається з двох дуг кола. Граничні умови для її побудови показано на рис.8. Цих даних достатньо для визначення п'яти умов. Шоста замикаюча умова вибирається з міркувань забезпечення необхідного ступеню стиковки дуг кіл при відношенні їх радіусів, яке прямує до одиниці.

Обводи профілів стояка пропонується описувати дугами кіл одного або двох радіусів при умові забезпечення заданих кутів загострень вхідної та вихідної кромek, а також розміщення максимальної товщини профілю на певній відстані від вхідної кромки. З метою надання проєктанту можливості одержання профілів стояків, кривина обводів яких змінюється неперервно, розроблено спосіб їх геометричного моделювання з застосуванням полінома п'ятого степеня

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_5x^5.$$

Задача розв'язується при умовах завдання кутів загострення вхідної  $\gamma_1$  та вихідної  $\gamma_2$  кромek. При необхідності ці кути можна уточнити в ітераційному процесі конструювання обвода.

Потрібний розподіл кривини обводу досягається тоді, коли при уточненні кутів  $\gamma_1$  та  $\gamma_2$  виходити із забезпечення таких умов:

$$\int_0^s k^2 ds \rightarrow \min \quad \text{та} \quad \frac{d^2 \rho}{dx^2} \leq 0,$$

де  $k = \frac{y''}{(1+y')^{3/2}}$ ,  $\rho = \frac{1}{k}$ ;  $s$  - довжина дуги кривої.

Реалізація цих умов приводить до найбільшого значення мінімального радіуса кривини лінії та забезпечує відсутність перегинів на графіку розподілу радіуса кривини по профілю. При практичних розрахунках інтервал по осі  $x$  розбивається на  $N$  частин та замість інтеграла

$$\int_0^s k^2 ds \quad \text{обчислюється сума} \quad \Omega = \sum_{i=1}^N k^2 \sqrt{1+y_i'^2} \quad (4)$$

Одночасно перевіряється умова  $\frac{d^2\Omega}{dx^2} \leq 0$  по знаку других різниць, які підраховуються при визначенні радіуса кривини в точках, які використовувались при утворенні суми (4). Мінімізація інтеграла здійснюється методом координатного спуску. Облік зміни знака других різниць реалізовано за допомогою метода штрафних функцій.

## ВИСНОВОК

Дисертаційна робота присвячена розробці геометричних методів аеродинамічного удосконалення елементів проточних частин відцентрових компресорів. У зв'язку з цим були одержані такі результати:

1. Розроблено геометричний метод моделювання робочого колеса ВК, який дозволяє управляти формою меридіонального перерізу та профілів лопаток, визначати геометричні характеристики лопатки робочого колеса в будь-якому перерізі. Метод дає можливість створювати високо-ефективні проточні частини в широкому діапазоні значень геометричних та режимних параметрів компресорних машин відцентрового типу.

2. Інтерпретовано метод Безьє введенням вагових функцій вершин ламаної, що дозволяє збільшувати локальні впливи на форму результуючої кривої. Функція  $\omega$  виявляє унімодальний вплив на форму кривої. З метою розширення можливості впливу на інтегральні та диференціальні характеристики обводів, що проєктуються, розроблено метод їх профілювання на основі кривих Безьє.

3. Одержано рівняння параметричної кубічної кривої з двома степенями свободи, які визначаються за результатом розв'язання ітераційної задачі забезпечення кутів входу та виходу потоку, даної стрілки прогину профілю. Досліджено вплив степенів свободи на форму результуючої кривої. Розроблено метод побудови каркасної лінії профілів лопаток з використанням параметричних кубічних кривих з двома степенями свободи.

4. Вперше застосовано методи теорії планування експерименту для аналізу геометричних об'єктів. Вивчено вплив параметрів каркасної лінії профілів лопаток вхідного напрямного апарату на степені свободи параметричної кубічної кривої.

5. Розроблено методи геометричного моделювання нерухомих елементів проточної частини ВК (стояків, лопаток вхідного напрямного апарату, дифузорів, зворотного напрямного апарату) з застосуванням конхоїди Нікомеда, степеневих поліномів, кубічних сплайнів.

6. Методи геометричного моделювання елементів проточної частини ВК реалізовано програмами розрахунку та візуалізації одержаних даних на екрані монітора персональної ЕОМ.

7. Порівняння результатів геометричного моделювання окремих елементів проточної частини ВК з відомими даними свідчить про задовільне їх погодження. Розроблені автором методи дозволяють одержати аеродинамічно більш гладку криву, досліджувати її інтегральні та диференціальні характеристики. Методи дають можливість оптимізувати процес моделювання за допомогою швидкого та якісного автоматизованого дослідження багатокількісних варіантів, що дозволяє рекомендувати розроблені методи, алгоритми та програми у практику проектування та створення компресорів розглянутого типу.

8. Впровадження результатів досліджень, яке здійснюється в плані виконання договорів творчого співробітництва з ЦНДіП "Тайфун" (м. Миколаїв), підтвердило практичну цінність розробок автора.

Основні положення дисертації опубліковано в наступних роботах:

1. Борисенко В.Д., Бидниченко Е.Г. Параметрические кубические кривые с двумя степенями свободы// Динамика, прочность и надежность судовых машин: Сб. науч. тр. - Николаев: НКМ, 1994. -С.100-106.

2. Борисенко В.Д., Бидниченко Е.Г. Применение теории планирования эксперимента к решению задач геометрического моделирования элементов проточных частей турбомашин// Судовые энергетические установки: Сб. науч. тр. - Николаев: НКМ, 1994.

3. Борисенко В.Д., Бидниченко Е.Г. Профилирование лопаток рабочих колес центробежных компрессоров// Динамика, прочность и надежность судовых машин: Сб. науч. тр. - Николаев: НКМ, 1994. - С.84-91.

4. Борисенко В.Д., Бидниченко Е.Г. Профилирование меридиональных обводов рабочих колес центробежных компрессоров с применением кривых Безье// Динамика, прочность и надежность судовых машин: Сб. науч. тр.- Николаев: НКМ, 1994. - С.92-99.

5. Борисенко В.Д., Бидниченко Е.Г. Профилирование стоек входных устройств центробежных компрессоров// Судовые энергетические установки: Сб. науч. тр.- Николаев: НКМ, 1994.

6. Борисенко В.Д., Бидниченко Е.Г., Калинина И.А. Геометрическое моделирование турбомашин// Тези міжнародної науково-методичної конференції "Геометричне моделювання. Інженерна та комп'ютерна графіка"- Львів. 1994.- С.49 -50.

7. Борисенко В.Д., Бидниченко Е.Г., Калинина И.А. Профилирование отгибаемой части лопатки рабочего колеса осерадиальной турбомашины//Прикладная геометрия и инженерная графика: Республ. межведомств. научно-технич. сб.- Киев: Будівельник, 1994.- Вып.57.- С.70-72.

Видишченко Елена Галиковна. Геометрическое моделирование элементов проточных частей центробежных компрессоров. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.01.01 - "Прикладная геометрия, компьютерная графика, дизайн и эргономика". Киевский государственный технический университет строительства и архитектуры. Киев, 1995.

Диссертационная работа посвящена разработке теоретических и прикладных вопросов геометрического моделирования подвижных и неподвижных элементов проточных частей центробежных компрессоров. Пространственные формы лопаток моделируются с применением модифицированного метода Безье, рациональных кубических кривых с двумя степенями свободы, кубических сплайнов, конхоиды Никомеда, полиномов различных степеней. Все разработанные методы предоставляют проектанту широкие возможности локального воздействия на форму кривых, описывающих меридиональное сечение проточной части и обводы профилей. В сочетании с визуализацией полученных результатов это позволяет существенно ускорить процесс отработки высокоэффективных проточных частей компрессоров центробежного типа.

Ключевые слова: компрессор центробежный, геометрическое моделирование, управление формой кривой.

Bidmichenko O.G. Geometrical simulation of the elements of duct components of centrifugal compressors. The thesis for the scientific degree of Candidate of Technical Sciences in speciality 05.01.01 - Applied geometry, computer graphics, design and ergonomics. Kiev State Technical University of Building and Architecture. Kiev, 1995.

The thesis is dedicated to the development of theoretical and applied problems of geometrical simulation of the duct components of rotor and stator of centrifugal compressors. The surfaces of blades are modelled with the help of various curves: modified Bezier curve, cubic curves with two degrees of freedom, cubic splines, Nicomedian conchoid, polinomials of different degrees. All the methods developed enable to influence locally on the form of the blades. In combination with a visualization program it makes it possible to considerably accelerate the process of the optimized design of duct components of centrifugal compressors.

*Видишченко*

Підп. до друку . Формат 60×84  $\frac{1}{16}$   
Умовн. друк.арк. , роталіт УДМУ  
Тираж 100 . Зам. № 230

---

Миколаїв, Проспект Героїв Сталінграда, 9.

456574

AB 32.894