

УДК 693.546

*В.С. Ловейкін, д.т.н., професор;  
К.І. Почка, к.т.н., доцент*

## ДОСЛІДЖЕННЯ НАВАНТАЖЕНЬ В ЕЛЕМЕНТАХ РОЛИКОВОЇ ФОРМУВАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ З ЕНЕРГЕТИЧНО ВРІВНОВАЖЕНИМ ПРИВОДОМ

**АНОТАЦІЯ.** Для роликової формувальної установки з енергетично врівноваженим приводом на три формувальні візки визначено навантаження в її елементах та встановлено характер їх зміни протягом циклу руху, а також визначено значення потужності, необхідної для забезпечення процесу формування.

**Ключові слова:** роликова формувальна установка, приводний механізм, зусилля, потужність.

**SUMMARY.** For roller forming installation with energetically balanced drive on three forming carts loadings in its elements are defined and nature of their change throughout a motion cycle is established, and also value of the power necessary for ensuring process of formation is defined.

**Key words:** roller forming installation, driving mechanism, effort, power.

**Постановка проблеми.** В установках роликового формування залізобетонних виробів під час їхньої роботи виникають значні динамічні навантаження в елементах приводного механізму та в елементах формувальних візків [1-6]. Не дивлячись на досить широке дослідження технологічного процесу формування залізобетонних виробів безвібраційним роликовим методом [1-3], до цих пір не було досліджено динаміку руху формувального візка та її вплив на процес формування. Мало приділялось уваги зусиллям, що виникають в елементах приводного механізму та формувального візка.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В існуючих теоретичних та експериментальних дослідженнях машин роликового формування залізобетонних виробів обґрунтовано їхні конструктивні параметри та продуктивність [1-3]. Разом з тим недостатньо уваги приділено дослідженню діючим динамічним навантаженням та режимам руху, що в значній мірі впливає на роботу установки та на якість готової продукції.

Для підвищення продуктивності роботи з одночасним зниженням енерговитрат на забезпечення технологічного процесу ущільнення виробів з бетонної суміші та розвантаження приводного механізму було розроблено конструкцію роликової формувальної установки [7], що складається з нерухомого порталу та трьох формувальних візків, які виконані з можливістю приведення в зворотно-поступальний рух від спільного приводу з трьома кривошипно-повзунними механізмами, кривошипи яких жорстко закріплені на одному приводному валу і зміщені один відносно одного на кут  $\Delta\varphi = 120^\circ$ . Всі формувальні пристрої розташовані паралельно між собою з одного боку приводного валу для забезпечення ущільнення виробів з бетонної суміші на одній технологічній лінії. При застосуванні спільного енергетично врівноваженого приводу на три формувальні візки підвищується продуктивність установки, зменшуються динамічні навантаження в елементах її приводного механізму, зменшуються зайві руйнівні навантаження на рамну конструкцію і, відповідно, підвищується довговічність установки в цілому.

На рис. 1 зображено загальний вигляд роликової формувальної установки з енергетично врівноваженим приводом для трьох формувальних візків (вигляд з боку) та наведено її кінематичну схему. Установка складається з трьох однакових формувальних візків 1, 2 та 3, що розміщені з одного боку від приводу. Кожний з візків через шатуни 4, 5 та 6 шарнірно рухомо з'єднано з кривошипами 7, 8 та 9, які жорстко закріплені на приводному валу 10 та зміщені один відносно другого на кут  $\Delta\varphi = 120^\circ$ . Формувальні візки 1, 2 та 3 змонтовані на спільному порталі 11. На порталі 11 є напрямні руху 12, у яких здійснюють зворотно-поступальний рух вищезгадані формувальні візки над порожниною

форми 13. Формувальні візки 1, 2 та 3 мають подавальний бункер 14 та уковувальні ролики 15, які встановлені в напрямних руху 12.

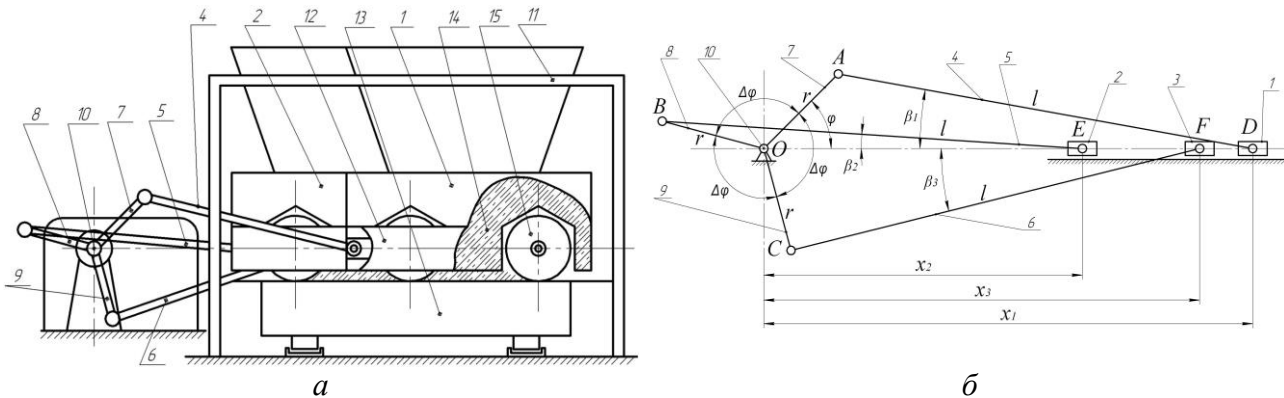


Рисунок 1. Роликова формувальна установка з енергетично врівноваженим приводом (а) та її кінематична схема (б).

В роботі [8] було визначено навантаження в елементах роликів формувальних установок, однак це було зроблено для установки з кривошипно-повзунним приводом на один формувальний візок. Тому актуальною є задача визначення навантажень в елементах роликів формувальної установки з енергетично врівноваженим приводом.

**Метою даної роботи** є дослідження навантажень в елементах роликів формувальної установки з енергетично врівноваженим приводом на три формувальні візки та встановлення характеру їх зміни протягом циклу руху, а також визначення значення потужності, необхідної для забезпечення процесу формування.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** В такій установці під час її роботи виникають навантаження в елементах приводного механізму та в елементах формувального візка. Для роликів формувальної установки з енергетично врівноваженим приводом складено розрахункову схему навантажень на один із формувальних візків (рис. 2, а) та на приводний механізм (рис. 2, б), визначені геометричні параметри та місця прикладання відповідних навантажень. На інші два формувальні візки діють аналогічні навантаження, що відповідають їхнім положенням.

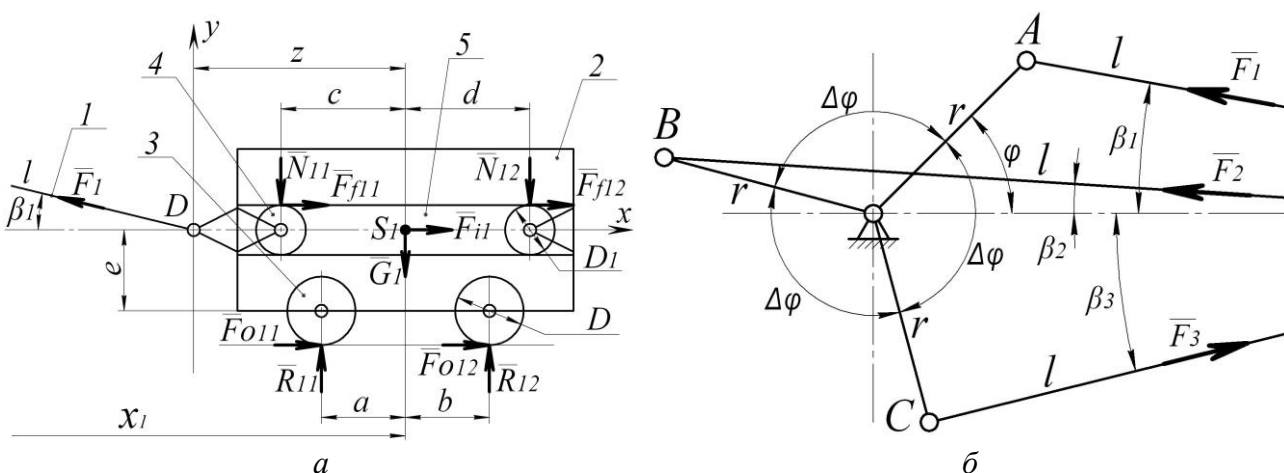


Рисунок 2. Розрахункова схема навантажень на формувальний візок (а) та на приводний механізм (б).

На розрахунковій схемі навантажень на формувальний візок (рис. 2, а) 1 – шатун, 2 – формувальний візок, 3 – уковувальні ролики, 4 – напрямні ролики та 5 – напрямні руху формувального візка.

Для установки складено рівняння кінетостатичної рівноваги формувальних візків 1, 2 та 3. Спроекувавши всі сили на осі  $x$  і  $y$  та взявши суму моментів усіх сил відносно центрів мас формувальних візків, отримано:

для першого формувального візка:

$$\begin{cases} \sum X = -F_1 \cdot \cos \beta_1 + F_{O11} + F_{O12} + F_{f11} + F_{f12} + F_{i1} = 0; \\ \sum Y = F_1 \cdot \sin \beta_1 + R_{11} + R_{12} - G_1 - N_{11} - N_{12} = 0; \\ \sum M_{S1} = -R_{11} \cdot a + F_{O11} \cdot \left(e + \frac{D}{2}\right) + R_{12} \cdot b + F_{O12} \cdot \left(e + \frac{D}{2}\right) + \\ + N_{11} \cdot c - F_{f11} \cdot \frac{D_1}{2} - N_{12} \cdot d - F_{f12} \cdot \frac{D_1}{2} - F_1 \cdot z \cdot \sin \beta_1 = 0; \end{cases} \quad (1)$$

для другого формувального візка:

$$\begin{cases} \sum X = -F_2 \cdot \cos \beta_2 + F_{O21} + F_{O22} + F_{f21} + F_{f22} + F_{i2} = 0; \\ \sum Y = F_2 \cdot \sin \beta_2 + R_{21} + R_{22} - G_2 - N_{21} - N_{22} = 0; \\ \sum M_{S2} = -R_{21} \cdot a + F_{O21} \cdot \left(e + \frac{D}{2}\right) + R_{22} \cdot b + F_{O22} \cdot \left(e + \frac{D}{2}\right) + \\ + N_{21} \cdot c - F_{f21} \cdot \frac{D_1}{2} - N_{22} \cdot d - F_{f22} \cdot \frac{D_1}{2} - F_2 \cdot z \cdot \sin \beta_2 = 0; \end{cases} \quad (2)$$

для третього формувального візка:

$$\begin{cases} \sum X = -F_3 \cdot \cos \beta_3 + F_{O31} + F_{O32} + F_{f31} + F_{f32} + F_{i3} = 0; \\ \sum Y = F_3 \cdot \sin \beta_3 + R_{31} + R_{32} - G_3 - N_{31} - N_{32} = 0; \\ \sum M_{S3} = -R_{31} \cdot a + F_{O31} \cdot \left(e + \frac{D}{2}\right) + R_{32} \cdot b + F_{O32} \cdot \left(e + \frac{D}{2}\right) + \\ + N_{31} \cdot c - F_{f31} \cdot \frac{D_1}{2} - N_{32} \cdot d - F_{f32} \cdot \frac{D_1}{2} - F_3 \cdot z \cdot \sin \beta_3 = 0, \end{cases} \quad (3)$$

де  $F_1$ ,  $F_2$  та  $F_3$  – зусилля в шатунах, яке необхідне для приведення в зворотно-поступальний рух формувальних візків;  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  та  $\beta_3$  – кутові координати, які визначають положення шатунів відносно горизонталі;  $F_{O11}$ ,  $F_{O12}$ ,  $F_{O21}$ ,  $F_{O22}$ ,  $F_{O31}$  та  $F_{O32}$  – зусилля взаємодії ролика з бетонною сумішшю;  $R_{11}$ ,  $R_{12}$ ,  $R_{21}$ ,  $R_{22}$ ,  $R_{31}$  та  $R_{32}$  – вертикальні сили взаємодії ролика з бетонною сумішшю;  $N_{11}$ ,  $N_{12}$ ,  $N_{21}$ ,  $N_{22}$ ,  $N_{31}$  та  $N_{32}$  – нормальні реакції напрямних руху формувальних візків на напрямні ролики;  $F_{f11} = N_{11} \cdot f_{np}$ ,  $F_{f12} = N_{12} \cdot f_{np}$ ,  $F_{f21} = N_{21} \cdot f_{np}$ ,  $F_{f22} = N_{22} \cdot f_{np}$ ,  $F_{f31} = N_{31} \cdot f_{np}$ ,  $F_{f32} = N_{32} \cdot f_{np}$  – сили тертя напрямних роликів по напрямних руху формувальних візків;  $f_{np}$  – коефіцієнт тертя напрямних роликів по напрямних руху формувальних візків;  $F_{i1}$ ,  $F_{i2}$  та  $F_{i3}$  – сили інерції формувальних візків;  $G_1$ ,  $G_2$  та  $G_3$  – сили тяжіння формувальних візків;  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$ ,  $e$ ,  $z$  – геометричні розміри формувального візка;  $D$  – діаметр укочувальних роликів;  $D_1$  – діаметр напрямних роликів.

Розв'язавши складені системи рівнянь (1)-(3) відносно  $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_3$ ,  $N_{11}$ ,  $N_{12}$ ,  $N_{21}$ ,  $N_{22}$ ,  $N_{31}$  та  $N_{32}$ , отримано залежності для визначення зусилля в шатунах та нормальних реакцій напрямних руху формувальних візків на напрямні ролики в залежності від кута повороту кривошипа:

$$N_{11} = F_1 \cdot \sin \beta_1 + R_{11} + R_{12} - G_1 - N_{12}; \quad (4)$$



$$N_{12} = \frac{-R_{11} \cdot a + (F_{O11} + F_{O12}) \cdot \left(e + \frac{D}{2}\right) + R_{12} \cdot b + (F_1 \cdot \sin \beta_1 + R_{11} + R_{12} - G_1) \cdot \left(c - f_{np} \cdot \frac{D_1}{2}\right) - F_1 \cdot z \cdot \sin \beta_1}{(d + c)};$$

$$N_{21} = F_2 \cdot \sin \beta_2 + R_{21} + R_{22} - G_2 - N_{22};$$

$$N_{22} = \frac{-R_{21} \cdot a + (F_{O21} + F_{O22}) \cdot \left(e + \frac{D}{2}\right) + R_{22} \cdot b + (F_2 \cdot \sin \beta_2 + R_{21} + R_{22} - G_2) \cdot \left(c - f_{np} \cdot \frac{D_1}{2}\right) - F_2 \cdot z \cdot \sin \beta_2}{(d + c)}; \quad (5)$$

$$N_{31} = F_3 \cdot \sin \beta_3 + R_{31} + R_{32} - G_3 - N_{32};$$

$$N_{32} = \frac{-R_{31} \cdot a + (F_{O31} + F_{O32}) \cdot \left(e + \frac{D}{2}\right) + R_{32} \cdot b + (F_3 \cdot \sin \beta_3 + R_{31} + R_{32} - G_3) \cdot \left(c - f_{np} \cdot \frac{D_1}{2}\right) - F_3 \cdot z \cdot \sin \beta_3}{(d + c)}; \quad (6)$$

$$F_1 = \frac{F_{O11} + F_{O12} + (R_{11} + R_{12} - G_1) \cdot f_{np} + F_{i1}}{\cos \beta_1 - \sin \beta_1 \cdot f_{np}}; \quad F_2 = \frac{F_{O21} + F_{O22} + (R_{21} + R_{22} - G_2) \cdot f_{np} + F_{i2}}{\cos \beta_2 - \sin \beta_2 \cdot f_{np}};$$

$$F_3 = \frac{F_{O31} + F_{O32} + (R_{31} + R_{32} - G_3) \cdot f_{np} + F_{i3}}{\cos \beta_3 - \sin \beta_3 \cdot f_{np}}. \quad (7)$$

Користуючись геометричними характеристиками приводного механізму отримано вирази для визначення кутових координат положення шатунів відносно горизонталі:

$$\beta_1 = \arcsin\left(\frac{r}{l} \cdot \sin \varphi\right); \quad \beta_2 = \arcsin\left(\frac{r}{l} \cdot \sin(\varphi + \Delta\varphi)\right); \quad \beta_3 = \arcsin\left(\frac{r}{l} \cdot \sin(\varphi + 2 \cdot \Delta\varphi)\right), \quad (8)$$

де  $r$  – радіус кривошипів;  $\varphi$  – кутова координата кривошипа першого формувального візка;  $\Delta\varphi$  – кут зміщення кривошипів.

Сили інерції формувальних візків визначені за виразами [10]:

$$F_{i1} = -m_1 \cdot \ddot{x}_1; \quad F_{i2} = -m_2 \cdot \ddot{x}_2; \quad F_{i3} = -m_3 \cdot \ddot{x}_3, \quad (9)$$

де  $m_1$ ,  $m_2$  та  $m_3$  – маси першого, другого та третього формувальних візків відповідно (маси формувальних візків рівні  $m_1 = m_2 = m_3 = m$ );  $\ddot{x}_1$ ,  $\ddot{x}_2$  та  $\ddot{x}_3$  – функції зміни лінійного прискорення формувальних візків.

Функції зміни лінійного прискорення першого, другого та третього формувальних візків роликової формувальної установки з енергетично врівноваженим приводом розраховані за методикою, наведеною в роботах [9, 10].

Для роликової формувальної установки з параметрами: радіус кривошипа –  $r = 0,2 м$ ; довжина шатуна –  $l = 0,8 м$ ; кутова швидкість обертання кривошипів  $\omega = \dot{\varphi} = 10,5 рад/с$ ; сила опору –  $F_0 = 3562 Н$ , яка необхідна на переміщення формувального візка з двома уключувальними роликами радіусом  $R = 0,1 м$  для формування виробів висотою –  $h_0 = 0,22 м$ ; шириною –  $B = 1,164 м$ ; тип суміші, що ущільнюється – дрібнозерниста суміш; вологість бетонної суміші –  $W = 10\%$ ; потрібна щільність виробу –  $k_{yщ} = 0,98$ ; та всі інші геометричні та експлуатаційні показники:  $F_{O11} = F_{O12} = F_{O21} = F_{O22} = F_{O31} = F_{O32} = 7962 Н$ ;  $R_{11} = R_{12} = R_{21} = R_{22} = R_{31} = R_{32} = 9740 Н$ ;  $G_1 = G_2 = G_3 = 10000 Н$ ;  $m_1 = m_2 = m_3 = m = 1000 кг$ ;  $f_{np} = 0,008$ ;  $D = 0,22 м$ ;  $D_1 = 0,046 м$ ;  $a = 0,27 м$ ;  $b = 0,27 м$ ;  $c = 0,37 м$ ;  $d = 0,37 м$ ;  $e = 0,1 м$  та  $z = 0,65 м$  [3].

Підставивши всі отримані дані в рівняння (4)-(7), побудовано графіки зміни зусиль в шатунах  $F_1$ ,  $F_2$  та  $F_3$  (рис. 3) та нормальних реакцій  $N_{11}$ ,  $N_{12}$ ,  $N_{21}$ ,  $N_{22}$ ,  $N_{31}$  та  $N_{32}$  (рис. 4) напрямних руху формувальних візків на напрямні ролики в залежності від кута повороту кривошипа.

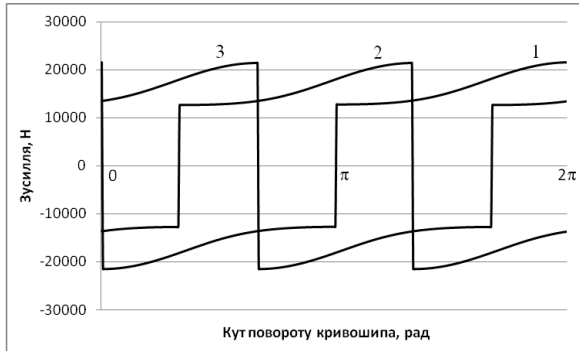


Рисунок 3. Графіки зміни зусиль в шатунах  $F_1 - 1$ ,  $F_2 - 2$  та  $F_3 - 3$  в залежності від кута повороту кривошипа.

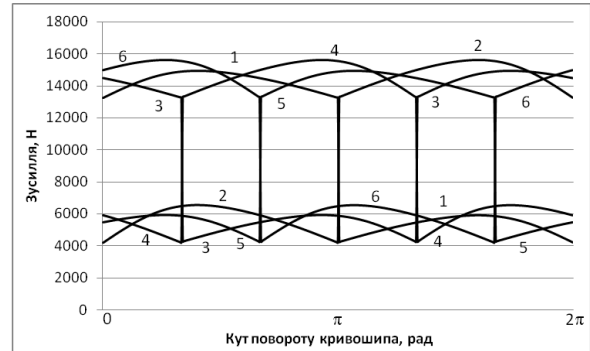


Рисунок 4. Графіки зміни зусиль  $N_{11} - 1$ ,  $N_{12} - 2$ ,  $N_{21} - 3$ ,  $N_{22} - 4$ ,  $N_{31} - 5$  та  $N_{32} - 6$  в залежності від кута повороту кривошипа.

Аналізуючи графіки на рис. 3 та 4 можна побачити, що шатуни під час першої частини циклу працюють на розтягування, а під час другої частини – на стиснення; напрямні ролики сприймають навантаження від напрямних руху формувальних візків, але під час першої частини циклу навантаження на перший напрямний ролик значно більше ніж на другий, а під час другої частини циклу – навпаки. Ця нерівномірність спричинена значною величиною зусилля взаємодії робочого органу з бетонною сумішшю.

Використавши функції зміни зусиль в шатунах, отримано залежності для визначення необхідного крутного моменту на приводному валу для кожного з візків:

$$M_{кр1} = F_1 \cdot r \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - (\varphi + \beta_1)\right); \quad M_{кр2} = F_2 \cdot r \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - (\varphi + \Delta\varphi + \beta_2)\right);$$

$$M_{кр3} = F_3 \cdot r \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - (\varphi + 2 \cdot \Delta\varphi + \beta_3)\right).$$
(10)

Значення крутного моменту на приводному валу дало змогу визначити функцію зміни потужності, необхідної для здійснення процесу формування для кожного з візків:

$$P_1 = M_{кр1} \cdot \omega; \quad P_2 = M_{кр2} \cdot \omega; \quad P_3 = M_{кр3} \cdot \omega$$
(11)

та її сумарного значення

$$P_{сум} = P_1 + P_2 + P_3.$$
(12)

Для даної установки з раніше наведеними параметрами побудовано графіки зміни потужностей, необхідних для забезпечення процесу формування для першого візка – 1, другого візка – 2, третього візка – 3 та її сумарного значення – 4 в залежності від кута повороту кривошипа (рис. 5).

Аналіз цих графіків показує, що максимальне значення потужності, необхідної для забезпечення процесу формування кожним формувальним візком становить  $P_{1,2,3 \max} = 8045,6 \text{ Вт}$ .

При цьому середнє значення цієї потужності протягом циклу роботи установки для кожного візка має значення  $P_{1,2,3 \text{ сєр}} = 4738,8 \text{ Вт}$ . Максимальне значення сумарної потужності установки, необхідної для забезпечення процесу формування становить  $P_{сум \max} = 16462,1 \text{ Вт}$ , а середнє значення цієї потужності протягом циклу роботи

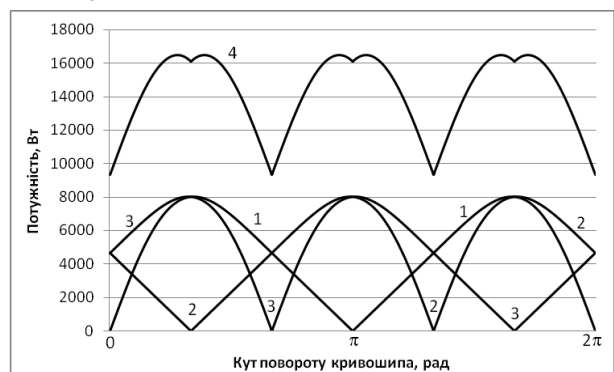


Рисунок 5. Графіки зміни потужностей, необхідних для забезпечення процесу формування для першого – 1, другого – 2, третього – 3 візків та сумарної потужності – 4 в залежності від кута повороту кривошипа.





установки має значення  $P_{\text{сум сер}} = 14242,4 \text{ Вт}$ . З наведеного вище можна зробити висновок, що при застосуванні енергетично врівноваженого приводу на три формувальні візки середнє значення сумарної потужності на кожний формувальний візок становить  $4747,5 \text{ Вт}$ , що майже рівне значенню  $P_{1,2,3 \text{ сер}}$ , а максимальне значення сумарної потужності на кожний формувальний візок становить  $5487,4 \text{ Вт}$ , що в 1,466 разів менше у порівнянні з  $P_{1,2,3 \text{ max}}$ .

### Висновки

1. В результаті проведених досліджень визначено навантаження в елементах роликової формувальної установки з енергетично врівноваженим приводом на три формувальні візки і встановлено характер їх зміни протягом циклу руху.
2. Визначено значення потужності, необхідної для забезпечення процесу формування кожним формувальним візком та їх сумарне значення.
3. Результати роботи можуть в подальшому бути корисними для уточнення та удосконалення існуючих інженерних методів силового розрахунку машин роликового формування як на стадіях проектування/конструювання, так і в режимах реальної експлуатації.

### Література

1. Гарнець В.М. Прогресивні бетоноформуєчі агрегати і комплекси. / В.М. Гарнець – К.: Будівельник, 1991. – 144 с.
2. Кузин В.Н. Технология роликового формования плоских изделий из мелкозернистых бетонов. / В.Н. Кузин. – Автореф. дис... канд. наук. – М. – 1981. – 20 с.
3. Рюшин В.Т. Исследование рабочего процесса и разработка методики расчета машин роликового формования бетонных смесей. / В.Т. Рюшин. – Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – К. – 1986.
4. Ловейкін В.С. Динамічний аналіз роликової формувальної установки з рекупераційним приводом. / В.С. Ловейкін, К.І. Почка // Динаміка, міцність і надійність сільськогосподарських машин: Пр. І-ї Міжнародної науково-технічної конференції (DSR AM-I). – Тернопіль, 2004. – С. 507-514.
5. Ловейкін В.С. Результати експериментальних досліджень режимів руху роликової формувальної установки з рекупераційним приводом. / В.С. Ловейкін, К.І. Почка // Вісник Харківського національного університету сільського господарства ім. П.Василенка. – Харків, 2007. – № 59, Том 1. – С. 465-474.
6. Ловейкін В.С. Визначення оптимального значення кута зміщення кривошипів роликової формувальної установки з рекупераційним приводом. / В.С. Ловейкін, К.І. Почка // Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні. – НУ «Львівська політехніка», 2007. – № 41. – С. 127-134.
7. Патент 50032 U Україна, МКВ В28В13/00 / Установка для формирования виробів з бетонних сумішей / Ловейкін В.С., Почка К.І. – № u 200911443 заявл. 10.11.2009; опубл. 25.05.2010, Бюл. № 10.
8. Ловейкін В.С. Визначення навантажень в елементах роликових формувальних установок. / В.С. Ловейкін, К.І. Почка // Збірник наукових праць. – Харків: УкрДАЗТ, 2008. – Вип. 88 – С. 15-20.
9. Ловейкін В.С. Динамічний аналіз роликової формувальної установки з енергетично врівноваженим приводом / В.С. Ловейкін, В.П. Ковбаса, К.І. Почка // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК. – К., 2010. – Вип. 144, ч. 5. – С. 338-344.
10. Ловейкін В.С. Силовий аналіз роликової формувальної установки з енергетично врівноваженим приводом. / В.С. Ловейкін, В.П. Ковбаса, К.І. Почка // Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету. – Мелітополь: ТДАТУ, 2011. – Вип. 1, Том 2. – С. 16-23.