УДК 693.546

В. С. Ловейкін[1], К. І. Почка[2]
[1] Національний університет біоресурсів і природокористування України (м. Київ),
[2] Київський національний університет будівництва і архітектури

ДОСЛІДЖЕННЯ НАВАНТАЖЕНЬ В ЕЛЕМЕНТАХ РОЛИКОВОЇ ФОРМУВАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ З ВРІВНОВАЖЕНИМ ПРИВОДОМ

© Ловейкін В. С., Почка К. І., 2015

Для роликової формувальної установки з врівноваженим приводом на чотири 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, рекуперацiйний привід, динамічне зрівноваження.

The loading on four forming carts for a roller forming plant with a balanced drive is defined and the nature of their change throughout a motion cycle is established. Also the power value necessary for ensuring the formation process is defined.
Key words: roller forming plant, recuperation drive, dynamic equilibration.

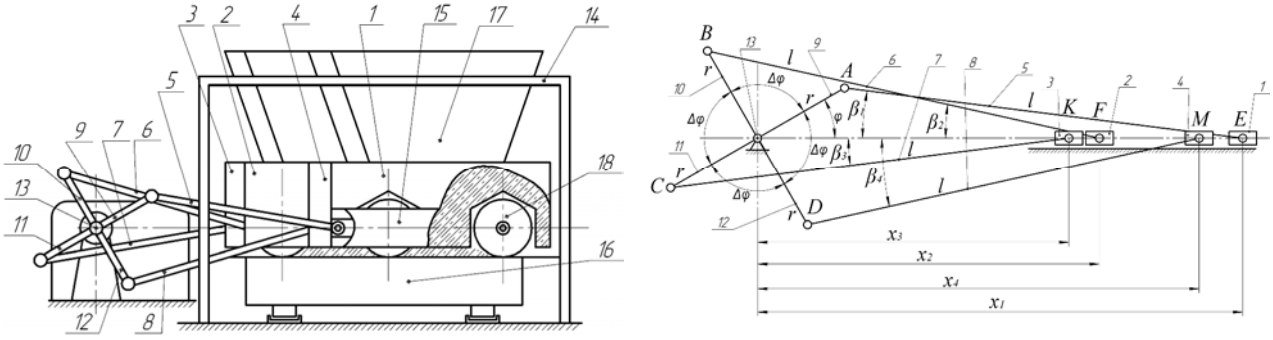
Постановка проблеми. В установках роликового формування залізобетонних виробів під час їхньої роботи виникають значні динамічні навантаження в елементах привідного механізму та в елементах формувальних візків [1–6]. Незважаючи на доволі широке дослідження технологічного процесу формування залізобетонних виробів безвібраційним роликовим методом [1–3], до цього часу не була досліджена динаміка руху формувального візка та її вплив на процес формування. Мало приділялось уваги зусиллям, що виникають в елементах привідного 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]. До того ж недостатньо уваги приділено дослідженню діючим динамічним навантаженням та режимам руху, що значною мірою 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 привідного механізму було розроблено конструкцію роликової формувальної установки [7, 8], що складається з нерухомого порталу та чотирьох формувальних візків, які виконані з можливістю приведення у зворотно-поступальний рух від спільного приводу з чотирма кривошипно-повзунними механізмами, кривошипи яких жорстко закріплені на одному привідному валу і зміщені один щодо одного на кут $\Delta j = 90^0$. Усі формувальні пристрої розташовані паралельно між собою з одного боку привідного вала для забезпечення ущільнення виробів з бетонної суміші на одній технологічній лінії [8]. Під час застосування спільного врівноваженого приводу на чотири формувальні візки підвищується продуктивність установки, зменшуються динамічні навантаження в елементах її привідного механізму, зменшуються зайві руйнівні навантаження на рамну конструкцію і, відповідно, підвищується довговічність установки загалом.

На рис. 1 зображено загальний вигляд роликової формувальної установки з врівноваженим приводом для чотирьох формувальних візків (вигляд з боку) та наведено її кінематичну схему. Установка складається з чотирьох однакових формувальних візків 1, 2, 3 та 4, що розміщені з одного боку від приводу. Кожний з візків через шатуни 5, 6, 7 та 8 шарнірно рухомо з'єднаний з кривошипами 9, 10, 11 та 12, які жорстко закріплені на привідному валу 13 та зміщені один щодо

іншого на кут $\Delta j = 90^0$. Формувальні візки 1, 2, 3 та 4 змонтовані на спільному порталі 14. На порталі 14 є напрямні руху 15, у яких здійснюють зворотно-поступальний рух вищезгадані формувальні візки над порожниною форми 16. Формувальні візки 1, 2, 3 та 4 мають подавальний бункер 17 та укочувальні ролики 18, які встановлені в напрямних руху 15.



а *б*

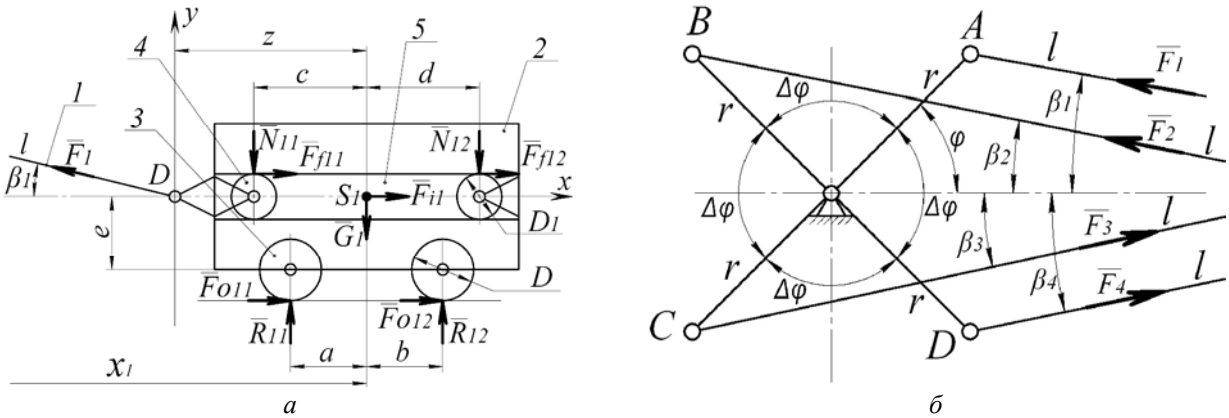
Рис. 1. Роликова формувальна установка з врівноваженим приводом (а) та її кінематична схема (б)

У [9] було визначене навантаження в елементах роликових формувальних установок, однак це було зроблено для установки з кривошипно-повзунним приводом на один формувальний візок. Тому актуальним є завдання визначення навантажень в елементах роликової формувальної установки з врівноваженим приводом.

Мета роботи – дослідити навантаження в елементах роликової формувальної установки з врівноваженим приводом на чотири формувальні візки та встановити характер їх зміни протягом циклу руху, а також визначити значення потужності, необхідної для забезпечення процесу формування.

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

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



а *б*

Рис. 2. Розрахункова схема навантажень на формувальний візок (а) та на привідний механізм (б)

Для установки складено рівняння кінетостатичної рівноваги формувальних візків 1, 2, 3 та 4. Спроектувавши усі сили на осі x і y та узявши суму моментів усіх сил щодо центрів мас формувальних візків, отримано:

для першого формувального візка:

$$\begin{cases} \sum X = -F_1 \cdot \cos b_1 + F_{O11} + F_{O12} + F_{f11} + F_{f12} + F_{i1} = 0; \\ \sum Y = F_1 \cdot \sin b_1 + R_{11} + R_{12} - G_1 - N_{11} - N_{12} = 0; \\ \sum M_{S1} = -R_{11} \cdot a + F_{O11} \cdot \left(e + \dfrac{D}{2} \right) + R_{12} \cdot b + F_{O12} \cdot \left(e + \dfrac{D}{2} \right) + \\ + N_{11} \cdot c - F_{f11} \cdot \dfrac{D_1}{2} - N_{12} \cdot d - F_{f12} \cdot \dfrac{D_1}{2} - F_1 \cdot z \cdot \sin b_1 = 0; \end{cases} \quad (1)$$

для другого формувального візка:

$$\begin{cases} \sum X = -F_2 \cdot \cos b_2 + F_{O21} + F_{O22} + F_{f21} + F_{f22} + F_{i2} = 0; \\ \sum Y = F_2 \cdot \sin b_2 + R_{21} + R_{22} - G_2 - N_{21} - N_{22} = 0; \\ \sum M_{S2} = -R_{21} \cdot a + F_{O21} \cdot \left(e + \dfrac{D}{2} \right) + R_{22} \cdot b + F_{O22} \cdot \left(e + \dfrac{D}{2} \right) + \\ + N_{21} \cdot c - F_{f21} \cdot \dfrac{D_1}{2} - N_{22} \cdot d - F_{f22} \cdot \dfrac{D_1}{2} - F_2 \cdot z \cdot \sin b_2 = 0; \end{cases} \quad (2)$$

для третього формувального візка:

$$\begin{cases} \sum X = -F_3 \cdot \cos b_3 + F_{O31} + F_{O32} + F_{f31} + F_{f32} + F_{i3} = 0; \\ \sum Y = F_3 \cdot \sin b_3 + R_{31} + R_{32} - G_3 - N_{31} - N_{32} = 0; \\ \sum M_{S3} = -R_{31} \cdot a + F_{O31} \cdot \left(e + \dfrac{D}{2} \right) + R_{32} \cdot b + F_{O32} \cdot \left(e + \dfrac{D}{2} \right) + \\ + N_{31} \cdot c - F_{f31} \cdot \dfrac{D_1}{2} - N_{32} \cdot d - F_{f32} \cdot \dfrac{D_1}{2} - F_3 \cdot z \cdot \sin b_3 = 0, \end{cases} \quad (3)$$

для четвертого формувального візка:

$$\begin{cases} \sum X = -F_4 \cdot \cos b_4 + F_{O41} + F_{O42} + F_{f41} + F_{f42} + F_{i4} = 0; \\ \sum Y = F_4 \cdot \sin b_4 + R_{41} + R_{42} - G_4 - N_{41} - N_{42} = 0; \\ \sum M_{S4} = -R_{41} \cdot a + F_{O41} \cdot \left(e + \dfrac{D}{2} \right) + R_{42} \cdot b + F_{O42} \cdot \left(e + \dfrac{D}{2} \right) + \\ + N_{41} \cdot c - F_{f41} \cdot \dfrac{D_1}{2} - N_{42} \cdot d - F_{f42} \cdot \dfrac{D_1}{2} - F_4 \cdot z \cdot \sin b_4 = 0, \end{cases} \quad (4)$$

де F_1, F_2, F_3 та F_4 – зусилля у шатунах, яке необхідне для приведення у зворотно-поступальний рух формувальних візків; b_1, b_2, b_3 та b_4 – кутові координати, які визначають положення шатунів щодо горизонталі; F_{O11}, F_{O12}, F_{O21}, F_{O22}, F_{O31}, F_{O32}, F_{O41} та F_{O42} – зусилля взаємодії ролика з бетонною сумішшю; R_{11}, R_{12}, R_{21}, R_{22}, R_{31}, R_{32}, R_{41} та R_{42} – вертикальні сили взаємодії ролика з бетонною сумішшю; N_{11}, N_{12}, N_{21}, N_{22}, N_{31}, N_{32}, N_{41} та N_{42} – нормальні

реакції напрямних руху формувальних візків на напрямні ролики; $F_{f11}=N_{11}\cdot f_{np}$, $F_{f12}=N_{12}\cdot f_{np}$, $F_{f21}=N_{21}\cdot f_{np}$, $F_{f22}=N_{22}\cdot f_{np}$, $F_{f31}=N_{31}\cdot f_{np}$, $F_{f32}=N_{32}\cdot f_{np}$, $F_{f41}=N_{41}\cdot f_{np}$, $F_{f42}=N_{42}\cdot f_{np}$ – сили тертя напрямних роликів по напрямних руху формувальних візків; f_{mp} – коефіцієнт тертя напрямних роликів по напрямних руху формувальних візків; F_{i1}, F_{i2}, F_{i3} та F_{i4} – сили інерції формувальних візків; G_1, G_2, G_3 та G_4 – 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)–(4) щодо F_1, F_2, F_3, F_4, N_{11}, N_{12}, N_{21}, N_{22}, N_{31}, N_{32}, N_{41} та N_{42}, отримано залежності для визначення зусилля у шатунах та нормальних реакцій напрямних руху формувальних візків на напрямні ролики залежно від кута повороту кривошипа:

$$N_{11}=F_1\cdot\sin b_1+R_{11}+R_{12}-G_1-N_{12};$$

$$N_{12}=\frac{-R_{11}\cdot a+\left(F_{O11}+F_{O12}\right)\cdot\left(e+\frac{D}{2}\right)+R_{12}\cdot b+\left(F_1\cdot\sin b_1+R_{11}+R_{12}-G_1\right)\cdot\left(c-f_{np}\cdot\frac{D_1}{2}\right)-F_1\cdot z\cdot\sin b_1}{\left(d+c\right)};\quad(5)$$

$$N_{21}=F_2\cdot\sin b_2+R_{21}+R_{22}-G_2-N_{22};$$

$$N_{22}=\frac{-R_{21}\cdot a+\left(F_{O21}+F_{O22}\right)\cdot\left(e+\frac{D}{2}\right)+R_{22}\cdot b+\left(F_2\cdot\sin b_2+R_{21}+R_{22}-G_2\right)\cdot\left(c-f_{np}\cdot\frac{D_1}{2}\right)-F_2\cdot z\cdot\sin b_2}{\left(d+c\right)};\quad(6)$$

$$N_{31}=F_3\cdot\sin b_3+R_{31}+R_{32}-G_3-N_{32};$$

$$N_{32}=\frac{-R_{31}\cdot a+\left(F_{O31}+F_{O32}\right)\cdot\left(e+\frac{D}{2}\right)+R_{32}\cdot b+\left(F_3\cdot\sin b_3+R_{31}+R_{32}-G_3\right)\cdot\left(c-f_{np}\cdot\frac{D_1}{2}\right)-F_3\cdot z\cdot\sin b_3}{\left(d+c\right)};\quad(7)$$

$$N_{41}=F_4\cdot\sin b_4+R_{41}+R_{42}-G_4-N_{42};$$

$$N_{42}=\frac{-R_{41}\cdot a+\left(F_{O41}+F_{O42}\right)\cdot\left(e+\frac{D}{2}\right)+R_{42}\cdot b+\left(F_4\cdot\sin b_4+R_{41}+R_{42}-G_4\right)\cdot\left(c-f_{np}\cdot\frac{D_1}{2}\right)-F_4\cdot z\cdot\sin b_4}{\left(d+c\right)};\quad(8)$$

$$F_1=\frac{F_{O11}+F_{O12}+\left(R_{11}+R_{12}-G_1\right)\cdot f_{np}+F_{i1}}{\cos b_1-\sin b_1\cdot f_{np}};\qquad F_2=\frac{F_{O21}+F_{O22}+\left(R_{21}+R_{22}-G_2\right)\cdot f_{np}+F_{i2}}{\cos b_2-\sin b_2\cdot f_{np}};$$

$$F_3=\frac{F_{O31}+F_{O32}+\left(R_{31}+R_{32}-G_3\right)\cdot f_{np}+F_{i3}}{\cos b_3-\sin b_3\cdot f_{np}};\qquad F_4=\frac{F_{O41}+F_{O42}+\left(R_{41}+R_{42}-G_4\right)\cdot f_{np}+F_{i4}}{\cos b_4-\sin b_4\cdot f_{np}}.\quad(9)$$

Користуючись геометричними характеристиками привідного механізму отримано вирази для визначення кутових координат положення шатунів щодо горизонталі:

$$b_1 = \arcsin\left(\frac{r}{l}\cdot\sin j\right);\quad b_2 = \arcsin\left(\frac{r}{l}\cdot\sin(j+\Delta j)\right);$$
$$b_3 = \arcsin\left(\frac{r}{l}\cdot\sin(j+2\cdot\Delta j)\right);\quad b_4 = \arcsin\left(\frac{r}{l}\cdot\sin(j+3\cdot\Delta j)\right), \tag{10}$$

де r – радіус кривошипів; j – кутова координата кривошипа першого формувального візка; Δj – кут зміщення кривошипів.

Сили інерції формувальних візків визначені за виразами [11]:

$$F_{i1} = -m_1\cdot \text{[illegible]}_1;\quad F_{i2} = -m_2\cdot \text{[illegible]}_2;\quad F_{i3} = -m_3\cdot \text{[illegible]}_3;\quad F_{i4} = -m_4\cdot \text{[illegible]}_4, \tag{11}$$

де m_1, m_2, m_3 та m_3 – маси першого, другого, третього та четвертого формувальних візків відповідно (маси формувальних візків рівні $m_1 = m_2 = m_3 = m_4 = m$); [illegible]_1, [illegible]_2, [illegible]_3 та [illegible]_4 – функції зміни лінійного прискорення формувальних візків.

Функції зміни лінійного прискорення першого, другого, третього та четвертого формувальних візків роликової формувальної установки з врівноваженим приводом розраховані за методикою, наведеною у [10, 11].

Для роликової формувальної установки з параметрами: радіус кривошипа – $r = 0,2$ *м*; довжина шатуна – $l = 0,8$ *м*; кутова швидкість обертання кривошипів – $w = \text{[illegible]} = 10,5$ *рад/с*; сила опору – $F_0 = 3562$ *Н*, яка необхідна на переміщення формувального візка з двома укочувальними роликами радіусом $R = 0,11$ *м* для формування виробів заввишки – $h_0 = 0,22$ *м*; завширшки – $B = 1,164$ *м*; тип суміші, що ущільнюється – дрібнозерниста суміш; вологість бетонної суміші – $W = 10$ %; потрібна щільність виробу – $k_{ущ} = 0,98$ та усі інші геометричні та експлуатаційні показники: $F_{O11} = F_{O12} = F_{O21} = F_{O22} = F_{O31} = F_{O32} = F_{O41} = F_{O42} = 7962$ *Н*; $R_{11} = R_{12} = R_{21} = R_{22} = R_{31} = R_{32} = R_{41} = R_{42} = 9740$ *Н*; $G_1 = G_2 = G_3 = G_4 = 10000$ *Н*; $m_1 = m_2 = m_3 = m_4 = m = 1000$ *кг*; $f_{mp} = 0,008$; $D = 0,22$ *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 усі отримані дані в рівняння (5)–(9), побудовано графіки зміни зусиль у шатунах F_1, F_2, F_3 та F_4 (рис. 3) та нормальних реакцій N_{11}, N_{12}, N_{21}, N_{22}, N_{31}, N_{32}, N_{41} та N_{42} (рис. 4) напрямних руху формувальних візків на напрямні ролики залежно від кута повороту кривошипа.

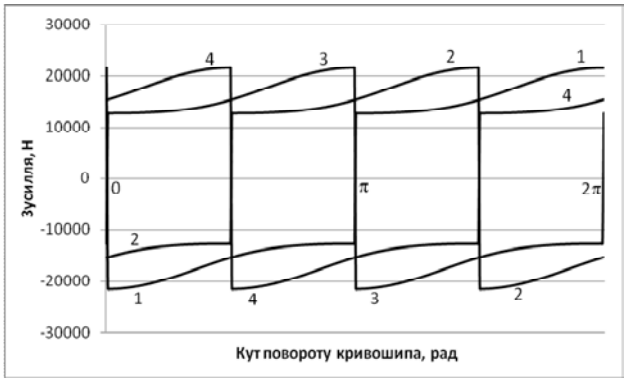


Рис. 3. Графіки зміни зусиль у шатунах:
$F_1 - 1$, $F_2 - 2$, $F_3 - 3$ та $F_4 - 4$
залежно від кута повороту кривошипа

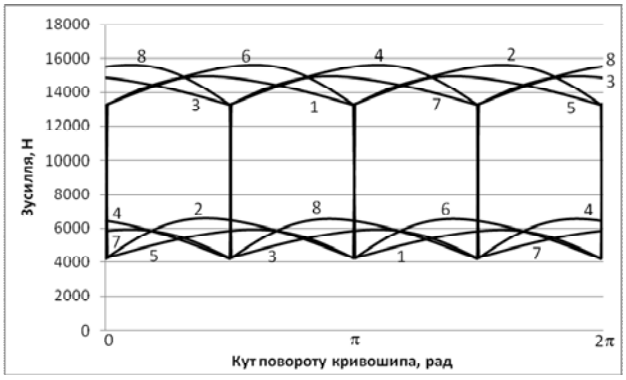


Рис. 4. Графіки зміни зусиль: $N_{11} - 1$,
$N_{12} - 2$, $N_{21} - 3$, $N_{22} - 4$, $N_{31} - 5$, $N_{32} - 6$,
$N_{41} - 7$ та $N_{42} - 8$ залежно
від кута повороту кривошипа

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 органа з бетонною сумішшю.

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

$$M_{кр1} = F_1 \cdot r \cdot \cos\left(p/2 - (j + b_1)\right); \quad M_{кр2} = F_2 \cdot r \cdot \cos\left(\frac{p}{2} - (j + \Delta j + b_2)\right);$$
$$M_{кр3} = F_3 \cdot r \cdot \cos\left(\frac{p}{2} - (j + 2 \cdot \Delta j + b_3)\right); \quad M_{кр4} = F_4 \cdot r \cdot \cos\left(\frac{p}{2} - (j + 3 \cdot \Delta j + b_4)\right). \tag{12}$$

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

$$P_1 = M_{кр1} \cdot w; \quad P_2 = M_{кр2} \cdot w; \quad P_3 = M_{кр3} \cdot w; \quad P_4 = M_{кр4} \cdot w \tag{13}$$

та її сумарного значення:

$$P_{сум} = P_1 + P_2 + P_3 + P_4. \tag{14}$$

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

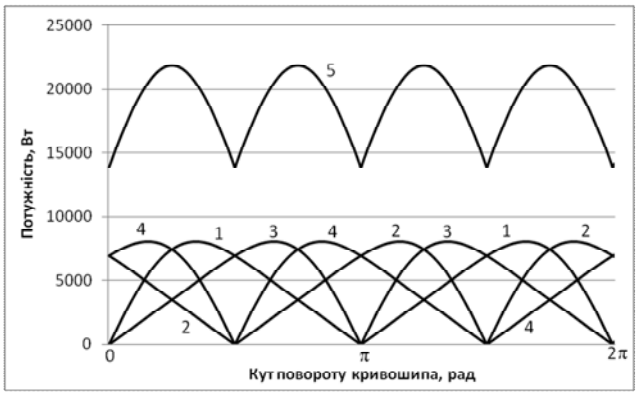


Рис. 5. Графіки зміни потужностей, необхідних для забезпечення процесу формування для першого – 1, другого – 2, третього – 3, четвертого візків – 4 та сумарної потужності – 5 залежно від кута повороту кривошипа

Аналіз цих графіків показує, що максимальне значення потужності, необхідної для забезпечення процесу формування кожним формувальним візком становить $P_{1,2,3,4\,\max} = 8045,6\ Вт$. При цьому середнє значення цієї потужності протягом циклу роботи установки для кожного візка має значення $P_{1,2,3,4\,сер} = 4738,8\ Вт$. Максимальне значення сумарної потужності установки, необхідної для забезпечення процесу формування, становить $P_{сум\,\max} = 21872,2\ Вт$, а середнє значення цієї потужності протягом циклу роботи установки має значення $P_{сум\,сер} = 18993,8\ Вт$. З наведеного вище можна зробити висновок, що під час застосування врівноваженого приводу на чотири формувальні візки середнє значення сумарної потужності на кожний формувальний візок становить $4748,45\,Вт$, що майже дорівнює значенню $P_{1,2,3,4\,сер}$, а максимальне значення сумарної потужності на кожний формувальний візок становить $5468,05\ Вт$, що в 1,471 раза менше порівнянно з $P_{1,2,3,4\,\max}$.

Висновки:

1. В результаті проведених досліджень визначено навантаження в елементах роликової формувальної установки з врівноваженим приводом на чотири 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 у 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.

1. Гарнець В. М. Прогресивні бетоноформуючі агрегати і комплекси / В. М. Гарнець. - К.: Будівельник, 1991. - 144 с. 2. Кузин В. Н. Технология роликового формования плоских изделий из мелкозернистых бетонов: автореф. … дис. канд. наук / В. Н. Кузин. - М., 1981. - 20 с. 3. Рюшин В. Т. Исследование рабочего процесса и разработка методики расчета машин роликового формования бетонных смесей: диссер. … канд. техн. наук / В. Т. Рюшин. – К., 1986. – 212 с. 4. Ловейкін В. С. Динамічний аналіз роликової формовочної установки з рекуперацiйним приводом / В. С. Ловейкін, К. І. Почка // Динаміка, міцність і надійність сільськогосподарських машин: праці 1-ї Міжнар. наук.-техн. конф. (DSR AM - I), 4–7 жовтня 2004 р., Тернопіль (Україна) - С. 507–514. 5. Ловейкін В. С. Результати експериментальних досліджень режимів руху роликової формувальної установки з рекуперацiйним приводом / В. С. Ловейкін, К. І. Почка // Вісник Харківського національного університету сільського господарства ім. П. Василенка. – Харків, 2007. – № 59, Т. 1. – С. 465–474. 6. Ловейкін В. С. Визначення оптимального значення кута зміщення кривошипів роликової формувальної установки з рекуперацiйним приводом / В. С. Ловейкін, К. І. Почка // Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні. - Львів: Нац. ун-ту "Львівська політехніка", 2007. – № 41. – С. 127–134. 7. Патент 32838 U Україна, МКВ B28B13/00 / Установка для формування виробів з бетонних сумішей / Ловейкін В. С., Ярошенко В. Ф., Почка К. І. – № и 20041108955 заявл. 02.11.2004; опубл. 10.06.2008, Бюл. № 11. 8. Патент 7884 U Україна, МКВ B28B13/02 / Установка для формування виробів з бетонних сумішей / Ловейкін В. С., Ярошенко В. Ф., Почка К. І., Бичевський В. М. – № и 20041209993 заявл. 06.12.2004; опубл. 15.07.2005, Бюл. № 7. 9. Ловейкін В. С. Визначення навантажень в елементах роликових формувальних установок / В. С. Ловейкін, К. І. Почка // Зб. наук. пр. – Харків: УкрДАЗТ, 2008. – Вип. 88 – С. 15–20. 10. Ловейкін В. С. Аналіз руху роликової формовочної установки з врівноваженим приводом / В. С. Ловейкін, К. І. Почка // Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету. – 2004. – № 27. – С. 95–101. 11. Ловейкін В. С. Силовий аналіз роликової формовочної установки з врівноваженим приводом / В. С. Ловейкін, К. І. Почка // Науковий вісник Національного аграрного університету. – 2005. – Вип. 80. – С. 346–356.