

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

Теорія механізмів і машин
Методичні вказівки
до виконання розділу курсового проєкту
«Синтез кулачкових механізмів»
для студентів галузей знань «Механічна інженерія» і «Транспорт»

Затверджено
редакційно-видавничою
радою університету,
протокол №1 від 15.02.24

Харків
НТУ «ХПІ»
2024

Теорія механізмів і машин. Методичні вказівки до виконання розділу курсового проєкту „Синтез кулачкових механізмів” для студентів галузей знань «Механічна інженерія» і «Транспорт» / Уклад. Г.А. Кротенко, О.І. Зінченко, А.О. Зарубіна – Харків: НТУ «ХПІ», – 2024. – 30 с.

Укладачі: Г. А. Кротенко, О. І. Зінченко, А.О. Зарубіна

Рецензент О.І. Пономаренко

Кафедра теорії і систем автоматизованого проектування механізмів і машин

ВСТУП

При вивченні теми курсу ТММ „Кулачкові механізми” теоретичні навички закріплюються при виконанні розділу курсового проекту на тему „Синтез кулачкового механізму”.

У методичних вказівках до виконання цього розділу наведені основні теоретичні визначення і послідовність виконання розрахунків і креслень.

Кулачкові механізми широко використовуються у техніці. Основною їх перевагою є те, що за допомогою них можна забезпечити будь-який закон руху вихідної ланки. Вони є невід’ємною частиною багатьох машинних агрегатів, а тому доцільно розглядати синтез цих механізмів.

Метою даних методичних вказівок є надання студентам навичок проектування різних видів кулачкових механізмів; закріплення та поглиблення теоретичних знань шляхом самостійного розв’язання задачі синтезу кулачкових механізмів.

1. Основні теоретичні визначення розділу

1.1. Кулачкові механізми

Кулачковими механізмами (КМ) називаються механізми (рисунок 1), до складу яких входить вища кінематична пара, одним з елементів якої є поверхня змінної кривизни. Ланку, яка має елемент вищої кінематичної пари, виконаний у вигляді поверхні змінної кривизни, називають *кулачком*.

У КМ вхідною ланкою є кулачок, а вихідною – *штовхач*, якщо ця ланка здійснює зворотно-поступальний рух (див. рис. 1, *а, б*) або *коромисло*, якщо ланка рухається зворотно-коливально (здійснює неповний оберт навколо нерухомої точки) (див. рис. 1, *в*).

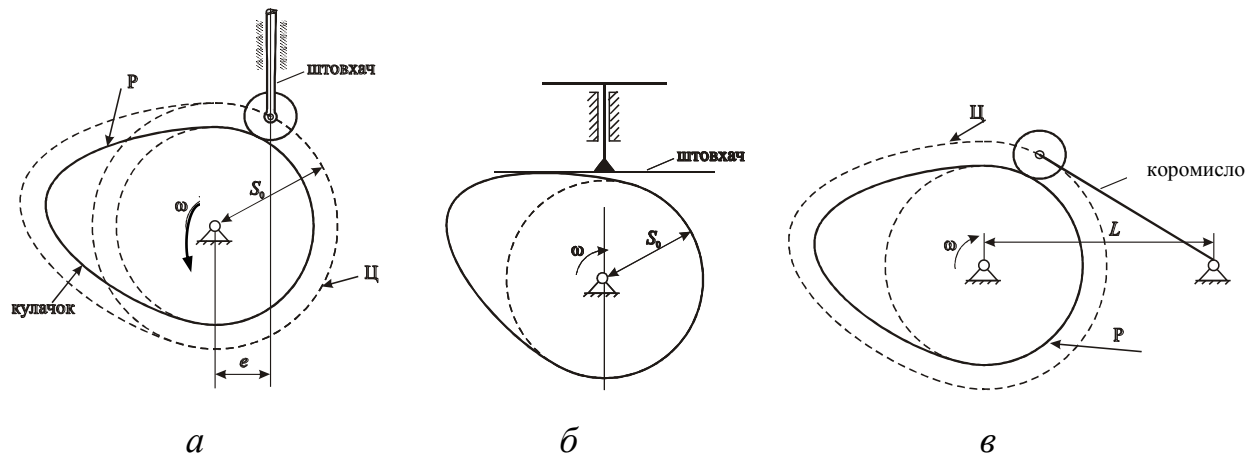


Рисунок 1 – Різновиди КМ: *a* – з роликівим штовхачем (типу РШ); *б* – з плоским штовхачем (типу ПШ); *в* – з роликівим коромислом

1.2. Теоретичний (центровий) профіль

Теоретичний (центровий) профіль кулачка віддалений від *робочого (практичного) профілю* на величину радіуса ролика (див. рис. 1, *a*). Ці два профілі утворюють еквідистантні (рівновіддалені) криві. На рис. 1 теоретичний профіль позначений літерою *Ц* і зображений пунктиром. Це профіль, по якому рухається котиться центр ролика у відносному русі навколо кулачка. Робочий профіль позначений літерою *P* і зображений жирною лінією. Робочим профілем називають реальну поверхню кулачка, яка складає із роликом вищу кінематичну пару.

В КМ з плоским штовхачем (див. рис. 1, *б*) є лише робочий профіль.

Профіль кулачка завжди залежить від обраного закону руху штовхача.

1.3. Фазові кути повороту кулачка

Фазові кути повороту кулачка – це кути, які визначають відповідні періоди руху штовхача (коромисла) (рис. 2). Виділяють: $\varphi_{\text{в}}$ – фазовий кут віддалення (штовхач або коромисло віддаляється від центру кулачка); $\varphi_{\text{д}}$ – фазовий кут дальнього вистою (штовхач або коромисло не рухається); $\varphi_{\text{н}}$ – фазовий кут наближення (штовхач або коромисло наближається до центру кулачка); $\varphi_{\text{б}}$ – фазовий кут ближнього вистою (штовхач або коромисло не рухається). Інколи один або два фазові кути вистою можуть бути відсутніми. Фазові кути повороту зв'язані між собою залежністю: $\varphi_{\text{в}} + \varphi_{\text{д}} + \varphi_{\text{н}} + \varphi_{\text{б}} = 360^{\circ}$.

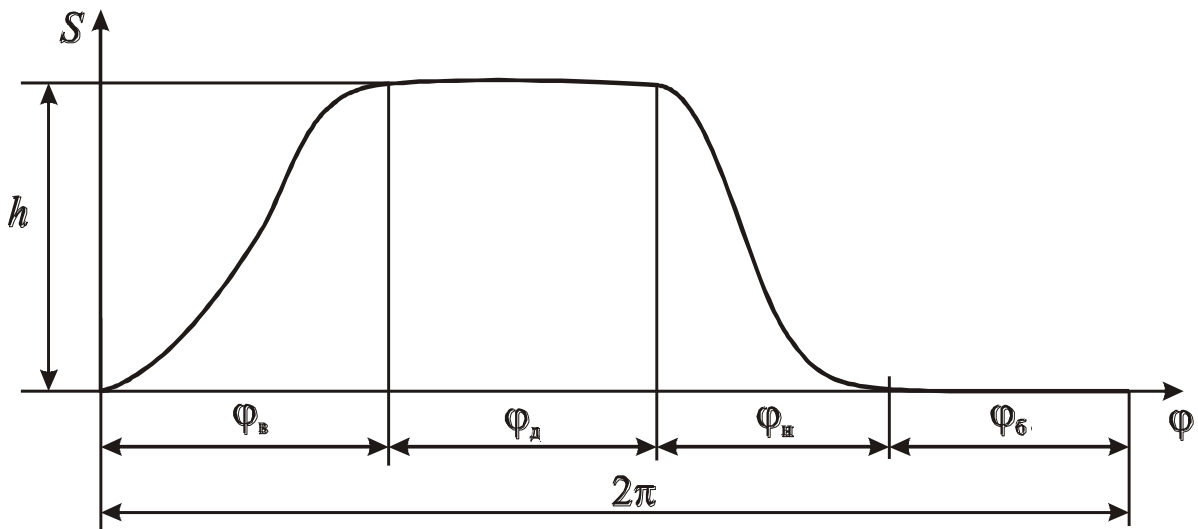


Рисунок 2 – Фазові кути повороту кулачка

1.4. Закони руху вихідної ланки

Відрізняють три основні закони руху: *безударні*, з так званими *м'якими* та з *жорсткими* ударами. Закони руху, в яких прискорення вихідної ланки змінюється миттєво на скінченну величину, викликають м'які удари. Закони, в яких прискорення вихідної ланки змінюються миттєво на нескінченну величину, викликають жорсткі удари. Закони руху, в яких прискорення вихідної ланки змінюється поступово (без стрибків), є безударними.

1.5. Синтез кулачкових механізмів

Задачу синтезу КМ ділять на два етапи. На першому етапі, який називається *динамічним синтезом*, визначають основні розміри: мінімальний радіус кулачка $S_0(r_0)$, ексцентриситет e , міжосьову відстань L (див. рис. 1). На другому етапі, який називається *кінематичним синтезом*, необхідно за заданими законами руху побудувати профіль кулачка.

1.6. Кут тиску

Кутом тиску θ в КМ називається гострий кут між напрямком дії сили Q (реакції з боку кулачка на штовхач) і напрямком переміщення штовхача V_c (швидкості) (рис. 3).

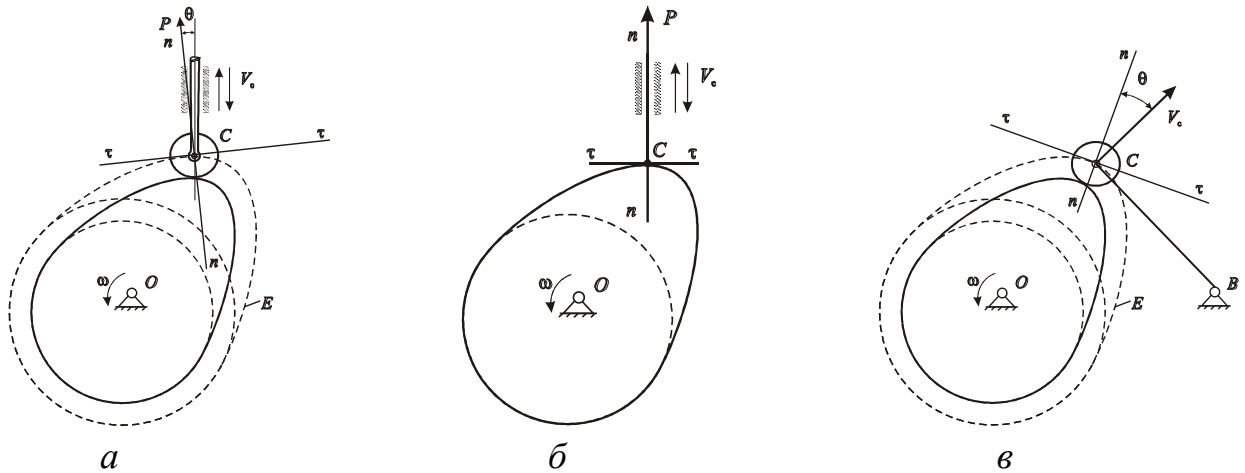


Рисунок 3 – Кути тиску в КМ

2. Послідовність виконання синтезу

У завданні на курсовий проект до розділу “Синтез кулачкового механізму” наведено: вигляд кулачкового механізму (КМ типу РШ, див. рис. 1, *a* або КМ типу ПШ, див. рис. 1, *б*; механізми з коромислом (див. рис. 1, *в*) зустрічаються на практиці значно рідше, тому у завданнях не розглядаються); $S'' = S''(\varphi)$ на фазах віддалення та наближення вихідної ланки; h – хід штовхача, $[\theta]$ – допустимий кут тиску. Закон зміни аналога прискорення позначено номером (N), а його конкретний вигляд відповідно до цього номеру наведено у додатку до завдань на курсовий проект.

Необхідно:

1. Задану функцію $S'' = S''(\varphi)$ аналітично проінтегрувати двічі і одержати функції $S' = S'(\varphi)$ та $\Delta S = \Delta S(\varphi)$, де S' – аналог швидкості штовхача, ΔS – лінійне переміщення штовхача, φ – кут повороту кулачка (відлік починається від початку фази віддалення, див. рис. 2). Побудувати графіки залежностей $S'' = S''(\varphi)$, $S' = S'(\varphi)$, $\Delta S = S(\varphi)$.

2. Знайти основні параметри КМ ($S_0(r_0), e$). Для цього необхідно побудувати графік залежності $S = S(S')$ для КМ типу РШ і графік залежності $(S'' + \Delta S) = (S'' + \Delta S)(\varphi)$ для КМ типу ПШ. Із графіків знайти $S_0(r_0)$ і e .

3. Побудувати теоретичний профіль кулачка для КМ типу РШ або тільки робочий профіль для КМ типу ПШ.

4. Для КМ типу РШ вибрати радіус ролика.

5. Побудувати робочий профіль кулачка для КМ типу РШ.

6. Визначити параметри пружини. Побудувати графік залежності $P_i = P_i(\Delta S)$, де P_i – сила інерції штовхача. Із графіка визначити Q_0 – зусилля попереднього стискання пружини та c – жорсткість пружини.

3. Приклади знаходження залежностей $\Delta S = \Delta S(\varphi)$

Під законом руху вихідної ланки КМ розуміють залежність між переміщеннями вихідної ланки та часом: $\Delta S = \Delta S(t)$

Інколи закон руху задають залежностями: $V = V(t)$ або $a = a(t)$.

У курсовому проєкті вважається, що кулачок обертається рівномірно ($\omega = const$). Тоді закон руху вихідної ланки можна записати як функцію аналога прискорення від кута повороту φ кулачка, оскільки $\varphi = \omega t$ ($S'' = S''(\varphi)$).

Вибір закону руху вихідної ланки є одним із найвідповідальніших етапів, оскільки закон руху визначає динаміку роботи механізмів. Теоретично КМ можуть забезпечувати різноманітні закони руху, але на практиці користуються лише тими законами, які забезпечують просту технологію обробки профілю кулачка та задовольняють кінематичним і динамічним вимогам.

Найвигіднішим з точки зору ударів в роботі є синусоїдний закон зміни аналогу прискорень ($S'' = a \sin k\varphi$), при якому аналоги швидкості, прискорень, переміщення змінюються плавно (рис. 4). Недолік: повільне наростання переміщень на фазах віддалення і наближення.

Широкого розповсюдження в машинах набув косинусоїдний закон зміни аналога прискорень ($S'' = a \cos k\varphi$), коли прискорення змінюється раптово на початку і в кінці руху штовхача, що є його недоліком, оскільки виникають м'які удари. Переваги: на проміжках віддалення і наближення прискорення і сили інерції P змінюються дуже плавно (рис. 5, 19, б).

Розглянемо чотири закони руху:

$$N = 1 \quad S'' = a \cdot \sin k\varphi;$$

$$N = 2 \quad S'' = a \cdot \cos k\varphi;$$

$$N = 3 \quad S'' = a \left(1 - 2 \frac{\varphi}{\varphi_b} \right);$$

$$N = 4 \quad S'' = \begin{cases} a, & 0 \leq \varphi \leq 0,5\varphi_b \\ -a, & 0,5\varphi_b \leq \varphi \leq \varphi_b \end{cases}.$$

Проінтегруємо двічі ці залежності, знайдемо закон руху штовхача у вигляді: $\Delta S = \Delta S(\varphi)$.

$$N = 1.$$

$$S'' = a \cdot \sin k\varphi, \quad (1)$$

де

$$k = \frac{2\pi}{\varphi_B}.$$

$$S' = \int a \cdot \sin k\varphi d\varphi = -\frac{a}{k} \cos k\varphi + C_1. \quad (2)$$

Константу C_1 знаходимо із умови: при $\varphi = 0$ $S' = 0$. Тоді $C_1 = \frac{a}{k}$.

$$\text{Маємо: } S' = \frac{a}{k}(1 - \cos k\varphi), \Delta S = \int \frac{a}{k}(1 - \cos k\varphi)d\varphi = \frac{a}{k}\varphi - \frac{a}{k^2} \sin k\varphi + C_2.$$

Константу C_2 знаходимо із умови: при $\varphi = 0$ $\Delta S = 0$. Тоді $C_2 = 0$.

$$\text{Маємо } \Delta S = \frac{a}{k}\varphi - \frac{a}{k^2} \sin k\varphi.$$

Знайдемо константу a із умови: при $\varphi = \varphi_B$ $\Delta S = \Delta S_{\max} = h$, де h – хід штовхача (задана величина). Тоді $h = \frac{a}{k}\varphi_B - \frac{a}{k^2} \sin k\varphi_B$, звідки $a = \frac{kh}{\varphi_B}$.

Таким чином, маємо такі залежності:

$$S'' = \frac{kh}{\varphi_B} \sin k\varphi; \quad (3)$$

$$S' = \frac{h}{\varphi_B} (1 - \cos k\varphi); \quad (4)$$

$$\Delta S = \frac{h}{\varphi_B} \varphi - \frac{h}{k\varphi_B} \sin k\varphi. \quad (5)$$

Щоб порахувати значення k , можна у формулу (2) підставляти значення 2π і φ_B як у градусах, так і у радіанах. Якщо кут φ буде стояти під знаком тригонометричної функції, то його варто підставляти у формули (3) – (5) у градусах, якщо ні – у радіанах (як у (5): $\frac{h\varphi}{\varphi_B}$). Це саме стосується і кута φ_B

($\frac{h}{\varphi_B}$ – у радіанах; $\sin k\varphi_B$ – у градусах), h – підставляємо в метрах.

- $N = 2.$

$$S'' = a \cdot \cos k\varphi, \quad (6)$$

де

$$k = \frac{\pi}{\varphi_B}. \quad (7)$$

$$S' = \int a \cdot \cos k\varphi d\varphi = \frac{a}{k} \sin k\varphi + C_1.$$

Константу C_1 знаходимо із умови: при $\varphi = 0$ $S' = 0$. Тоді $C_1 = 0$.

$$\text{Маємо } S' = \frac{a}{k} \sin k\varphi. \Delta S = \int \frac{a}{k} \sin k\varphi d\varphi = -\frac{a}{k^2} \cdot \cos k\varphi + C_2.$$

Константу C_2 знаходимо із умови: при $\varphi = 0$ $\Delta S = 0$. Тоді $C_2 = \frac{a}{k^2}$.

$$\text{Маємо } \Delta S = \frac{a}{k^2} (1 - \cos k\varphi).$$

Знайдемо константу a із умови: при $\varphi = \varphi_B$ $\Delta S = \Delta S_{\max} = h$.

$$\text{Тоді } h = \frac{a}{k^2} (1 - \cos k\varphi_B), \text{ звідки } a = \frac{k^2 h}{2}.$$

Таким чином, маємо такі залежності:

$$S'' = \frac{k^2 h}{2} \cos k\varphi; \quad (8)$$

$$S' = \frac{kh}{2} \sin k\varphi; \quad (9)$$

$$\Delta S = \frac{h}{2} (1 - \cos k\varphi). \quad (10)$$

У формули (8) – (10) значення кутів φ підставляємо у градусах.

- $N = 3$.

$$S'' = a \left(1 - 2 \frac{\varphi}{\varphi_B} \right). \quad (11)$$

$$S' = \int a \left(1 - 2 \frac{\varphi}{\varphi_B} \right) d\varphi = a\varphi - \frac{a\varphi^2}{\varphi_B} + C_1.$$

Константу C_1 знаходимо із умови: при $\varphi = 0$ $S' = 0$. Тоді $C_1 = 0$.

$$\text{Маємо } S' = a\varphi - \frac{a\varphi^2}{\varphi_B} = a\varphi \left(1 - \frac{\varphi}{\varphi_B} \right).$$

$$\Delta S = \int \left(a\varphi - \frac{a\varphi^2}{\varphi_B} \right) d\varphi = \frac{a\varphi^2}{2} - \frac{a\varphi^3}{3\varphi_B} + C_2.$$

Константу C_2 знаходимо із умови: при $\varphi = 0$ $\Delta S = 0$. Тоді $C_2 = 0$.

$$\text{Маємо } \Delta S = \frac{a\varphi^2}{2} - \frac{a\varphi^3}{3\varphi_B} = a\varphi^2 \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{3} \frac{\varphi}{\varphi_B} \right)$$

Знайдемо константу a із умови: при $\varphi = \varphi_B$ $\Delta S = \Delta S_{\max} = h$.

Тоді $h = \frac{a\varphi_B^2}{2} - \frac{a\varphi_B^3}{3\varphi_B}$, звідки $a = \frac{6h}{\varphi_B^2}$.

Таким чином, маємо такі залежності:

$$S'' = \frac{6h}{\varphi_B^2} \left(1 - 2 \frac{\varphi}{\varphi_B} \right); \quad (12)$$

$$S' = \frac{6h\varphi}{\varphi_B^2} \left(1 - \frac{\varphi}{\varphi_B} \right); \quad (13)$$

$$\Delta S = \frac{6h\varphi^2}{\varphi_B^2} \left(\frac{1}{2} - \frac{\varphi}{3\varphi_B} \right). \quad (14)$$

У формули (12) – (14) значення кутів φ і φ_B підставляємо у радіанах.

Формула переведення градусів у радіани:

$$\varphi(\text{рад}) = \frac{\varphi(\text{град}) \cdot 3,14}{180}.$$

- $N = 4$.

$$S'' = \begin{cases} a, & 0 \leq \varphi \leq 0,5\varphi_B, & \text{I} \\ -a, & 0,5\varphi_B \leq \varphi \leq \varphi_B. & \text{II} \end{cases} \quad (15)$$

Для ділянки I ($0 \leq \varphi \leq 0,5\varphi_B$) маємо:

$$S'_I = \int a d\varphi = a\varphi + C_1.$$

Константу C_1 знаходимо із умови: при $\varphi = 0$ $S'_I = 0$. Тоді $C_1 = 0$.

$$\text{Маємо } S'_I = a\varphi. \quad \Delta S_I = \int S'_I d\varphi = a\varphi d\varphi = \frac{a\varphi^2}{2} + C_2.$$

Константу C_2 знаходимо із умови: при $\varphi = 0$ $\Delta S_I = 0$. Тоді $C_2 = 0$.

$$\text{Маємо } \Delta S_I = \frac{a\varphi^2}{2}.$$

Для ділянки II ($0,5\varphi_B \leq \varphi \leq \varphi_B$) маємо: $S''_{II} = \int -a d\varphi = -a\varphi + C_3$.

Константу C_3 знаходимо із умови: при $\varphi = 0,5\varphi_B$ $S''_{II} = S'_I$.

Тоді: $-0,5a\varphi_B + C_3 = 0,5a\varphi_B$, $C_3 = a\varphi_B$.

Маємо $S''_{II} = -a\varphi + a\varphi_B = a(\varphi_B - \varphi)$.

$$\Delta S_{II} = \int S''_{II} d\varphi = \int a(\varphi_B - \varphi) d\varphi = a\varphi_B\varphi - \frac{a\varphi^2}{2} + C_4.$$

Константу C_4 знаходимо із умови: при $\varphi = 0,5\varphi_B$ $\Delta S_{II} = \Delta S_I$.

$$\text{Тоді: } 0,5a\varphi_B^2 - \frac{a\varphi_B^2}{8} + C_4 = \frac{a\varphi_B^2}{8}, \quad C_4 = \frac{-a\varphi_B^2}{4}.$$

$$\text{Маємо } \Delta S_{\text{II}} = a\varphi_{\text{B}}\varphi - \frac{a\varphi^2}{2} - \frac{a\varphi_{\text{B}}^2}{4} = a\left(\varphi_{\text{B}}\varphi - \frac{\varphi^2}{2} - \frac{\varphi_{\text{B}}^2}{4}\right).$$

Константу a визначимо із умови: при $\varphi = \varphi_{\text{B}}$ $\Delta S_{\text{II}} = \Delta S_{\text{IImax}} = h$.

$$\text{Тоді: } h = a\varphi_{\text{B}}^2 - \frac{a\varphi_{\text{B}}^2}{2} - \frac{a\varphi_{\text{B}}^2}{4}, \text{ звідки } a = \frac{4h}{\varphi_{\text{B}}^2}.$$

Таким чином, маємо такі залежності на двох ділянках:

$$S_{\text{I}}'' = \frac{4h}{\varphi_{\text{B}}^2}, \quad (16) \quad S_{\text{II}}'' = -\frac{4h}{\varphi_{\text{B}}^2}, \quad (19)$$

$$S_{\text{I}}' = \frac{4h}{\varphi_{\text{B}}^2}\varphi, \quad (17) \quad S_{\text{II}}' = \frac{4h}{\varphi_{\text{B}}^2}(\varphi_{\text{B}} - \varphi), \quad (20)$$

$$\Delta S_{\text{I}} = \frac{2h}{\varphi_{\text{B}}^2}\varphi^2 \quad (18) \quad \Delta S_{\text{II}} = \frac{h}{\varphi_{\text{B}}^2}(4\varphi_{\text{B}}\varphi - 2\varphi^2 - \varphi_{\text{B}}^2). \quad (21)$$

У формули (16) – (21) φ і φ_{B} підставляють у радіанах.

Розглянемо приклади розрахунків для наведених законів.

$$N = 1: S'' = a \sin k\varphi.$$

Для наступних вхідних даних:

$$\varphi_{\text{B}} = \varphi_{\text{H}} = 60^\circ; \varphi_{\text{д}} = 5^\circ; \varphi_{\text{б}} = 235^\circ; h = 0,04 \text{ м після подвійного інтегрування}$$

$$\text{функції } S'' = S''(\varphi) \text{ знаходимо: } k = \frac{2\pi}{\varphi_{\text{B}}} = 6; \quad a = 0,229; \quad S'' = 0,229 \sin 6\varphi;$$

$$S' = 0,038(1 - \cos 6\varphi); \Delta S = 0,038\left(\varphi - \frac{\sin 6\varphi}{6}\right). \text{ Крок розрахунку } \Delta\varphi \leq 10^\circ. \text{ Це визна-}$$

чає число точок для побудови профілю. Результати розрахунків функцій $S''=S''(\varphi)$, $S'=S'(\varphi)$, $\Delta S=\Delta S(\varphi)$ заносимо у таблицю 1.

Таблиця 1 – $N = 1$: результати розрахунків функцій $S''=S''(\varphi)$, $S'=S'(\varphi)$,

$\Delta S=\Delta S(\varphi)$

φ , град	0°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°	60°
S'' , м	0	0,198	0,229	0,198	0,115	0	-0,115	-0,198	-0,229	-0,198	0
S' , м	0	0,019	0,038	0,057	0,071	0,076	0,071	0,057	0,038	0,019	0
ΔS , м	0	0,0012	0,0036	0,0078	0,013	0,02	0,026	0,0322	0,036	0,0388	0,04

Для побудови графіків вибираємо масштаб по осі φ : $\mu_\varphi = \frac{\varphi_B + \varphi_D + \varphi_H}{L}$,

де L – відрізок на осі φ , мм. Масштаби $\mu_{S''}$, $\mu_{S'}$, $\mu_{\Delta S}$ вибираємо наступним чином: $\mu_{S''} = S''_{max} / [S'']$; $\mu_{S'} = S'_{max} / [S']$; $\mu_{\Delta S} = \Delta S_{max} / [\Delta S]$, де S''_{max} , S'_{max} , ΔS_{max} – максимальні значення функцій S'' , S' , S із таблиці, м; $[S'']$, $[S']$, $[\Delta S]$ – відповідні відрізки на графіках, мм. Зазвичай масштаб по осі φ приймається $\mu_\varphi = 1$ град/мм. Масштаби $\mu_{S''}$, $\mu_{S'}$ вибираються із розрахунку того, що відрізки $[S'']$, $[S']$ на графіках повинні бути в межах $50 \div 100$ мм.

Графіки будуть мати вигляд (рис.4):

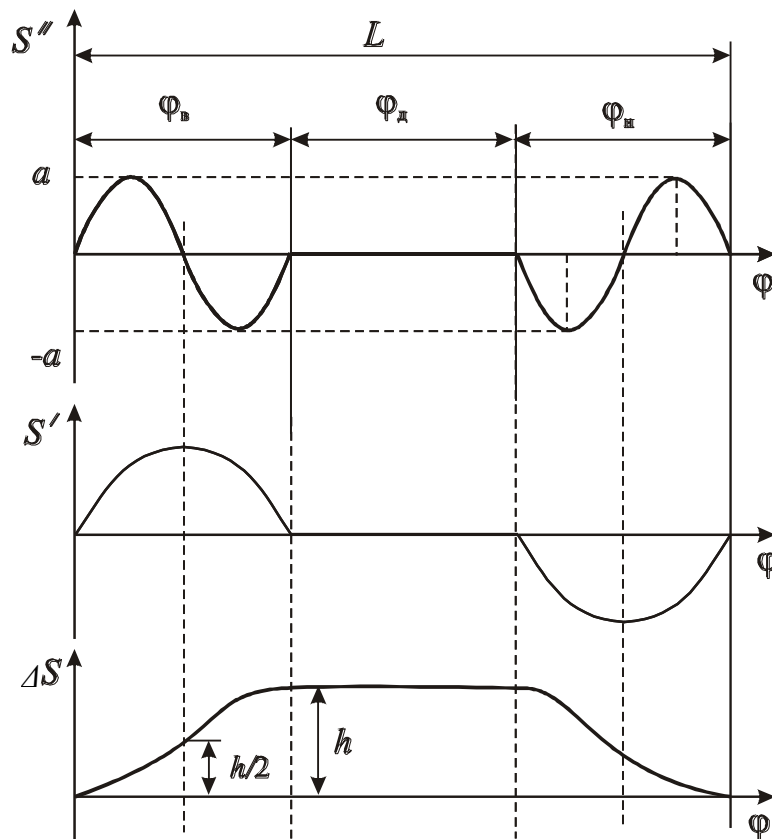


Рисунок 4 – Графіки функцій $S''(\varphi)$, $S'(\varphi)$, $\Delta S(\varphi)$ для $N = 1$

$$N = 2: S'' = a \cos k\varphi.$$

Для наступних вхідних даних: $\varphi_B = \varphi_H = 70^\circ$; $\varphi_D = 50^\circ$; $\varphi_6 = 170^\circ$; $h = 0,025$ м після подвійного інтегрування функції $S'' = S''(\varphi)$ знаходимо:

$$k = \frac{\pi}{\varphi_B} = 2,571; \quad a = 0,0826; \quad S'' = 0,0826 \cos 2,571\varphi; \quad S' = 0,0321 \sin 2,571\varphi;$$

$\Delta S = 0,0125(1 - \cos 2,571\varphi)$. Результати розрахунків функцій $S''=S''(\varphi)$, $S'=S'(\varphi)$, $\Delta S=\Delta S(\varphi)$ із кроком $\Delta\varphi = 10^\circ$ заносимо у таблицю 2. Незалежно від обраного кроку в цю таблицю треба занести кут, який відповідає середині інтервалу φ_b . В цьому випадку це кут $\varphi = 35^\circ$.

Таблиця 2 – $N=2$: результати розрахунків функцій $S''=S''(\varphi)$, $S'=S'(\varphi)$, $\Delta S=\Delta S(\varphi)$

φ , град	0°	10°	20°	30°	35°	40°	50°	60°	70°
S'' , м	0,0826	0,0744	0,0515	0,0184	0	-0,0184	-0,0515	-0,0744	-0,0826
S' , м	0	0,0139	0,0251	0,0313	0,0321	0,0313	0,0251	0,0139	0
ΔS , м	0	0,0012	0,0047	0,0097	0,0125	0,0153	0,0203	0,0238	0,025

Графіки будуть мати вигляд:

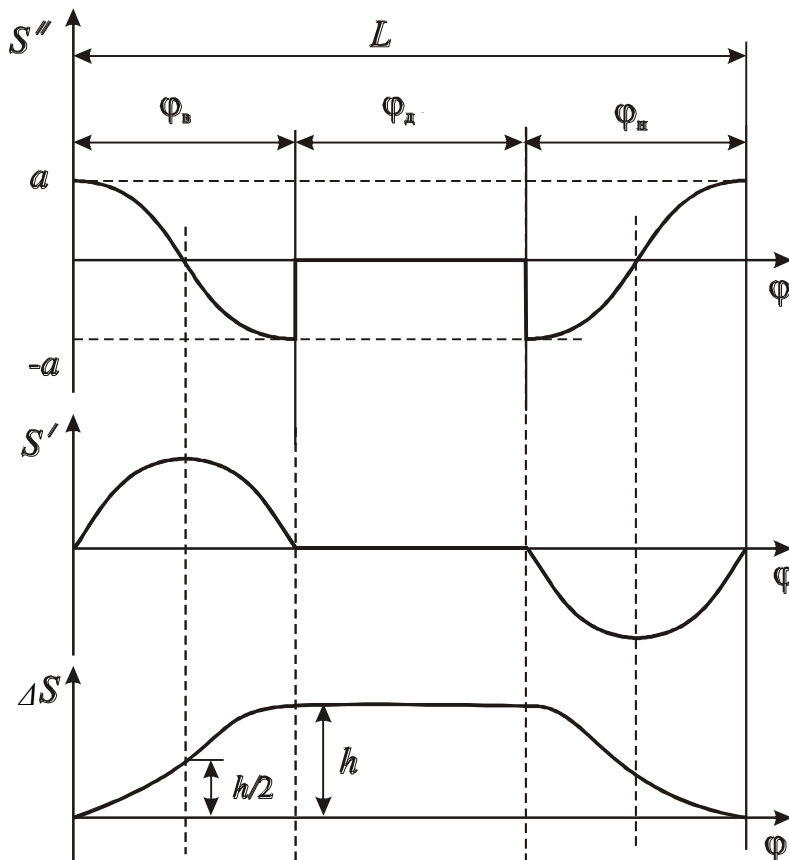


Рисунок 5 – Графіки функцій $S''=S''(\varphi)$, $S'=S'(\varphi)$, $\Delta S=\Delta S(\varphi)$ для $N=2$

$$N=3: S'' = a\left(1 - 2\frac{\varphi}{\varphi_b}\right).$$

Для наступних вхідних даних: $\varphi_b = \varphi_n = 60^\circ$; $\varphi_d = 20^\circ$; $\varphi_0 = 220^\circ$; $h = 0,03$ м

після подвійного інтегрування функції $S'' = S''(\varphi)$ знаходимо: $k = \frac{2}{\varphi_b} = 1,9108$;

$$\varphi_b = \frac{60^\circ \cdot 3,14}{180^\circ} = 1,0467; \quad a = 0,1643; \quad S'' = 0,1643(1 - 1,91084\varphi); \quad S' = 0,1643\varphi(1 - 0,9554\varphi);$$

$\Delta S = 0,0274\varphi^2(3 - 1,9108\varphi)$. Результати розрахунків із кроком $\Delta\varphi = 10^\circ$ заносимо у таблицю 3.

Таблиця 3 – $N = 3$: результати розрахунків функцій $S'' = S''(\varphi)$, $S' = S'(\varphi)$, $S = S(\varphi)$

φ , град	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°
S'' , м	0,1643	0,1095	0,0548	0	-0,0548	-0,1095	-0,1643
S' , м	0	0,0239	0,0382	0,043	0,0382	0,0239	0
ΔS , м	0	0,0022	0,0078	0,015	0,022	0,0278	0,03

Графіки будуть мати вигляд:

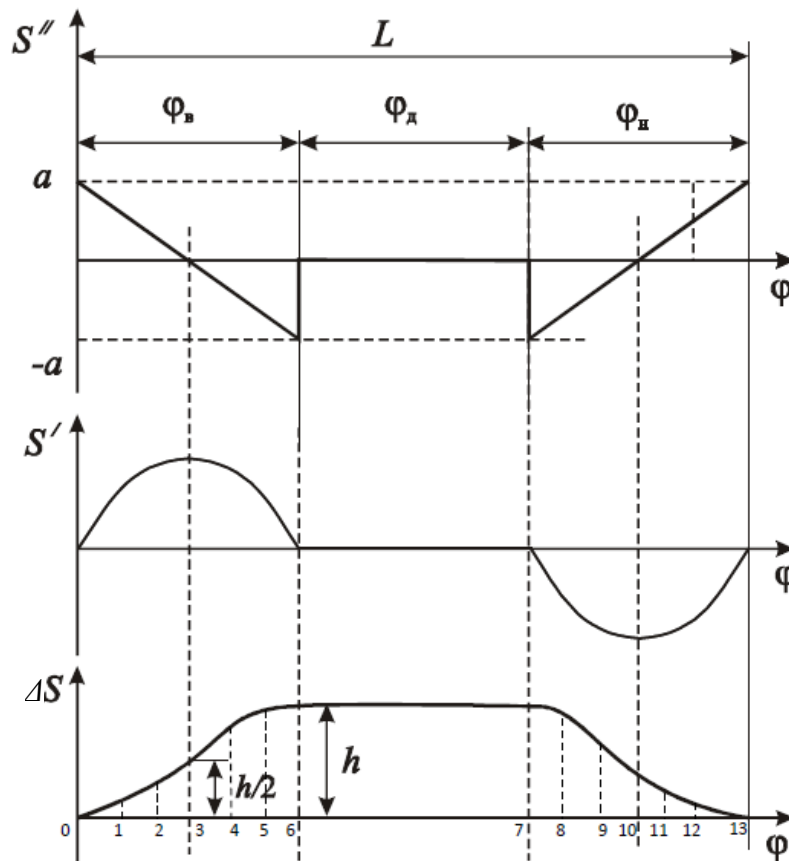


Рисунок 6 – Графіки функцій $S'' = S''(\varphi)$, $S' = S'(\varphi)$, $S = S(\varphi)$ для $N = 3$

$$N = 4: \quad S'' = \begin{cases} a, & 0 \leq \varphi \leq 0,5\varphi_b, & \text{I} \\ -a, & 0,5\varphi_b \leq \varphi \leq \varphi_b. & \text{II} \end{cases}$$

Для наступних вхідних даних: $\varphi_b = \varphi_n = 50^\circ$; $\varphi_d = 70^\circ$; $\varphi_6 = 190^\circ$;
 $h = 0,025$ м після подвійного інтегрування функції $S'' = S''(\varphi)$ знаходи-

мо: $\varphi_b = \frac{50^\circ \cdot 3,14}{180^\circ} = 0,8722$; $a = 0,13146$;

$S''_I = 0,13146$; $S''_{II} = -0,13146$;

$S'_I = 0,13146\varphi$; $S'_{II} = 0,11466 - 0,13146\varphi$;

$\Delta S_I = 0,0657\varphi^2$; $\Delta S_{II} = 0,1147\varphi - 0,0657\varphi^2 - 0,025$.

Результати розрахунків із кроком $\Delta\varphi = 10^\circ$ заносимо у таблицю 4. В цю таблицю вносимо кут, який відповідає середині інтервалу φ_b . В цьому випадку це кут $\varphi = 25^\circ$.

Таблиця 4 – $N = 4$: результати розрахунків функцій $S'' = S''(\varphi)$,
 $S' = S'(\varphi)$, $\Delta S = \Delta S(\varphi)$

φ , град	0°	10°	20°	25°	30°	40°	50°
S'' , м	0,13146	0,13146	0,13146	0,13146; -0,13146	-0,13146	-0,13146	-0,13146
S' , м	0	0,0229	0,0459	0,0573	0,0459	0,0229	0
ΔS , м	0	0,002	0,008	0,0125	0,017	0,023	0,025

Графіки будуть мати вигляд:

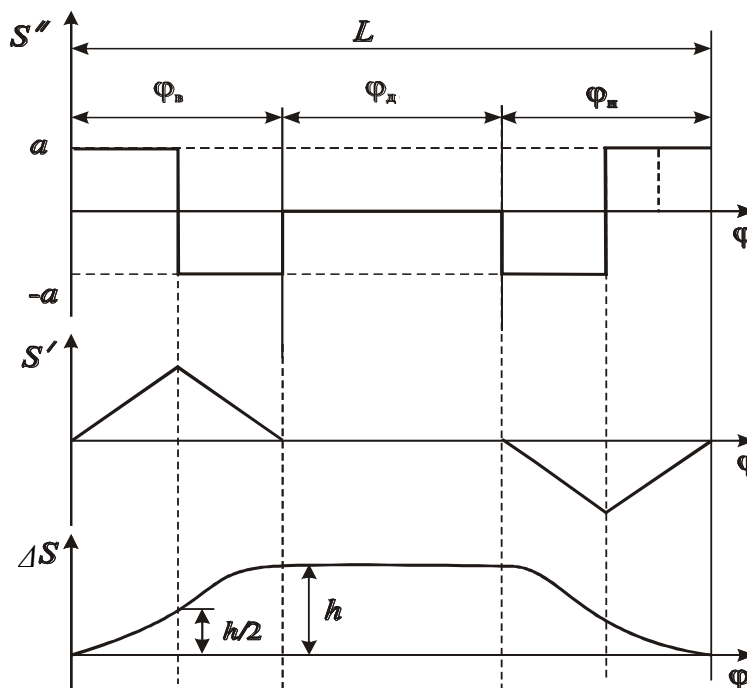


Рисунок 7 – Графіки функцій $S'' = S''(\varphi)$, $S' = S'(\varphi)$, $\Delta S = \Delta S(\varphi)$ для $N = 4$

4. Визначення основних параметрів кулачкових механізмів

До основних параметрів КМ відносять: мінімальний радіус кулачка (кулачкова шайба) S_0 або r_0 та ексцентриситет e (див. рис. 1). Якщо центр обертання кулачка лежить на продовженні прямолінійної траєкторії точки штовхача, то такий КМ називають центральним (рис. 1, б); якщо центр обертання штовхача відстоїть на величину e від осі штовхача, то такий КМ називають механізмом з ексцентриситетом (рис. 1, а).

Рівність кутів віддалення і наближення дає $e = 0$.

Для КМ, упоряджених роликом, параметри S_0 і e визначаються із умови $\theta_{\max} \leq [\theta]$, де $[\theta]$ – допустиме значення кута тиску. Для КМ із штовхачем, який здійснює поступальний рух, на практиці приймають $[\theta] = 20^\circ - 30^\circ$; із коромислом, яке здійснює коливальний (обертальний) рух – $[\theta] = 35^\circ - 45^\circ$.

Необхідно зобразити в масштабі $\mu_S = \mu_{S'}$ графік функції $\Delta S = \Delta S(S')$ (рис.8). Величини ΔS і S' необхідно взяти із таблиці залежностей: $S'' = S''(\varphi)$, $S' = S'(\varphi)$, $\Delta S = \Delta S(\varphi)$. Якщо кулачок обертається проти годинникової стрілки, то S' відкладають вліво на фазі віддалення і вправо – на фазі наближення. Якщо кулачок обертається за годинниковою стрілкою, то навпаки.

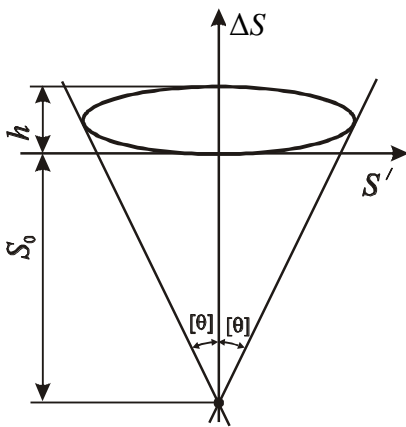


Рисунок 8 – Визначення параметру S_0 для центрального КМ типу РШ ($\varphi_B = \varphi_H$)

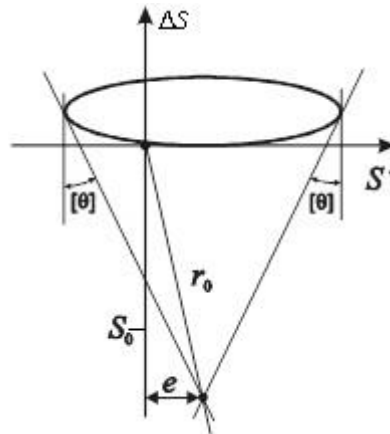


Рисунок 9 – Визначення параметрів S_0 , r_0 і e для КМ з ексцентриситетом типу РШ ($\varphi_B \neq \varphi_H$).

Необхідно провести дві дотичні до графіку під кутом $[\theta]$ до осі ΔS . Кут $[\theta]$ задається. У випадку, коли $\varphi_B = \varphi_H$, точка перетину дотичних буде лежати на осі

ΔS . Отримаємо параметр S_0 (рис. 8). У випадку, коли $\varphi_b \neq \varphi_n$, точка перетину дотичних не лежатиме на осі ΔS (рис. 9). Отримуємо параметри S_0, r_0 і e .

В КМ з плоским штовхачем, у яких кут тиску дорівнює нулю, мінімальний радіус кулачка вибирають так, щоб профіль кулачка завжди був опуклим.

Для КМ типу ПШ (рис. 1, б) для знаходження параметру S_0 необхідно зобразити в масштабі $\mu_{S''} = \mu_{\Delta S}$ графік залежності $(S'' + \Delta S) = (S'' + \Delta S)(\varphi)$ (рис. 10).

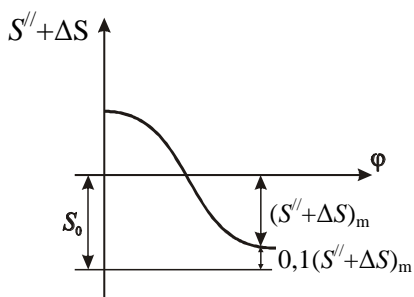


Рисунок 10 – Визначення S_0 для КМ типу ПШ

Після побудови цього графіку до максимальної від'ємної ординати слід додати 10 % від цього максимуму. Одержана відстань до осі φ визначить величину S_0 .

Якщо побудований по результатам обчислень графік не буде містити від'ємних значень величини $(S'' + \Delta S)$, то S_0 можна прийняти рівним $30 \div 50$ мм

5. Побудова профілю кулачка

Для побудови профілю КМ використовують метод оберненого руху, який дозволяє при проектуванні розглядати замість абсолютного руху штовхача його рух відносно кулачка; сам кулачок стає немов би нерухомою ланкою. Розв'язання задачі з використанням цього методу значно спрощується.

5.1. Побудова центрального і робочого профілю кулачкового механізму з роликівим штовхачем

5.1.1. Центральний КМ ($e = 0$)

1. Описуємо навколо центру O коло радіусом S_0 і відкладаємо на цьому колі від довільно обраного початку відліку фазові кути $\varphi_b, \varphi_d, \varphi_n$ ді-

лимо це коло на фазах φ_v та φ_n на n частин з кроком $\Delta\varphi$, які відповідають кутам φ , наприклад у таблиці 3 (див. рис.6).

Кут фази вистою не поділяють. Нумерація точок ділення кола ведеться у напрямку, протилежному обертанню кулачка. Крок має бути не більш 10° $\Delta\varphi \leq 10^\circ$ (рис. 11).

2. Початок відліку кутів обираємо довільно з будь-якої точки на колі.

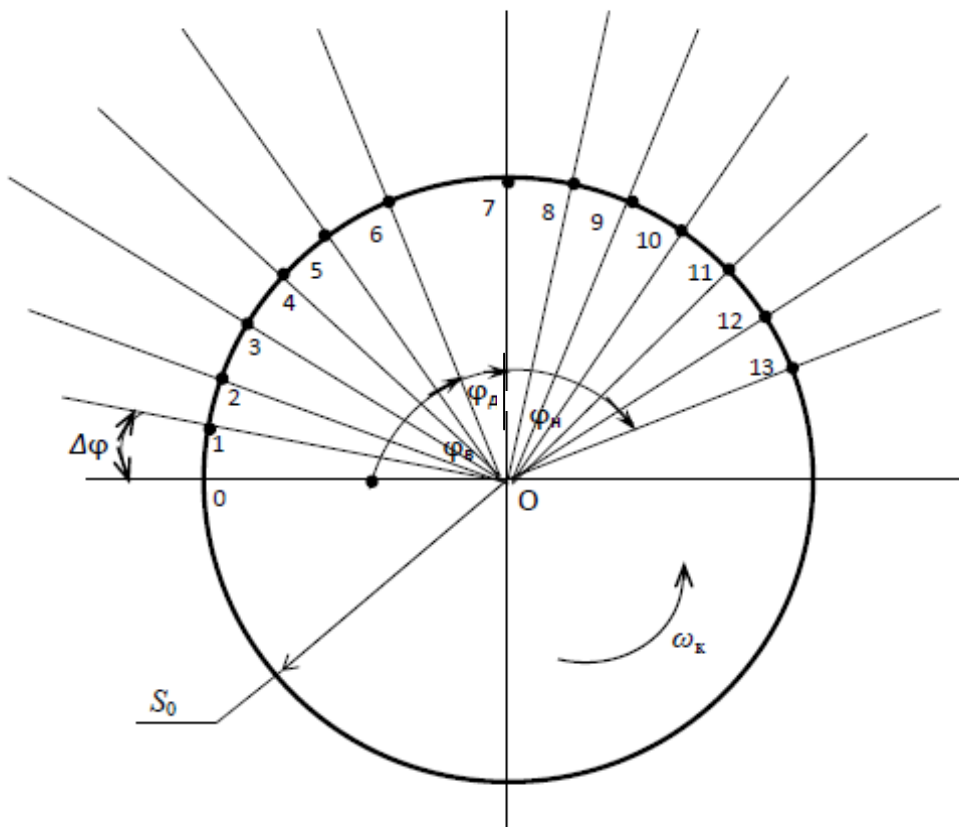


Рисунок 11 – Перший етап побудови центрального кулачкового механізму: побудова кола радіусом S_0 , розбивка кола на фазові кути та розбивка кутів φ_v , φ_n на n частин із кроком $\Delta\varphi$

3. Проводимо через центр O і точки ділення кола прямі лінії, які продовжуються на відстань 30-50 мм від кола.

4. Відкладаємо на цих прямих відрізки $\overline{OB_0} = S_0; 1B_1 = \Delta S_1; 2B_2 = \Delta S_2$ і т.д., які беруться із діаграми $[\Delta S; \varphi]$. Таким чином знаходимо точки $B_0, B_1, B_2 \dots B_6$ і т.д. Точки $B_7, B_8, B_9 \dots B_{13}$ відкладаємо симетрично точкам $B_6 \dots B_0$ на фазовому куті наближення (рис. 12).

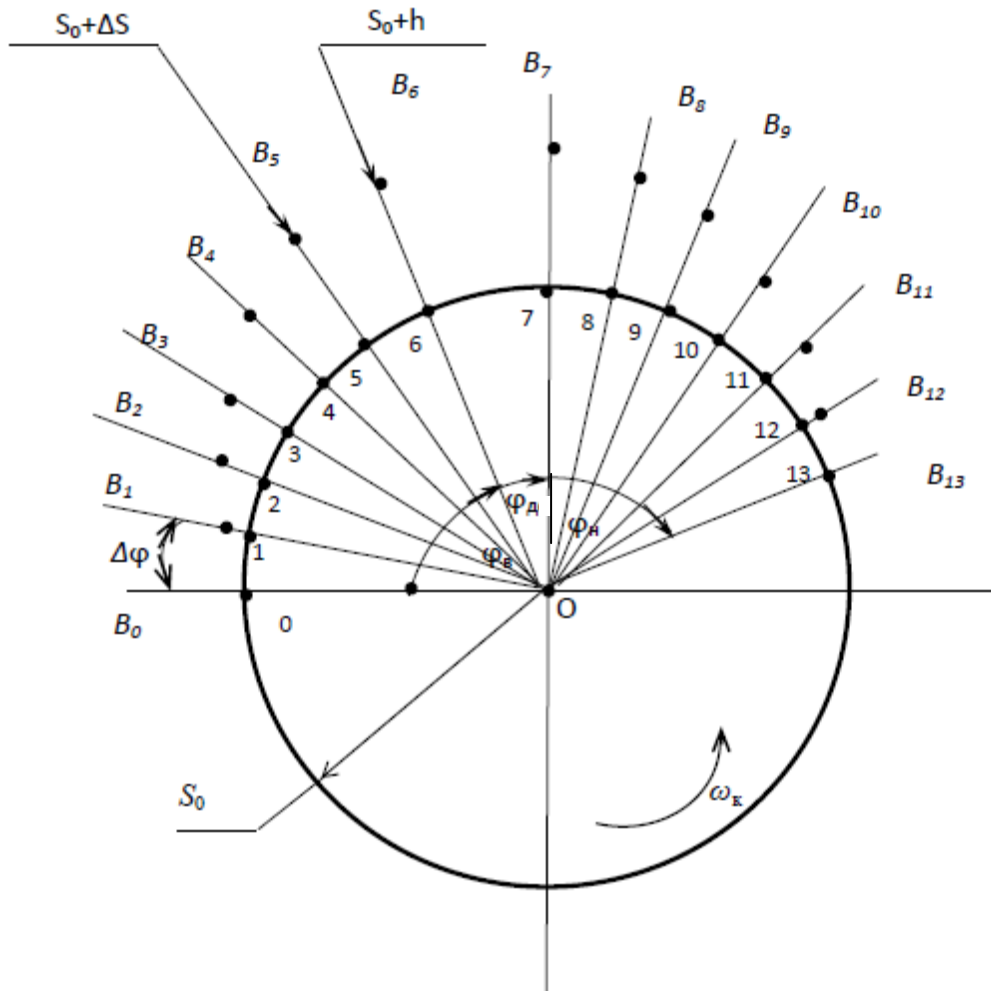


Рисунок 12 – Перенос графіка $\Delta S = \Delta S(\varphi)$ на коло кулачкової шайби

5. Об'єднуємо всі точки B плавною кривою – отримуємо криву центрального профілю (Ц). На фазових кутах вистюю φ_d, φ_6 профіль описується колами радіусів OB_6 і OB_0 відповідно (рис. 13).

де $r_{\min\zeta}$ – найменший радіус кола, описаного навколо центру O , яке дотикається усередині до центрального профілю (S_0 або r_0); $\rho_{\min\zeta}$ – мінімальний радіус кривизни центрального профілю.

Якщо при вирішенні задачі для центрального профілю ζ складено рівняння, то величину ρ_{\min} можна знайти аналітично. Якщо синтез відбувається графо-аналітичним методом, то поступимо таким чином: виберемо на опуклій частині кривої ζ (на фазі віддалення) таку точку B , в якій кривизна кривої здається «на око» найбільшою. Потім виберемо поблизу цієї точки ще дві точки B' і B'' і знайдемо центр кола M , яке буде проходити через три точки: B , B' , B'' (рис. 14). Радіус цього кола можна прийняти за $\rho_{\min\zeta}$.

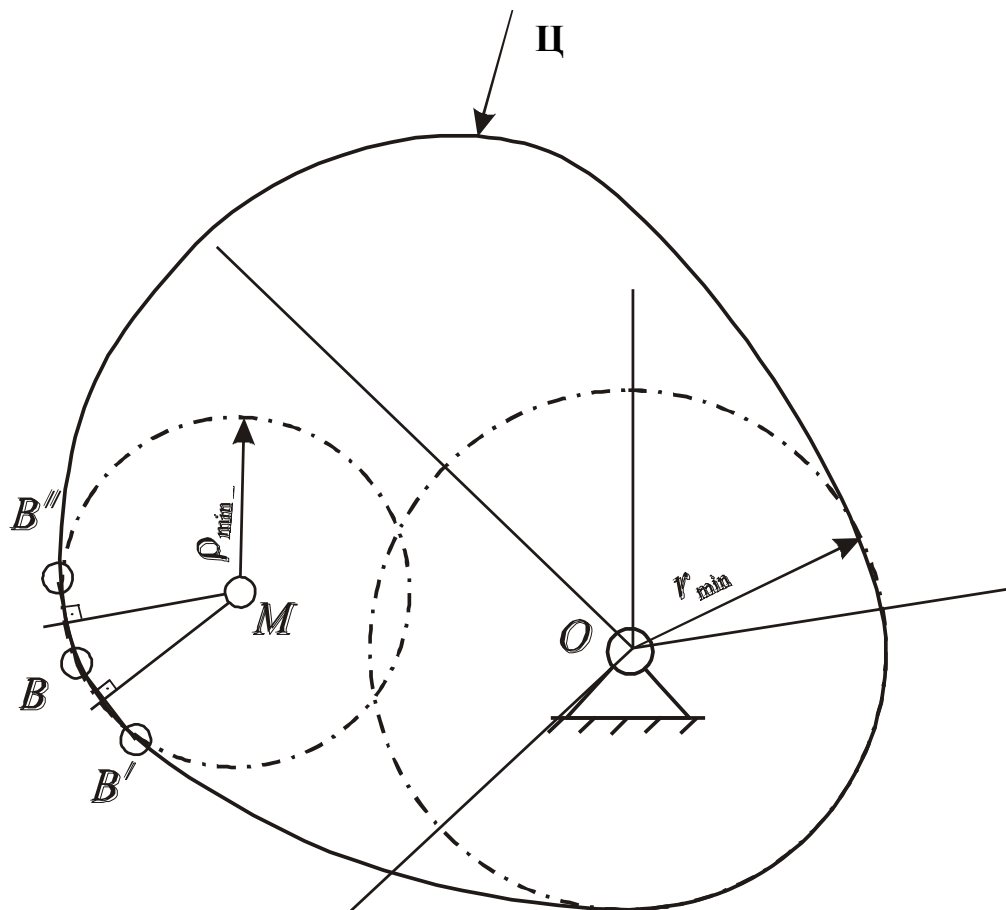


Рисунок 14 – Визначення мінімального радіусу кривизни центрального профілю

7. Будуємо на відстані r від кривої Π нову еквідистантну криву, яка є робочим профілем кулачкового механізму (P) (рис.15).

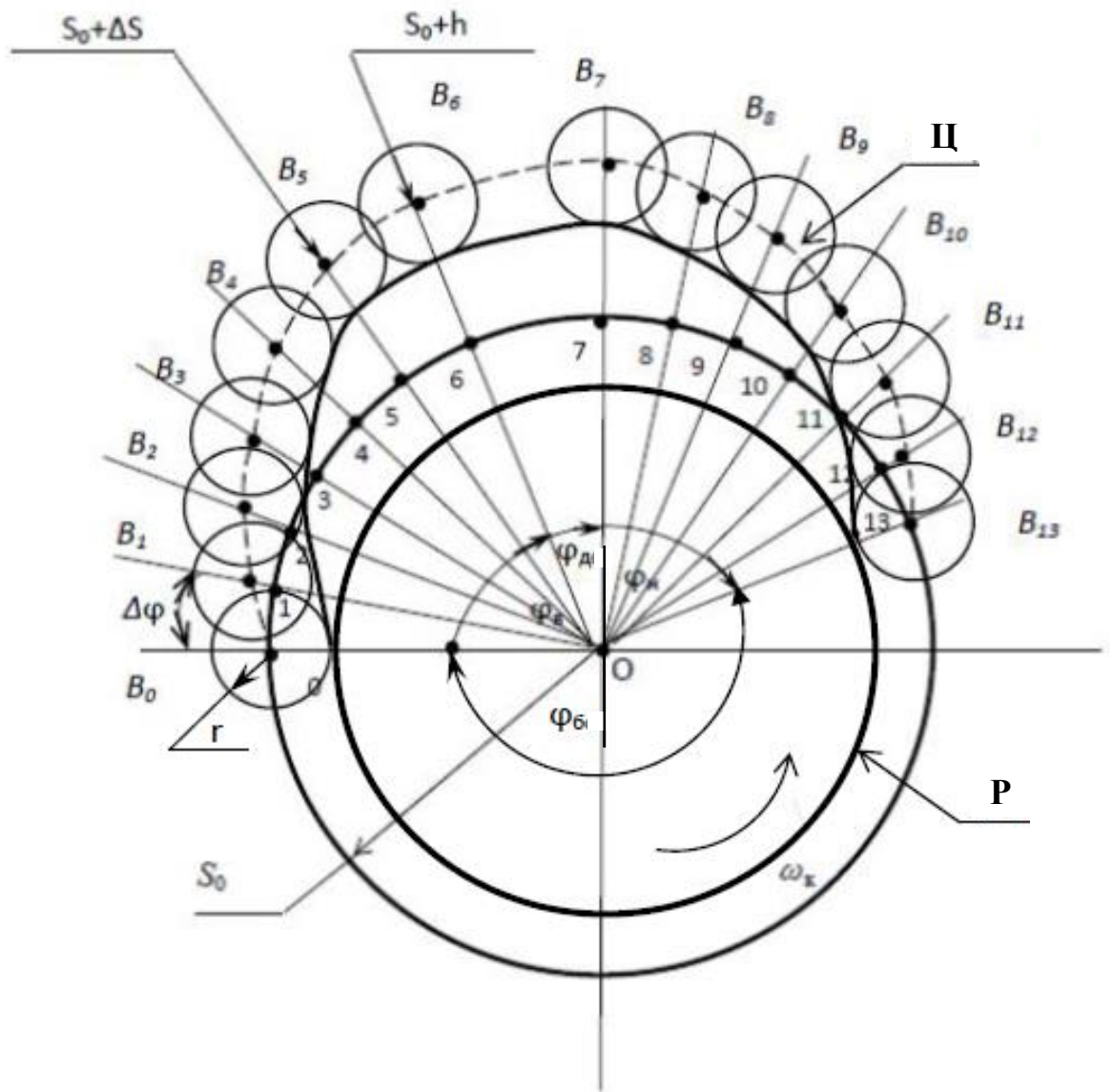


Рисунок 15 – Побудова робочого профілю (P) кулачкового механізму

5.1.2. Кулачковий механізм з ексцентриситетом

Цей механізм будується по тому же принципу, що і співвісний кулачковий механізм, тому схеми побудови профілю кулачка надані скорочено.

1. Навколо центру O описуємо два кола: радіусом e і радіусом r_0 (рис. 16).

2. Коло радіуса r_0 ділимо на n частин, які відповідають кутам φ_B , наприклад у таблиці 3. Нумерація точок ділення кола ведеться у напрямку, протилежному обертанню кулачка.

3. Через точки ділення проводимо лінії, дотичні до кола радіуса e .

4. На цих лініях від точок 0, 1, 2, 3... відкладаємо відрізки $\overline{OB_0} = S_0$; $1B_1 = \Delta S_1$; $2B_2 = \Delta S_2$; і т.д., де ΔS_i відкладаємо від кола радіуса r_0 і беремо із діаграми $[\Delta S; \varphi]$.

5. Отримуємо точки B_0, B_1, B_2, \dots і знаходимо центровий і робочий профілі, як пояснюється у п. 5 – 7 підрозділу 5.1.1.

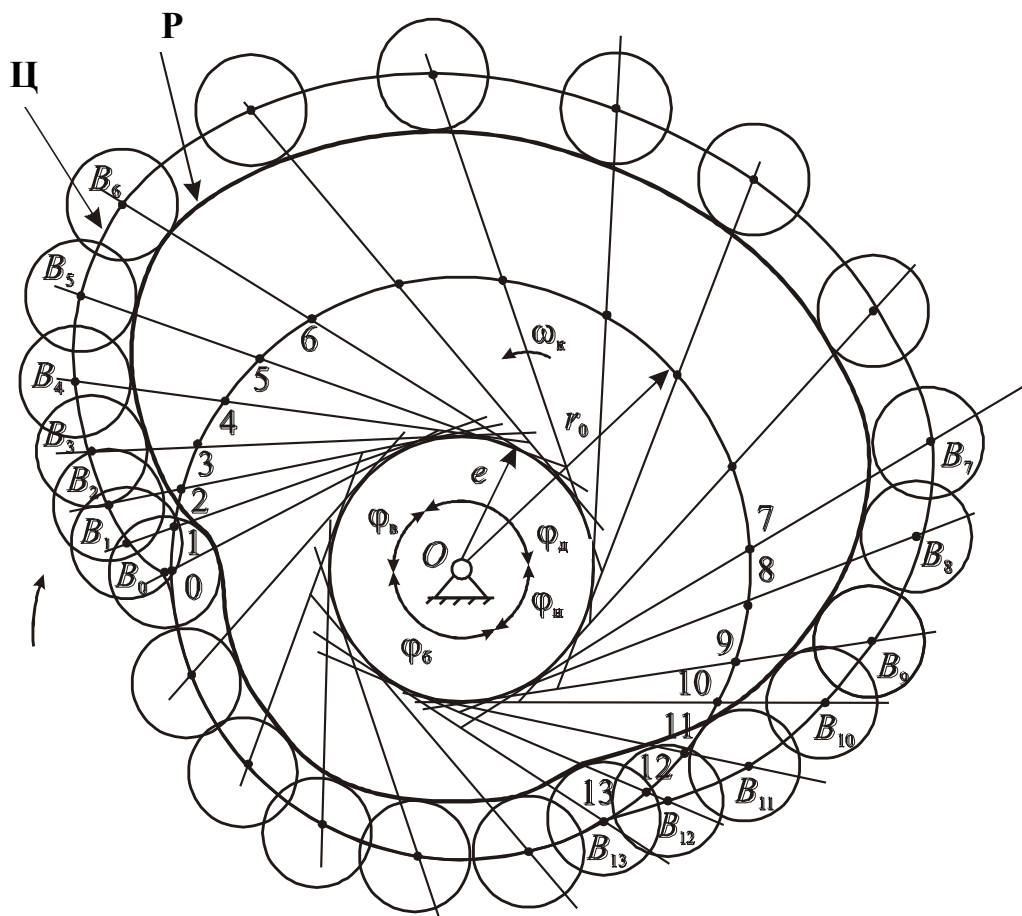


Рисунок 16 – Побудова центрового профілю Ц і робочого профілю P кулачкового механізму з роликним штовхачем із ексцентриситетом

$$Q_0 + c \cdot \Delta S \geq -1,3m_{\text{шт}} \cdot a_{\text{max}},$$

де Q_0 – зусилля попереднього стискання пружини, H ; $m_{\text{шт}}$ – маса штовха-
ча, кг (якщо не задана, то прийняти $m_{\text{шт}} = 2$ кг); ΔS – переміщення штовха-
ча, м; a_{max} – прискорення штовхака, м/с²; c – жорсткість пружини, Н/м.

Оскільки кулачок розміщено на валу кривошипу шарнірно-важільного
механізму, то приймаємо $\omega_k = \omega_1, 1/c$ (ω_k – кутова швидкість кулачка, ω_1 –
кутова швидкість кривошипу).

Побудуємо графік функції $P_i^{\text{шт}} = P_i^{\text{шт}}(\Delta S)$, де $P_i^{\text{шт}}$ – сила інерції штовха-
ча, використовуючи масштабні коефіцієнти μ_S і $\mu_{P_i^{\text{шт}}}$, одиниці вимірювання
яких [м/мм] і [Н/мм] відповідно.

$$P_i^{\text{шт}} = -m_{\text{шт}} \cdot a; a = S'' \cdot \omega_k^2.$$

Із початку координат цього графіка проведемо дотичну до графіка, а
потім пряму, яка їй паралельна на відстані $0,3m_{\text{шт}} \cdot a_{\text{max}}$, де a_{max} – приско-
рення штовхака у точці дотику M . Отримаємо графік для визначення харак-
теристик пружини.

Для залежностей, розглянутих у п. 3, вигляд графіків $P_i^{\text{шт}} = P_i^{\text{шт}}(\Delta S)$ бу-
де наступним (рис. 19):

а) $N = 1: S'' = a \cdot \sin k\varphi$;

б) $N = 2: S'' = a \cdot \cos k\varphi$;

в) $N = 3: S'' = a(1 - 2\frac{\varphi}{\varphi_B})$;

г) $N = 4: S'' = \begin{cases} a, & 0 \leq \varphi \leq 0,5\varphi_B, \\ -a, & 0,5\varphi_B \leq \varphi \leq \varphi_B. \end{cases}$

Q – сила пружності пружини, яка відповідає переміщенню штовхака на
величину ΔS .

Зусилля попереднього стискання пружини:

$$Q_0 = 0,3m_{\text{шт}} \cdot S_M'' \cdot \omega_k^2.$$

Жорсткість пружини:

$$c = \frac{m_{\text{шт}} \cdot a_M}{S_M} = \frac{m_{\text{шт}} \cdot S_M'' \cdot \omega_k^2}{S_M}.$$

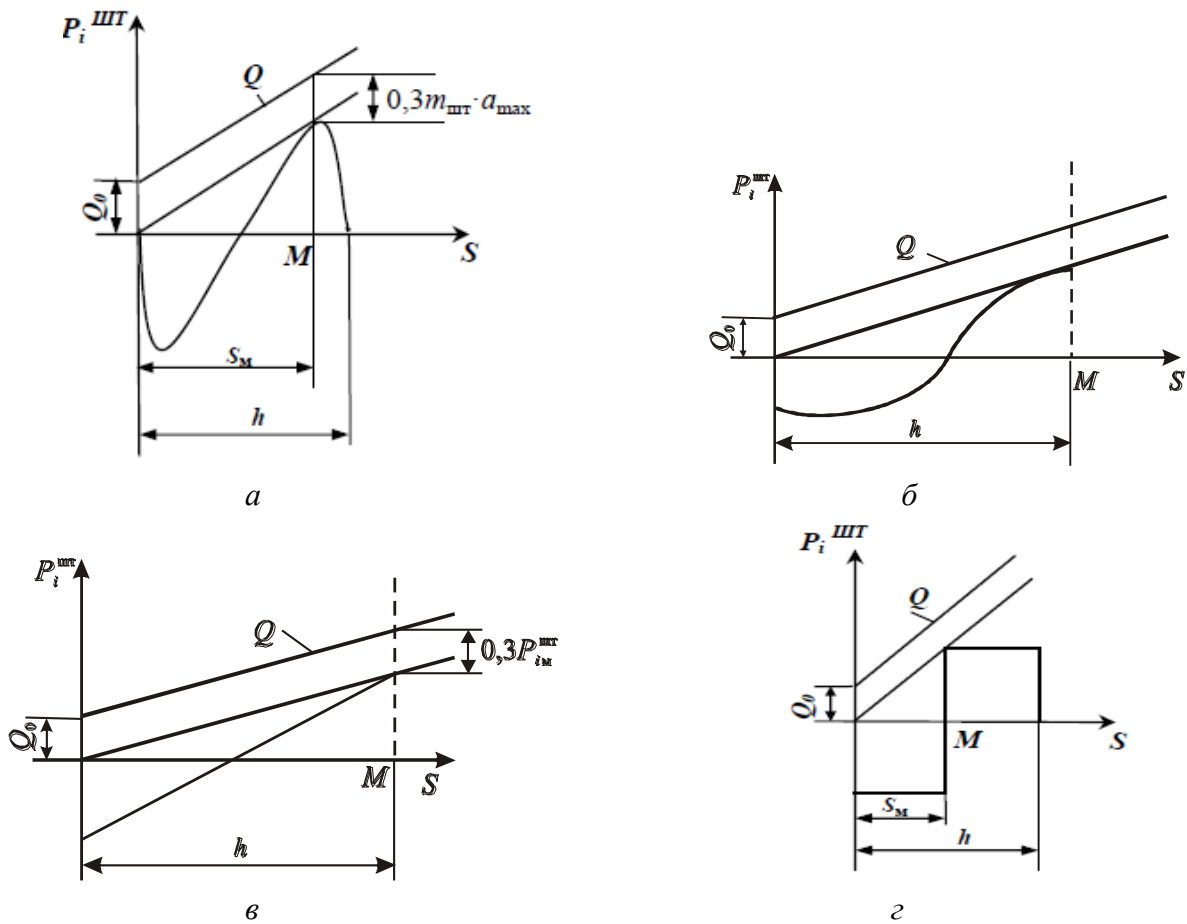


Рисунок 19 – Вигляд графіку функції сили інерції штовхача для $N = 1, 2, 3, 4$

Використовуючи дані табл. 1, для $\omega_k = 9$ (1/с), отримуємо:

$$Q_0 = 0,3 \cdot 2 \cdot 0,229 \cdot 9^2 = 11,13 \text{ (Н)};$$

$$c = \frac{2 \cdot 0,229 \cdot 9^2}{0,036} = 1030,5 \text{ (Н/м)}.$$

Використовуючи дані табл. 2, одержимо:

$$Q_0 = 0,3 \cdot 2 \cdot 0,0826 \cdot 9^2 = 4,014 \text{ (Н)};$$

$$c = \frac{2 \cdot 0,0826 \cdot 9^2}{0,025} = 535,25 \text{ (Н/м)}.$$

Використовуючи дані табл. 3, отримуємо:

$$Q_0 = 0,3 \cdot 2 \cdot 0,1643 \cdot 9^2 = 7,985 \text{ (Н)};$$

$$c = \frac{2 \cdot 0,1643 \cdot 9^2}{0,03} = 887,22 \text{ (Н/м)}.$$

Використовуючи дані табл. 4, отримуємо:

$$Q_0 = 0,3 \cdot 2 \cdot 0,13146 \cdot 9^2 = 6,39 \text{ (Н)};$$

$$c = \frac{2 \cdot 0,13146 \cdot 9^2}{0,025} = 851,86 \text{ (Н/м)}.$$

Список літератури

1. Кіницький Я.Т. Теорія механізмів і машин. Підручник. – Київ, Наукова думка, 2002 – 660 с.
2. Кіницький Я. Т. Практикум із теорії механізмів і машин / Я. Т. Кіницький. – Львів: Афіша, 2002, 453 с.
3. Теорія механізмів і машин. Контрольні та домашні роботи. Навчальний посібник з кредитного модуля для здобувачів ступеня бакалавра за спеціальностями 131 «Прикладна механіка», 133 «Галузеве машинобудування» / Кірієнко О.А. – К.: НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2021. – 72 с.

ЗМІСТ

Вступ.....	3
1. Основні теоретичні визначення розділу.....	3
1.1. Кулачкові механізми	3
1.2. Теоретичний (центровий) профіль.....	4
1.3. Фазові кути повороту кулачка.....	4
1.4. Закони руху вихідної ланки.....	5
1.5. Синтез кулачкових механізмів.....	5
1.6. Кут тиску.....	5
2. Послідовність виконання синтезу.....	6
3. Приклади знаходження залежностей $S = S(\varphi)$	7
4. Визначення основних параметрів кулачкових механізмів.....	16
5. Побудова профілю кулачка.....	17
Список літератури.....	28

Навчальне видання

Теорія механізмів и машин. Методичні вказівки до виконання розділу курсового проєкту „Синтез кулачкових механізмів” для студентів галузей знань «Механічна інженерія» і «Транспорт»

Укладачі:

КРОТЕНКО Галина Анатоліївна

ЗІНЧЕНКО Олена Іванівна

ЗАРУБІНА Алла Олександрівна

Відповідальний за випуск
Роботу до видання рекомендував

проф. Устиненко О.В.
проф. Пономаренко О. І.

В авторській редакції

План 2024 р., п. 5

Гарнітура Times New Roman

Видавничий центр НТУ «ХП»,
вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 5478 від 21.08.2017 р.

Електронна версія