

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ УКРАЇНИ  
КИЇВСЬКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО ЧЕРВОНОГО ПРАПЮРА  
ИНЖЕНЕРНО - БУДІВЕЛЬНИЙ ІНСТИТУТ

На правах рукопису

Брустінов Володимир Михайлович

УДК 515.2

ГЕОМЕТРИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ  
ЛІНІЙНИХ ОБВОДІВ КУЗОВНИХ  
ПОВЕРХОНЬ МЕТОДОМ ДИСКРЕТНОЇ  
ІНТЕРПОЛЯЦІЇ

Спеціальність 05.01.01 -  
Прикладна геометрія  
та інженерна графіка

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Київ - 1993

ЛНБ України ім.В.Стефаника



00802727 (Q)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ УКРАЇНИ  
КИЇВСЬКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО ЧЕРВОНОГО ПРАПОРА  
ИНЖЕНЕРНО - БУДІВЕЛЬНИЙ ІНСТИТУТ

На правах рукопису

Брустінов Володимир Михайлович

УДК 515.2

ГЕОМЕТРИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ  
ЛІНІЙНИХ ОБВОДІВ КУЗОВНИХ  
ПОВЕРХОНЬ МЕТОДОМ ДИСКРЕТНОЇ  
ІНТЕРПОЛЯЦІЇ

Спеціальність 05.01.01 -  
Прикладна геометрія  
та інженерна графіка

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Київ - 1993

46 28.097

Робота виконана в Мелітопольському ордену Трудового Червоного  
Прапора інституті механізації сільського господарства.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор Найдиш В. М.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор Бадаєв Ю. І.;  
кандидат технічних наук, професор Сідлецька Н. І.

Ведуча організація : Виробниче об'єднання  
"Південний машинобудівний завод".

Захист відбудеться 20 жовтня 1993р. о 13 годині на  
засіданні спеціалізованої ради Д 068.05.03 в Київському ордену  
Трудового Червоного Прапора інженерно-будівельному інституті за  
адресою: 252037, Київ-37, Повітрофлотський проспект, 31, ауди-  
торія \_\_\_\_ .

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Київського  
ордену Трудового Червоного Прапора інженерно - будівельного  
інституту.

Автореферат розіслано 16 вересня 1993р.

Вчений секретар спеціалізованої

ради кандидат технічних наук, доцент

Плюський В. О.



ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ.

Актуальність. Основою сучасних методів проектування лицювальних поверхонь кузовів легкових автомобілів є процес "оптимізації форми", коли за основу приймається прототип, що має низький коефіцієнт аеродинамічного опору (КАО). Геометричні форми прототипа в подальшому піддаються корекції з метою виконання вимог щодо компоновки, дизайну, аеродинаміки розміщення пасажирів, тощо. Забезпечення цього процесу потребує від апарату геометричного моделювання лінійних обводів і кузовної поверхні в цілому значної гнучкості, широких дозволяючих спроможностей як за вхідними даними (потужності масивів вхідних даних та їх різноманітність і т.ін.), так і за методами їх обробки, розв'язування прикладних задач та видачі результатів моделювання. Існуючі класичні методи поліноміальної та сплайн-інтерполяції і апроксимації не здатні в повному об'ємі задовольнити практичні вимоги проектування, тому що із зростанням числа точок і параметрів неминуcho проявляється осциляція, так що результати з точки зору їх практичного використання стають незадовільними.

У зв'язку з паливно-енергетичною кризою особливо актуальними стають методи геометричного моделювання, що гарантують відсутність осциляції поверхні, а також графіків кривини її поздовжніх лінійних обводів, що є необхідною умовою зниження КАО і підвищення економічності і швидкості руху автомобіля за рахунок зниження інтенсивності вихротоутворення і кращого обтікання автомобіля повітрям. На жаль існуючі методи формотворення та створені на їх основі системи автоматизованого проектування не здатні забезпечити бажаний характер зміни кривини обводів та гарантувати відсутність осциляції поверхні, особливо при проектуванні стиковочних та перехідних ділянок поверхонь.

Все це потребує розробки нових методів геометричного моделювання, що мають достатню швидкодю, простоту, високу точність, гарантують відсутність осциляції. В найбільш повній мірі цим вимогам відповідає дискретне геометричне моделювання, для якого властиві локальність розрахунків, висока швидкодія, відсутність осциляції, незалежність від числа точок. Але в його арсеналі поки відсутні методи, що дозволяють описувати лінійні обводи з заданим законом зміни кривини.

Мета роботи полягає в розробці, програмній реалізації та впровадженні в практику проектування методу дискретного геомет-

ричного моделювання лінійних обводів кузовних поверхонь за заданим законом зміни їх кривини.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішуються наступні задачі:

- розробка способу підготовки вихідних даних для дискретної інтерполяції неосцилюючого дискретного лінійного обвода, представленого координатами вузлів на рівномірній та нерівномірній сітці, а також при параметричному представленні;
- розробка способу згущення неосцилюючого точкового каркаса дискретного лінійного обвода при умові задання його вузлів, вузлів з дотичними і кривинами в них на різноманітних сітках;
- розробка алгоритмічного і програмного забезпечення запропонованого метода;
- практичне впровадження результатів дослідження.

Методика досліджень. В процесі вирішення поставлених в роботі задач використовувались методи нарисної, аналітичної і диференціальної геометрії; теорії інтерполяції та обчислювальних методів.

Теоретичною базою для проведення досліджень послужили роботи провідних вчених:

в галузі геометричного моделювання поверхонь технічних форм: Бадаєва Ю.І., Іванова Г.С., Ковальова С.М., Котова І.І., Михайленка В.Е., Надолінного В.О., Найдиша В.М., Павлова А.В., Обухової В.С., Підгорного О.Л., Полозова В.С., Рижова М.М., Скидана І.А. та їх учнів, а також П. Безьє, І. Гардана, В. Гілоя, Д. Роджерса, С. Кунса, М. Пратта, А. Фокса, А. Форреста та інших;

в галузі проектування кузовних поверхонь легкових автомобілів: Вільямса Д.А., Горячого Д.В., Долматовського Ю.А., Каца А.М., Родіонова В.Ф., Фіттермана В.М., та інших, а також іноземних вчених Гухо В.Г., Дж. Фентона, Штробеля В.К. та інших.

Наукову новизну визначає метод дискретного геометричного моделювання неосцилюючих лінійних обводів за заданим законом зміни кривини, включаючий такі нові результати:

- спосіб формування випуклої дискретно представленної кривої (ДПК) в заданій смузі допустимих значень на основі розв'язання системи лінійних нерівностей;
- спосіб формування смуги з випуклими в заданому напрямку межами усередині заданої смуги;

- спосіб формування випуклої ДПК усередині смуги з випуклими межами;
- спосіб формування системи неосцилюючих значень першої похідної і кривини в вузлах випуклої ДПК;
- спосіб дискретної інтерполяції неосцилюючої ДПК з заданими в 11 вузлах дотичними і кривинами;
- спосіб згущення точкового каркасу ділянки неосцилюючої ДПП.

Вірогідність та обґрунтованість одержаних результатів підтверджується розрахунками реальних обводів і поверхонь в процесі впровадження методу в практику.

Практичне значення роботи полягає в наданні проектувальнику можливостей формування неосцилюючих лінійних обводів кузовних поверхонь з неосцилюючим характером зміни кривини, застосування яких дозволить покращити видовищні характеристики автомобіля, підвищити його швидкість і економічність за рахунок покращення його аеродинамічних характеристик.

На захист виносяться положення, що визначають наукову новизну результатів досліджень.

Реалізація роботи. Результати досліджень в виді пакета програм розрахунку дискретного каркасу неосцилюючих лінійних обводів і поверхонь з неосцилюючим характером зміни кривини впроваджені в відділі САПР АвтоЗАЗ (м. Запоріжжя), а також в відділі головного конструктора ПО "Завод ім. Малишева" (м. Харків).

Апробація роботи. Основні положення дисертаційної роботи докладалися та обговорювалися на Всеукраїнській науково-методичній конференції "Перспективи розвитку машинної графіки в викладанні графічних дисциплін" /Одеса, 15-18 вересня 1992 р./; на симпозиумі "Графічна інформація: геометричні, апаратні, програмні і методологічні аспекти" (Севастополь, жовтень, 1992 р.);

на Всеукраїнській науково-методичній конференції "Геометричне моделювання, інженерна і комп'ютерна графіка" (Харків, 21-23 вересня 1993 р.); на семінарі "Прикладна геометрія та інженерна графіка" КІБІ, червень, 1993 р.; на науково-методичних конференціях Мелітопольського інституту механізації сільського господарства в 1992 - 1993 роках.

Структура і обсяг роботи. Дисертація складається із вступу, п'яти глав, висновків, списку літератури із 123 найменувань та додатку. Робота містить 144 сторінки машинописного тексту, 69 рисунків та 20 таблиць.

Публікації основних положень дисертаційної роботи виповнені в трьох статтях та тезах трьох доповідей.

#### ЗМІСТ РОБОТИ

В першій главі розглядаються особливості формотворення кузовних поверхонь та аналіз існуючих методів їх геометричного моделювання.

Визначальною якістю кузова з точки зору його споживчих якостей є форма його зовнішніх поверхонь, до розробки яких окрім вимог дизайна ставлять багаточисленні вимоги експлуатаційного, технологічного, конструктивного характеру. Процес геометричного моделювання повинен в максимальній мірі врахувати ці вимоги.

Дослідження, що проводяться в роботі, стосуються формування математичної моделі та алгоритмів формотворення та розрахунку кузова в межах комплексної системи його проектування.

Розглядаються загальні вимоги до формотворення облицювальних поверхонь, пов'язані з технологією їх виготовлення. Для підсилення та підвищення жорсткості тонкостінних оболонок значних розмірів (дах, панелі крил та дверей), цим поверхням надають додатну гаусову кривину. При цьому значна увага приділяється монотонності зміни кривини в усіх напрямках з метою запобігання химерних відображень оточуючих автомобіль предметів в його бокових панелях після фарбування їх високо глянцевиими емаллями.

Опуклість поверхонь сприяє стійкості технологічного процесу виготовлення штампів, а також штампування самої оболонки.

Важливі вимоги щодо геометрії поверхонь кузова ставляться з боку його аеродинамічних властивостей. Головним джерелом опору повітря під час руху автомобіля є лобовий опір, що залежить від форми зовнішньої поверхні, наявності виступаючих частин, зламів поверхонь і, в особливості від форми задньої частини автомобіля, що визначає ступінь турбулентності, а, отже і тиску повітряного потоку за автомобілем. Оптимальні значення параметрів форми поверхонь складових частин кузова визначаються експериментальним шляхом.

Аналіз зовнішніх форм і їх впливу на експлуатаційні якості кузова та величину КАО дозволили виділити 2 основні вимоги щодо геометричних властивостей лінійних обводів кузовних поверхонь. Це відсутність осциляції самого обводу та графіка його кривини. Сформульовані основні вимоги щодо геометричної моделі кузовної поверхні. Модель повинна мати розвинену інформаційну базу; бути розрахованою на різні способи представлення початкових даних; мати достатній набір розрахункових алгоритмів і методів розв'язання прикладних задач; видавати інформацію у стані, придатному для використання в засобах візуалізації та документування, в системах ЧПУ; бути відкритою для редагування; вписуватись в існуючу САПР та розрахунків кузова. Апарат геометричного моделювання теж повинен відповідати певним вимогам, а саме: значна гнучкість алгоритмів формотворення, щоб дати простір для численних корекцій і оптимізації; швидкодія і простота алгоритмів; органічний зв'язок процесу моделювання з розробкою технологічних, компоновочних та інших питань проектування кузова.

До недавніх часів найбільш поширеними були графічні та графоаналітичні методи формотворення поверхонь, серед яких домінуюче положення займали ключові методи, розроблені Вільямсом Д.А. Але ці методи не задовольняють сучасних вимог із-за низької точності, малої гнучкості алгоритмів і низьких можливостей корекції, труднощів адаптації їх до САПР. З другого боку, методи, покладені в основу сучасних САПР, обмежені рамками поліноміальної інтерполяції, не здатні побороти труднощі, пов'язані з виглажуванням поверхонь, їх стиковкою, забезпечити неосцилюючий характер зміни кривини.

В найбільшій мірі висвітленим вимогам відповідають методи дискретного геометричного моделювання. Ці вимоги в максимальній

мірі враховані при розробці метода, що пропонується в роботі.

В другій главі розглядаються способи підготовки до геометричного моделювання початкових даних ДПК на рівномірній сітці. Необхідність розробки цих способів зумовлена тим, що початкові дані можуть бути задані по-різному: тільки точки; точки, а в деяких з них (може і всіх) задані дотичні, кривини тощо. Задача полягає в тому, щоб задати значення першої похідної, або першої похідної і кривини в кожному вузлі ДПК таким чином, щоб вони не протирічили опуклості ДПК і дискретного графіка її кривини.

Розглядається призначення дотичних у вузлах ДПК на основі поліноміальної інтерполяції шляхом розкладу невідомої функції ДПК в алгебраїчний ряд Тейлора та виявлення впливу нахилу хорд точкового ряду ДПК на значення першої похідної в заданому вузлі. Відзначається, що цей спосіб не дає достатніх можливостей варіації форми, не може гарантувати відсутність осциляції.

Більше можливостей дає спосіб дискретного моделювання, основу якого складає передумова: значення першої похідної  $y'_i$  у  $i$ -му вузлі не протирічить опуклій вгору ДПК  $(x_i, y_i)$ ,  $i=0; n$ ,  $h=x_i - x_{i-1}$ , коли витримуються обмеження

$$\frac{y_{i+1} - y_i}{h} < y'_i < \frac{y_i - y_{i-1}}{h}; \quad i=1; n-1 \quad (1)$$

Для опуклої вниз ДПК знаки нерівностей слід замінити на протилежні.

Ці обмеження можна записати для будь-якої точки ДПК за винятком першої  $y'_0$  і останньої  $y'_n$ . Можна прийняти

$$\frac{y_i - y_0}{h} < y'_0 < \frac{y_i - y_0}{h} + \left| \frac{y_i - y_0}{h} \right|; \quad \frac{y_n - y_{n-1}}{h} - \left| \frac{y_n - y_{n-1}}{h} \right| < y'_n < \frac{y_n - y_{n-1}}{h} \quad (2)$$

Позначивши ліві частини нерівностей (1) та (2) через  $a'_i$ , а праві - через  $b'_i$ , маємо дискретну смугу, усередині якої треба побудувати дискретний графік першої похідної. Бажано, щоб цей графік теж був опуклим (не завжди в той же бік, куди опукла ДПК).

Розглядається система нерівностей

$$y'_{i-1} - 2y'_i + y'_{i+1} > 0, \quad i=1; n-1, \quad (3)$$

що визначає опуклість вниз графіка  $i$ -ї похідної.

В результаті розв'язку системи одержана геометрична схема обмежень (рис.1), на основі яких розроблено алгоритм вибору значення  $u_k'$ , включаючий 4 обмеження:

1. Точка  $u_k'$  повинна розміщуватися вище хорди  $u_{k-2}$ ,  $u_{k-1}$ , що з'єднує точки передуючі заданій.
2. Точка  $u_k'$  повинна розміщуватися нижче хорди  $u_{k-1}, b_k'$ .
3. Хорда  $u_k', b_k'$  повинна проходити вище точок  $a_j'$ ,  $k < j < n$ .
4. Точка  $u_k'$  повинна розміщуватися в смузі свого допуску, тобто  $a_k' < u_k' < b_k'$ .

Цей спосіб має той недолік, що для побудови  $k-1$  точки  $u_k'$  треба мати точку  $u_{k-1}$ . Щоб уникнути цього в роботі пропонується алгоритм побудови смуги з опуклими в заданому напрямі межами усереднені заданої смуги (рис.2). Цей алгоритм складається з двох частин.

1. Частина. Формування опуклої вниз верхньої межі  $(\bar{b}_k')$  смуги.

1.1. Приймемо  $\bar{b}_0 = b_0$ ,  $\bar{b}_1 = b_1$ .

1.2. Знаходимо вузли  $\bar{b}_k'$ , для яких  $b_{k-1}' - 2b_k' + b_{k+1}' > 0$ . Решту вузлів виключаємо із розгляду:

1.3. Перевіряємо опуклість розташування вузлів, що лишилися.

$$\frac{b_m' - b_e'}{m-e} - \frac{b_e' - b_k'}{e-k} \geq 0, \quad k < e < m. \quad (4)$$

Вузли  $b_e$ , для яких не справджується (4), виключаємо із розгляду, а решту вузлів знову перевіряємо. Процес закінчується тоді, коли вузли, що залишилися, будуть відповідати (4).

1.4. Розрахунок точок  $b_k'$  у проміжку між вузлами  $\bar{b}_s'$  і  $\bar{b}_p'$ , що лишилися.

$$\bar{b}_k' = \bar{b}_p' + (\bar{b}_s' - \bar{b}_p') \cdot \frac{k-p}{s-p}; \quad (6)$$

Формування опуклої вниз нижньої межі  $(\bar{a}_k')$  смуги (2 частини алгоритму) здійснюється шляхом опускання вниз сформованої верхньої межі на величину  $\Delta' = \min [b_k' - a_k']$ ,  $k = 0, 1, n$  мінімального зазору з послідуною деформацією цієї опущеної межі з метою розширення смуги можливих рішень.

На відміну від верхньої межі, де рішення знаходиться однозначно, знаходження опуклої нижньої границі не має однозначного рішення.

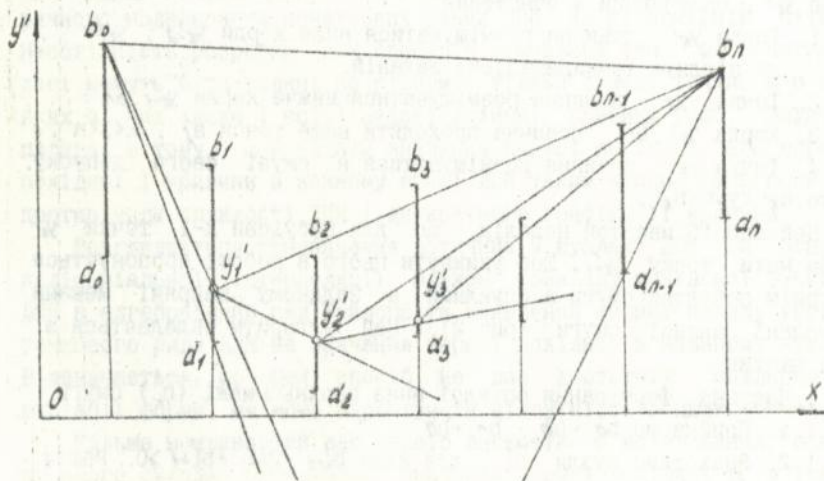


Рис. 1. Геометрична схема розв'язання системи нерівностей

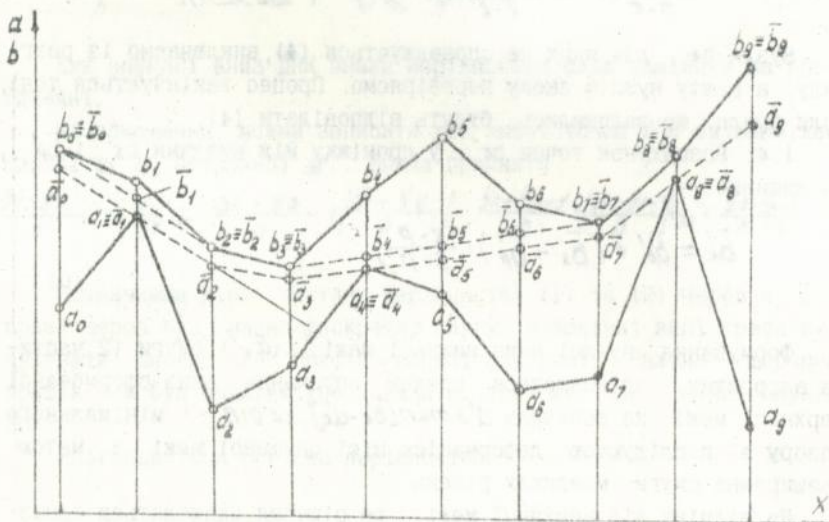


Рис. 2. Схема формування смуги з округлими межами

Для опуклої вверх смуги побудова опуклих меж здійснюється в зворотному порядку.

Смуга з опуклими межами містить в собі всі можливі опуклі в той же бік ДПК.

Розглядається алгоритм побудови опуклої ДПК в смугі з такими ж межами. Як один із варіантів в роботі пропонується побудова складеної з декількох відрізків 2-парабол ДПК, що має перший порядок гладкості на стижах.

Розглядається формування кривини  $K_i$  в вузлах ДПК. За формулою

$$K_i = \frac{y_i'''}{(1+y_i'^2)^{3/2}} \quad (7)$$

будується номограма (рис.3), де множині допустимих значень  $y_i'$  відповідає сектор. Після того, як сформовано опуклий графік  $y_i'$  в смугі допустимих значень, можна за формулами, аналогічними (1) та (2), побудувати смугу  $(a_i'', b_i'')$  допустимих значень для другої похідної  $y_i''$ , а зрештою згідно з (7) і смугу  $(a_{K_i}, b_{K_i})$  допустимих значень  $K_i$ . При цьому в роботі прийнято вважати знак  $K_i$  співпадаючим зі знаком  $y_i''$ , щоб відрізнити по знаку кривини зони різного напрямку опуклості.

В одержаній таким чином смугі  $(a_{K_i}, b_{K_i})$  будується опуклий графік кривини. У випадку, коли смуга кривини має конфігурацію, що протирічить опуклості графіка  $K_i$ , передбачена корекція значень першої похідної в межах її смуги з опуклими межами в напрямку, що сприяє проведенню опуклого графіка  $K_i$ . Розроблені <sup>рекомендовані</sup> на їх основі алгоритм корекції в автоматизованому режимі.

Таким чином шляхом попереднього формування графіка  $y_i'$  і послідуочної його корекції є можливість одночасно побудувати дискретні опуклі графіки 1-ї похідної і кривини в вузлах опуклої ДПК на рівномірній сітці (рис.4).

Третя глава присвячена підготовці початкових даних на нерівномірній сітці. Ці питання вирішені, як узагальнення результатів, одержаних в другій главі. Так, наприклад, граничні значення  $y_i'$  обчислюються за формулами

$$a_i' = \frac{y_{i+1} - y_i}{h_{i+1}}, b_i' = \frac{y_i - y_{i-1}}{h_i}, h_i = x_i - x_{i-1} \quad (8)$$

Відсутні значення  $b_0'$  та  $a_n'$  дорівнюють



$$b_0' = \frac{y_1 - y_0}{h_1} + \left| \frac{y_1 - y_0}{h_1} \right|; \quad c_n' = \frac{y_n - y_{n-1}}{h_n} - \left| \frac{y_n - y_{n-1}}{h_n} \right| \quad (9)$$

Граничні значення  $(a_i', b_i')$ ,  $i=0, n$ , складають смугу обмежень. Побудуємо в цій смузі довільну опуклу вниз ДПК  $y_k'$  за системою обмежень, що витікає з рішення системи нерівностей. Значення  $y_k'$  вибирається з системи 4-х обмежень:

1. Точка  $y_k'$  повинна розміщуватися вище хорди  $y_{k-1}'$ ,  $y_{k+1}'$

$$\left( \frac{y_{k-1}' - y_{k-2}'}{h_{k-1}} + y_{k-1}' \right) < y_k'; \quad k=2; \quad n-1. \quad (10)$$

2. Точка  $y_k'$  повинна розміщуватися нижче хорди  $y_{k-1}'$ ,  $b_n'$

$$y_k' < y_{k-1}' + (b_n' - y_{k-1}') \cdot \frac{h_k}{h_k + \dots + h_n}; \quad (11)$$

3. Хорда  $y_k'$ ,  $b_n'$  повинна проходити вище точок  $a_j'$ ,  $k < j < n$ .

$$\frac{1}{h_{k+1} + \dots + h_n} [a_k' (h_{k+1} + \dots + h_n) - b_n' (h_{k+1} + \dots + h_n)] < y_k'; \quad (12)$$

4. Обмеження смуги, тобто  $a_k' < y_k' < b_k'$ .

При цьому заздалегідь приймається  $y_0' = b_0'$ ,  $y_n' = b_n'$ , які потім уточнюються після розрахунку всіх  $y_k'$ .

Розглядається побудова смуги з опуклими вниз межами за алгоритмом глави 2. Співвідношення (4) в цьому випадку має вигляд

$$\frac{b_n' - b_k'}{h_{k+1} + \dots + h_n} - \frac{b_k' - b_k'}{h_{k+1} + \dots + h_k} \geq 0, \quad \begin{matrix} k < e < m \\ 0 < k < n \end{matrix} \quad (13)$$

Замість (6) слід мати на увазі

$$\bar{b}_k' = \bar{b}_p' - (\bar{b}_s' - \bar{b}_p') \frac{h_{k+1} + \dots + h_k}{h_{k+1} + \dots + h_s}; \quad (14)$$

Якщо первісна смуга  $(a_i', b_i')$  не дозволяє побудувати смугу з опуклими в один бік межами, то можна розділити її на ряд ділянок різної орієнтації, в межах яких і побудувати опуклі частини загальної смуги.

Розглядається побудова опуклого графіка кривин для заданої ДПК та побудованого графіка  $y_k'$ .

В роботі приділяється значна увага параметричному представленню для спіралевидних та замкнутих ДПК. В якості параметра виступає номер точки  $N$ , або сумарна довжина  $S$  хорд ламаної лінії, що з'єднує вузли ДПК.

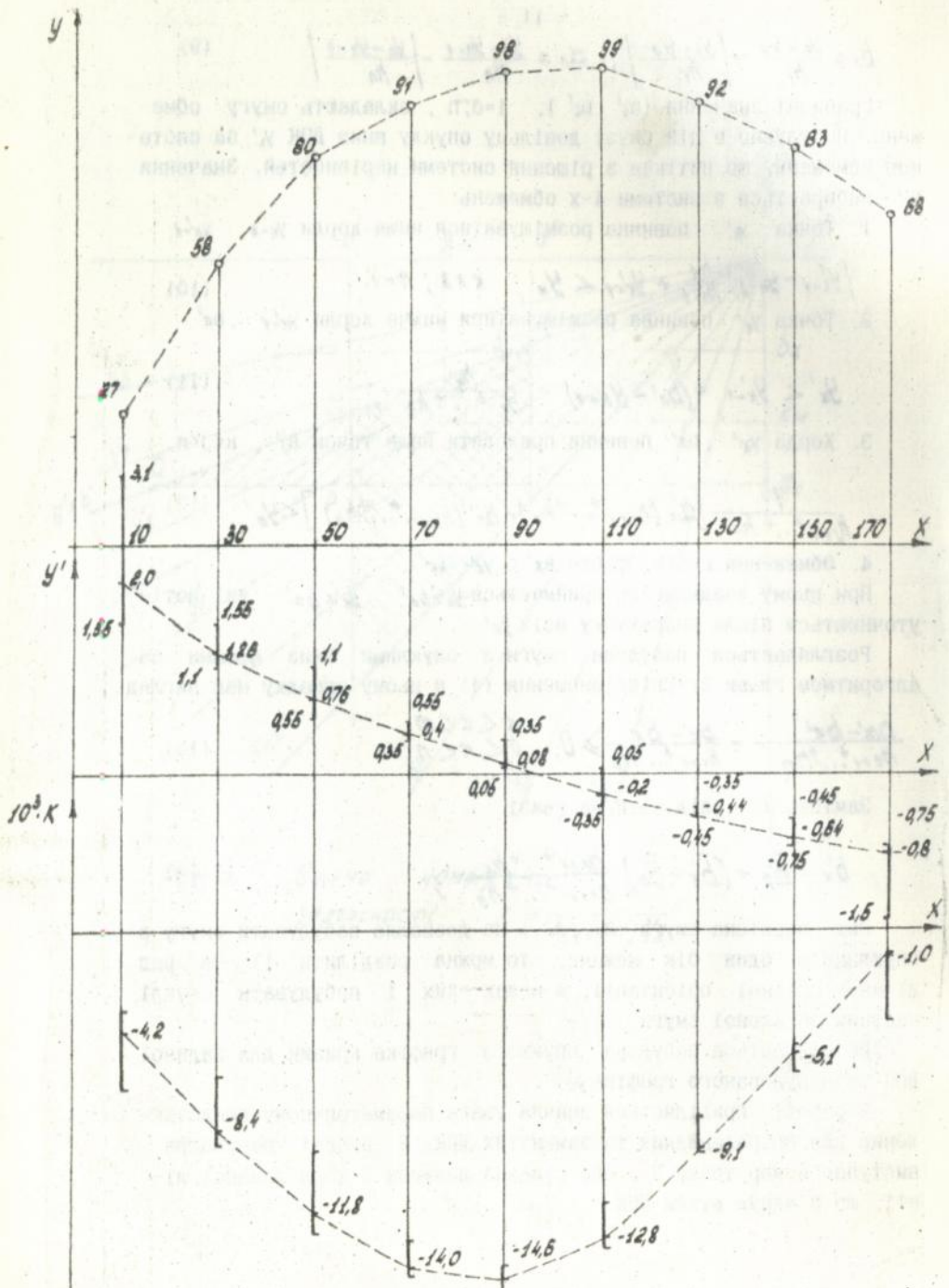


Рис. 4. Графіку ДПК, її першої похідної по кривині

Розглядається призначення дотичних  $u'_i = u'(x_i)$  в точках заданої ДПК  $u(x)$  в залежності від дотичних у вузлах параметричних рядів  $u_i = u(N_i)$  та  $x_i = x(N_i)$ . При цьому формуються точкові ряди  $u_i$  та  $x_i$ , для них будуються смуги допустимих значень параметричних похідних  $\dot{u}_i = \dot{u}(N_i)$  та  $\dot{x}_i = \dot{x}(N_i)$  від параметра  $N$ , усередині яких будуються неосцилюючі графіки  $\dot{u}_i$  та  $\dot{x}_i$ . Потім обчислюються значення  $\dot{u}_i = \dot{u}_i / \dot{x}_i$  і будується графік  $u'_i = u'(s_i)$  від довжини хорди ламаної.

Одержані точки перевіряються на відсутність осциляції і піддаються корекції, якщо це необхідно, шляхом зміни  $\dot{x}_i$  в першу чергу в межах свого допуску. Якщо зміни  $\dot{x}_i$  недостатньо, включають в дію сусідні точки.

Аналогічно розв'язується задача призначення дотичних у вузлах просторової ДПК, заданої своїми проєкціями  $z(x_i)$  та  $u(x_i)$ .

Вирішується також зворотна задача: призначення дотичних у вузлах параметричних рядів, якщо дотичні на точкових рядах проєкцій задані.

Після того, як сформовані графіки перших похідних параметричних рядів, можна приступити до формування графіку кривини  $K(s_i)$  в точках ДПК  $u(x_i)$  за формулою

$$K_i = \frac{\dot{x}_i \ddot{u}_i - \dot{u}_i \ddot{x}_i}{(\dot{x}_i^2 + \dot{u}_i^2)^{3/2}}; \quad (15)$$

За графіками  $\dot{u}_i$  та  $\dot{x}_i$  розраховуються граничні значення смуг для  $\ddot{u}_i$  та  $\ddot{x}_i$ , які по черзі підставляються в (15) і знаходиться максимальне та мінімальне значення  $K_i$ . Це є граничні значення смуги для вибору  $K_i$ . Будується ця смуга в залежності від  $S_i = \sqrt{(\dot{x}_i + \dot{x}_{i+1})^2 + (\dot{u}_i + \dot{u}_{i+1})^2}$ , піддається корекції, якщо це потрібно, і усередині смуги будується неосцилюючий графік  $K_i$ .

При цьому треба звертати увагу на ті геометричні властивості перевищеної ДПК, що стосуються характеру зміни кривини, наприклад, наявність точок екстремуму, їх кількість тощо.

Відсутність осциляції при цьому слід розуміти, як відсутність коливань графіка, які протирічать геометрії кривої. Наприклад, замкнута крива має два максимума і два мінімуми значень кривини, які і повинні характеризувати її графік.

Аналогічна методика застосовується для побудови неосцилюючого графіка кривини просторової ДПК при її параметричному представленні. При цьому

$$K_i = \frac{\sqrt{A_i^2 + B_i^2 + C_i^2}}{(\dot{X}_i^2 + \dot{Y}_i^2 + \dot{Z}_i^2)^{3/2}} \quad (16)$$

де  $A_i = \dot{Y}_i \ddot{Z}_i - \dot{Y}_i \ddot{Z}_i$ ;  $B_i = \ddot{Z}_i \dot{X}_i - \ddot{Z}_i \dot{X}_i$ ;  $C_i = \dot{X}_i \dot{Y}_i - \dot{X}_i \dot{Y}_i$ .

Кручення  $\tau_i$  просторової кривої розраховується за формулою

$$\tau_i = \frac{1}{A_i^2 + B_i^2 + C_i^2} \begin{vmatrix} \dot{X}_i & \dot{Y}_i & \dot{Z}_i \\ \ddot{X}_i & \ddot{Y}_i & \ddot{Z}_i \\ \ddot{\ddot{X}}_i & \ddot{\ddot{Y}}_i & \ddot{\ddot{Z}}_i \end{vmatrix} \quad (17)$$

Для побудови графіка  $L(S_4)$  необхідно (додатково до операцій по побудові  $K(S_4)$ ) побудувати графіки других похідних з урахуванням одержаного  $K(S_4)$ , розрахувати смуги для третіх похідних 1, підставляючи по черзі граничні їх значення в (17), знайти  $a\tau_i$  та  $b\tau_i$ , тобто побудувати смугу для вибору  $\tau_i$  та сам графік  $\tau_i$ . Найбільш складна частина цього алгоритму полягає в узгодженні других похідних та кривини. Для цього розроблено спеціальну схему - номограму на основі ізоліній поверхні 2-го порядку.

При побудові неосцилюючих графіків кривини та кручення просторової кривої широко застосовується корекція смуг, щоб досягти такої конфігурації, яка дозволяла би побудувати бажаний графік. В роботі докладно видаються відповідні рекомендації.

В четвертій главі розглядається дискретна інтерполяція ДПК з заданими в вузлах диференціально - геометричними характеристиками. В процесі підготовки початкових даних були одержані 3 різновиди ДПК: точковий ряд (графік кривини), точковий ряд з дотичними (графік першої похідної), точковий ряд з дотичними і кривинами (графік самої ДПК). В роботі розглядається дискретна інтерполяція кожного з цих видів точкових рядів.

Дискретна інтерполяція ряду полягає в побудові точки згущення  $Y_{i+0.5}$  з абсцисою  $X_{i+0.5} = 1/2(X_i + X_{i+1})$  так, щоб згущений ряд не мав осциляції. Розглядається основна тотожність згущення

$$\Delta_i^{(0)} \cdot h_i + \Delta_i^{(0)} (h_i + h_{i+1}) + \Delta_{i+0.5}^{(0)} \cdot h_{i+1} = 2\Delta_i^{(0)} (h_i + h_{i+1}), \quad (18)$$

де  $\Delta_i^{(0)}$  - розділена різниця другого порядку для точок  $Y_{i-1}, Y_i, Y_{i+1}$ .

$\Delta_i^{(1)}$  - для точок  $x_{i-1}, x_i, x_{i+1}$ .  $\Delta_i^{(1)}$  - для відповідних точок після першого кроку згущення.

Більш зручними і доступними для огляду є перевищення  $m_i^{(2)}$  середньої точки  $x_i$  над точкою хорди, що з'єднує точки  $x_{i-1}$  і  $x_{i+1}$ .

Враховуючи, що  $m_i^{(2)} = -h_i \cdot h_{i+1} \Delta_i^{(1)}$ , а також аналогічні перевищення  $m_{i-2.5}^{(2)}, m_i^{(2)}, m_{i+2.5}^{(2)}$  після першого кроку згущення, маємо із (18)

$$m_{i-2.5}^{(2)} \cdot h_{i+1} + m_i^{(2)} (h_i + h_{i+1}) + m_{i+2.5}^{(2)} \cdot h_i = \frac{m_i^{(2)}}{2} (h_i + h_{i+1}). \quad (19)$$

Ці тотожності справедливі для любого способу згущення.

В роботі пропонується два алгоритма дискретної інтерполяції згущення, що базуються на введенні певних співвідношень між перевищеннями.

**Алгоритм 1** перебачає рівність всіх перевищень в точці  $x_k$ , де  $\Delta_k^{(2)}$  має мінімальне по модулю значення. Тоді  $m_{k-2.5}^{(2)} = m_k^{(2)} = m_{k+2.5}^{(2)} = m_k^{(2)}$ ,

$$m_i^{(2)} = \frac{1}{4} m_k^{(2)} \quad (20)$$

Ординати точок згущення розраховуються за формулою

$$y_{i+2.5} = \frac{y_i + y_{i+1}}{2} + m_i^{(2)}; \quad i = 0; n-1 \quad (21)$$

де  $m_i^{(2)}$  однакове для всіх точок згущення.

Після першого кроку згущення точки згущеного ряду знову нумеруються, розраховується  $m_i^{(2)} = 1/4 \cdot m_i^{(1)}$  і процес повторяється до тих пір, поки не стане  $|m_i^{(2)}| < \epsilon$ ,  $\epsilon > 0$  - довільно мале число. Після цього одержані на останньому кроці згущення точки з'єднуються ламаною лінією, яка в подальшому замінює криву.

Дається **алгоритм 2** розрахунку точки  $\bar{y}$  на цій лінії при заданому  $x = \bar{x}$ .

$$\bar{y} = (y_{i+1} - y_i) \frac{\bar{x} - x_i}{x_{i+1} - x_i} + y_i, \quad x_i < \bar{x} < x_{i+1}. \quad (22)$$

Для алгоритму 1 властиві локальність, швидкодія, простота. Але він не реагує на зміну кривини ДПК. Пропонується **алгоритм 3** згущення ДПК, що не має цього недоліку. Тут

$$m_{i+2.5}^{(3)} = \frac{1}{4} (-h_i \cdot h_{i+1} \frac{\Delta_i^{(1)}}{\Delta_i^{(1)}} \cdot m_i^{(1)} \cap |\Delta_i^{(1)}, \Delta_{i+1}^{(1)}|), \quad j' = \overline{1; K}. \quad (23)$$

Для згущення точкового ряду з дотичними пропонується алгоритм 4. коли дотична в точці згущення не задана. Тоді для опуклої в верх ДПК

$$y_{i+0.5} = \frac{y_i + y_{i+1}}{2} (1 - M_i) + y_i \cdot M_i, \quad (24)$$

де  $M_i \in [0; 1]$  - коефіцієнт повноти обводу, що вибирається з конструктивних, технологічних міркувань тощо;  $M_i = \min\{M_i, M_{i+1}\}$ , де

$$M_i = y_i + y'_i \cdot \frac{h_{i+1}}{2}; \quad M_{i+1} = y_{i+1} - y'_{i+1} \cdot \frac{h_{i+1}}{2}; \quad (25)$$

Значення першої похідної в точці згущення вибирається в межах

$$\frac{y_{i+1} - y_{i+0.5}}{h_{i+1}/2} < y'_{i+0.5} < \frac{y_{i+0.5} - y_i}{h_{i+1}/2} \quad (26)$$

Якщо при цьому треба витримати вимогу опуклості вниз графіка  $y'_i$ , то  $y'_{i+0.5}$  повинно додатково відповідати обмеженням

$$y'_{i+0.5} < \frac{y'_i + y'_{i+1}}{2}; \quad \frac{3y'_i - y'_{i+1}}{2} < y'_{i+0.5}; \quad \frac{3y'_{i+1} - y'_i}{2} < y'_{i+0.5}. \quad (27)$$

Пропонується алгоритм 5 згущення ДПК, коли значення  $y'_{i+0.5}$  в точці згущення задане. Для опуклої вниз ДПК

$$\max \left[ y_i + y'_i \cdot \frac{h_{i+1}}{2}; y_{i+1} - y'_{i+1} \cdot \frac{h_{i+1}}{2} \right] < y_{i+0.5} < \min \left[ y_i + y'_{i+0.5} \cdot \frac{h_{i+1}}{2}; y_{i+1} - y'_{i+0.5} \cdot \frac{h_{i+1}}{2} \right], \quad (28)$$

що ілюструє рис. 5.

Пропонується алгоритм 6 згущення ДПК з заданими у вузлах дотичними і кривинами. Передбачається, що значення 1-ї похідної та кривини в точках згущення не задані. Алгоритм включає формування обмежень та вибір  $y'_{i+0.5}$  з умов опуклості ДПК і графіка  $y'_i$ , розрахунок обмежень на  $y'_{i+0.5}$  та  $K_{i+0.5}$  співставлення обмежень за номограмою (рис. 3), корекція і вибір значень першої, другої похідної і кривини  $i$ , нарешті, розрахунок точки згущення згідно з (28).

В п'ятій главі розглядається інтерполяція дискретно представлених поверхонь (ДПП).

Для довільної ДПП, заданої разом з дотичними площинами у

вузлах на нерівномірній прямокутній в плані  $OXY$  сітці, способом послідовної дискретної інтерполяції визначається апліката та дотична площина в деякій точці  $M(\bar{x}, \bar{y})$ . Кожна вузлова дотична площина визначається двома векторами дотичних, розташованих в площинах  $OYZ$  і  $OXZ$  відповідно. Алгоритм 7 включає в себе знаходження 4-кутної ділянки  $x_i < \bar{x} < x_{i+1}, y_j < \bar{y} < y_{j+1}$ ; згущення ребер  $y = y_j$  та  $y = y_{j+1}$  згідно з алгоритмом 4 і знаходження точок  $x = \bar{x}$  на цих ребрах та поздовжніх дотичних,  $Z'_{\bar{x}, y} = \bar{x}, \rho, x, \rho = j, j+1$ , знаходження поперечних дотичних в точках  $x = \bar{x}$  в напрямку осі  $OY$  згідно з рівнянням

$$Z'_{\bar{x}, y} = Z'_{i, \rho, y} \cdot \frac{x_{i+1} - \bar{x}}{x_{i+1} - x_i} + Z'_{i+1, \rho, y} \cdot \frac{\bar{x} - x_i}{x_{i+1} - x_i}; \rho = j, j+1; \quad (29)$$

і, нарешті, згідно з алгоритмом 4, згущення одержаних точок і їх дотичних та визначення аплікати  $Z\bar{x}\bar{y}$ , похідної  $Z\bar{x}\bar{y}, x$ , та похідної

$$Z'_{\bar{x}, \bar{y}, x} = Z'_{i, j, x} \cdot \frac{y_{j+1} - \bar{y}}{y_{j+1} - y_j} + Z'_{i, j+1, x} \cdot \frac{\bar{y} - y_j}{y_{j+1} - y_j}; \quad (30)$$

Пропонується алгоритм 8 знаходження аплікати, векторів дотичних та значень кривини в двох напрямках для довільної точки  $M(\bar{x}, \bar{y})$  ДПП, заданої вузлами, дотичними векторами та значеннями кривини в них. Він є узагальненням алгоритму 7. Лінійна інтерполяція виконується згідно з алгоритмом 6, а значення поперечних кривин обчислюються за рівняннями, аналогічними (29) і (30).

Розроблено алгоритм 9 згущення 4-кутної ділянки ДПП, в вузлах якої задані дотичні і значення кривини в двох напрямках (рис. 6) Алгоритм включає згущення бокових ребер за алгоритмом 6; знаходження найвищої точки  $Z_{MTOX}$  із середин 4-х хорд, що з'єднують протилежні точки ділянки; знаходження найнижчої  $Z_{MMLN}$  із 8 точок, що належать дотичним площинам і конкурують з т.  $Z_{MTOX}$  ( $Z_{MTOX} < Z_{MMLN}$ ); знаходження дотичних та кривин в двох напрямках згідно з алгоритмом 6; корекція поля допуску для точки згущення в залежності від вибраних дотичних за формулою, аналогічною (28): вибір діагональних дотичних із умови розміщення їх векторів в одній дотичній площині з поздовжніми і поперечними дотичними, а також кривин із умови узгодження їх значень з поздовжніми і поперечними кривинами за формулою Ейлера; розрахунок допуску на вибір точки згущення в залежності від прийнятих дотичних і вибір самої точки згущення. Після цього здійснюється



перехід до початкового пункту 1 проводиться розрахунок тієї частки ділянки, яку потребує поставлена практична задача.

На основі алгоритмів підготовки початкових даних та послідовного згущення ДПК з заданими в вузлах дотичними і кривинами розроблено програмне забезпечення методу. Одержаний пакет програм здійснює дискретну інтерполяцію лінійних обводів та послідовну інтерполяцію поверхні. В роботі приведені приклади розрахунку лінійних обводів даху та лівого переднього крила кузова автомобіля "Таврія".

## В И С Н О В К И

Дослідження, проведені в рамках дисертаційної роботи, дозволили одержати наступні результати, що мають наукову новизну і практичну цінність.

1. Запропоновано, досліджено і випробовано у практику проектування метод дискретного геометричного моделювання лінійних обводів кузовних поверхонь з неосцилюючим законом зміни їх кривини, в межах якого одержані нові наукові результати.

2. Запропоновано спосіб формування опуклої ДПК на довільній сітці в заданій смузі допустимих значень на основі розв'язання системи лінійних нерівностей. Спосіб дає послідовну множину точок бажаної лінії і має властивість локальності.

3. Розроблено спосіб формування смуги з опуклими в заданому напрямку межами усередині заданої смуги. Сформована смуга охоплює всю множину опуклих в тому ж напрямку рішень.

4. Розроблено спосіб формування складеної опуклої ДПК усередині смуги з опуклими границями. Спосіб дає змогу одержати точковий ряд з заданими властивостями.

5. Розроблено спосіб формування неосцилюючої системи значень першої похідної та кривини в вузлах опуклої ДПК. Спосіб складає основу дискретної інтерполяції лінійних обводів з неосцилюючим законом зміни кривини.

6. Запропоновано два алгоритми дискретної інтерполяції неосцилюючої ДПК, як з врахуванням кривини точкового ряду, так і без нього.

7. Запропоновано два алгоритми дискретної інтерполяції неосцилюючої ДПК з заданими в її вузлах дотичними, як з врахуванням значення першої похідної в точці згущення, так і без нього.

8. Розроблено алгоритм дискретної інтерполяції ДПК з заданими в 11 вузлах дотичними і кривинами при умові відсутності осциляції ДПК і графіка 11 кривини.

9. Розроблено спосіб послідовної дискретної інтерполяції ДПК при умові відсутності осциляції в двох напрямках лінійних обводів і графіків їх кривини.

10. Запропоновано спосіб дискретної інтерполяції ДПК на основі згущення точкового каркасу 4-кутної 11 ділянки за умов відсутності 11 осциляції.

11. На основі запропонованого методу розроблено програмне забезпечення дискретної інтерполяції та випроваджено в умовах реального проектування лінійних обводів кузовних поверхонь на ПО АвтоЗАЗ ( м. Запоріжжя), а також поверхонь складних виробів на ПО "Завод ім. Малишева".

Запропонований в роботі підхід дозволяє розраховувати не стільки точки, скільки обмеження на їх розміщення і тим самим дає можливість ширшої варіації рішень і оптимізації форми.

Основні положення дисертації опубліковані в наступних роботах:

1. Брустинов В.М. Дискретное геометрическое моделирование кузовных поверхностей //Перспективы развития машинной графики в преподавании графических дисциплин: Тезисы докл. Всеукраинской научно-метод. конф., 15-18 сентября 1992 г. - Одесса: ОПИ, 1992. - с.107.
2. Брустинов В.М. О назначении производных при параметрическом представлении кривых / Мелитоп. ин-т механизации с. хоз-ва. Мелитополь, 1993-9с.: Рус.-Деп. в ГНТБ Украины 07.06.93г. N1122-УК93.
3. Брустинов В.М. Сгущение ряда двукратных точек. //Геометрическое моделирование. Инженерная и компьютерная графика :Тезисы докл. Всеукраинской научно-метод. конф., 21-23 сентября 1993 г. - Харьков: ХПИ, 1993, - с.
4. Верещага В.М. Брустинов В.М. Дискретное моделирование поверхностей, представленных каркасом двукратных точек. //Геометрическое моделирование. Инженерная и компьютерная графика: Тезисы докл. Всеукраинской научно-метод. конф., 21-23 сентября 1993 г. - Харьков: ХПИ, 1993, - с.
5. Верещага В.М., Найдыш А.В., Брустинов В.М. Задание касательных в узлах дискретно представленной кривой. /Мелитоп. ин-т

механизации с. хоз.-ва. Мелитополь, 1993-9с.; Рус.-Деп. в ГНТБ Украины 07.06.93г. N1120-УК93.

6. Найдыш В.М., Брустинов В.М., Верещага В.М., Найдыш А.В. Моделирование линейных обводов с неосциллирующим характером изменения кривизны. /Мелитоп. ин-т механизации с.хоз.-ва. Мелитополь, 1993.-10с.; Рус.-Деп. в ГНТБ Украины 07.06.93. N1121-УК93.

В работе предложен метод дискретного геометрического моделирования неосциллирующих линейных обводов кузовных поверхностей при условии неосцилляции графиков их кривизны.

Метод включает подготовку исходных данных и их дискретную интерполяцию. Первый этап состоит в формировании неосциллирующего множества значений первых производных и кривизны в узлах дискретно представленной кривой (ДПК).

Рассматривается решение этой задачи на равномерной, неравномерной сетке, а также при параметрическом представлении кривых.

Второй этап состоит в расчете точек сгущения неосциллирующей ДПК и значений производных и кривизны в ее точках. Рассматриваются различные варианты задания ДПК (узлы, узлы с касательными, узлы с касательными и кривизнами) и даются алгоритмы расчета.

Рассматривается применение предложенного метода для последовательной интерполяции дискретно представленной поверхности (ДПП) и сгущения точечного каркаса ее 4-угольной ячейки.

Разработан пакет прикладных программ дискретной интерполяции линейных обводов, решены практические примеры.

*В. Брустинов*



163404

Ab 28.097

**AB 28.097**