

ОПТИМІЗАЦІЯ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ ДИСКОВИХ КОПАЧІВ

Р.Б.ГЕВКО, к.т.н.; О.Б.ПАВЕЛЧАК, інженер

В загальному вигляді оптимізація дискових копачів є багатокритеріальною задачею нелінійного програмування, в якій шукані параметри повинні відповідати вимогам мінімізації пошкоджень, втрат, крутного моменту на диску і загальних енерговитрат [1].

Враховуючи те, що з експлуатаційної точки зору конструктивно найбільш вразливим є питання надійності редукторів копачів, то за критерій якості доцільно взяти функцію

$$f_0 = \alpha_1 M + \alpha_2 Q_X \frac{v_M}{\omega} \quad (1)$$

де M - крутний момент на диску копача;

Q_X - осьове зусилля на кронштейні копача по ходу машини (лобова сила опору);

v_M - швидкість бурякозбиральної машини;

ω - кутова швидкість диска копача;

α_1 та α_2 - коефіцієнти вагомості, що в першу чергу враховують конструктивні особливості копача та їх надійність і вибираються із умови

$$\frac{\alpha_1}{\alpha_1 + \alpha_2} = 0.7 \dots 0.9$$

Згідно [2]

$$M = \mu r_{cp} \sqrt{2r^3 \Delta h^3} \left(1 - \frac{\Delta h}{2r} \right) \frac{v_M (v_d - v_M)}{v_d^2}; \quad (2)$$

$$Q_X = k_Q M = \frac{2(\cos \beta \sin \alpha - \mu k_X \cos \alpha) M}{\mu \left(r - \frac{\Delta h}{2 \cos \beta} \right)}$$

де r - радіус кромки диска копача;

Δh - глибина заглиблення дисків;

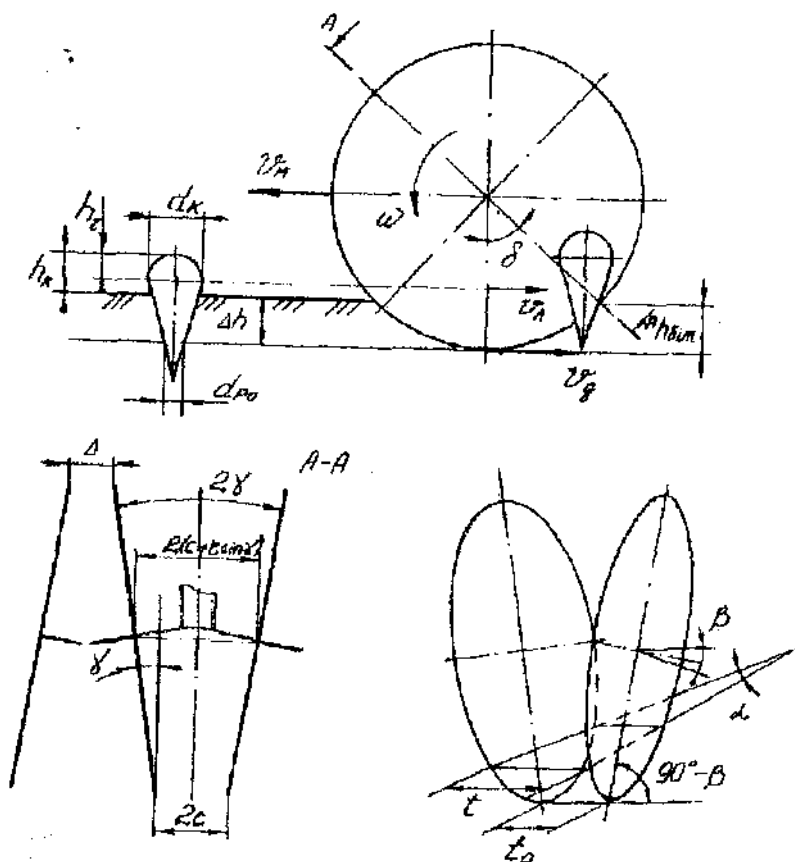


Рис.1. Розрахункова схема до визначення оптимальних конструктивних параметрів копаців.

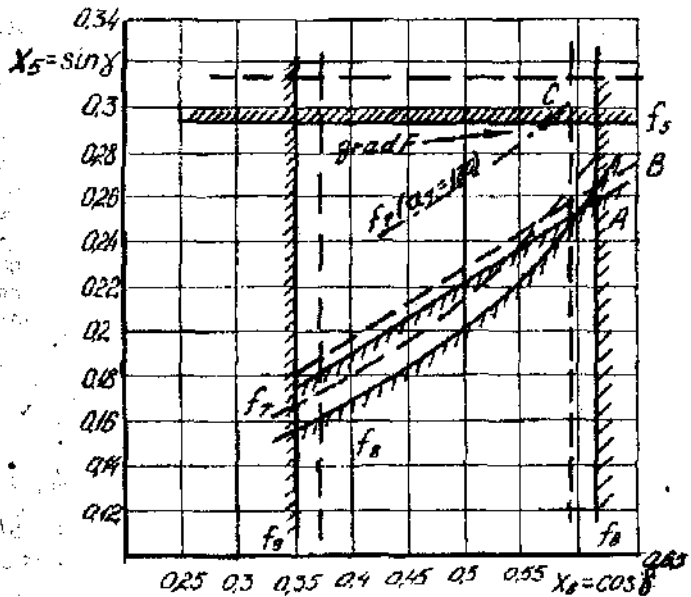


Рис.2. Область визначення параметрів x_5 та x_6 обмежена функціями f_i при заглибленні копачів $h \leq 100$: А, В, С - точки можливого розміщення оптимальних значень; для копачів радіусом $r=340$ мм; для $r=320$ мм

2α - кут розхилу копачів в перетині з горизонтальною площиною;

β - кут нахилу осі диска до горизонтальної площини;

v_a - лінійна швидкість кромки диска, $v_a = \omega \cdot r$.

За незалежні параметри x_i , що описують конструкцію дисків копачів і режими їх роботи, які підлягають оптимізації з метою мінімізації цільової функції, приймаємо лінійну кутову швидкість машини $x_1 = v_M$ швидкість обертання дисків $x_2 = \omega$ радіус диска $x_3 = r$, глибину заглиблення

$x_4 = \Delta h$, а також кути встановлення диска α та β , рис.1.

З метою зменшення рівня складності задачі за незалежні кутові параметри доцільно приймати кут нахилу дисків один до другого 2γ та кут атаки δ (кут повороту лінії максимального розхилу від вертикальної осі), тобто приймемо $x_5 = \sin \gamma$; $x_6 = \cos \delta$;

Вказані параметри γ та δ із кутами просторового розміщення дисків α та β пов'язані залежностями:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\sin \alpha}{\operatorname{tg} \beta}; \quad \cos \gamma = \cos \alpha \cos \beta. \quad (4)$$

Отже множина незалежних параметрів x_j буде складати

$$\{x_j\} = \{v_M, \omega, r, \Delta h, \sin \gamma, \cos \delta\}.$$

На їх зміну накладаються фізичні, конструкторсько-технологічні та експлуатаційні обмеження із яких виділимо найбільш значущі.

1. Обмеження експлуатаційної швидкості машини із умови неперевикнення значення v_{max} , що приводить до збільшення втрат вище допустимих значень [1], чи різкого збільшення потужності збирання

$$x_1 = v_M \leq v_{max} \quad (5)$$

Представимо цю умову у вигляді функції обмеження

$$f_1 = x_1 - v_{max} \leq 0 \quad (6)$$

2. Обмеження мінімальної кутової швидкості диска із умови зтягування коренеплоду дисками і попередження його злому. Для цього лінійна швидкість поверхні дисків на радіусі, що відповідає рівню максимальних діаметрів коренеплодів, повинна перевищувати лінійну швидкість машини (рис. 1), тобто

$$v_A = \omega r_K = \omega(r - \Delta h - h_K + h_r) > v_M$$

де h_r та h_K - відповідно висота головки коренеплоду та висота рівня їх розміщення відносно поверхні ґрунту. Розрахункові значення згідно [1] становлять $h_r = 32,4$ мм, $h_K = 42,4$ мм.

Відповідно функція обмеження

$$f_2 = -(x_3 - x_4 - h_K + h_r)x_2 + x_1 \leq 0. \quad (8)$$

3. Обмеження радіуса дисків r не менше мінімального значення r_{min} , що визначається конструктивно із врахуванням ширини ріжучого леза, необхідних розмірів просівних отворів дисків, діаметру редукторів копачів, отже можна представити функцію

$$f_3 = r_{min} - x_3 \leq 0. \quad (9)$$

4. Обмеження по глибині копання із умови збирання коренеплодів при максимальній врожайності, де регульована глибина копання $\Delta h_p = 100$ мм. Зобразимо у вигляді

$$f_4 = -x_4 + \Delta h_p \leq 0. \quad (10)$$

5. Обмеження, що накладаються шириною міжрядь і необхідністю компоновки машини [1]

$$4r \sin \gamma \leq b - 2c - \Delta, \quad (11)$$

де b - ширина міжрядь;

Δ - мінімально допустима віддаль між дисками суміжних копачів;

$2c$ - максимальне значення регульованої віддалі між дисками одного копача.

Функція обмеження буде

$$f_5 = x_3 x_5 - a_5 \leq 0 \quad (12)$$

де a_5 - параметри, $a_5 = \frac{b - 2c - \Delta}{4}$.

6. Обмеження мінімального значення кута атаки із умови розтиску коренеплода по висоті $h_{\text{оім}}$, достатній для його захвату бітером, тобто

$$r - r \cos \delta \geq h_{\text{оім}}, \quad (13)$$

$$\text{чи } f_6 = -x_3 (1 - x_6) + h_{\text{оім}} \leq 0. \quad (14)$$

7. Обмеження на мінімальну величину розхилу дисків із умови неперізаання коренеплодів великого діаметру d_K при допустимому його відхиленні в ряду $\Delta_{\text{рлл}}$.

При цьому ширина захоплення $t \geq a_7$ у міждисковому просторі на рівні ґрунту повинна бути

[1]

$$t = \sin \gamma \left[r + \frac{\Delta h - r(1 - \sin \delta)}{\cos \delta} \right] \geq d_K + 2\Delta_{\text{рлл}} = a_7. \quad (15)$$

Відповідно функція обмеження

$$f_7 = a_7 x_6 - x_5 \left[x_3 (x_6 - 1 + \sqrt{1 - x_6^2}) + x_4 \right] \leq 0 \quad (16)$$

8. Обмеження на мінімальний розхил t_0 в нижній точці дисків копачів, що вводиться як додаткове при їх конструюванні із зменшеним радіусом

$$t_0 = 2 \left[C + r(1 - \cos \delta) \sin \gamma \right] \geq d_{\text{рo}} \quad (17)$$

де $d_{\text{рo}}$ - розрахункова величина діаметра коренеплоду на рівні нижньої кромки копачів із врахуванням його зміщення.

Тоді

$$f_g = a_g - x_7 x_5 (1 - x_6) \leq 0 \quad (18)$$

де $a_g = \frac{d_{po}}{2} - C$ - параметр функції f_g .

9. Із умови незатягування коренеплодів копачами точка мінімуму якого сходження дисків повинна бути розміщена нижче їх осової ділі на певну величину ε , тобо $r \cos \delta \geq \varepsilon$.

Відповідно

$$f_p = -x_7 x_6 + \varepsilon \leq 0 \quad (19)$$

Аналіз зміни цільової функції f_0 в області допустимих значень $\{x_i\}$ і

визначення точки оптимуму проводимо з використанням умови Куна-Таккера [3], якаполягає у існуванні таких множників

$$u_i \geq 0, i = 1 \dots n, \text{ що } u_i f_i = 0 \text{ та } \frac{\partial \Phi(u_i, x_i)}{\partial x_i} = 0,$$

де $\Phi(u_i, x_i) = f_0 + \sum u_i f_i$ - функція Лагранжа.

Визначимо часткові похідні функції Лагранжа

$$\frac{\partial \Phi(u_i, x_i)}{\partial x_1} = \frac{\partial f_0}{\partial x_1} + u_1 + u_2 = 0;$$

$$\frac{\partial \Phi(u_i, x_i)}{\partial x_2} = \frac{\partial f_0}{\partial x_2} - u_2 (x_3 - x_6 + h_r - h_k) = 0; \quad (20)$$

$$\frac{\partial \Phi(u_i, x_i)}{\partial x_3} = \frac{\partial f_0}{\partial x_3} - u_2 k_2 - u_3 + u_5 x_5 - u_6 - u_7 x_5 (x_6 - 1 + \sqrt{1 - x_6^2}) - u_8 x_5 (1 - x_6^2) - u_9 x_6 = 0;$$

$$\frac{\partial \Phi(u_i, x_i)}{\partial x_4} = \frac{\partial f_0}{\partial x_4} + u_2 x_2 - u_4 - u_7 x_5 = 0;$$

$$\frac{\partial \Phi(u_i, x_j)}{\partial x_5} = \frac{\partial f_0}{\partial x_5} + u_5 x_3 - u_7 x_3 \left(x_6 - 1 + \sqrt{1 - x_6^2} \right) - u_8 x_3 (1 - x_6) = 0,$$

$$\frac{\partial \Phi(u_i, x_j)}{\partial x_6} = \frac{\partial f_0}{\partial x_6} + u_6 x_3 + u_7 \left(a_7 - x_3 x_5 \left(1 - \frac{2x_6}{\sqrt{1 - x_6^2}} \right) \right) + u_8 x_3 x_5 - u_9 x_3 = 0.$$

Аналіз цільової функції показує, що в області визначення параметрів x_i , що задаються функціями обмежень f_j , цільова функція не має глобального мінімуму і її часткові похідні відмінні від нуля, причому

$$\frac{\partial f_0}{\partial x_1} < 0; \frac{\partial f_0}{\partial x_2} > 0; \frac{\partial f_0}{\partial x_3} > 0; \frac{\partial f_0}{\partial x_4} > 0; \frac{\partial f_0}{\partial x_5} > 0; \frac{\partial f_0}{\partial x_6} > 0; \quad (21)$$

Із всіх теоретично можливих варіантів розв'язку даної задачі нелінійного програмування шляхом перебору вибираємо три, що можуть мати місце при реальному проектуванні дискових копачів бурякозбиральних машин.

В першому варіанті координати x_i точки оптимуму визначаються із спільного розв'язку системи складеної із таких обмежень

$$f_1 = 0, f_2 = 0, f_3 = 0, f_4 = 0, f_6 = 0, f_8 = 0. \quad (22)$$

Звідси шукані змінні визначаються за залежностями

$$x_1 = v_M = v_{\max};$$

$$x_2 = \omega = \frac{x_1}{x_3 - x_4 - h_K + h_r} = \frac{v_{\max}}{r_{\min} - \Delta h_p - h_K + h_r};$$

$$x_3 = r = r_{\min};$$

$$x_4 = \Delta h = \Delta h_p;$$

$$x_6 = \cos \delta = 1 - \frac{a_6}{x_3} = 1 - \frac{h_{\text{бум}}}{r_{\min}};$$

$$x_5 = \sin \gamma = \frac{a_7 x_6}{x_3 \left(x_6 - 1 + \sqrt{1 - x_6^2} + x_4 \right)} = \frac{(d_K + 2\Delta h_{\text{рна}}) \cos \delta}{r_{\min} \sin \delta - h_{\text{бум}} + \Delta h_p}$$

У випадку коли порушується обмеження $f_5 \leq 0$, то пошук координат точки оптимуму шукають із спільного розв'язку системи

$$f_1 = 0, f_2 = 0, f_4 = 0, f_5 = 0, f_6 = 0, f_7 = 0. \quad (24)$$

В цьому випадку швидкість машини v_M , кутова швидкість колочів ω та глибина заглиблення Δh визначаються так же, як і в попередньому випадку, а параметри r , γ та δ відповідно із залежностей

$$r = h_{\text{ош}} \frac{h_{\text{ош}}}{(1 - \cos \delta)};$$

$$\sin \gamma = \frac{(b - 2c - \Delta)(1 - \cos \delta)}{4h_{\text{ош}}} = \frac{(b - 2c - \Delta)}{4r};$$

$$\cos \delta = \frac{1}{2a'} \left[\sqrt{b'^2 - 4a'c'} + b' \right];$$

$$a' = \left[\frac{4(d_K + 2\Delta_{\text{рш}})}{b - 2c - \Delta} - \frac{\Delta h}{h_{\text{ош}}} - 1 \right]^2 + 1;$$

$$b' = +2 \left[1 + \frac{\Delta h}{h_{\text{ош}}} - \frac{4(d_K + 2\Delta_{\text{рш}})}{b - 2c - \Delta} \right]; \quad c' = \left(1 + \frac{\Delta h}{h_{\text{ош}}} \right)^2 - 1.$$

У випадку, коли отримані значення шуканих величин не задовільняють умову $f_8 \leq 0$, то точку оптимуму шукають із систем

$$f_1 = 0, f_2 = 0, f_4 = 0, f_5 = 0, f_7 = 0, f_8 = 0.$$

Звідки

$$\cos \delta = 1 - \frac{2(d_K + 2\Delta_{\text{рш}})}{b - 2c - \Delta}; \quad (26)$$

$$\sin \gamma = \frac{(b - 2c - \Delta)(\cos \delta + \sin \delta - 1) - 4(d_K + 2\Delta_{\text{рш}}) \cos \delta}{\Delta h};$$

$$r = \frac{b - 2c - \Delta}{4 \sin \gamma}.$$

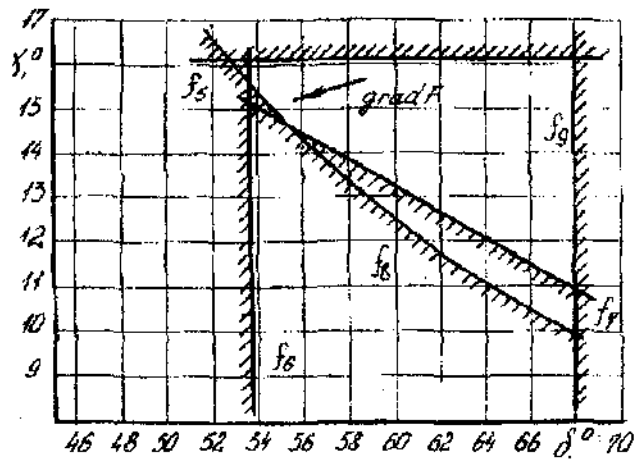
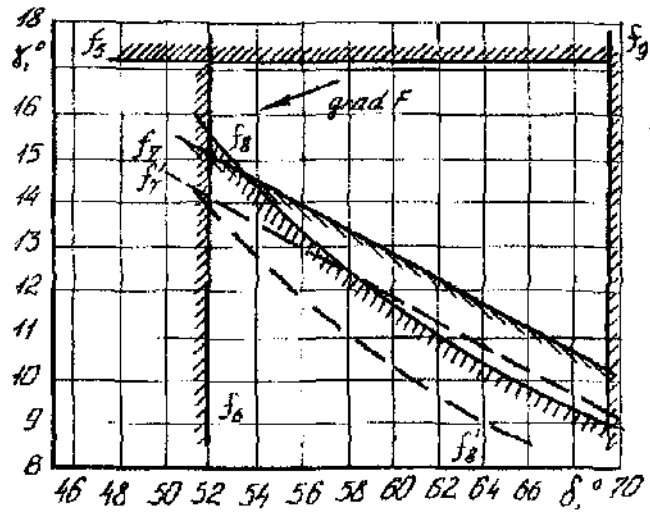


Рис. 3. Схема розміщення оптимальних значень кута нахилу дисків β між собою та кута атаки α для: а- $r=340$ мм, б- $r=320$ мм.

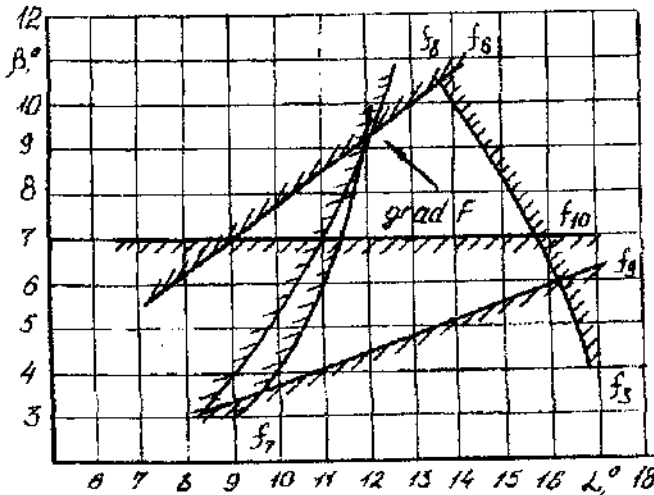


Рис.4.Схема розміщення оптимальних значень кута α розвалу копачів та нахилу осі диска до горизонтальної площини β для копачів з радіусом $r=340$ мм..

За визначеними кутовими параметрами δ та γ значення інших кутових параметрів α та β просторового розміщення диска, у відповідності (4), проводиться залежностями

$$\alpha = \arctg(\operatorname{tg} \gamma \sin \delta);$$

$$\beta = \arcsin(\sin \gamma \cos \delta). \quad (27)$$

На рис.2 показані область зміни параметрів x_2 та x_6 і можливі варіанти розміщення точок оптимуму, що відповідають різним розрахунковим схемам. Відповідно на рис.3 показані зміни та зона оптимального розміщення кутів атаки δ та нахилу дисків γ , а на рис.4 - кутів розвалу копачів α та нахилу осі диска до горизонтальної площини β .

При користуванні схемою рис.4 доцільно ввести додаткове обмеження f_{10} , що уточнює визначення кута β . Згідно [1] та експлуатаційних даних розміщення дисків із кутом нахилу $\beta < 70$ недоцільне.

Вказана методика розрахунку, що полягає в почерговому переборі даних варіантів, які задовільняють всі вказані обмеження, дозволяє аналітичним шляхом визначити оптимальні конструктивні параметри дискового копача та режим роботи коренезбиральної машини і може бути покладена в основу системи автоматизованого або іншого проектування викопувально-очисних систем.

Список літератури

1. Свеклоуборочные машины.(Конструирование и расчет)/Л.В.Погорелый, Н.В.Татьянко, В.В.Брей и др.Под общ.ред.Л.В.Погорелого.-К.:Техника, 1985.-168 с.
2. Гевко Р.Б. Викопувально-очисні пристрої бурякозбиральних машин.:Тернопіль, 1997.
3. Хог Э., Арора Я.Прикладное оптимальное проектирование. Механические системы и конструкции. М., 1977.