

УДК 515.2

С.І.Пустюльга, В.Р.Самостян, Ю.В.Клак

Луцький національний технічний університет

## МЕТОДИКА ВРАХУВАННЯ ВИХІДНИХ УМОВ ПРИ ДИСКРЕТНОМУ МОДЕЛЮВАННІ КУЗОВНИХ ПАНЕЛЕЙ АВТОМОБІЛІВ ДВОВИМІРНИМИ ЧИСЛОВИМИ ПОСЛІДОВНОСТЯМИ

В роботі розглядаються процеси дискретного моделювання складних поверхонь кузовних деталей автомобілів на основі зрівноважених сіток, побудованих за допомогою систем двовимірних числових послідовностей. Запропоновано методи врахування вихідних умов при формуванні дискретних моделей двовимірних образів на нерівномірній сітці.

Ключові слова: дискретне моделювання, статико-геометричний метод, подвійні числові послідовності, рівновага, суперпозиція, скінченно-різницеві оператори, крайові умови.

Постановка проблеми. В сучасних умовах розвиток різних галузей машинобудування, в тому числі автомобілебудування, супроводжується різким ускладненням зовнішніх форм проєктованих об'єктів. При цьому одним із основних завдань для конструкторів є суттєве скорочення термінів підготовки виробництва. У зв'язку з цим традиційна, достатньо трудомістка технологія виготовлення штампової оснастки, що включає виготовлення майстер-моделі, гіпсової моделі, об'ємних шаблонів, і наступна обробка деталей штампів на фрезерно-копіювальних верстатах є неприйнятними. Найбільш ефективним методом освоєння нових моделей автомобілів є наскрізна підготовка виробництва на базі використання сучасних комп'ютерних технологій.

Створення геометричної форми кузовних панелей є найбільш складним етапом, який погано піддається формалізації, тому в кожному конкретному випадку потребує творчого підходу, обробки великої кількості можливих варіантів, залучення широкого кола висококваліфікованих спеціалістів, а прийняте рішення не завжди є оптимальним. Тому удосконалення існуючих методів моделювання просторових елементів кузовів, розробка швидкісних уніфікованих алгоритмів, які дозволяють враховувати різного роду вихідні умови, дають можливість змінювати в процесі формоутворення геометрію поверхонь, локально коректувати окремі ділянки, особливо на початковій стадії проєктування кузовних деталей, є актуальним.

Аналіз останніх досліджень. Практика сучасного проєктування кузовних деталей автомобілів показує, що основною проблемою моделювання є відсутність простих, уніфікованих програмних модулів, що забезпечили би автоматичну генерацію сітки на поверхні деталі (тобто дискретизацію поверхні), можливості швидкого корегування геометрії як усієї моделі, так і її окремих ділянок за допомогою мінімальної кількості управляючих параметрів з метою візуальної оцінки форми деталі.

Вченими, що працюють у галузі прикладної геометрії, відпрацьовано ряд підходів до дискретного геометричного моделювання двовимірних образів. Розроблені в роботах [1, 2] алгоритми дискретного моделювання поверхонь у тривимірному просторі статико-геометричним методом, підходи до раціональної дискретизації відсіків поверхонь із заданою точністю дозволили створити програмний модуль формоутворення поверхонь кузовних деталей, який забезпечує ефективне проєктування ескізних варіантів панелей кузовів автомобілів [3]. Для перевірки ефективності запропонованих алгоритмів і програмного забезпечення процесу формування була побудована дискретна модель просторових криволінійних елементів капота автомобіля "ЛуАЗ - 1301" (рис. 1).

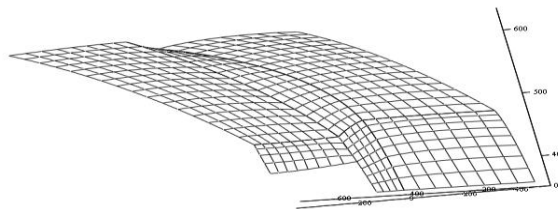


Рис. 1

Зважаючи на математичну простоту запропонованого підходу до формування дискретних сіток, його уніфікованість, нескладність комп'ютерної реалізації, наявність можливостей для глобального та локального коректування моделі в процесі проектування, він має і ряд суттєвих недоліків: потреба у складанні та розв'язанні громіздких систем лінійних рівнянь рівноваги, включення до моделі спеціальних алгоритмів раціональної дискретизації, потреба у використанні методів дискретної інтерполяції для згущення сітки каркаса. Цих недоліків можна позбутися, якщо у якості моделюючого апарату застосувати подвійні числові послідовності. Основною проблемою при цьому є забезпечення крайових умов при побудові моделі та одночасне врахування комплексу інших вихідних вимог до процесу формування.

Формулювання цілей статті. Метою даної роботи є створення ефективних алгоритмів дискретного моделювання складних поверхонь кузовних деталей автомобілів на основі зрівноважених сіток, побудованих за допомогою систем двовимірних числових послідовностей.

Основна частина. Розроблений у роботі [4] спосіб формування зрівноважених дискретних сіток із заданими крайовими умовами за допомогою апарату подвійних числових послідовностей поряд із визначеним перевагами має один недолік. У разі задання конкретних значень коефіцієнтів у виразах одновимірних послідовностей, що визначають положення дискретно заданого опорного контуру сітки з рівномірним кроком вузлів, відсутні вільні додаткові параметри для управління процесам формування внутрішніх вузлів дискретної моделі, а відтак унеможливується врахування заданих вихідних формалізованих умов. Це пов'язано перш за все із підходом до комплексного використання операцій над подвійними числовими послідовностями, де кожна із послідовностей геометрично інтепретивулася як лінійчата поверхня виду:

$$ZS_{n,k} = (a_0 + a_1k + a_2k^2 + \dots + a_s k^s) \alpha_0(n) + (b_0 + b_1k + b_2k^2 + \dots + b_s k^s) \alpha_1(n), \quad (1)$$

$\alpha_0(n)$  і  $\alpha_1(n)$  є лінійними функціями зміщення крайових умов і не мають вільних параметрів для забезпечення можливостей врахування вихідних умов моделювання.

Якщо ж функції зміщення вибрати нелінійними або, наприклад, у вигляді поліномів загального виду чи кубічних сплайнів, то можна отримати множину вільних параметрів для врахування, при формуванні дискретно заданих поверхонь подвійними числовими послідовностями, різного роду вихідних умов. При цьому вимога забезпечення крайових умов у процесі створення математичного апарату моделювання залишається визначальною.

Крайові умови, у загальному вигляді, для моделювання прямокутних у плані дискретних сіток з чотирикутними клітинами представляються одновимірними числовими послідовностями:

$$\begin{aligned} Z_{0,k} &= a_0 + a_1k + a_2k^2 + \dots + a_s k^s, \\ Z_{N-1,k} &= b_0 + b_1k + b_2k^2 + \dots + b_s k^s, \\ Z_{0,n} &= c_0 + c_1n + c_2n^2 + \dots + c_s n^s, \\ Z_{K-1,n} &= d_0 + d_1n + d_2n^2 + \dots + d_s n^s. \end{aligned} \quad (2)$$

Тоді дискретну модель поверхні, сформовану на крайових умовах виду  $Z_{0,k}$  і  $Z_{N-1,k}$  з нелінійною функцією зміщення  $\alpha_n^0 = 1 - \frac{\beta_1 n}{(N-1)} - \frac{\beta_2 n^2}{(N-1)^2} \dots - \dots - \frac{\beta_p n^p}{(N-1)^p}$ , можна подати у вигляді:

$$\begin{aligned} Z1_{n,k} &= (a_0 + a_1k + a_2k^2 + \dots + a_s k^s) \left( 1 - \frac{\beta_1 n}{(N-1)} - \frac{\beta_2 n^2}{(N-1)^2} \dots - \right. \\ &\left. \dots - \frac{\beta_p n^p}{(N-1)^p} \right) + (b_0 + b_1k + b_2k^2 + \dots + b_s k^s) \left( \frac{n}{(N-1)} \right) \end{aligned}, \quad (3)$$

де  $\beta_1 + \beta_2 + \dots + \beta_p = 1$ .

Дискретна модель поверхні, сформована на крайових умовах  $Z_{0,n}$  та  $Z_{K-1,n}$ , задається подвійною числовою послідовністю виду:

$$Z2_{n,k} = (c_0 + c_1n + c_2n^2 + \dots c_s n^s) \left(1 - \frac{\alpha_1 k}{(K-1)} - \frac{\alpha_2 k^2}{(K-1)^2} \dots - \frac{\alpha_p k^p}{(K-1)^p}\right) + (d_0 + d_1n + d_2n^2 + \dots d_s n^s) \left(\frac{k}{(K-1)}\right) \tag{4}$$

де  $\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_p = 1$ .

Оскільки нелінійні функції зміщення у виразах (3) і (4), забезпечуючи виконання заданих відповідних протилежних крайових умов, вносять зміни до крайових умов протилежного напрямку, необхідно стабілізувати їх вплив на формування кінцевої моделі. Таку стабілізацію можна забезпечити подвійними числовими послідовностями, що є моделями циліндроїдів, побудованих на кривих нелінійних функцій зміщення. Для першої поверхні  $Z1_{n,k}$  дискретна модель циліндроїда набуде вигляду:

$$ZC1_{n,k} = \left[ a_0 \left(1 - \frac{\beta_1 n}{(N-1)} - \frac{\beta_2 n^2}{(N-1)^2} \dots - \frac{\beta_p n^p}{(N-1)^p}\right) + b_0 \left(\frac{n}{(N-1)}\right) \right] \left[ 1 - \frac{k}{(K-1)} \right] + \left[ \begin{aligned} &(a_0 + a_1(K-1) + a_2(K-1)^2 + \dots a_s(K-1)^s) \\ &\left(1 - \frac{\beta_1 n}{(N-1)} - \frac{\beta_2 n^2}{(N-1)^2} \dots - \frac{\beta_p n^p}{(N-1)^p}\right) + \\ &+(b_0 + b_1(K-1) + b_2(K-1)^2 + \dots b_s(K-1)^s) \left(\frac{n}{(N-1)}\right) \end{aligned} \right] \left[ \frac{k}{(K-1)} \right] \tag{5}$$

А для дискретної моделі поверхні двоякої кривини  $Z2_{n,k}$  стабілізуючий циліндроїд можна представити виразом:

$$ZC2_{n,k} = \left[ c_0 \left(1 - \frac{\alpha_1 k}{(K-1)} - \frac{\alpha_2 k^2}{(K-1)^2} \dots - \frac{\alpha_p k^p}{(K-1)^p}\right) + d_0 \left(\frac{k}{(K-1)}\right) \right] \left[ 1 - \frac{n}{(N-1)} \right] + \left[ \begin{aligned} &(c_0 + c_1(N-1) + c_2(N-1)^2 + \dots c_s(N-1)^s) \\ &\left(1 - \frac{\alpha_1 k}{(K-1)} - \frac{\alpha_2 k^2}{(K-1)^2} \dots - \frac{\alpha_p k^p}{(K-1)^p}\right) + \\ &+(d_0 + d_1(N-1) + d_2(N-1)^2 + \dots d_s(N-1)^s) \left(\frac{k}{(K-1)}\right) \end{aligned} \right] \left[ \frac{n}{(N-1)} \right] \tag{6}$$

П'ятим необхідним елементом виконання заданих крайових умов є подвійна числова послідовність виду:

$$Zg_{n,k} = a_0 - \frac{a_0 n}{(N-1)} + a_1 k - \frac{a_1 nk}{(N-1)} + a_2 k(K-1) - \frac{a_2 nk(K-1)}{(N-1)} + \frac{b_0 n}{(N-1)} + \frac{b_1 nk}{(N-1)} + b_2 kn \tag{7}$$

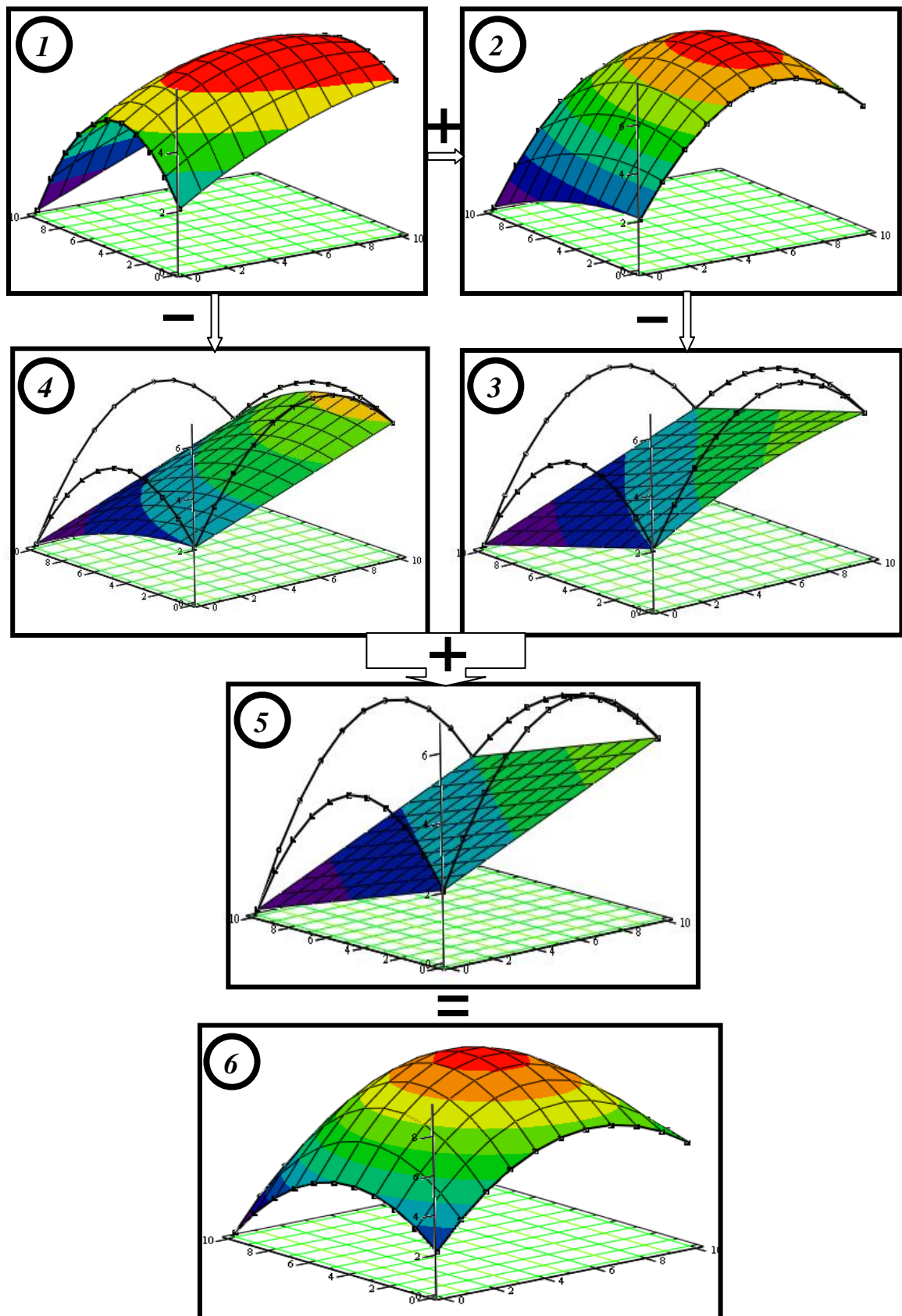


Рис. 2

що є дискретною моделлю гіперболічного параболоїда, побудованого на кутових точках заданого опорного контуру.

Результуючу дискретну модель поверхні пропонується одержати як суперпозицію вищеназваних подвійних числових послідовностей (3), (4), (5), (6) і (7):

$$Z_{n,k} = Z1_{n,k} + Z2_{n,k} - ZC1_{n,k} - ZC2_{n,k} + Zg_{n,k}, \quad (8)$$

наочна інтерпретація якої наведена на рис.2 і геометрично представляється операціями над різними видами двовимірних сіток. У такій моделі вихідні умови процесу формування можна враховувати за рахунок вільних параметрів нелінійних функцій зміщення. Так, при нелінійній функції зміщення у вигляді поліномів 2-го порядку результуюча дискретна модель має вигляд:

$$\begin{aligned} Z_{n,k} = & \left[1 - \frac{k}{(K-1)}\right] (\beta_1 a_2 n k) + \left[\frac{1}{N-1} - \frac{k}{(N-1)^2}\right] (\beta_2 a_2 n^2 k) + \\ & + \left[\frac{1}{N-1} - \frac{n}{(N-1)^2}\right] (\alpha_2 c_2 n k^2) + a_2 k(k-n) + \left[1 - \frac{n}{(N-1)}\right] \\ & (a_0 + a_1 k - d_2 n k + \alpha_1 c_2 n k) + c_2 n(n - (N-1)) + \left[\frac{k}{(K-1)}\right] \\ & (b_2 n k + b_1 n) + \frac{b_0 n}{N-1}, \end{aligned} \quad (9)$$

забезпечує абсолютне виконання крайових умов і включає чотири вільні параметри для проведення процедури врахування у моделі довільних вихідних даних (проходження через задані вузли сітки, наявність заданих дискретних аналогів дотичних площин у вузлах тощо).

$$h^2 \left( \frac{d^2 z}{dx^2} + \frac{d^2 z}{dy^2} \right) \approx -P_{x,y} =$$

$$\begin{aligned} & z_{n,k-1} + z_{n,k+1} + z_{n-1,k} + \\ & z_{n+1,k} - 4z_{n,k} \end{aligned}$$

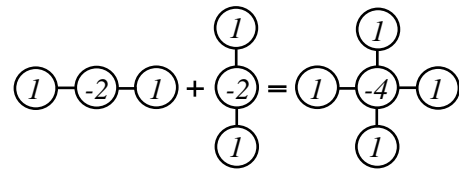


Рис. 3

Ще однією важливою процедурою, відповідно до основного постулату статико-геометричного методу моделювання, є приведення сформованих дискретних сіток у рівновагу. У роботі [4] реалізація рівноваги вузлів дискретної моделі виконувалась на основі скінченно-різницевого оператора (рис. 3) і потребувала знаходження громіздких виразів подвійних числових послідовностей у околі центрального вузла апроксимаційної схеми відповідного диференційного рівняння.

Враховуючи взаємозв'язок між скінченно-різницевиими рівняннями статико-геометричного методу, зусиллями у вузлах формованих дискретних сіток та неперервним представленням відповідних обчислювальних шаблонів, виокремлення функції зовнішнього формоутворюючого навантаження пропонується проводити шляхом подвійного диференціювання результуючої подвійної числової послідовності. Наприклад, функція навантаження, яка приводить дискретну систему, задану подвійною послідовністю (9), до рівноваги, буде мати вигляд:

$$\begin{aligned} P_{n,k} = & \left[\frac{2}{(N-1)}\right] (k(\alpha_1 c_2 - \beta_2 a_2 - d_2) + n(\beta_1 a_2 - \alpha_2 c_2 - b_2)) + \\ & + \left[\frac{2}{(N-1)^2}\right] (k^2 + n^2)(\beta_2 a_2 + \alpha_2 c_2) - 2(a_2 + c_2), \end{aligned} \quad (10)$$

а наочне зображення сформованої зрівноваженої сітки, під його дією, подано на рис. 4.

Запропонована методика формування зрівноважених дискретних моделей криволінійних поверхонь із заданими крайовими умовами та іншими вихідними даними на основі суперпозицій подвійних числових послідовностей стосується планів сіток, побудованих з рівномірним кроком. Однак параметричне представлення криволінійних поверхонь дає можливість будувати дискретні моделі зрівноважених сіток з нерівномірним кроком за допомогою систем подвійних числових

послідовностей, сформованих за запропонованою методикою по кожній із координатних складових. Така система послідовностей у загальному вигляді подається виразами:

$$\begin{aligned} X_{n,k} &= f_1(n,k), \\ Y_{n,k} &= f_2(n,k), \\ Z_{n,k} &= f_3(n,k), \end{aligned} \quad (11)$$

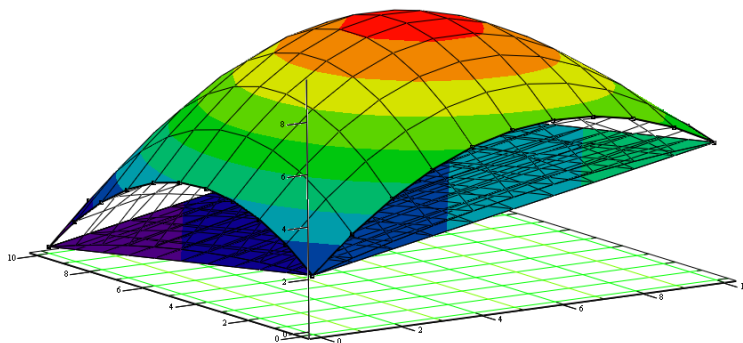


Рис. 4

За представленою методикою побудована модель одного криволінійного елемента капота автомобіля "ЛуАЗ - 1301" (рис. 5) без процедур складання та розв'язання громіздких систем лінійних рівнянь.

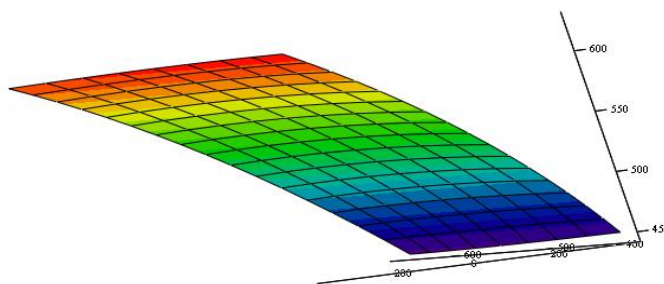


Рис. 5

Висновки. В даній роботі запропоновано метод та алгоритми формування зрівноважених дискретних сіток з рівномірним і нерівномірним кроком за допомогою суперпозиції подвійних числових послідовностей або їх систем. Метод дозволяє будувати дискретні моделі складних криволінійних поверхонь на визначених крайових умовах та з можливостями врахування інших формалізованих даних. Запропонована методика виокремлення функцій складових зовнішнього навантаження для забезпечення рівноваги вузлів сіток.

1. Ковалёв С.Н. Формирование дискретных моделей поверхностей пространственных архитектурных конструкций. Дис.....докт. техн. наук. 05.01.01.- М.: МАИ, 1986. -348с.
2. Пустюльга С.І. Дискретне визначення геометричних об'єктів числовими послідовностями. Дис.....докт. техн. наук. 05.01.01.- К.: КНУБА, 2006.-320с.
3. Пустюльга С.І., Придюк В.М. Автоматизація процесу геометричного моделювання кузовних деталей автомобілів // Друга науково-практична конф. в Сімферополі "Геометричне та комп'ютерне моделювання...":Збірник наукових праць КНУТД.- Київ, 2005.- С. 108-114.
4. Пустюльга С.І., Самостян В.Р. Моделювання зрівноважених дискретно представлених криволінійних поверхонь із заданими крайовими умовами числовими послідовностями // Шоста науково-практична конф. в Сімферополі "Геометричне та комп'ютерне моделювання...":Збірник наукових праць КНУТД.- Київ, 2009.- С. 74-79