

УДК 621.81/.85

П. І. Літовченко, О. О. Кириченко, А. О. Іванченко

### РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ОПТИМАЛЬНОГО РОЗТАШУВАННЯ ШКІВІВ БАГАТОШКІВНОЇ ПАСОВОЇ ПЕРЕДАЧІ

*Розглядається проблема автоматизованого пошуку координат оптимального розташування шківів багатошківних клинопасових передач, яке забезпечує зменшення потрібної сили попереднього натягу, напружень у гілках паса та радіальних зусиль на валах.*

**Постановка проблеми.** На тягову здатність і довговічність пасів багатошківних пасових передач, їх працездатність впливають кути нахилу гілок паса, кути обхвату шківів, довжина паса, які залежать від взаємного розташування шківів передачі. Для отримання мінімальних габаритів передачі і підвищення її працездатності необхідно виконати оптимальну компоновку, тобто підібрати найвигідніше розташування шківів, траєкторію руху натяжного елемента (ролика або шківа). У проектуванні пасових передач приводів агрегатів автомобільних двигунів пріоритетом є компактна компоновка двигуна, а не забезпечення вигідного розташування елементів пасової передачі. З цієї причини розроблення методик і засобів оптимізації розташування шківів багатошківної пасової передачі з натяжним роликом, яке дозволяє підвищити експлуатаційні характеристики передачі, є актуальною задачею.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У роботі [1] послідовно вирішувались задачі створення узагальнених залежностей і методик розрахунку геометричних параметрів багатошківних передач різної конфігурації, а потім у статті [2] – раціонального розташування їх шківів, яке забезпечує максимальну величину кута обхвату на всіх шківах передачі. Запропоновано основні шляхи вирішення проблеми раціонального розташування шківів, встановлено, що ця задача має множини рішень, тому потребує застосування механізму швидкого пошуку оптимального рішення.

**Метою статті** є розроблення на основі дослідження геометричних характеристик багатошківної пасової передачі методики та алгоритму пошуку оптимального розташування її шківів та комп'ютерної програми для реалізації вказаної методики.

Для проведення досліджень використано геометричний образ пасової передачі двигунів ЗМЗ-4061, ЗМЗ-4063 (рис.1), якими комплектуються автомобілі “Газель”, і програму Belt\_drive розрахунку геометричних параметрів пасових передач, яку запропоновано у роботах [1, 2].

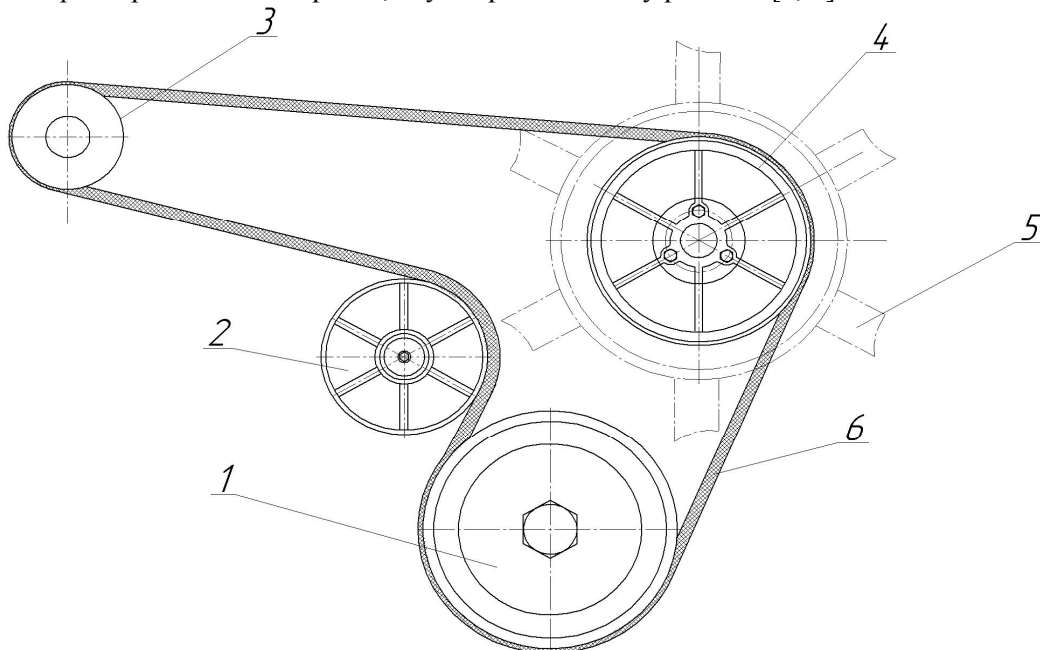


Рис. 1. Схема пасової передачі двигуна ЗМЗ-4061 автомобіля ГАЗ-3221: 1– ведучий шків, встановлений на колінчастому валу двигуна; 2 – натяжний ролик; 3 – шків приводу генератора; 4 – шків приводу вентилятора і водяного насоса; 5 – вентилятор; 6 – пас клиновий

**Виклад основного матеріалу.** Було проведено чисельні розрахункові експерименти щодо визначення геометричних параметрів передачі з координатами шківів, які варіювалися. При цьому розглядалася залежність від координат розташування шківів кута обхвату  $\alpha_4$ , значення якого менше нормативного  $[\alpha] = 120^\circ$ . У процесі дослідження за допомогою вказаних засобів пасової передачі двигуна ЗМЗ-4061 після попередніх розрахунків було встановлено, що для базової конфігурації передачі кути обхвату шківів мають такі значення:

$$\alpha_1 = 182,77^\circ > [\alpha] = 120^\circ; \alpha_3 = 169,75^\circ > [\alpha] = 120^\circ; \alpha_4 = 107,62^\circ < [\alpha] = 120^\circ,$$

де  $\alpha_1$  – кут обхвату пасом ведучого шківів 1, розташованого на колінчастому валу двигуна;  $\alpha_3$  – кут обхвату пасом шківів 3 приводу генератора;  $\alpha_4$  – кут обхвату пасом шківів 4 приводу водяного насоса і вентилятора;  $[\alpha] = 120^\circ$  – мінімальне рекомендоване значення кута обхвату шківів для клинопасових передач.

Як бачимо, кут обхвату шківів 4 не відповідає умові достатності. Розрахуємо параметри пасової передачі, яка забезпечить достатність кута обхвату на всіх шківів.

Об'єктами оптимізації є кути обхвату  $\alpha_1$ ,  $\alpha_3$ ,  $\alpha_4$  ведучого шківів 1, шківів приводу генератора 3, вентилятора та водяного насоса 4 (рис. 2).

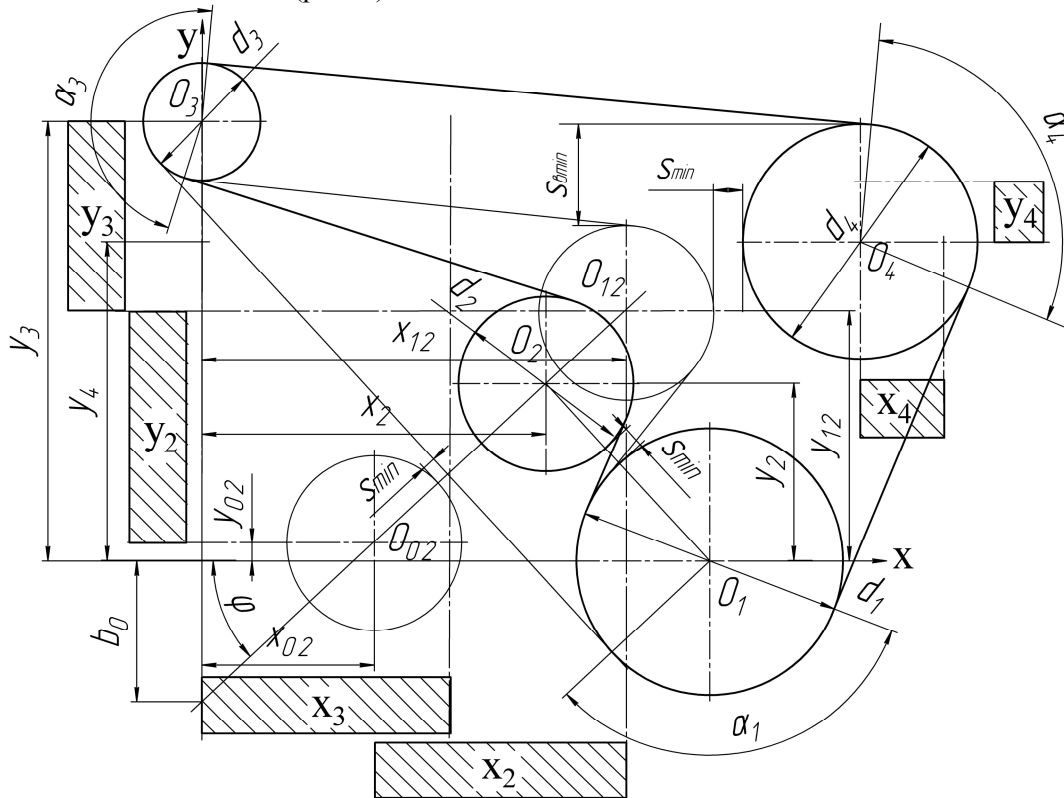


Рис. 2. Розрахункова схема передачі та діапазони значень координат центрів шківів

Метою оптимізації є максималізація кутів обхвату на всіх трьох шківів передачі, тоді цільову функцію в загальному вигляді можна записати як:

$$F(x_1, y_1, x_2, y_2, x_3, y_3, x_4, y_4) = \alpha_1 + \alpha_3 + \alpha_4, \quad (1)$$

де  $\alpha_1$ ,  $\alpha_3$ ,  $\alpha_4$  – кути обхвату, відповідно, ведучого і двох ведених шківів;  $x_1, y_1, x_3, y_3, x_4, y_4$  – координати центрів шківів;  $x_2, y_2$  – координати центра натяжного ролика.

Якщо підставити у формулу (1) значення кутів обхвату, виражені через координати центрів шківів, залежності для визначення яких наведені в роботі [1], отримаємо остаточний вид цільової функції:

$$F(x_1, y_1, x_2, y_2, x_3, y_3, x_4, y_4) = \frac{3}{2}\pi + \arctg \frac{y_2}{x_1 - x_2} + \arctg \frac{x_2}{y_3 - y_2} + \arcsin \frac{d_1 + d_2}{2a_{12}} + \arcsin \frac{d_2 + d_3}{2a_{23}}, \quad (2)$$

де  $d_1$  – діаметр ведучого шківів;  $d_2$  – діаметр натяжного ролика;  $d_3$  – діаметр шківів приводу генератора.

Вважатимемо, що оптимальне розташування всіх шківів передачі буде досягнуто за рахунок

варіювання положенням шківів 3 і 4 в системі координат  $xu$ , яка жорстко зв'язана з нерухомим шківом 1. У цьому випадку координати  $x_3, y_3, x_4, y_4$  будемо вважати варійованими, саме вони складуть остаточний список аргументів цільової функції (2).

Обмеження на аргументи цільової функції.

1. Координати  $x_1, y_1$  шківів 1, встановленого на колінчастому валу двигуна, вважатимемо незмінними.
2. Діапазони значень координат центра натяжного ролика:

$$x_{02} + (S_{\min} + 5 \dots 10 \text{ мм}) \cdot \cos \varphi \leq x_2 \leq x_{12}, \quad (3)$$

$$y_{02} \leq y_2 \leq y_{12}. \quad (4)$$

Координати  $x_{02}, y_{02}, x_{12}, y_{12}$  кінцевих положень натяжного ролика визначаються за залежностями, запропонованими у праці [1], як функції координат центрів шківів, тому вважатимемо ці координати не варійованими.

3. Обмеження на координати  $x_4$  і  $y_4$  центра шківів 4 встановлювались з таких міркувань. Мінімальні значення абсциси  $x_4$  та ординати  $y_4$  вважатимемо такими, які забезпечуватимуть відсутність нерегламентованого контакту елементів передачі між собою. За верхню границю абсциси приймаємо деяке її максимальне значення  $x_{4\max}$ , яке залежить від конструктивних вимог. Максимальне значення  $y_4$  визначаємо з умови неперевикнення базових габаритів передачі по висоті, тоді остаточно матимемо обмеження для координат центра шківів 4:

$$x_{12} + (d_2 + d_4) / 2 + S_{\min} \leq x_4 \leq x_{4\max}, \quad (5)$$

$$y_{12} + (d_1 + d_4) / 2 + S_{\min} \leq y_4 \leq y_3 - (d_4 - d_3) / 2. \quad (6)$$

4. Діапазони значень координат  $x_3$  та  $y_3$  центра шківів 3 визначаємо, виходячи з аналогічних міркувань. Нижньою границею вказаної координати вважатимемо її базове значення  $x_3 = 0$ , а верхнє значення визначатимемо з умов відсутності нерегламентованого контакту рухомих елементів передачі. Максимальне значення ординати  $y_3$  приймаємо рівним базовому з міркувань незбільшення габаритів передачі порівняно з базовими. Для виключення неприпустимого перегину паса між ординатами центрів шківів 3 і натяжного ролика 2 повинно постійно виконуватися співвідношення  $y_3 \geq y_2$ . Тоді обмеження для координат центра шківів 3:

$$0 \leq x_3 \leq x_{12} + (d_2 + d_4) / 2 + S_{\min}, \quad (7)$$

$$y_2 \leq y_3 \leq y_{3\max}. \quad (8)$$

Ураховуючи проведені перетворення, остаточний вигляд цільової функції буде таким:

$$F(x_3, y_3, x_4, y_4) = \frac{3}{2} \pi + \arctg \frac{y_2}{x_1 - x_2} + \arctg \frac{x_2}{y_3 - y_2} + \arcsin \frac{d_1 + d_2}{2a_{12}} + \arcsin \frac{d_2 + d_3}{2a_{23}}. \quad (9)$$

Для пошуку параметрів оптимального розташування шківів було застосовано метод Хука–Дживса [3] прямого пошуку мінімального значення функції – пошук мінімального значення  $F = -F(x_3, y_3, x_4, y_4)$ , модифікований для випадку наявності обмежень аргументів функції у формулах (3... 8). Цей метод ґрунтується на пошуку мінімуму функції окіл деякої заданої базової точки. Розрахунки показали, що при такому методі неможливо рухатись повздовж границі обмежень, оскільки збіжність досягається у першій же точці границі, де й знаходиться рішення. Це рівнозначно тому, що цільова функція (9) у просторі обмежень має кілька локальних мінімумів, кожен з яких обчислюється окіл деякої базової точки. З урахуванням цього було розроблено такий загальний алгоритм пошуку координат оптимального розташування шківів:

– у області обмежень функції створюється кінцевий масив базових точок із заданими значеннями варійованих параметрів  $x_{3i}, y_{3i}, x_{4i}, y_{4i}$ ;

– для кожної базової точки виконується пошук локального мінімуму  $F_{\min i}$ ; при цьому створюється масив таких локальних мінімумів, кожен з яких характеризується набором параметрів  $x_{3i}, y_{3i}, x_{4i}, y_{4i}$ ;

– з масиву знайдених рішень за заданими критеріями вибирається найбільш раціональне рішення.

Сутність модифікації алгоритму полягала в тому, що кожна точка, отримана у процесі пошуку, перевірялася на належність її області обмежень. Якщо ця умова виконувалася, то значення функції вираховувалося за формулою (9), а якщо ні – функції присвоювалося завідомо дуже велике значення.

Для реалізації цього методу розроблено процедуру, за допомогою якої модернізована програма Belt\_drive розрахунку геометричних параметрів клинопасових передач [1]. Схема модернізованого алгоритму мінімізації функції за методом Хука–Дживса наведена на рис. 3. У головне вікно модернізованої програми Belt\_drive (див. рис. 4) додано панель вводу даних для оптимізації. Як видно з цього рисунку, у програмі створено діалог

для інтерактивного вводу і збереження масивів координат базових точок.

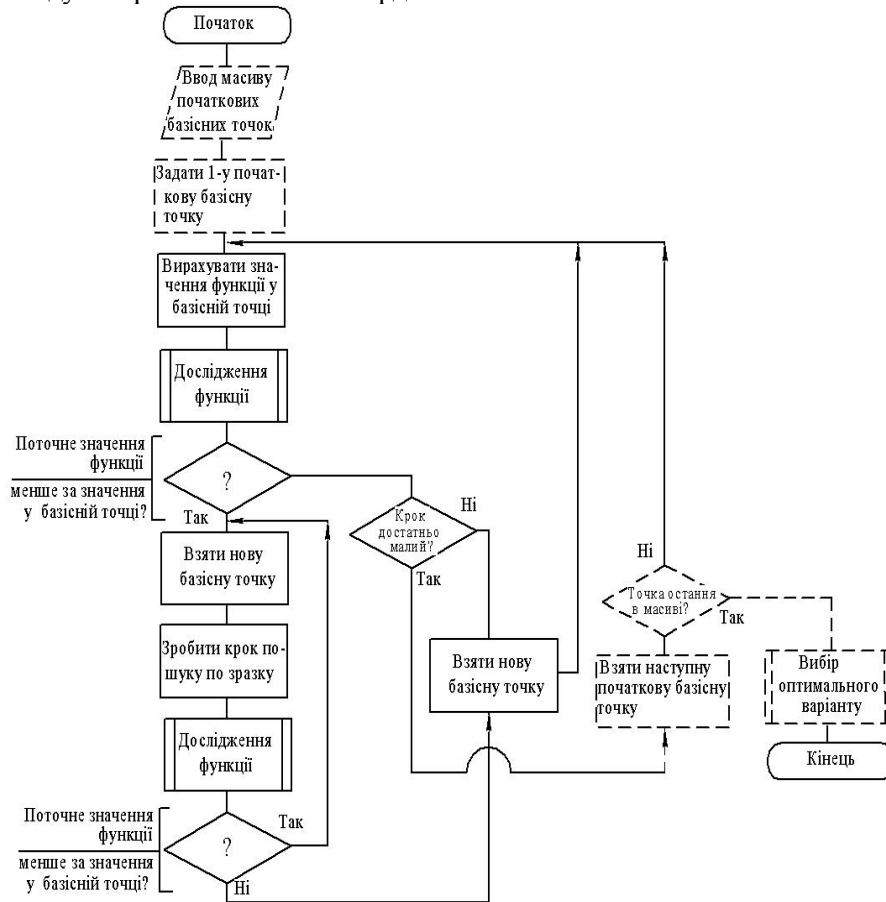


Рис. 3. Модернізований алгоритм методу Хука–Дживса



Рис. 4. Головне вікно програми розрахунку геометричних параметрів пасових передач з панеллю вводу даних

Крім того, для візуалізації результатів розрахунків аналітичних досліджень розроблено графічну процедуру, яка накреслює суміщені схеми варіантів передач.

Було проведено численні розрахункові експерименти щодо пошуку оптимального розташування шківів передачі, схема якої наведена на рис. 1. Найкращий результат отримано при оптимізації окіл базової точки зі значеннями варійованих координат  $x_3 = 0$  (базове значення),  $y_3 = 121$ ;  $x_4 = 315$ ,  $y_4 = 115$  (базове значення).

Результати розрахунків базового та оптимізованого варіантів наведені у таблиці, схеми варіантів передачі наведені на рис. 5 (світла лінія – базова передача, темніша – оптимізована).

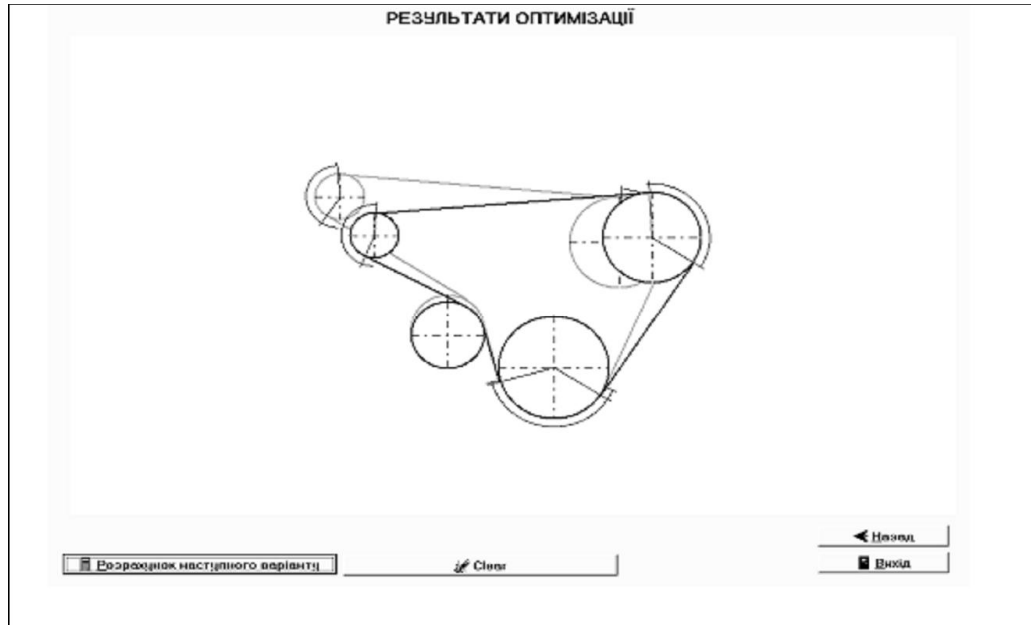


Рис. 5. Схеми базової і оптимізованої передач у графічному вікні програми Belt\_drive

Т а б л и ц я

Параметри Варіанти	$a_{12}$ , мм	$a_{23}$ , мм	$a_{34}$ , мм	$a_{14}$ , мм	$\alpha_1$ , °	$\alpha_3$ , °	$\alpha_4$ , °	$L_{\min}$ , мм
Базовий	115,23	202,54	314,84	167,29	182,33	169,86	107,87	1156,56
Оптимізований	117,08	179,73	349,23	194,22	171,46	175,67	126,91	1200,39

Аналіз таблиці показує, що кути обхвату на всіх шківів передачі перевищують мінімальне значення  $120^\circ$ , що підтверджує досягнення мети оптимізації. При цьому спостерігається незначне збільшення потрібної довжини паса.

Для оцінювання зміни значень силових факторів у оптимізованій передачі визначалась величина сили попереднього натягу  $F_0$  для базового і вдосконаленого варіантів.

Оскільки варіанти передачі, які розглядаються, відрізняються лише кутом обхвату шківів  $\alpha_4$ , отримано формулу для розрахунку сили натягу паса, виражену через цей параметр.

Із роботи [4] відомо, що співвідношення між силами у ведучій і веденій гілках паса та силою корисного опору (коловою силою)  $F_t$  можна описати залежністю:

$$F_1 - F_2 = F_t, \quad (10)$$

де  $F_1$  – сила у ведучій гілці паса;  $F_2$  – сила у веденій гілці паса.

Залежність між силами в гілках паса виражається за допомогою формули Ейлера:

$$F_1 = F_2 e^{f' \alpha_4}, \quad (11)$$

де  $f'$  – зведений коефіцієнт тертя між пасом і шківом;  $\alpha_4$  – кут обхвату шківів 4.

Якщо за допомогою формули (11) виразити силу  $F_1$  через  $F_2$  і підставити у формулу (10), то після деяких перетворень можна отримати:

$$F_2 = \frac{F_t}{e^{f'\alpha_4} - 1}. \quad (12)$$

З іншого боку, зв'язок між силою у веденій гілці паса, коловою силою і силою попереднього натягу паса описується залежністю:

$$F_2 = F_0 - 0,5F_t. \quad (13)$$

Якщо порівняти праві частини виразів (12) і (13) та розв'язати рівняння відносно  $F_0$ , то можна отримати залежність для розрахунку сили попереднього натягу паса при різних кутах обхвату ведучого шківів:

$$F_0 = F_t \left( \frac{1}{e^{f'\alpha_4} - 1} + 0,5 \right). \quad (14)$$

Вважаючи шків 4 веденим по відношенню до шківів 3, проведено розрахунки сили попереднього натягу  $F_0$  для базового і удосконаленого варіантів передачі. Розрахунки показали, що раціональне розташування шківів разом із збереженням тягової здатності дозволяє зменшити силу натягу паса на 9 %, а напруження у ведучій його гілці на 7 %, також зменшується на 3 % радіальна сила, яка діє на вал водяного насоса.

Нижче наведено алгоритм розрахунку оптимального розташування шківів:

- за допомогою програми Belt\_drive визначаються кути обхвату на всіх шківів передачі;
- визначається критичний шків (шківів), на якому кут обхвату менше припустимого значення;
- визначаються шківів, координати яких можна змінювати для збільшення кута обхвату на критичному шківів;
- після розрахунків за допомогою програми Belt\_drive визначаються координати шківів удосконаленої передачі.

Проте слід пам'ятати, що отримане рішення може бути не найкращим у просторі обмежень параметрів цільової функції з двох причин:

- через недоліки застосованого методу пошуку мінімального значення функції та складність самої функції, яка має декілька локальних мінімумів;
- через недосконалість методу вибору масиву базових точок, який створений простим діленням діапазонів обмежень варіюваних параметрів цільової функції.

### **Висновки**

Таким чином, у результаті проведених досліджень розроблено методику та алгоритм пошуку координат оптимального розташування шківів багатошківної клинопасової передачі, яке забезпечує максимальні значення кутів обхвату пасом всіх шківів, а отже, зменшення потрібної сили попереднього натягу паса, напружень у його гілках, та радіального навантаження на вали.

Перспективним напрямом досліджень є подальша формалізація процесу оптимізації, а саме, удосконалення процесу створення масиву базових точок за допомогою методу Хука–Дживса або застосування більш складних методів оптимізації.

### **Список використаних джерел**

1. Литовченко П. И. К расчету геометрических параметров ременной передачи с тремя шкивами / П. И. Литовченко // Вопросы проектирования и производства летательных аппаратов : сб. науч. тр. Нац. аэрокосмич. ун-та им. Н. Е. Жуковского "ХАИ". – Вып. 1 (44). – Х., 2006. – С. 131–136.
2. Літовченко П. І. Розрахунок параметрів раціонального розташування шківів багатошківної пасової передачі / П. І. Літовченко // Збр. наук. пр. Акад. ВВ МВС України. – Вип. 1(11). – Х., 2008. – С. 32–35.
3. Банди Б. Методы оптимизации. Вводный курс : пер с англ. / Б. Банди – М. : Радио и связь, 1998. – 128 с.
4. Павлице В. Т. Основи конструювання та розрахунок деталей машин / В.Т. Павлице – Л. : Афіша, 2003. – 560 с.

*Стаття надійшла до редакції 04.12.2008 р.*