

4. Динамічний синтез механізму за коефіцієнтом нерівномірності руху.

Дано:

Частота обертання валу кривошипу $n_4 = 30 \text{ хв}^{-1}$;

Коефіцієнт нерівномірності руху $\delta = 0,2$.

4.1. Побудова діаграми зведених моментів сил.

Визначаємо величини зведених до ведучого валу машини моментів сил. Зведеним моментом сил називають такий момент пари сил, умовно прикладений до валу. миттєва потужність якого в данному положенні механізму дорівнює сумі миттєвих потужностей усіх сил, діючих на ланках механізму в даному положенні.

$$M_{зв} = \frac{1}{\omega_4} (P_K \cdot V_K \cdot \cos \alpha_K + G_3 \cdot V_{S3} \cdot \cos \alpha_{G3} + G_7 \cdot V_{S7} \cdot \cos \alpha_{G7} + G_6 \cdot V_{S6} \cdot \cos \alpha_{G6} + G_5 \cdot V_{S5} \cdot \cos \alpha_{G5}).$$

Де Кутова швидкість кривошипу дорівнює

$$\omega_4 = \pi * n_4 / 30 = 3,14 * 30 / 30 = 3,14 \text{ с}^{-1}.$$

Наприклад для положення 1

$$\begin{aligned} M_{зв} &= \frac{1}{\omega_4} (P_K \cdot V_K \cdot \cos \alpha_K + G_3 \cdot V_{S3} \cdot \cos \alpha_{G3} + G_7 \cdot V_{S7} \cdot \cos \alpha_{G7} + \\ &G_6 \cdot V_{S6} \cdot \cos \alpha_{G6} + G_5 \cdot V_{S5} \cdot \cos \alpha_{G5}) = \\ &= \frac{1}{3,14} (1200 * 0,31 * 1 + 3139,2 * 0,22 * (-0,96) + 4316,4 * 0,68 * 0,74 \\ &+ 2354,4 * 0,63 * 0,08 + 6827,8 * 0,47 * (-0,34)) = 289,6 \text{ Нм}. \end{aligned}$$

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Результати розрахунків зводимо в таблицю 4.1.

Таблиця 4.1 Зведені моменти сил механізму

Пол.	0	1	2	3	4	5
$P_K, Н$	1200	850	685	464	185	25
$V_K, м/с$	0	0,31	0,36	0,55	0,62	0,78
$\text{Cos}\alpha_{GK}$	0	1	1	1	1	1
$G_3, Н$	3139,2	3139,2	3139,2	3139,2	3139,2	3139,2
$V_{S3}, в/с$	0	0,22	0,26	0,39	0,44	0,56
$\text{Cos}\alpha_{G3}$	0	-0,96	-0,75	-0,52	-0,25	-0,08
$G_7, Н$	4316,4	4316,4	4316,4	4316,4	4316,4	4316,4
$V_{S7}, в/с$	0	0,68	0,84	0,54	0,48	0,25
$\text{Cos}\alpha_{G7}$	0	0,74	0,85	0,95	0,72	0,48
$G_6, Н$	2354,4	2354,4	2354,4	2354,4	2354,4	2354,4
$V_{S6}, в/с$	0	0,63	0,81	0,46	0,41	0,17
$\text{Cos}\alpha_{G6}$	0	0,08	0,12	0,25	0,32	0,12
$G_5, Н$	6827,8	6827,8	6827,8	6827,8	6827,8	6827,8
$V_{S5}, в/с$	0,85	0,47	0,54	0,81	1,2	1,24
$\text{Cos}\alpha_{G5}$	0,15	-0,52	-0,24	-0,28	0,35	0,42
$M_{3B}, Нм$	870,5	289,6	-158	-894,6	-1257,3	-986,4
$M_{3B}, мм$	87,0	28,9	-15,8	-89,5	-125,73	-98,6

Виберемо масштабні коефіцієнти.

$$\mu_\varphi = \frac{2 \cdot \pi}{0 - 12} = \frac{2 \cdot 3,14}{240} = 0,026 \text{ рад/мм};$$

$$\mu_\varphi^0 = \frac{360}{0 - 12} = \frac{360}{240} = 1,5 \frac{\text{град}}{\text{мм}}$$

$$\mu_t = \frac{2 \cdot \pi}{\omega_4 \cdot 0 - 12} = \frac{2 \cdot 3,14}{3,14 \cdot 240} = 0,0083 \frac{\text{с}}{\text{мм}}$$

Продовження таблиці 4.1

Пол.	6	7	8	9	10	11	12	
$P_K, Н$	345	786	2150	2400	2400	2400	1200	
$V_K, м/с$	0,87	0,94	0,62	0,39	0,29	0,25	0	
$\text{Cos}\alpha_{GK}$	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	
$G_3, Н$	3139,2	3139,2	3139,2	3139,2	3139,2	3139,2	3139,2	
$V_{S3}, в/с$	0,62	0,68	0,45	0,28	0,21	0,18	0	
$\text{Cos}\alpha_{G3}$	0,12	0,54	0,78	0,78	0,85	0,92	0	
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				Арк.

G ₇ .H	4316,4	4316,4	4316,4	4316,4	4316,4	4316,4	4316,4
V _{S7} .v/c	0,35	0,45	0,51	0,38	0,45	0,84	0
Cosα _{G7}	-0,12	-0,25	-0,48	-0,78	-0,85	-0,76	0
G ₆ .H	2354,4	2354,4	2354,4	2354,4	2354,4	2354,4	2354,4
V _{S6} .v/c	0,15	0,32	0,35	0,28	0,24	0,64	0
Cosα _{G6}	0,05	0,09	-0,32	-0,54	-0,45	-0,28	0
G ₅ .H	6827,8	6827,8	6827,8	6827,8	6827,8	6827,8	6827,8
V _{S5} .v/c	1,41	1,15	1,08	0,75	0,65	0,45	0,85
Cosα _{G5}	0,56	0,58	0,78	0,85	0,74	0,72	-0,45
M _{ЗВ} .НМ	-315,4	589,3	1154,6	978,6	575,2	342,8	870,5
M _{ЗВ} .ММ	-31,5	58,9	115,5	97,8	57,5	34,3	87,0

Визначаємо масштабний коефіцієнт моментів сил

$$\mu_{МЗВ} = \frac{M_{ЗВ.МАХ}}{M_{ЗВ.МАХ}} = \frac{1257,3}{125,73} = 10,0 \frac{Нм}{мм}$$

4.2. Побудова діаграм робіт.

Діаграму робіт сил будуємо методом графічного інтегрування діаграми моментів сил. Принявши полюсну відстань Н = 50 мм.

Вважаючи моменти сил опору за період константа і робота сил опору рушійних сил дорівнюють одна одній. Діаграму робіт сил опору будуємо з'єднуючи початкову та кінцеву діаграму робіт рушійних сил.

Масштабний коефіцієнт робіт.

$$\mu_A = \mu_M \cdot \mu_\varphi \cdot H = 10 * 0,026 * 50 = 13,0 \frac{Дж}{мм}$$

Виконавши диференціювання графіка A_{ЗВ.р}, одержимо на діаграмі M_{ЗВ.р} пряму, рівнобужну осі абцис, що представляє величину постійного зведеного моменту рушійних сил

$$M_{ДВ} = M_{ЗВ.Р} = h_1 \cdot \mu_M = 7,5 * 10 = 75,0 Нм.$$

Діаграму надлишкових робіт будуємо графічно за формулою.

$$A_H = A_{с.р} - A_{с.о}$$

4.3. Зведений момент інерції механізму. Визначення моменту

Арк.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
------	------	----------	--------	------

інерції маховика методом Ф.Віттенбауера.

Визначаємо зведений до ведучого валу машини момент інерції ланок. Зведеним моментом інерції механізму називається такий умовний момент інерції обертової ланки зведення. Кінетична енергія якої у кожному положенні механізму дорівнює сумі кінетичних енергій усіх його ланок

$$I_{зв} = \frac{1}{\omega_4^2} \cdot (m_3 \cdot V_{S3}^2 + m_7 \cdot V_{S7}^2 + m_6 \cdot V_{S6}^2 + m_5 \cdot V_{S5}^2 + I_3 \cdot \omega_3^2 + I_7 \cdot \omega_7^2 + I_6 \cdot \omega_3^2 + I_5 \cdot \omega_5^2).$$

Де моменти інерції ланок дорівнюють

$$I_3 = 0,1 \cdot m_3 \cdot \ell_3^2 = 0,1 \cdot 200 \cdot 1,6 \cdot 1,6^2 = 81,92 \text{ кг*м}^2;$$

$$I_7 = 0,1 \cdot m_7 \cdot \ell_7^2 = 0,1 \cdot 200 \cdot 2,2 \cdot 2,2^2 = 96,8 \text{ кг*м}^2;$$

$$I_6 = 0,1 \cdot m_6 \cdot \ell_6^2 = 0,1 \cdot 200 \cdot 1,2 \cdot 1,2^2 = 34,56 \text{ кг*м}^2 .$$

$$I_5 = 0,1 \cdot m_5 \cdot \ell_5^2 = 0,1 \cdot 200 \cdot 3,48 \cdot 3,48^2 = 842,9 \text{ кг*м}^2;$$

Наприклад для положення 1

$$\begin{aligned} I_{зв} &= \frac{1}{\omega_4^2} \cdot (m_3 \cdot V_{S3}^2 + m_7 \cdot V_{S7}^2 + m_6 \cdot V_{S6}^2 + m_5 \cdot V_{S5}^2 + I_3 \cdot \omega_3^2 + I_7 \cdot \omega_7^2 + I_6 \cdot \omega_3^2 + I_5 \cdot \omega_5^2) = \\ &= \frac{1}{3,14^2} (320 \cdot 0,22^2 + 440 \cdot 0,68^2 + 240 \cdot 0,63^2 + 696 \cdot 0,47^2 + 96,8 \cdot 1,89^2 + \\ &+ 81,92 \cdot 1,76^2 + 34,56 \cdot 2,2^2 + 842,9 \cdot 0,15^2) = 143,8 \text{ кг*м}^2. \end{aligned}$$

Розрахунки зводимо до таблиці 4.2

Таблиця 4.2 Зведені моменти інерції механізму

Пол.	0	1	2	3	4	5	
$\omega_4, \text{с}^{-1}$	3,14	3,14	3,14	3,14	3,14	3,14	
$I_3, \text{кг*м}^2$	81,92	81,92	81,92	81,92	81,92	81,92	
$\omega_7, \text{с}^{-1}$	0	1,76	4,2	6,2	5,6	2,2	
$I_7, \text{кг*м}^2$	96,8	96,8	96,8	96,8	96,8	96,8	
$\omega_6, \text{с}^{-1}$	0	2,2	0,4	3,8	0,58	4,7	
$I_6, \text{кг*м}^2$	34,56	34,56	34,56	34,56	34,56	34,56	
$\omega_5, \text{с}^{-1}$	0,57	0,15	0,22	0,26	0,05	0,02	
$I_5, \text{кг*м}^2$	842,9	842,9	842,9	842,9	842,9	842,9	
$V_{S3}, \text{м/с}$	0	0,22	0,26	0,39	0,44	0,56	
$m_3, \text{кг}$	320	320	320	320	320	320	
$V_{S7}, \text{м/с}$	0	0,68	0,84	0,54	0,48	0,25	
$m_7, \text{кг}$	440	440	440	440	440	440	Арк.
$V_{S6}, \text{м/с}$	0	0,63	0,81	0,46	0,41	0,17	
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

$m_6, \text{кг}$	240	240	240	240	240	240
$V_{S5}, \text{м/с}$	0,85	0,47	0,54	0,81	1,2	1,24
$m_5, \text{кг}$	696	696	696	696	696	696
$I_{3B}, \text{кгм}^2$	98,7	143,8	201,5	215,6	214,3	195,4
$I_{3B}, \text{мм}$	24,7	35,9	50,4	53,9	53,5	48,8

Будуємо діаграму зведених моментів інерції прийнявши масштабний коефіцієнт

$$\mu_{I_{3B}} = \frac{I_{3B.MAX}}{I_{3B.MAX}} = \frac{378,2}{94,55} = 4,0 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{мм}}$$

Діаграму енергомас Ф.Віттенбауера будуємо методом виключення параметру φ з діаграм надлишкової роботи та зведених моментів інерції.

Проводимо дотичні до діаграми енергомас під кутами ψ_{\min} та ψ_{\max} .

Продовження таблиці 4.2

Пол.	6	7	8	9	10	11	12
$\omega_4, \text{с}^{-1}$	3,14	3,14	3,14	3,14	3,14	3,14	3,14
$I_3, \text{кг} \cdot \text{м}^2$	81,92	81,92	81,92	81,92	81,92	81,92	81,92
$\omega_7, \text{с}^{-1}$	1,1	4,3	4,7	3,7	3,2	1,9	0
$I_7, \text{кг} \cdot \text{м}^2$	96,8	96,8	96,8	96,8	96,8	96,8	96,8
$\omega_6, \text{с}^{-1}$	1,7	0,5	1,9	2,2	3,1	3,6	0
$I_6, \text{кг} \cdot \text{м}^2$	34,56	34,56	34,56	34,56	34,56	34,56	34,56
$\omega_5, \text{с}^{-1}$	0,02	0,01	0,12	0,15	0,16	0,21	0,57
$I_5, \text{кг} \cdot \text{м}^2$	842,9	842,9	842,9	842,9	842,9	842,9	842,9
$V_{S3}, \text{м/с}$	0.62	0.68	0.45	0.28	0.21	0.18	0
$m_3, \text{кг}$	320	320	320	320	320	320	320
$V_{S7}, \text{м/с}$	0,35	0,45	0,51	0,38	0,45	0,84	0
$m_7, \text{кг}$	440	440	440	440	440	440	440
$V_{S6}, \text{м/с}$	0,15	0,32	0,35	0,28	0,24	0,64	0
$m_6, \text{кг}$	240	240	240	240	240	240	240
$V_{S5}, \text{м/с}$	1,41	1,15	1,08	0,75	0,65	0,45	0,85
$m_5, \text{кг}$	696	696	696	696	696	696	696
$I_{3B}, \text{кгм}^2$	85,9	215,7	378,2	358,4	245,6	154,2	98,7
$I_{3B}, \text{мм}$	21,5	53,9	94,55	89,6	61,4	38,6	24,7

							Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

$$tg \psi_{\min} = \frac{\mu_{I_{3B}}}{2\mu_A} \cdot \omega_{KP}^2 (1 - \delta) = \frac{4,0}{2 * 13,0} * 3,14^2 (1 - 0,2) = 1,21;$$

$$\psi_{\min} = 50,5.^{\circ}$$

$$tg \psi_{\max} = \frac{\mu_{I_{3B}}}{2\mu_A} \cdot \omega_{KP}^2 (1 + \delta) = \frac{4,0}{2 * 13,0} * 3,14^2 (1 + 0,2) = 1,82;$$

$$\psi_{\max} = 61,2.^{\circ}$$

Відрізок АВ = 132 мм.

Момент інерції маховика

$$I_{\max} = \frac{\overline{AB} \cdot \mu_A}{\omega_{кр}^2 \cdot \delta} = \frac{132 * 13,0}{3,14^2 \cdot 0,2} = 870,2 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

4.4.Визначення дійсної кутової швидкості ведучої ланки.

Величину кутової швидкості ведучої ланки без маховика визначаємо за формулою

$$\omega_i = \sqrt{\frac{2 \cdot A_H + I_{3B.O} \cdot \omega_1^2}{I_{3B.i}}} \text{ с}^{-1}$$

Наприклад для положення 1

$$\omega_{41} = \sqrt{\frac{2 \cdot A_H + I_{3B.O} \cdot \omega_1^2}{I_{3B.1}}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 70,3 + 98,7 * 3,35^2}{173,8}} = 3,08 \text{ с}^{-1}.$$

Результати розрахунків наведені в таблиці 4.3.

Пол.	0,12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$\omega_{Б,с}$	3,08	2,98	2,75	2,52	2,62	2,89	3,04	3,12	3,45	3,95	3,45	3,21

$\omega_B, \text{мм}$	61,6	59,6	55,0	50,4	52,4	57,8	60,8	62,4	69,0	79,0	69,0	64,1
$\omega_M, \text{с}^{-1}$	3,32	3,28	3,25	2,84	2,95	3,05	3,12	3,25	3,75	3,94	3,54	3,28
ω_{MM}^-	66,4	65,6	65,0	56,8	59,0	61,0	62,4	65,0	75,0	78,8	70,8	65,6

Величину кутової швидкості ведучої ланки з маховиком розраховуємо за формулою

$$\omega_i = \sqrt{\frac{2 \cdot A_H + (I_{3B.O} + I_M) \cdot \omega_1^2}{(I_{3B.i} + I_M)}} \text{ с}^{-1}$$

Наприклад для положення 1

$$\omega_{i1} = \sqrt{\frac{2 \cdot A_H + (I_{3B.O} + I_M) \cdot \omega_1^2}{(I_{3B.1} + I_M)}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 70,3 + (98,7 + 2548,4)3,35^2}{(98,7 + 2548,4)}} = 3,12 \text{ с}^{-1}$$

Результати розрахунків наведені в таблиці 4.3.

За даними таблиці 4.3 побудую графіки зміни кутових швидкостей ведучої ланки $\bar{\omega}_i$ без маховика і $\bar{\omega}_{iM}$ з маховиком. Для побудови використаю масштабний коефіцієнт

$$\mu_\omega = \frac{\omega_{i.\max}}{\omega_{i.\max}} = \frac{3,95}{79} = 0,05 \frac{\text{с}^{-1}}{\text{мм}}$$

Визначаємо величину коефіцієнта нерівномірності руху механізму без маховика і з маховиком.

$$\delta_p = \frac{2(\omega_{i.\max} - \omega_{i.\min})}{\omega_{i.\max} + \omega_{i.\min}} = \frac{2(3,95 - 2,52)}{3,95 + 2,52} = 0,44.$$

$$\delta_{p.M} = \frac{2(\omega_{i.M \max} - \omega_{i.M \min})}{\omega_{i.M \max} + \omega_{i.M \min}} = \frac{2(3,94 - 2,84)}{3,94 + 2,84} = 0,2.$$

$$\delta_p > [\delta = 0,02] \quad \delta_{p.M} < [\delta = 0,02]$$

												Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	4.5. Визначення параметрів двигуна.							

Використовуючи діаграму зведених моментів сил, визначаємо величину постійного моменту двигуна

$$M_{зв.д} = \overline{M_{зв.р}} \cdot \mu_M = 7,5 * 10 = 75,0 Н \cdot м$$

В такому разі потужність і кількість оборотів за хвилину двигуна відповідно мають значення

$$N_{д} = \frac{M_{зв.д} \cdot \omega_4}{1000} = \frac{1257,3 * 3,14}{1000} = 3,95 кВт.$$

4.6. Розрахунок розмірів маховика

Більшість сучасних важільних механізмів забезпечується або дисковим маховиком, або маховиком у вигляді обода зі спицями. На підставі аналізу конструкцій маховиків встановлено наступні геометричні співвідношення між його розмірами.

$$H / B = (1,2 \dots 2,0);$$

$$D / B = (6 \dots 10);$$

де D – середній діаметр обода маховика;

H – висота обода маховика;

B – ширина обода маховика.

Приймаючи, що вся маса маховика m зосереджена у об'ємі обода, одержуємо формулу

$$m = H \cdot B \cdot \pi \cdot D \cdot \gamma \text{ кг.}$$

де $\gamma = 7000 \text{ кг/м}^3$ – щільність матеріалу маховика.

					Арк.
					Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

Момент інерції обода маховика дорівнює $I_M=0,25 * m * D^2$, відкіля середній діаметр обода дорівнює

$$D = (0,37...0,39) \cdot \sqrt[5]{I_M} = 0,375 \cdot \sqrt[5]{870,2} = 1,44 \text{ м.}$$

Приймаємо $D = 1,44$ м, співвідношення $H/B=1,2$, $D/B=7$ і визначаємо ширину та висоту обода маховика

$$B = D / 7 = 1,44 / 7 = 0,205 \text{ м.}$$

$$H = 1,2 \cdot B = 1,2 \cdot 0,205 = 0,246 \text{ м.}$$

Зовнішній D_H і внутрішній D_B діаметри обода дорівнюють

$$D_H = D + H = 1,44 + 0,246 = 1,686 \text{ м}$$

$$D_B = D - H = 1,44 - 0,246 = 1,194 \text{ м}$$

Посадковий діаметр валу під маховик визначаємо з розрахунку на крутіння по зниженій допущеній напрузі

$$d_n = \sqrt[3]{\frac{10^3 \cdot M_{зв. \max}}{0,2 \cdot [\tau_{кр}]}} = \sqrt[3]{\frac{10^3 \cdot 1257,3}{0,2 \cdot 15}} = 74,8 \text{ мм.}$$

де $[\tau_{кр}] = 15...20$ Мпа – знижена напруга, що допускається, на крутіння.

Розрахунок d_n округляємо до цілого числа.

Діаметр d_c і довжина l_c маточини маховика знаходимо за співвідношеннями

$$d_c = 2 \cdot d_n = 2 \cdot 75 = 150 \text{ мм,}$$

$$l_c = 1,05 \cdot B = 1,05 \cdot 205 = 215 \text{ мм.}$$

Для вибору конструкції маховика (дисковий чи зі спицями) визначаємо кількість спиць за формулою:

$$n_c = (0,143...0,125) \cdot \sqrt{D} = (0,143...0,125) \sqrt{1440} = (5,4...4,7)$$

Якщо $n_c > 3$, то маховик рекомендують конструювати зі спицями.

Маховик креслимо у стандартному масштабі 2:1.

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		