https://doi.org/10.30857/2786-5371.2022.4.4

УДК 685.31.02

ЧУПРИНКА В. І., ЧУПРИНКА Н. В., ВАСИЛЕНКО О. Л., НАУМЕНКО Б. В.
Київський національний університет технологій та дизайну, Україна

ПІДГОТОВКА ІНФОРМАЦІЇ ПРО ЗОВНІШНІ КОНТУРИ ПЛОСКИХ ГЕОМЕТРИЧНИХ ОБ'ЄКТІВ ДЛЯ ЕФЕКТИВНОГО АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЕКТУВАННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ СХЕМ РОЗКРОЮ

Мета: *Розробити математичне та програмне забезпечення для підготовки інформації про зовнішні контури плоских геометричних об'єктів для ефективного автоматизованого проектування раціональних схем розкрою матеріалів на ці плоскі геометричні об'єкти.*

Методика*. У ході розробки алгоритмів підготовки інформації про зовнішні контури плоских геометричних об'єктів з допустимою точністю апроксимації використані методи аналітичної геометрії та прикладної математики.*

Результати. *Для ефективного використання програмного забезпечення щодо автоматизованого проектування раціональних схем розкрою матеріалів на плоскі геометричні об'єкти запропоновані алгоритми підготовки інформації про зовнішні контури плоских геометричних об'єктів з допустимою точністю, які забезпечують скорочення часу автоматизованого проектування раціональних схем розкрою в декілька разів. Особливо це важливо при інтерактивному проектуванні та коригуванні розкрійних схем. Проаналізувавши значення коефіцієнта точного відображення, рекомендовано допустиму точність апроксимації про зовнішні контури деталей взуття вибрати в діапазоні 0.5 мм≤ε ≤0.25.*

Наукова новизна*. Запропоновані алгоритми підготовки інформації про зовнішні контури плоских геометричних об'єктів для ефективного автоматизованого проектування раціональних схем розкрою матеріалів на ці плоскі геометричні об'єкти, які визначають допустиму точність кусково-лінійної апроксимації цих контурів, та забезпечують їх апроксимацію із цією допустимою точністю.*

Практична значимість. *Запропоновані алгоритми підготовки інформації про зовнішні контури плоских геометричних об'єктів для ефективного автоматизованого проектування раціональних схем розкрою матеріалів на ці плоскі геометричні об'єкти реалізовані в програмний продукт для ущільнення інформації про зовнішні контури при кусково-лінійній апроксимації цих контурів. У результаті ущільнення отримана інформація про зовнішні контури плоских геометричних об'єктів забезпечить скорочення часу автоматизованого проектування раціональних схем розкрою в декілька разів.*

Ключові слова: *зовнішній контур, плоский геометричний об'єкт, деталь, апроксимація, ущільнення інформації, раціональна схема розкрою, математичне та програмне забезпечення.*

Вступ. Наразі існують різні способи представлення інформації про зовнішні контури деталей. У роботі [1] автори пропонують геометрію взуттєвих деталей описати за допомогою фігур простої форми, а саме площина деталі покривається колами різних радіусів. У такому разі вихідною інформацією про деталь є координати центрів кіл та їх радіуси. Цей спосіб апроксимації дуже трудомісткий, потребує певних професійних навичок та складно піддається автоматизації. Але при такій апроксимації алгоритм побудови раціональних схем розкрою дуже спрощується.

При координатно-трапецеїдальному способі апроксимації взуттєвих деталей [2] спрощується процес апроксимації. Даний спосіб легко піддається автоматизації, але не є універсальним. У разі такої апроксимації алгоритм побудови раціональних схем розкрою дуже спрощується.

При рецепторному методі апроксимації [3] деталь розміщується у полі рецепторів та визначаються ті рецептори, що покривають деталь. Так як деталь визначається дискретно, то множина допустимих раціональних схем розкрою визначається дискретно і при такому представленні інформації про деталь є можливість пропустити найефективнішу схему розкою.

У роботі [4] розглядається аналітичний опис зовнішніх контурів деталей за допомогою R – функцій. Цей метод малоефективний для деталей зі складною конфігурацією зовнішнього контуру та не піддається автоматизації.

Особливістю всіх вище розглянутих способів представлення інформації про деталь є простота алгоритмів взаємного неперетину деталей у схемах розкрою. Але результати обчислень можна застосувати при автоматизованому розкрої тільки для пресів-автоматів, для яких ріжучим інструментом є різак. Крім того, деякі з них важко піддаються автоматизації (метод покриття колами), деякі не є універсальними (метод трапецій), інші потребують багато пам'яті для збереження інформації про деталь (рецепторний метод). Також у разі застосування данних методів передбачається побудова множини допустимих розв'язків дискретно із заданим кроком. А це може привести до того, що можемо пропустити кращий варіант.

У роботах [5–11] зовнішні контури деталей апроксимуються за допомогою кривих різного порядку. Параболічна інтерполяція розроблена Оверхаузером [12]. Оверхаузер інтерполяційну криву запропонував виходячи із геометричних міркувань. Ідея полягає у лінійній інтерполяції двох частин парабол, що перетинаються. Теорія B-сплайнів запропонована у роботі [13]. Рекурсивне визначення для чисельного розвязку запропоновано незалежно Коксом [14] та де Буром [15]. Гордон [16] та Резенфельд [17] визначили апроксимуючі криві через базис B – сплайну. Ці методи забезпечують велику точність апроксимації, але дуже ускланюють алгоритми побудови раціональних схем розкрою.

Кусково-лінійний спосіб апроксимації контурів деталей [18] найбільш простий та зручний у разі автоматизованого та автоматичного введення інформації про зовнішні контури деталей. Не накладає обмежень на складність конфігурації деталі. Інформація при такому методі апроксимації легко ущільнюється. За такої апроксимації зовнішній контур деталі буде представлено у вигляді багатокутника. Кількість вершин апроксимуючого багатокутника залежить від точності апроксимації (чим більша точність апроксимації, тим більше вершин у багатокутнику). При такій апроксимації немає обмеження на ріжучий інструмент при автоматичному розкрої (різак, гнучкий ніж, струмінь води чи промінь лазера).

Постанока завдання. Основною задачею роботи є розробка алгоритмів ефективної підготовки інформації про зовнішні контури плоских геометричних об'єктів для автоматизованого проектування раціональних схем розкрою при кусково-лінійній апроксимації зовнішніх контурів цих об'єктів.

Результати досліджень. Для побудови розкрійних схем необхідно мати інформацію про зовнішні контури плоского геометричного об'єкту у текстовому файлі.

Нехай S – плоский геометричний об'єкт із заданою орієнтацією. Зв'яжемо з деталлю S координатну систему XOY, де O – полюс деталі, обраний у будь-якій її внутрішній точці. Контур плоского геометричного об'єкту S апроксимуємою ламаною лінією з вершинами в послідовно вибраних на контурі деталі точках Кількість цих точок повинна забезпечувати потрібну точність апроксімації. Тоді плоский геометричний об'єкт S можна представити координатами точок вершин апроксимуючого многокутника, тобто масивом координат вершин $\{X_k, Y_k\}$, $i = 1 \ldots n$, де X_i, Y_i – координати i-ї вершини та n – кількість вершин апроксимуючого многокутника. Таке представлення дозволяє надати аналітичне описання зовнішнього контуру плоского геометричного об'єкту у вигляді систем рівнянь відрізків, з яких складаються ці контури. У параметричній формі запису ця система має вигляд:

$$\begin{cases} X(t_k) = X_k + (X_{k+1} - X_k)t_k \\ Y(t_k) = Y_k + (Y_{k+1} - Y_k)t_k \end{cases} \quad k = \overline{1, n}$$

де $\{X_k, Y_k\}$, $k = 1 \ldots n$, – точки на контурі деталі, вибрані при апроксимації, або вершини многокутника, t_k – параметр, $t_k \in [0;1)$.

Досвід свідчить, що для практичних задач при виготовленні взуття достатньо забезпечити точність апроксимації контурів 0,5 мм. Іншими словами, максимальне відхилення контуру деталі взуття від ланки апроксимуючої лінії не повинно перевищувати $H \le 0{,}5$ мм. Оберемо на площині координатну систему XOY.

Зупинимося більш детально на способі отримання інфомації про зовнішні контури плоских геометричних об’єктів із заданою точністю.

Нехай зовнішній контур плоского геометричного об’єкту представляється координатами точок вершин апроксимуючого многокутника, тобто масивом координат вершин $\{X_k, Y_k\}$, $i = 1...n$, де X_i, Y_i – координати i-ї вершини та n – кількість вершин апроксимуючого многокутника

Спочатку необхідно обрати першу вершину на зовнішньому контурі апроксимуючого многокутника. Це має бути вершина, яка повинна залишитись при ущільненні інформації про зовнішній контур апроксимуючого многокутника. Очевидно, що в якості цієї вершини можна обрати одну із чотирьох вершин на зовнішньому контурі апроксимуючого многокутника, в яких значення координати X або Y приймають найменше або найбільше значення.

Потім циклічно переномеруємо вершини на зовнішньому контурі апроксимуючого многокутника таким чином, щоб обрана вершина стала першою. Заносимо обрану вершину як першу вершину до ланцюга C шуканих вершин на зовнішньому контурі апроксимуючого многокутника після ущільнення інформації.

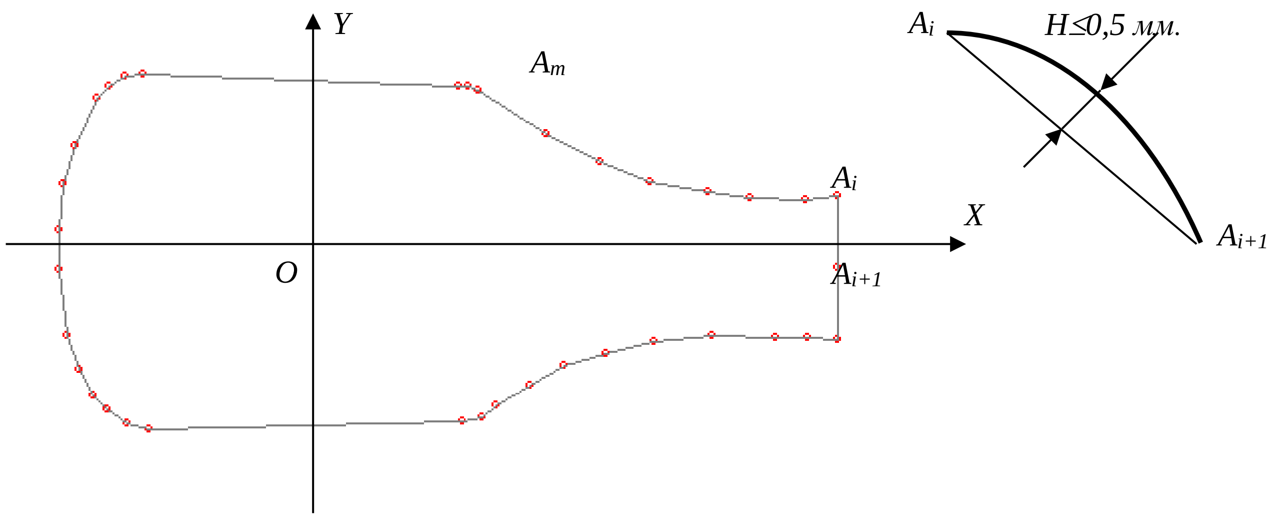


Рис. 1. **Кусково-лінійна апроксимація**

Проведемо через вершини $A_i(X_i, Y_i)$ та $A_k(X_k, Y_k)$ ломаної лінії $A_i A_{i+1} ... A_{k-1} A_k$, пряму $A_i A_k$. Рівняння цієї прямої прийме вигляд [19]:

$$\frac{x - X_i}{X_k - X_i} = \frac{y - Y_i}{Y_k - Y_i} \qquad (1)$$

або $P_x \cdot x + P_y \cdot y + P = 0$, де $P_x = Y_k - Y_i$; $P_y = X_i - X_k$; $P = X_k Y_i - X_i Y_k$. (2)

(Початково *i* та *k* відповідно приймають наступні значення: *i = 0, k = 2.*

Опустимо перпендикуляри із точок A_j, де *j = i + 1, …, k-1* на пряму $A_i A_k$.

Позначимо довжини відрізків $A_j B_j$ (рис. 1), як $\Delta_j = |\delta_j|$. Тоді $\Delta_j = |\delta_j|$ знаходимо за формулою [19]:

$$\Delta_j = |\delta_j| = \frac{P_x \cdot x + P_y \cdot y + P}{\sqrt{P_x^{\,2} + P_y^{\,2}}}. \qquad (3)$$

На кожному кроці *k* збільшується на одиницю. Визначимо $\Delta = \max\{\Delta_j\} = \max\{|A_j B_j|\}$, де *j=i+1,…,k-1.*

Якщо $\Delta > \varepsilon$, то точка A_{k-1} заноситься до ланцюгу *C*, тобто $C = C \cup A_{k-1}$ та *i* приймаємо рівним *k-1 (i=k-1).* Ці дії виконуємо до тих пір, поки *k* не стане рівним *m-1* (поки зовнішній контур базового апроксимуючого многокутника не буде пройдений повністю).

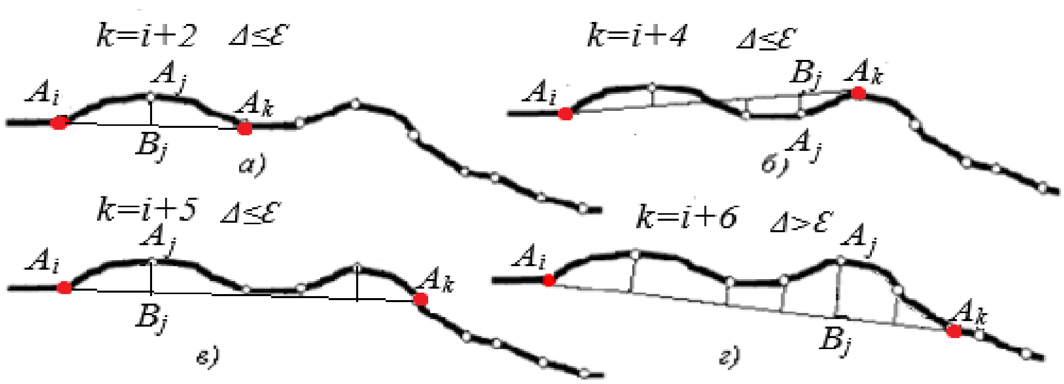


Рис. 2. **Апроксимація контуру деталі із заданою точністю ε**

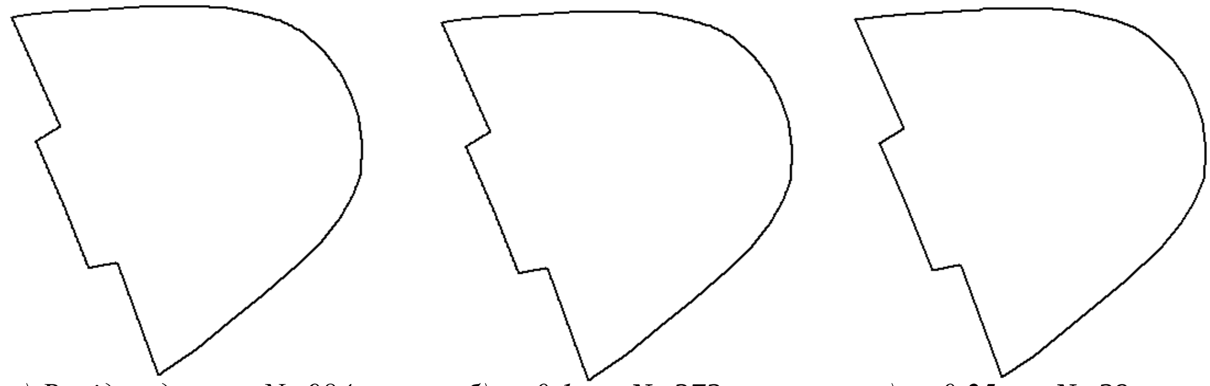
На рис. 3 представлені приклади впливу точності апроксимації *ε* на форму зовнішнього контуру деталі, де: *N* – кількість вершин апроксимуючого многокутника; *ε* – точності апроксимації. Очевидно, що зовнішні контури апроксимуючих многокутників при точності апроксимації *ε = 0,25мм* (рис. 3.д) та *ε = 0,1 мм* (рис. 3.е) візуально не відрізняються від вихідного апроксимуючого многокутника, але у разі точності апроксимації *ε = 0,25мм* кількість вершин апроксимуючого многокутника *N = 29*, а точності апроксимації *ε = 0,1 мм* – кількість вершин апроксимуючого многокутника *N = 372* (рис. 3).

Нехай маємо деталь *Sd* та плоский геометричний об’єкт *Sr*, що апроксимує нашу деталь.

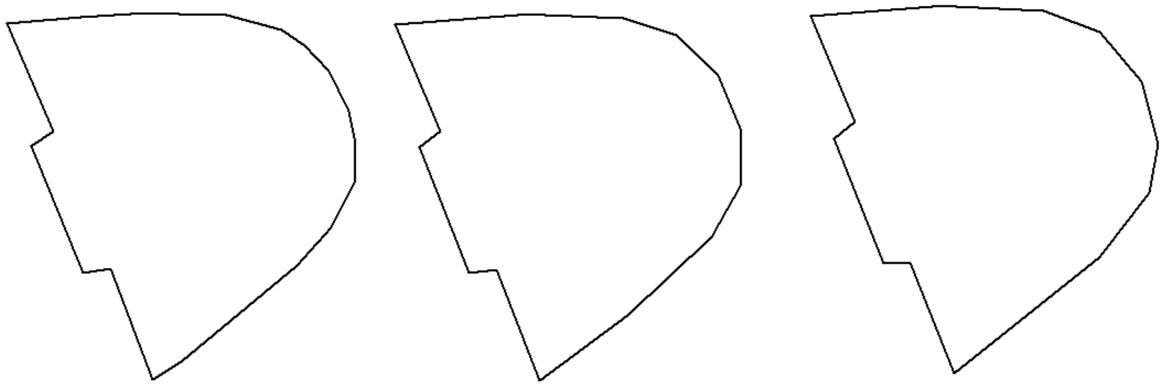
Під коефіцієнтом точного відображення *ζ* розуємо *ζ=1-|Sp|/|Sd|*, де |*Sd*| – площа деталі *Sd* (рис. 4.а), |*Sp*| – площа плоского геометричного об’єкта (зафарбованої області на рис. 4.в), що визначається наступним чином:

$$Sp = (Sd \setminus Sr) \cup (Sr \setminus Sd), \qquad (4)$$

тобто площа зафарбованої області на рис. 4.в.



а) Вихідна деталь N=984 *б) ε=0.1 мм N=372* *в) ε=0.25 мм N=29*



г) ε=0.5 мм N=19 *д) ε=0.75 мм N=15* *е) ε=1 мм N=13*

Рис. 3. **Вплив точності апроксимації ε на форму зовнішнього контуру деталі**

Будь-яка деталь *Sd* може бути представлена координатами вершин апроксимуючого опукло-ввігнутого многокутника, тобто масивом $\{X_m, Y_m\}$,. *m=1..n*. Тоді площу |*Sd*| деталі *Sd* можна визначити наступним чином[20]:

$$|Sd| = \left| \sum_{m=1}^{n} X_m Y_{m+1} - X_{m+1} Y_m \right| / 2, \quad (5)$$

а |*Sp*| – площу плоского геометричного об’єкта (зафарбованої області на рис. 4.в визначаємо наступним чином:

$$|Sp| = \sum_{t=1}^{q} Sp_t, \quad (6)$$

де Sp_t – площа *t*-ої елементарної ділянки об’єкта *Sp* та *q* – кількість елементарних ділянок, із яких складається об’єкт *Sp*.

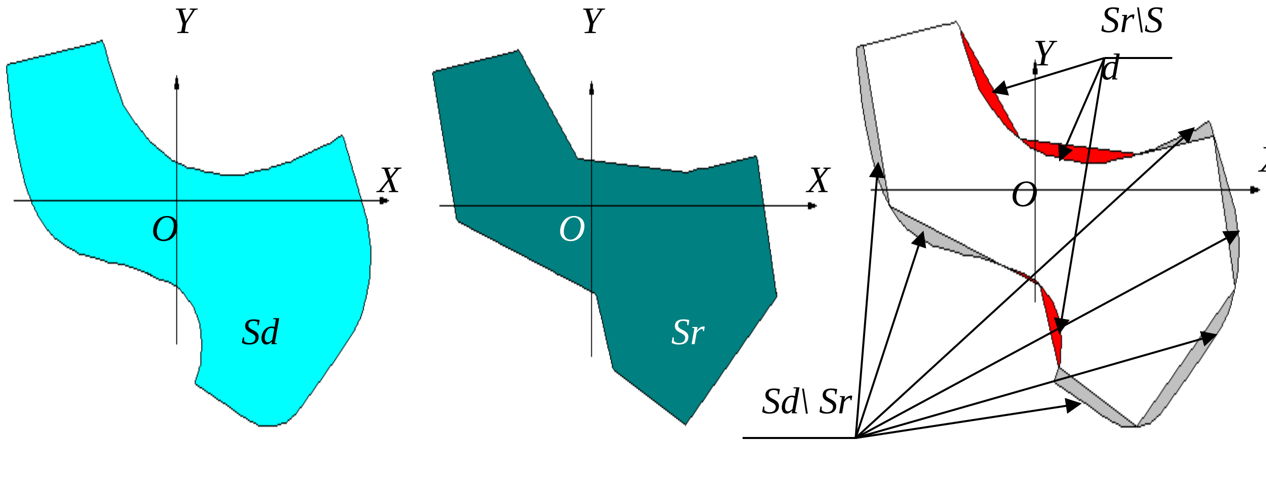


Рис. 4. **Визначення коефіцієнту точного відображення**

Розглянемо *t*-у елементарну ділянку об'єкта *Sp* (рис. 5) що знаходиться між двома вершинами $A_i(X_i,Y_i)$ та $A_j(X_j,Y_j)$. На цій елементарній ділянці кожна точка на контурі цієї ділянки знаходиться на відстані , що менша ε-точності ущільнення, від опорної прямої A_iA_j, якою буде замінена дуга $A_iA_kBA_{k+1}A_j$ при ущільнені інформації. Нам необхідно знайти всі базові точки на опорній прямій A_iA_j, тобто точки перетину дуги $A_iA_kBA_{k+1}A_j$ та відрізка опорної прямої A_iA_j (див. рис. 5).

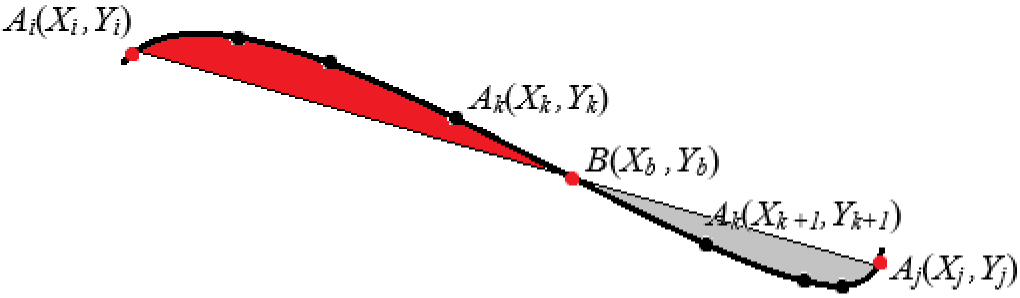


Рис. 5. **Визначення базових точок на елементарній ділянці плоского геометричного об'єкту *Sr***

Рівняння прямої A_iA_j має вигляд:

$$P_{x1}x + P_{y1}y + P_1 = 0,$$

де $P_{x1} = Y_j - Y_i$; $P_{y1} = X_i - X_j$; $P_1 = X_jY_i - X_iY_i$

Рівняння прямої A_kA_{k+1} має вигляд:

$$P_{x2}x + P_{y2}y + P_2 = 0,$$

де $P_{x2} = Y_{k+1} - Y_k$; $P_{y_2} = X_{k+1} - X_k$; $P_2 = X_{k+1}Y_k - X_kY_{k+1}$

Тоді базові точки ми знаходимо, розв’язавши наступну систему:

$$\begin{cases} P_{x1}x + P_{y_1}y + P_1 = 0 \\ P_{x2}x + P_{y_2}y + P_2 = 0 \\ (P_{x1} \cdot X_k + P_{y_1} \cdot Y_k + P_1)(P_{x1} \cdot X_{k+1} + P_{y_1} \cdot Y_{k+1} + P_1) \le 0, \\ (P_{x2} \cdot X_i + P_y \cdot Y_i + P_1)(P_{x2} \cdot X_j + P_{y_2} \cdot Y_j + P_2) \le 0 \end{cases} \quad (7)$$

де $k = i+1, i+2 \ldots j-2$.

Тобто, якщо виконуються умови:

$$\begin{cases} (P_{x1} \cdot X_k + P_{y_1} \cdot Y_k + P_1)(P_{x1} \cdot X_{k+1} + P_{y_1} \cdot Y_{k+1} + P_1) \le 0 \\ (P_{x2} \cdot X_i + P_y \cdot Y_i + P_1)(P_{x2} \cdot X_j + P_{y_2} \cdot Y_j + P_2) \le 0 \end{cases} \quad (8)$$

для $k = i+1, i+2 \ldots j-2$, то координати базових точок визначаємо наступними виразами:

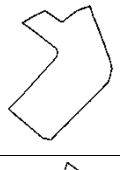
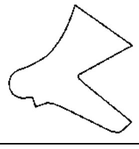
$$\begin{cases} X = \Delta_x / \Delta \\ Y = \Delta_y / \Delta \end{cases}, \text{ де } \Delta = \begin{vmatrix} A_1 & B_1 \\ A_2 & B_2 \end{vmatrix} = A_1B_2 - A_2B_1; \quad (9)$$

$$\Delta_x = \begin{vmatrix} -P_1 & P_{y_1} \\ -P_2 & P_{y_2} \end{vmatrix} = -P_1P_{y_2} + P_2P_{y_1}; \quad \Delta_y = \begin{vmatrix} P_{x1} & -P_1 \\ P_{x2} & -P_2 \end{vmatrix} = -P_{x1}P_2 + P_{x2}P_1. \quad (10)$$

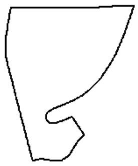
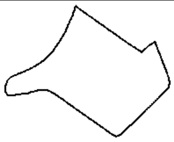
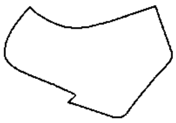
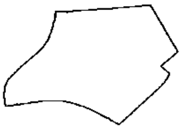
Визначивши координати опорних точок, легко знайти площу базового елементу та площу плоского геометричного об’єкту *Sp*. У таблиці 1 представлено залежність кількості вершин на зовнішньому контурі плоского геометричного об’єкта та коефіцієнта точноговідображення *ζ* від точності апроксимації ε.

Таблиця 1

Залежність кількості вершин на зовнішньому контурі плоского геометричного об’єкта від точності апроксимації ε

№	Деталь	К-сть вер-шин	Площа *S* в *см²* та периметр *P* в *см*.	Кількість вершин після ущільнення для				
				ε = 1 *мм*	ε = 0,75 *мм*	ε = 0,5 *мм*	ε =0,25 *мм*	ε =0,1 *мм*
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1		623	*S*=16,81 *P*=28,48	14 ζ= 0,936	16 ζ= 0,948	19 ζ= 0,972	86 ζ= 0,995	317 ζ= 0,9999
2		682	*S*=40,39 *P*=30,61	14 ζ= 0,966	15 ζ= 0,9741	20 ζ= 0,987	29 ζ= 0,996	417 ζ= 0,9999
3		816	*S*=76,39 *P*=48,73	24 ζ= 0,977	29 ζ= 0,985	45 ζ= 0,990	59 ζ= 0,998	439 ζ= 0,9999

Закінчення табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
4		875	*S*=82,12 *P*=44,5	18 ζ= 0,978	23 ζ= 0,986	28 ζ= 0,992	63 ζ= 0,999	506 ζ= 0,9999
5		598	*S*=84,37 *P*=51,27	20 ζ= 0,985	28 ζ= 0,987	57 ζ= 0,997	98 ζ= 0,999	317 ζ= 0,9999
6		659	*S*=93,02 *P*=49,4	17 ζ= 0,976	21 ζ= 0,987	57 ζ= 0,994	96 ζ= 0,999	426 ζ= 0,9999
7		680	*S*=97,03 *P*=44,9	18 ζ= 0,982	22 ζ= 0,988	29 ζ= 0,995	69 ζ= 0,999	501 ζ= 0,9999
8		717	*S*=115,55 *P*=47,1	21 ζ= 0,988	24 ζ= 0,989	39 ζ= 0,995	74 ζ= 0,999	545 ζ= 0,9999
9		803	*S*=117,28 *P*=72,33	27 ζ= 0,985	38 ζ= 0,989	57 ζ= 0,995	83 ζ= 0,999	356 ζ= 0,9999
10		756	*S*=118,51 *P*=45,82	18 ζ= 0,985	21 ζ= 0,990	31 ζ= 0,996	76 ζ= 0,999	407 ζ= 0,9999
11		614	*S*=179,18 *P*=68,28	34 ζ= 0,986	56 ζ= 0,990	71 ζ= 0,998	96 ζ= 0,999	377 ζ= 0,9999

У разі точності ε = 0,5 *мм* площа апроксимуючого многокутника буде відрізнятись від площі плоского геометричного об’єкту не більше ніж на 1,5%, а при точності ε = 0,25 *мм* – не більше ніж 0,7%. Кількість вершин апроксимуючого многокутника при 0,5 *мм* ≤ε ≤ 0,25 *мм* буде не більше ніж 60, що повністю задовольняє умовам формування алгоритмів раціонального розкрою матеріалів.

Висновки. За результатами аналізу існуючих методів апроксимації зовнішніх контурів плоских геометричних об’єктів для підготовки інформації для автоматизованого проектування раціональних схем розкрою обрано кусково-лінійний метод апроксимації як такий, що не має обмежень на зовнішні контури цих об’єктів.

Для цього методу апроксимації запропоновані алгоритми підготовки інформації про зовнішні контури плоских геометричних об’єктів для ефективного автоматизованого проектування раціональних схем розкрою матеріалів на ці плоскі геометричні об’єкти, які визначають допустиму точність кусково-лінійної апроксимації цих контурів, та забезпечують їх апроксимацію із цією допустимою точністю.

Ці алгоритми реалізовано в програмний продукт для ущільнення інформації про зовнішні контури у разі кусково-лінійної апроксимації цих контурів.

Отримана у результаті ущільнення інформація про зовнішні контури плоских геометричних об'єктів забезпечує скорочення часу автоматизованого проектування раціональних схем розкрою в декілька разів.

References

1. Bokiy, V. I., Skaternoy, V. A., Svistunova, L. T. (1970). Analiticheskoye opisaniye konturov obuvnykh detaley [Analytical description of the contours of shoe parts]. *Izvestiya VUZov. Tekhnologiya legkoy promyshlennosti = Proceedings of universities. Light industry technology*, № 4, P. 69–73 [in Russian].
2. Skaternoy, V. A., Veselov, V. V. (1973). Koordinatno-trapetsiyedalnyy sposob approksimatsii obuvnykh detaley [Coordinate-trapezoidal method of approximating shoe parts]. *Izvestiya VUZov. Tekhnologiya legkoy promyshlennosti = Proceedings of universities. Light industry technology*, № 2, P. 72–76 [in Russian].
3. Shchukina, S. N., Nesterov, V. P. (1979). Tochechno_retseptornyy metod opisaniya konturov detaley obuvi [Point-receptor method for describing the contours of shoe parts]. In: *Nauchnyye trudy MTILP = Scientific works of MTILP*, P. 102–104 [in Russian].
4. Lisnyak, A. A., Gomenyuk, S. I. (2009). Primeneniye R-funktsiy dlya geometricheskogo modelirovaniya ob″yektov slozhnoy formy [Application of R-functions for geometric modeling of objects of complex shape]. *Radíoyelektroníka. Ínformatika. Upravlínnya = Radio electronics. Informatics. Management.*, № 2, P. 76–81 [in Russian].
5. Balyuba, I. G., Konopatskiy, Ye. V. (2017). Konstruirovaniye dug obvoda iz krivykh odnogo otnosheniya [Construction of contour arcs from curves of one relation]. *Trudy 27-y Mezhdunarodnoy konferentsiya po komp'yuternoy grafike i mashinnomu zreniyu "GraphiCon 2017" = Proceedings of the 27th International Conference on Computer Graphics and Machine Vision "GraphiCon 2017"*, Perm, P. 332–334 [in Russian].
6. Bakhvalov, Yu. N. (2007). Metod mnogomernoy interpolyatsii i approksimatsii i yego prilozheniya [Method of multidimensional interpolation and approximation and its applications]. Moscow: Sputnik+. 108 p. [in Russian].
7. Belyayev, M. G. (2013). Approksimatsiya mnogomernykh zavisimostey po strukturirovannym vyborkam [Approximation of multidimensional dependencies by structured samples]. *Iskusstvennyy intellekt i prinyatiye resheniy = Artificial intelligence and decision making*, № 3, P. 24–39 [in Russian].
8. Blinov, A. O., Fralenko, V. P. (2009). Mnogomernaya approksimatsiya v zadachakh modelirovaniya i optimizatsii [Multidimensional approximation in modeling and

Література

1. Бокий В. И., Скатерной В. А., Свистунова Л. Т. Аналитическое описание контуров обувных деталей. *Известия ВУЗов. Технология легкой промышленности*. 1970. № 4. С. 69–73.
2. Скатерной В. А., Веселов В. В. Координатно-трапецеидальный способ аппроксимации обувных деталей. *Известия ВУЗов. Технология легкой промышленности*. 1973. № 2. С. 72–76.
3. Щукина С. Н., Нестеров В. П. Точечно-рецепторный метод описания контуров деталей обуви. В кн.: *Научные труды МТИЛП*. 1979. С. 102–104.
4. Лисняк А. А., Гоменюк С. И. Применение R-функций для геометрического моделирования объектов сложной формы. *Радіоелектроніка. Інформатика. Управління*. 2009. № 2. С. 76–81.
5. Балюба И. Г., Конопацкий Е. В. Конструирование дуг обвода из кривых одного отношения. *Труды 27-й Международной конференция по компьютерной графике и машинному зрению «GraphiCon 2017».* Пермь: ПГНИУ, 2017. С. 332–334.
6. Бахвалов Ю. Н. Метод многомерной интерполяции и аппроксимации и его приложения. М.: Спутник+, 2007. 108 с.
7. Беляев М. Г. Аппроксимация многомерных зависимостей по структурированным выборкам. *Искусственный интеллект и принятие решений*. 2013. № 3. С. 24–39.
8. Блинов А. О., Фраленко В. П. Многомерная аппроксимация в задачах моделирования и оптимизации. *Автомат. и телемех*. 2009. № 4. С. 98–109.

optimization problems]. *Avtomat. i telemekh. = Machine. and telemech*, № 4, P. 98–109 [in Russian].

9. Konopatskiy, Ye. V. (2019). Approksimatsiya geometricheskikh obyektov s pomoshchyu dug krivykh, prokhodyashchikh cherez napered zadannyye tochki [Approximation of geometric objects using arcs of curves passing through predetermined points]. *Informatsionnyye tekhnologii = Information Technology,* (Moscow), № 1, Vol. 25, P. 46–52 [in Russian].

9. Конопацкий Е. В. Аппроксимация геометрических объектов с помощью дуг кривых, проходящих через наперёд заданные точки. *Информационные технологии*. 2019. № 1. Т. 25. С. 46–52.

10. Konopatskiy, Ye. V. (2019). Modelirovaniye dug krivykh, prokhodyashchikh cherez napered zadannyye tochki [Modeling arcs of curves passing through predetermined points]. *Vestnik kompyuternykh i informatsionnykh tekhnologiy = Bulletin of Computer and Information Technologies,* Moscow, № 2, P. 30–36 [in Russian].

10. Конопацкий Е. В. Моделирование дуг кривых, проходящих через наперед заданные точки. *Вестник компьютерных и информационных технологий*. 2019. № 2. С. 30–36.

11. Golovanov, N. N. (2020). Geometricheskoye modelirovaniye [Geometric Modeling]. Moscow: DML Pres. 406 p [in Russian].

11. Голованов Н. Н. Геометрическое моделирование. М.: ДМЛ Прес, 2020. 406 с.

12. Overhauser, A. W. (1968). Overhauser Analytic Definition of Curve and Surfaces by Parabolic Blending. *Tech. Rep.* № Sl68-40, Ford Motor Company Scientific Laboratory, May 8, 1968.

12. Overhauser A. W. Analytic Definition of Curve and Surfaces by Parabolic Blending. *Tech. Rep.* № Sl68-40, Ford Motor Company Scientific Laboratory, May 8, 1968.

13. Schoenberg, I. J. (1949). Schoenberg Contributions to the Problem of Approximation of Equidistant Data by Analytic Functions. *Q. Appl. Math.*, Vol. 4, P. 45–99; P. 112–141.

13. Schoenberg I. J. Contributions to the Problem of Approximation of Equidistant Data by Analytic Functions. *Q. Appl. Math.* 1949. Vol. 4. P. 45–99; P. 112–141.

14. Cox, M. G. (1971). The Numerical Evaluation of B-splines. National Physical Laboratory DNCA 4, August 1971.

14. Cox M. G. The Numerical Evaluation of B-splines. National Physical Laboratory DNCA 4, August 1971.

15. de Boor, C. (1972). On Calculation with B-splines. *J. Approx. Theory*, Vol. 6, P. 50–62.

15. de Boor C. On Calculation with B-splines. *J. Approx. Theory*. 1972. Vol. 6. P. 50–62.

16. Gordon, W. J., Riesenfeld, R. F. (1974). Bernstein-Bezier Methods for the Computer Aided Design of Free-from Curves and Surfaces. *J. ACM*, Vol. 21, P. 293–310.

16. Gordon W. J., Riesenfeld R. F. Bernstein-Bezier Methods for the Computer Aided Design of Free-from Curves and Surfaces. *J. ACM.* 1974. Vol. 21. P. 293–310.

17. Riesenfeld, R. F. (1972). Application of B-Spline Approximation to Geometric Problems of Computer Aided Design. PhD dissertation, Syracuse Univ., Syracuse, NY, 1972, Also available as U, of Utah, UTEC-CSc-73-126, March 1973.

17. Riesenfeld R. F. Application of B-Spline Approximation to Geometric Problems of Computer Aided Design. PhD dissertation, Syracuse Univ., Syracuse, NY, 1972, Also available as U, of Utah, UTEC-CSc-73-126, March 1973.

18. Pavlenko, Yu. S., Zalevskiy, V. I., Pavlov, A. V. (1977). Kusochno-lineynaya approksimatsiya konturov shveynykh detaley s zadannym dopuskom [Piecewise linear approximation of the contours of sewing parts with a given tolerance]. *Izvestiya VUZov. Tekhnologiya legkoy promyshlennosti = Proceedings of universities. Light industry technology*, № 4, P. 109–115 [in Russian].

18. Павленко Ю. С., Залевский В. И., Павлов А. В. Кусочно-линейная аппроксимация контуров швейных деталей с заданным допуском. *Известия ВУЗов. Технология легкой промышленности*. 1977. № 4. С. 109–115.

19. Ilin, V. A., Poznyak, E. G. (1975). Analiticheskaya geometriya [Analytic geometry]. Moscow: Publishing house "Nauka", Main edition of physical and mathematical literature. 243 p. [in Russian].

19. Ильин В. А., Позняк Э. Г. Аналитическая геометрия. М.: Издательство “Наука”, Главная редакция физико-математической литературы, 1975. 243 с.

20. Vodnev, V. T., Naumovich, A. F., Naumovich, N. F. (1988). Osnovnyye matematicheskiye formuly [Basic Mathematical Formulas]. Minsk: Vysheyshaya shkola. 270 p. [in Russian].

20. Воднев В. Т., Наумович А. Ф., Наумович Н. Ф. Основные математические формулы. Минск: Вышэйшая школа, 1988. 270 с.

CHUPRYNKA VIKTOR
Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Computer Science, Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine
https://orcid.org/0000-0001-6869-3091
E-mail: Chuprynka_V_I@ukr.net

CHUPRYNKA NATALIA
Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor of the Department of Information and Computer Technologies, Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine
https://orcid.org/0000-0003-1507-489X
E-mail: natasha-chup@ukr.net

VASYLENKO OLEKSIY
Graduate Student of the Department of Computer Science, Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine
E-mail: akvalakh@gmail.com

NAUMENKO BOHDAN
Graduate Student of the Department of Computer Science, Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine
E-mail: bohdanych2011@gmail.com

ЧУПРИНКА В. И., ЧУПРИНКА Н. В., ВАСИЛЕНКО О. Л., НАУМЕНКО Б. В.
Киевский национальный университет технологий и дизайна, Украина

ПОДГОТОВКА ИНФОРМАЦИИ О ВНЕШНИХ КОНТУРАХ ПЛОСКИХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОГО АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ РАЦИОНАЛЬНЫХ СХЕМ РАСКРОЯ

Цель. *Разработать математическое и программное обеспечение подготовки информации о внешних контурах плоских геометрических объектов для эффективного автоматизированного проектирования рациональных схем раскроя материалов на эти плоские геометрические объекты.*

Методика. *При разработке алгоритмов подготовки информации о внешних контурах плоских геометрических объектов с допустимой точностью аппроксимации использованы методы аналитической геометрии и прикладной математики.*

Результаты. *Для эффективного использования программного обеспечения автоматизированного проектирования рациональных схем раскроя материалов на плоские геометрические объекты предложены алгоритмы подготовки информации о внешних контурах плоских геометрических объектов с допустимой точностью, что обеспечивает сокращение времени автоматизированного проектирования рациональных схем раскроя в несколько раз. Особенно это важно при интерактивном проектировании и корректировке раскройных схем. Проанализировав значение коэффициента точного отображения при заданной точности аппроксимации рекомендуется допустимую точность аппроксимации при автоматической подготовке информации о внешних контурах деталей обуви выбрать в диапазоне 0.5 мм≤ε ≤0.25.*

Научная новизна. *Предложены алгоритмы подготовки информации о внешних контурах плоских геометрических объектов для эффективного автоматизированного проектирования рациональных схем раскроя материалов на эти плоские геометрические объекты, которые определяет допустимую точность кусочно-линейной аппроксимации этих контуров, и обеспечивает их аппроксимацию с этой допустимой точностью.*

Практическая значимость. *Предложенные алгоритмы подготовки информации о внешних контурах плоских геометрических объектов для эффективного автоматизированного проектирования рациональных схем раскроя материалов на эти плоские геометрические объекты были реализованы в программный продукт для уплотнения информации о внешних контурах при* *кусочно-линейной аппроксимации этих контуров. В результате уплотнения полученная информация о внешних контурах плоских геометрических объектов обеспечит сокращение времени автоматизированного проектирования рациональных схем раскроя в несколько раз.*

Ключевые слова: *внешний контур; плоский геометрический объект; деталь; аппроксимация; уплотнение информации; рациональная схема раскроя; математическое и программное обеспечение.*

CHUPRYNKA V. I., CHUPRYNKA N. V., VASYLENKO O. L., NAUMENKO B. V.
Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine

PREPARATION OF INFORMATION ON THE EXTERNAL CONTOURS OF FLAT GEOMETRIC OBJECTS FOR EFFECTIVE AUTOMATED DESIGN OF RATIONAL CUTTING SCHEMES

Purpose. *To develop mathematical and software for preparing information about the external contours of flat geometric objects for effective automated design of rational schemes for cutting materials for these flat geometric objects.*

Methodology. *During the development of algorithms for the preparation of information about the external contours of flat geometric objects with acceptable approximation accuracy, the methods of analytical geometry and applied mathematics were used.*

Findings. *For the effective use of the software for the automated design of rational schemes for cutting materials into flat geometric objects, algorithms for preparing information about the external contours of flat geometric objects with acceptable accuracy are proposed, which ensure a reduction in the time of automated design of rational schemes for cutting several times. This is especially important for interactive design and correction of cutting patterns. After analyzing the value of the exact display coefficient for a given approximation accuracy, it is recommended to select the allowable approximation accuracy for automatic preparation of information about the external contours of shoe parts in the range of 0.5 mm* $\leq \varepsilon \leq 0.25$.

Originality. *Algorithms for preparing information about the external contours of flat geometric objects for efficient automated design of rational schemes for cutting materials for these flat geometric objects are proposed, which determine the permissible accuracy of the piecewise linear approximation of these contours and ensure their approximation with this permissible accuracy.*

Practical value. *The proposed algorithms for preparing information about the external contours of flat geometric objects for efficient automated design of rational schemes for cutting materials for these flat geometric objects were implemented in a software product for compacting information about external contours during piecewise linear approximation of these contours. As a result of compaction, the information obtained about the external contours of flat geometric objects will reduce the time of automated design of rational cutting patterns by several times.*

Key words: *external contour; flat geometric object; detail; approximation; compaction of information; rational cutting scheme; mathematical and software.*