

Підйомно-транспортні машини

УДК 693.546

В.С. Ловеїкін, д-р техн. наук, професор КНУБА,
К.І. Почка, магістр КНУБА

СИЛОВИЙ АНАЛІЗ РОЛИКОВОЇ ФОРМУВАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ З РЕКУПЕРАЦІЙНИМ ПРИВОДОМ

В існуючих установках поверхневого ущільнення залізобетонних виробів використовується кривошипно-повзунний або гідравлічний привод зворотно-поступального руху формувального візка з укочуючими роликами [1–5]. Під час постійних пуско-гальмівних режимів руху на елементи установки діють значні навантаження і втрачається значна частина енергії, яка йде на втомлене руйнування конструкції. Для зменшення динамічних навантажень та витрат енергії запропонована конструкція роликової формувальної установки (рис. 1), яка складається з двох спарених візків 1 і 2, що приводяться в рух від одного приводу 5. Привод складається з двох кривошипно-повзунних механізмів, кривошипи яких зміщені між собою на певний кут. Така конструкція формувальної установки дозволяє здійснювати передачу енергії від одного візка, який здійснює процес гальмування, до іншого, який в цей час розганяється. В літературі відсутні результати динамічних властивостей такої формувальної установки.

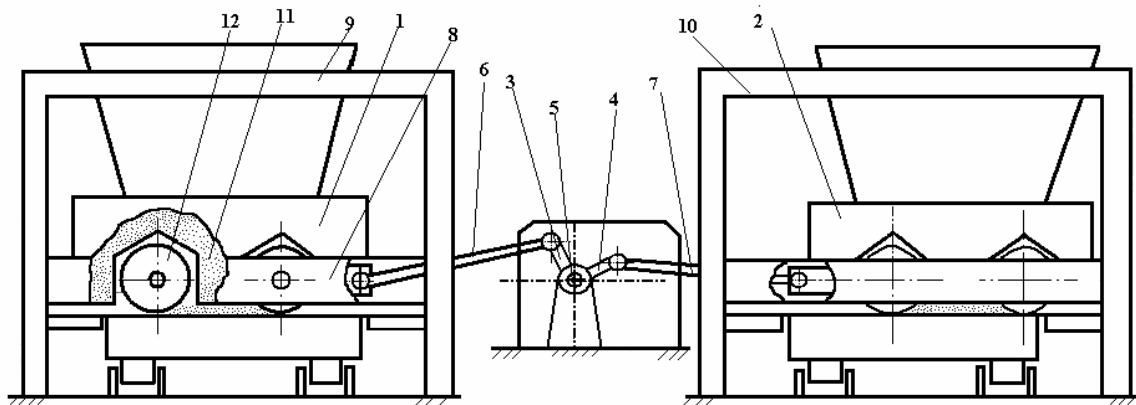


Рис. 1. Установка для формування плоских залізобетонних виробів на спарених постах з єдиним рекупераційним приводом

Тому метою цієї роботи є дослідження динамічних властивостей формувальної установки з рекупераційним приводом, схема якої показана на рис. 2. Основна задача цих досліджень полягає в тому, щоб визначити таке зміщення $\Delta\varphi$ осей кривошипів приводу, при якому навантаження, що діють на приводний механізм були б мінімальними [4].

Для проведення силового аналізу запропонованої формувальної установки визначимо швидкості і прискорення візків 1 і 2 при постійній кутовій швидкості кривошипу ($\dot{\varphi} = \omega = \text{const}$)

$$\dot{x}_1 = \dot{\varphi} \cdot \frac{\partial x_1}{\partial \varphi}; \quad \dot{x}_2 = \dot{\varphi} \cdot \frac{\partial x_2}{\partial \varphi}, \quad (1)$$

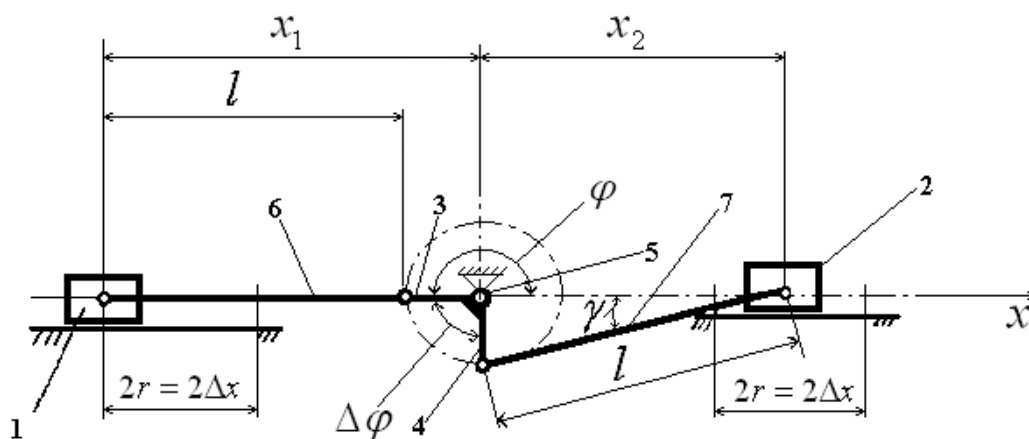


Рис. 2. Кінематична схема спарених кривошипно-повзунних механізмів, які реалізують рекуперацію енергії при зворотно-поступальному русі візків

В формулі (1) введені наступні позначення

$$\frac{\partial x_1}{\partial \varphi} = -r \cdot \sin \varphi \cdot \left(1 + \frac{r}{l} \cdot \frac{\cos \varphi}{\sqrt{1 - r^2/l^2 \cdot \sin^2 \varphi}} \right); \quad (2)$$

$$\frac{\partial x_2}{\partial \varphi} = -r \cdot \cos \varphi \cdot \left(1 + \frac{r}{l} \cdot \frac{\sin \varphi}{\sqrt{1 - r^2/l^2 \cdot \cos^2 \varphi}} \right), \quad (3)$$

де r - радіус кривошипів; l - довжина шатунів; φ - кутова координата положення кривошипа; $\dot{\varphi} = \omega$ - кутова швидкість кривошипів; $\Delta\varphi$ - кут зміщення одного кривошипу відносно іншого.

Кінцеві формули для визначення лінійних прискорень візків формувальної установки:

$$\ddot{x}_1 = \dot{\varphi}^2 \cdot \frac{\partial^2 x_1}{\partial \varphi^2}; \quad \ddot{x}_2 = \dot{\varphi}^2 \cdot \frac{\partial^2 x_2}{\partial \varphi^2}, \quad (4)$$

де

$$\frac{\partial^2 x_1}{\partial \varphi^2} = r \cdot \left(-\cos \varphi - \frac{r}{l} \cdot \sin^2 \varphi \cdot \left(\frac{r^2}{l^2} \cdot \frac{\cos^2 \varphi}{\left(1 - r^2/l^2 \cdot \sin^2 \varphi\right)^{-1}} - 1 \right) - \frac{r}{l} \cdot \frac{\cos^2 \varphi}{\sqrt{1 - r^2/l^2 \cdot \sin^2 \varphi}} \right); \quad (5)$$

$$\frac{\partial^2 x_2}{\partial \varphi^2} = r \cdot \left(-\cos(\varphi + \Delta\varphi) + \frac{r}{l} \cdot \sin^2(\varphi + \Delta\varphi) \cdot \left(\frac{r^2}{l^2} \cdot \frac{\cos^2(\varphi + \Delta\varphi)}{\left(1 - r^2/l^2 \cdot \sin^2(\varphi + \Delta\varphi)\right)^{-1}} - 1 \right) + \frac{r}{l} \cdot \frac{\cos^2(\varphi + \Delta\varphi)}{\sqrt{1 - r^2/l^2 \cdot \sin^2(\varphi + \Delta\varphi)}} \right). \quad (6)$$

У відповідності з методикою, наведеною в [6], визначено силу опору переміщенню формувального візка, яка дорівнює $F_B = 3562 \text{ Н}$ при використанні таких вихідних даних: розміри виробу, що формується: висота плити – $h_0 = 0,22 \text{ м}$, ширина виробу – $B = 1,164 \text{ м}$; тип суміші, що ущільнюється – дрібнозерниста бетонна суміш, вологістю – $W = 10\%$; потрібна щільність виробу – $k_{\text{ущ}} = 0,98$; величина максимального контактного тиску, що забезпечує $k_{\text{ущ}} = 0,98$ при $W = 10\%$, за експериментальними даними $q = 625 \text{ кПа}$ [6].

З умови рівності миттєвої потужності на переміщення формувального візка та необхідної потужності на приводному валу кривошипа отримуємо залежність для визначення необхідного крутного моменту на приводному валу кривошипа:

$$M_{\text{кр}} = \frac{F_B \cdot V_B}{\omega \cdot \eta}, \quad (7)$$

де V_B – швидкість переміщення формувального візка, яка не є сталою величиною, а залежить від кута повороту кривошипу приводу; $\eta = 0,9$ – ККД передаточного механізму від кривошипа до формувального візка; $\omega = 10,5 \text{ рад/с}$ – кутова швидкість обертання кривошипу.

Отримана залежність (7) використовується для визначення необхідного крутного моменту для установки з одним формувальним візком. Для установки, що здійснює формування залізобетонних виробів на спарених постах з єдиним рекуперативним приводом необхідний крутний момент на приводному валу буде визначатися за наступним виразом

$$M_{\text{кр}} = M_{\text{кр1}} + M_{\text{кр2}}, \quad (8)$$

де $M_{\text{кр1}}$, $M_{\text{кр2}}$ – необхідні крутні моменти на приводному валу першого та другого кривошипів відповідно першого та другого візків, які в свою чергу визначаються так

$$M_{\text{кр1}} = \frac{F_B}{\eta} \cdot \frac{\partial x_1}{\partial \varphi}; \quad (9)$$

$$M_{\text{кр2}} = \frac{F_B}{\eta} \cdot \frac{\partial x_2}{\partial \varphi}. \quad (10)$$

Для формувальної установки з параметрами: $r = 0,2 \text{ м}$; $l = 1,0 \text{ м}$; $F_B = 3562 \text{ Н}$ визначені функції зміни моментів статичного опору переміщенню першого 1 та другого 2 візків та їхнього сумарного значення 3 при різних значеннях кута $\Delta\varphi$ (рис. 3). Аналіз цих графіків показує, що найменше значення сумарного моменту статичного опору спостерігається при куті зміщення кривошипів $\Delta\varphi = 85^\circ$. Для цього значення кута $\Delta\varphi$ максимальні значення моментів статичного опору переміщенню першого та другого візків відповідно дорівнюють $M_{\text{кр1}} = 807 \text{ Н} \cdot \text{м}$ та $M_{\text{кр2}} = 807 \text{ Н} \cdot \text{м}$, а їхнє сумарне максимальне значення – $M_{\text{кр}} = 1229 \text{ Н} \cdot \text{м}$. Ці параметри визначені також для інших значень кута $\Delta\varphi$ і зведені в таблиці 1 та 2.

Аналіз даних таблиць 1 та 2 показує, що найменше значення сумарного моменту статичного опору переміщенню формувальних візків досягає значення $M_{\text{кр}} = 1196 \text{ Н} \cdot \text{м}$ при куті зміщення між осями кривошипів $\Delta\varphi = 82^\circ$. Крім того, з цих таблиць видно, що найбільші значення $M_{\text{кр}} = 1614 \text{ Н} \cdot \text{м}$ та $M_{\text{кр}} = 1610 \text{ Н} \cdot \text{м}$ спостерігається при $\Delta\varphi = 0^\circ$ та $\Delta\varphi = 150^\circ$ відповідно. Ці значення майже на 35% перевищують відповідні значення при оптимальному значенні кута $\Delta\varphi = 82^\circ$.

Під час руху формувальних візків на них також діють сили інерції, моменти від яких визначаються за залежностями:

– для першого візка

$$M_{\text{ил}} = m \cdot \ddot{x}_1 \cdot \frac{\partial x_1}{\partial \varphi}; \quad (11)$$

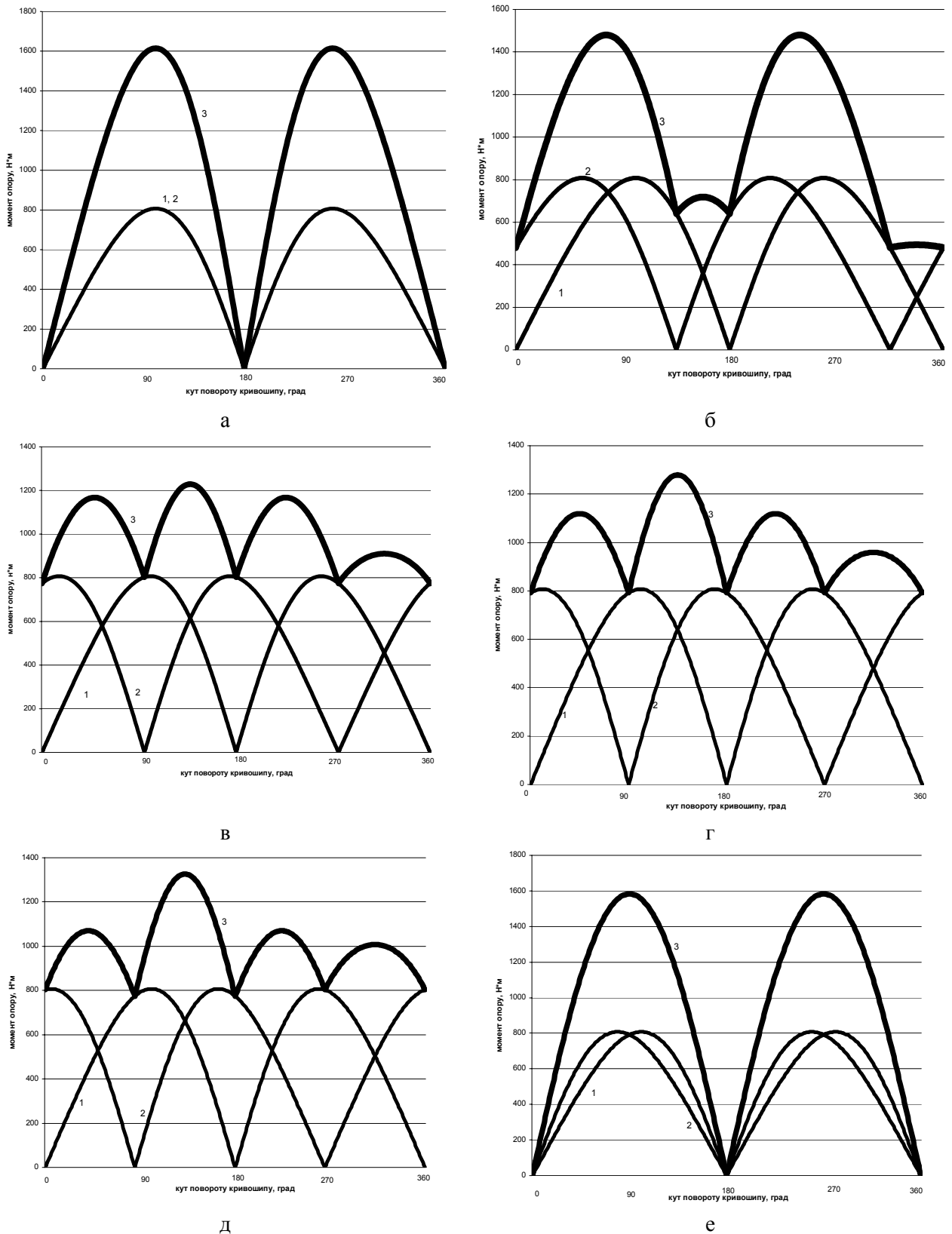


Рис. 3. Графіки зміни моментів статичного опору на приводному валу установки при різних значеннях кута зміщення кривошипів:
а - $\Delta\varphi = 0^\circ$; б - $\Delta\varphi = 45^\circ$; в - $\Delta\varphi = 85^\circ$; г - $\Delta\varphi = 90^\circ$; д - $\Delta\varphi = 95^\circ$; е - $\Delta\varphi = 180^\circ$; 1, 2 – моменти статичного опору першого та другого візків відповідно; 3 – сумарний момент статичного опору

Таблиця 1

$\Delta\varphi, ^\circ$	0	30	60	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90
$M_{оп1\max}, H \cdot M$	807	807	807	807	807	807	807	807	807	807	807	807	807
$M_{оп2\max}, H \cdot M$	807	807	807	807	807	807	807	807	807	807	807	807	807
$M_{оп.сум. min}, H \cdot M$	0	327	616	757	762	766	770	775	778	782	785	788	791
$M_{оп.сум. max}, H \cdot M$	1614	1553	1380	1205	1196	1207	1218	1229	1239	1249	1259	1269	1279

Таблиця 2

$\Delta\varphi, ^\circ$	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	120	150	180
$M_{оп1\max}, H \cdot M$	807	807	807	807	807	807	807	807	807	807	807	807	807
$M_{оп2\max}, H \cdot M$	807	807	807	807	807	807	807	807	807	807	807	807	807
$M_{оп.сум. min}, H \cdot M$	788	785	782	778	774	770	766	761	757	752	615	327	0
$M_{оп.сум. max}, H \cdot M$	1289	1298	1308	1317	1326	1335	1344	1353	1362	1370	1510	1610	1583



— для другого візка

$$M_{i2} = m \cdot \ddot{x}_2 \cdot \frac{\partial x_2}{\partial \varphi}, \quad (12)$$

Тоді момент сил інерції всієї установки в процесі формування визначається залежністю

$$M_i = M_{i1} + M_{i2}. \quad (13)$$

Для формувальної установки з параметрами: $\omega = 10,5$ рад/с; $r = 0,2$ м; $l = 1,0$ м; $m = 1000$ кг визначені функції зміни моментів сил інерції першого – 1 та другого – 2 візків, та їхнього сумарного значення – 3 при різних значеннях кута $\Delta\varphi$ (рис. 4). Аналіз цих графіків показує, що найменше відхилення максимального значення сумарного моменту сил інерції спостерігається при куті зміщення кривошипів $\Delta\varphi = \pi/2$. Для цього значення кута $\Delta\varphi$ найбільше відхилення сумарного моменту сил інерції дорівнює $\Delta M_i = 1176$ Н·м. Ці параметри визначені також для інших значень кута $\Delta\varphi$ і зведені в таблиці 3 та 4.

Аналіз даних таблиць 3 та 4 показує, що найменше відхилення максимального значення сумарного моменту сил інерції досягається при куті зміщення кривошипів $\Delta\varphi = \pi/2$. Крім того, з цих таблиць видно, що найбільші відхилення $\Delta M_i = 5683$ Н·м та $\Delta M_i = 6157$ Н·м спостерігається відповідно при $\Delta\varphi = 0^\circ$ та $\Delta\varphi = 180^\circ$. Ці значення майже в п'ять разів перевищують відповідні значення при оптимальному значенні кута $\Delta\varphi = \pi/2$.

Отже, під час процесу формування загальний опір переміщенню формувального візка визначається за залежністю:

— для першого візка

$$M_{on1} = M_{кр1} + M_{i1}; \quad (14)$$

— для другого візка

$$M_{on2} = M_{кр2} + M_{i2}. \quad (15)$$

Тоді загальний момент опору переміщенню формувальних візків установки під час процесу формування буде визначатися як сума двох попередніх виразів:

$$M_{on} = M_{on1} + M_{on2}. \quad (16)$$

Для формувальної установки з параметрами: $\omega = 10,5$ рад/с; $r = 0,2$ м; $l = 1,0$ м; $m = 1000$ кг визначені функції зміни загальних моментів опору переміщенню першого – 1 та другого – (рис. 5). Аналіз цих графіків показує, що найменше відхилення максимального значення 2 формувальних візків, та їхнього сумарного значення – 3 при різних значеннях кута $\Delta\varphi$ сумарного загального моменту опору переміщенню формувальних візків установки спостерігається при куті зміщення кривошипів $\Delta\varphi = 95^\circ$. Для цього значення кута $\Delta\varphi$ значення сумарного загального моменту опору переміщенню формувальних візків установки $M_{on} = 1931$ Н·м. Ці параметри визначені також для інших значень кута $\Delta\varphi$ і зведені в таблиці 5 та 6.

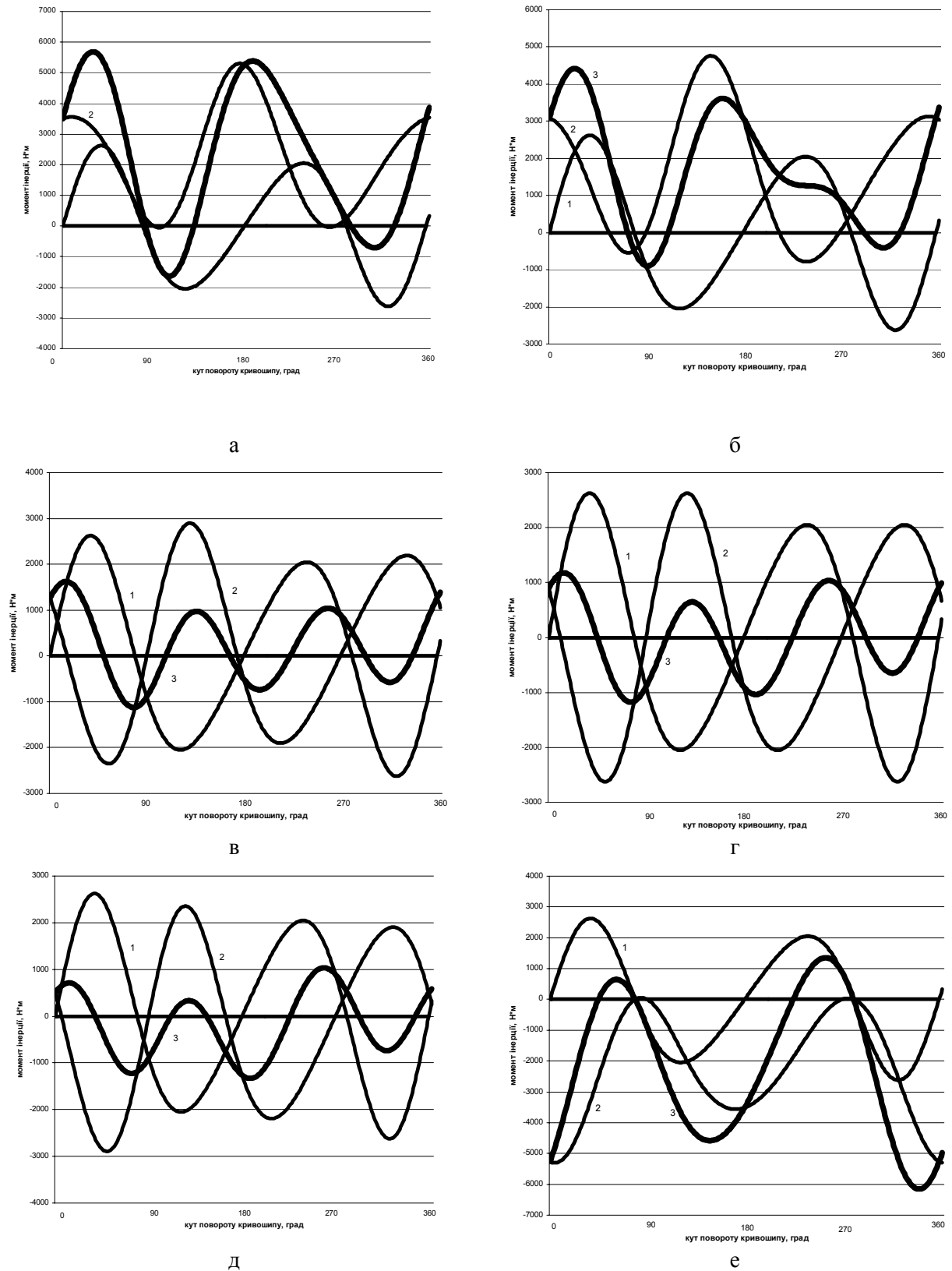


Рис. 4. Графіки зміни моментів інерції установки при різних значеннях кута зміщення кривошипів: а - $\Delta\varphi = 0^\circ$; б - $\Delta\varphi = 45^\circ$; в - $\Delta\varphi = 85^\circ$; г - $\Delta\varphi = 90^\circ$; д - $\Delta\varphi = 95^\circ$; е - $\Delta\varphi = 180^\circ$; 1, 2 – моменти інерції першого та другого візків відповідно; 3 – сумарний момент інерції



Таблиця 3

$\Delta\varphi,^{\circ}$	0	30	60	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90
$M_{I_{\min}}, H \cdot M$	-2624	-2624	-2624	-2624	-2624	-2624	-2624	-2624	-2624	-2624	-2624	-2624	-2624
$M_{I_{\max}}, H \cdot M$	2624	2624	2624	2624	2624	2624	2624	2624	2624	2624	2624	2624	2624
$M_{I_{2\min}}, H \cdot M$	-52	-446	-1182	-2140	-2194	-2247	-2299	-2354	-2407	-2458	-2516	-2570	-2624
$M_{I_{2\max}}, H \cdot M$	5301	5166	4165	3111	3058	3002	2950	2895	2842	2786	2733	2678	2624
$M_{I_{\min}}, H \cdot M$	-1627	-1008	-921	-1087	-1097	-1107	-1117	-1127	-1136	-1146	-1156	-1166	-1176
$M_{I_{\max}}, H \cdot M$	5683	5042	3561	1969	1885	1798	1711	1623	1534	1444	1354	1266	1175

Таблиця 4

$\Delta\varphi,^{\circ}$	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	120	150	180
$M_{I_{\min}}, H \cdot M$	-2624	-2624	-2624	-2624	-2624	-2624	-2624	-2624	-2624	-2624	-2624	-2624	-2624
$M_{I_{\max}}, H \cdot M$	2624	2624	2624	2624	2624	2624	2624	2624	2624	2624	2624	2624	2624
$M_{I_{2\min}}, H \cdot M$	-2679	-2732	-2787	-2841	-2895	-2949	-3004	-3057	-3108	-3164	-4165	-5171	-5305
$M_{I_{2\max}}, H \cdot M$	2569	2516	2461	2408	2353	2301	2246	2194	2140	2086	1182	445	52
$M_{I_{\min}}, H \cdot M$	-1185	-1195	-1213	-1271	-1330	-1388	-1448	-1506	-1564	-1622	-2713	-4417	-6157
$M_{I_{\max}}, H \cdot M$	1084	1033	1034	1034	1034	1032	1032	1032	1032	1032	1041	1113	1346

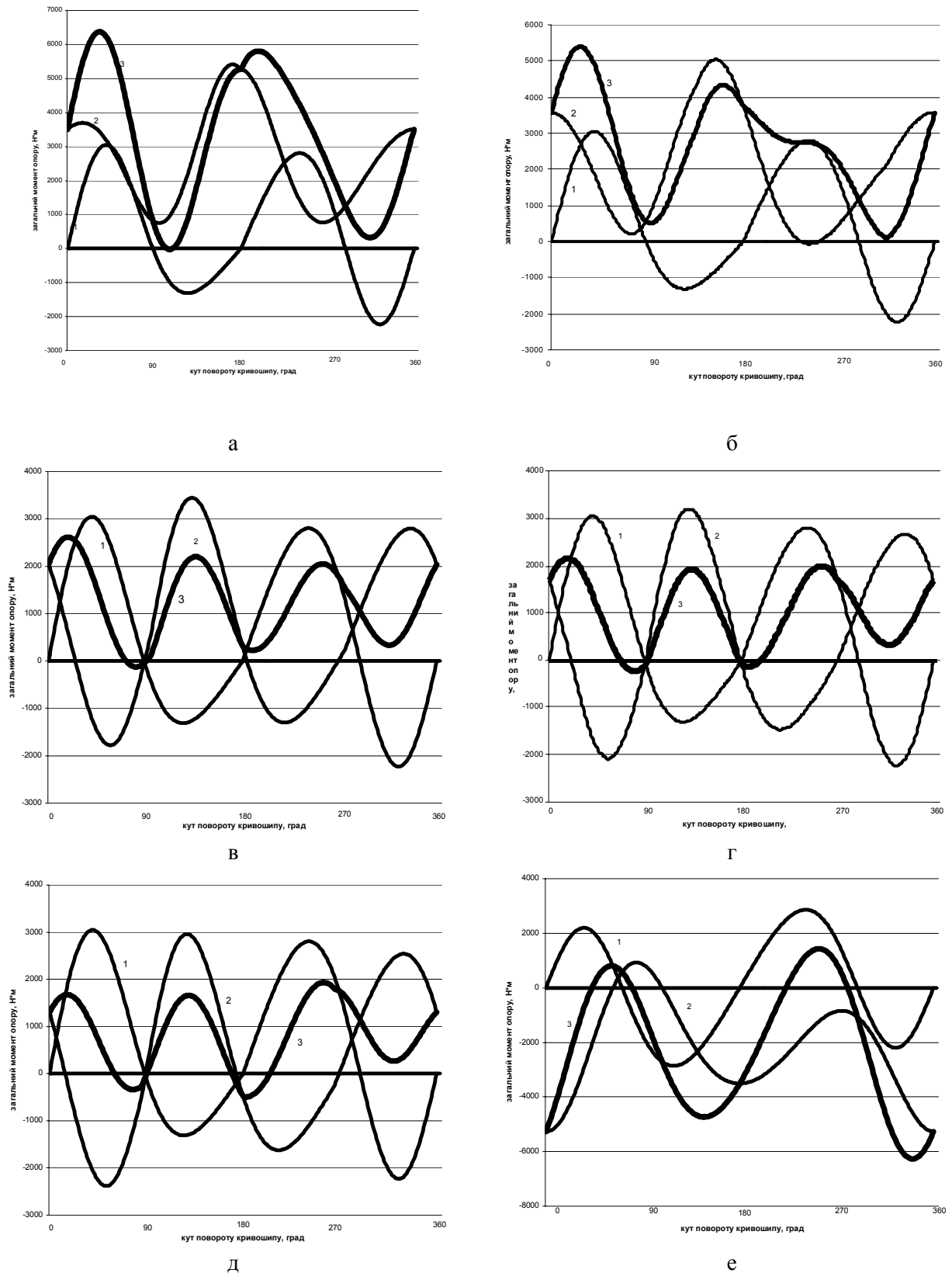


Рис. 5. Графіки зміни загального моменту опору установки при різних значеннях кута зміщення кривошипів:

а - $\Delta\varphi = 0^\circ$; б - $\Delta\varphi = 45^\circ$; в - $\Delta\varphi = 85^\circ$; г - $\Delta\varphi = 90^\circ$; д - $\Delta\varphi = 95^\circ$; е - $\Delta\varphi = 180^\circ$; 1, 2 – загальні моменти опору першого та другого візків відповідно; 3 – сумарний загальний опір



Таблиця 5

$\Delta\varphi,^{\circ}$	0	30	60	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90
$M_{3,оп.1\max}, H \cdot M$	3042	3042	3042	3042	3042	3042	3042	3042	3042	3042	3042	3042	3042
$M_{3,оп.2\max}, H \cdot M$	5412	5340	4550	3635	3586	3540	3491	3444	3394	3347	3298	3250	3200
$M_{3,оп.сум.\min}, H \cdot M$	-23	237	221	-38	-60	-81	-102	-124	-146	-168	-189	-211	-233
$M_{3,оп.сум.\max}, H \cdot M$	6373	5946	4567	2970	2880	2795	2705	2615	2523	2433	2340	2244	2153

Таблиця 6

$\Delta\varphi,^{\circ}$	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	120	150	180
$M_{3,оп.1\max}, H \cdot M$	3042	3042	3042	3042	3042	3042	3042	3042	3042	3042	3042	3042	3042
$M_{3,оп.2\max}, H \cdot M$	3150	3103	3056	3006	2959	2910	2863	2814	2767	2718	1884	1211	855
$M_{3,оп.сум.\min}, H \cdot M$	-253	-279	-351	-422	-494	-566	-636	-708	-780	-847	-2016	-3790	-5718
$M_{3,оп.сум.\max}, H \cdot M$	2058	1964	1952	1942	1931	1917	1906	1896	1883	1872	2081	2443	2883

Аналіз даних таблиць 5 та 6 показує, що найменше значення сумарного моменту загального опору переміщенню формувальних візків досягає значення $M_{\text{оп}} = 1872 \text{ Н} \cdot \text{м}$ при куті зміщення між осями кривошипів $\Delta\varphi = 100^\circ$. Крім того, з цих таблиць видно, що найбільше значення $M_{\text{оп}} = 6373 \text{ Н} \cdot \text{м}$ спостерігається при $\Delta\varphi = 0^\circ$. Це значення майже в три з половиною рази перевищують відповідне значення при оптимальному значенні кута $\Delta\varphi = 100^\circ$.

Таким чином запропонована формувальна установка з рекупераційним приводом дозволяє значно зменшити діючі навантаження на елементи формувальної установки, а також знизити енергетичні витрати і покращити динамічний режим руху всієї установки.

Література

1. *Гарнец В.Н., Ловейкин В.С.* Оценка эффективности конструкций машин роликового формования// Горные, строительные и дорожные машины.: Респ. межвед. научн.-техн. сб. – 1988. – Вып. 41. – С. 51-55.
2. *Кузин В.Н.* Технология роликового формования плоских изделий из мелкозернистых бетонов: Автореф. дис. канд. наук. – М., 1981. – 20 с.
3. *Назаренко И.И., Ловейкин В.С., Гарнец В.Н.* Оптимизация конструктивных параметров привода машин роликового формования// Горные, строительные и дорожные машины.: Респ. межвед. научн.-техн. сб. – 1992. – Вып. 46. – С. 19-25.
4. *Ловейкин В.С.* Расчеты оптимальных режимов движения механизмов строительных машин. – К.: УМК ВО, 1990. – 168 с.
5. *Гарнец В.М.* Прогресивні бетоноформуючі агрегати і комплекси. – К.: Будівельник, 1991. – 144 с.
6. *Рюшин В.Т.* Исследование рабочего процесса и разработка методики расчета машин роликового формования бетонных смесей. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – К., 1986.