

# Дослідження енергосилових характеристик кулісно-важільного механізму при розрізуванні картонної стрічки

К.Я. Сенчина, Українська академія друкарства, м. Львів

Відомо, що експерти оцінюють економічний стан країни через споживання паперу та картону на одного мешканця. За їхніми дослідженнями, в Україні протягом 2005–2010 рр. воно зросло з 25 до 40 кг [1]. Широке використання картону обумовлене його екологічною чистотою, достатньою міцністю, придатністю до багаторазової переробки.

Споживче пакування (пачки, коробки) виготовляють з коробкового, хромового картону чи картону хром-ерзац, який потрапляє на виробництво як у рулонах, так і в аркушах. Рулони картону зі складу подають у цех для розмотування та розрізування на окремі заготовки на аркушерізальних машинах. Практика їхньої експлуатації свідчить про наявність проблем, пов'язаних з налагодженням обладнання на потрібний формат розрізування стрічки та досягненням потрібної якості отриманих аркушів [2].

Запропоновано нову конструкцію аркушерізального пристрою, який складається з механізму привода ножа, рухомого протиножа та засобу подачі картонної стрічки (рис 1). Механізм ножа включає кривошип 1; кулісу 2 з повзунком 3; шатун 4 з коромислом 5; ніж 6. Рухомий протиніж являє собою циліндр 7 з еластичним марзаном 8. Картонна стрічка розмотується з рулону (на рисунку не показано) і подається роликми 9 на поверхню циліндра 7. Розрізування матеріалу здійснюється перпендикулярно до напрямку руху картонної стрічки. У момент часу, коли кривошип 1, куліса 2, шатун 4 і коромисло 5 займають вертикальне нижнє положення, загострене лезо ножа 6 врізається в матеріал і відсікає від картонної стрічки аркуш потрібного розміру. Подальше обертання кривошипа 1 забезпечує вихід леза ножа 6 з матеріалу стрічки, а роликми 9 подають картонний матеріал у зону різання.

Функціонування механізму пов'язане із циклічним доданням його ланками технологічних опорів, їхнім навантаженням знакозмінними інерційними силами, які в сукупності впливають на роботоздатність пристрою. Для обґрунтування можливих резервів покращення функціонування механізму привода ножа було виконано його силовий аналіз, який дозволив прослідкувати характер зміни навантажень у кінематичних парах протягом циклу.

З розгляду схеми силового навантаження механізму (рис. 2) видно, що діють такі зусилля:  $F_p$  — технологічні внаслідок розрізування стрічки;  $F_2$  — відцент-

рові;  $F_1$  — інерційні та  $G$  — гравітаційні, які створюють сумарний крутний момент  $M_\Sigma$  на валу коромисла. Перераховані зусилля різні за спрямуванням та величиною.

Для оцінювання впливу інерційних сил рухомих ланок механізму на процес розрізування приведемо маси рухомих ланок до шарніра С.

Маси кривошипа  $O_2B$  і куліси  $O_2A$ , приведені в точку В:

$$m_2 = \frac{2J_2 + J_1}{r_5^2}, \quad (1)$$

де  $J_1$  — момент інерції куліси  $O_2A$ ;  $J_2$  — момент інерції кривошипа  $O_2B$ ;  $r_5$  — радіус кривошипа чотириланковика.

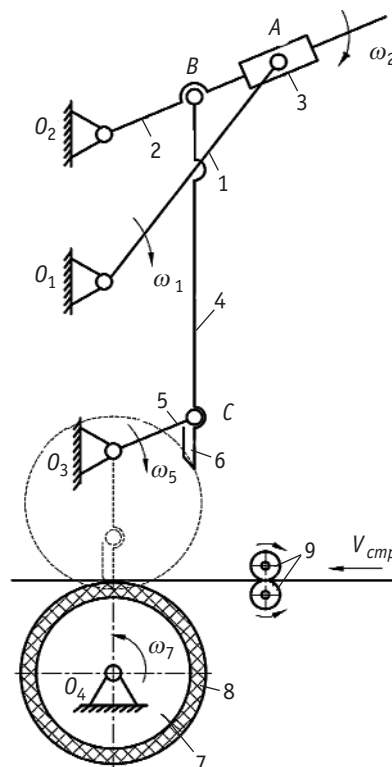


Рис. 1. Кінематична схема аркушерізального пристрою

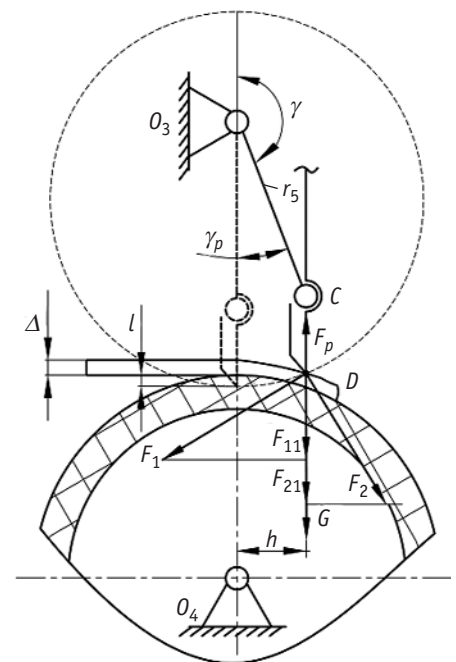
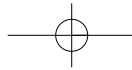


Рис. 2. Схема до розрахунку силових навантажень механізму



Масу  $m_2$  сумуємо з масою  $m_4$  двох шатунів  $BC$ , приведенною масою  $m_5$  двох коромисел  $O_3C$  та масою  $m_6$  ножа і приводимо в точку  $C$ :

$$m_{np} = \frac{2(J_2 + J_5) + J_1}{r_5^2} + 2m_4 + m_6, \quad (2)$$

де  $J_5$  — момент інерції коромисла  $O_3C$ .

Розрізування починається в момент контакту леза ножа зі стрічкою і закінчується після повороту коромисла  $O_3C$  на кут  $\gamma_p$  (рис. 2). Спроектувавши радіус обертання ножа на вертикальну вісь, отримуємо:

$$r_5 - \Delta - l = r_5 \cdot \cos \gamma_p, \quad (3)$$

де  $\Delta$  — товщина картонної стрічки;  
 $l$  — глибина врізання леза ножа в марзан.  
 З виразу (3) знаходимо кут повороту коромисла  $O_3C$ :

$$\gamma_p = \arccos \left[ \frac{r_5 - \Delta - l}{r_5} \right]. \quad (4)$$

До куліси 2 приєднаний чотириланковик  $O_2BCO_3$  (рис. 1), у якому  $O_2B = O_3C$  та  $\omega_2 = \omega_5$ . Із трикутника  $O_1AO_2$  знахо-

димо кут, що визначає положення куліси 2:

$$\gamma = \arccos \left[ \frac{\cos \varphi + \lambda}{\sqrt{1 + \lambda^2 - 2\lambda \cos \varphi}} \right], \quad (5)$$

де  $\lambda = \frac{a}{r}$ .

Кутову швидкість куліси, а отже і кривошипа  $O_3C$ , знаходимо диференціюванням (5):

$$\omega_5 = \frac{d\gamma}{dt} = \frac{d\gamma}{d\varphi} \cdot \frac{d\varphi}{dt} = \frac{1 - \lambda \cos \varphi}{1 - 2\lambda \cos \varphi + \lambda^2} [\omega_1], \quad (6)$$

де  $\frac{1 - \lambda \cos \varphi}{1 - 2\lambda \cos \varphi + \lambda^2} = \omega_{5i}$  — інваріант ку-

тової швидкості кривошипа  $O_3C$ ;  
 $[\omega_1]$  — кутова швидкість кривошипа  $O_1A$ .

Кутове прискорення кривошипа  $O_3C$  знаходимо диференціюванням виразу (6):

$$\varepsilon_5 = \frac{d\omega_5}{dt} = \frac{d\omega_5}{d\varphi} \cdot \frac{d\varphi}{dt} = \left( \frac{\lambda \sin \varphi}{1 - 2\lambda \cos \varphi + \lambda^2} + \frac{2\lambda \sin \varphi (\lambda \cos \varphi - 1)}{(\lambda^2 - 2\lambda \cos \varphi + 1)^2} \right) [\omega_1^2]. \quad (7)$$

Момент від дотичних сил інерції маси, приведені до ножа:

$$M_1 = m_{np} \cdot r_5^2 \cdot \varepsilon_5 = \varepsilon_{5i} [m_{np} \cdot r_5^2 \cdot \omega_1^2], \quad (8)$$

де  $\varepsilon_{5i}$  — інваріант кутового прискорення кривошипа  $O_3C$  (коромисла).

Сила інерції коромисла  $O_3C$ :

$$F_1 = \frac{M_1}{r_5} = \varepsilon_{5i} [m_{np} \cdot r_5 \cdot \omega_1^2]. \quad (9)$$

Проекція сили інерції на напрямок різання картону:

$$F_{11} = \varepsilon_{5i} \cdot \sin \gamma_p [m_{np} \cdot r_5 \cdot \omega_1^2]. \quad (10)$$

Момент від проектованої сили інерції відносно осі обертання коромисла:

$$M_1 = -F_{11} \cdot h, \quad (11)$$

де  $h = r_5 \cdot \sin \gamma_p$  — плече дії сили відносно осі  $O_3O_4$ .

Після підстановки виразу (10) в (11) отримуємо:

$$M_1 = -\varepsilon_{5i} \cdot \sin^2 \gamma_p [m_{np} \cdot r_5^2 \cdot \omega_1^2]. \quad (12)$$

Як видно із залежностей, отриманих за виразом (12) і зображених на рис. 3, у зоні розрізування картонної стрічки моменти від сил інерції незначні.

Відцентрова сила інерції мас, приведені до ножа:

$$F_2 = m_{np} \cdot r_5 \cdot \omega_5^2. \quad (13)$$

Крутний момент від відцентрової сили відносно осі обертання:

$$M_2 = -\omega_{5i} [m_{np} \cdot r_5^2 \cdot \omega_1^2]. \quad (14)$$

Знаходимо вертикальну складову відцентрової сили інерції мас у зоні розрізування картонної стрічки:

$$F_{21} = \omega_{5i} \cdot \cos \gamma_p [m_{np} \cdot r_5 \cdot \omega_1^2]. \quad (15)$$

Крутний момент від проектованої відцентрової сили відносно осі обертання:

$$M_2 = -\omega_{5i} \cdot \cos \gamma_p \cdot \sin \gamma_p [m_{np} \cdot r_5^2 \cdot \omega_1^2]. \quad (16)$$

Аналізуючи залежності, розраховані за виразом (16) і зображені на рис. 4, бачимо, що момент від відцентрових сил є змінним. Максимального значення цей момент набуває у випадку, коли  $h$  є максимальним (для розглядуваних умов  $M_{2max} = -8,1$  Н·м). У разі зменшення маси і довжини коромисла пікове значення моменту спадає.

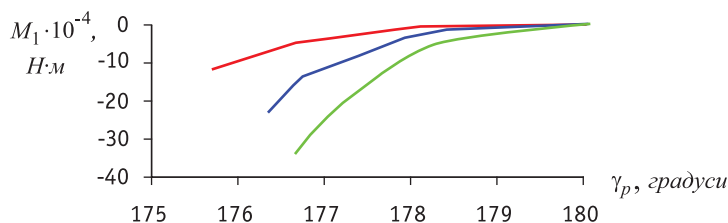


Рис. 3. Залежність моменту від дотичних сил інерції приведених мас у зоні розрізування стрічки від кута повороту коромисла для:  $m_{np} = 20$  кг,  $r_5 = 0,18$  м,  $n = 60$  об/хв (—);  $m_{np} = 25$  кг,  $r_5 = 0,25$  м,  $n = 70$  об/хв (—);  $m_{np} = 30$  кг;  $r_5 = 0,3$  м;  $n = 80$  об/хв (—)

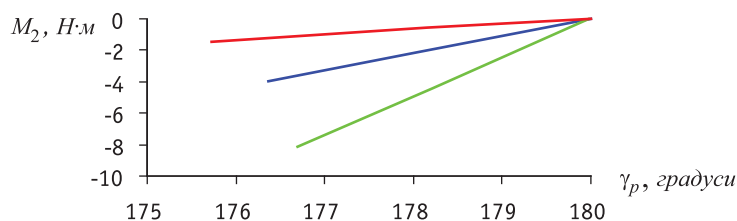
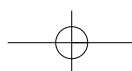


Рис. 4. Залежність моменту від відцентрових сил приведених мас у зоні розрізування стрічки від кута повороту коромисла для:  $m_{np} = 20$  кг,  $r_5 = 0,18$  м,  $n = 60$  об/хв (—);  $m_{np} = 25$  кг,  $r_5 = 0,25$  м,  $n = 70$  об/хв (—);  $m_{np} = 30$  кг;  $r_5 = 0,3$  м;  $n = 80$  об/хв (—)



Визначаємо технологічне навантаження різання, прикладене до ножа і необхідне для розрізування картонної стрічки:

$$F_p = k \cdot L \cdot p, \quad (17)$$

де  $k$  — коефіцієнт, що враховує ступінь загострення ножа;  
 $p$  — лінійне зусилля різання для заданої товщини картону;  
 $L$  — довжина лінії різання.  
 Крутний момент від сили різання:

$$M_3 = L \cdot p \cdot r_5 \cdot \sin \gamma_p. \quad (18)$$

Для розглядуваного випадку зусилля різання  $F_p = 13440$  Н (у розрахунках прийнято значення лінійного зусилля різання  $p = 16$  Н/мм [3] і довжини різання  $L = 840$  мм) при плечі  $h = 4 \cdot 10^{-3}$  м розташування ножа створює максимальний момент  $M_{3max} = 42$  Н·м (рис. 5) для радіуса коромисла  $r_5 = 0,18$  м і  $M_{3max} = 63$  Н·м для  $r_5 = 0,3$  м. Момент від ваги елементів механізму визначаємо добутком:

$$M_G = -m \cdot g \cdot r_5 \cdot \sin \gamma_p, \quad (19)$$

де  $g$  — прискорення вільного падіння. Як видно з рис. 6, у разі збільшення маси механізму, довжини коромисла момент від його ваги збільшується. При масі механізму 30 кг максимальний момент становить  $-5$  Н·м. Сумарний момент від спроектованих сил на напрямок дії сили різання:

$$M_{\Sigma r} = (\epsilon_{5r} \cdot \sin \gamma_p^2 + \omega_{5r} \cdot \cos \gamma_p \cdot \sin \gamma_p) \times [m \cdot r_5^2 \cdot \omega_1^2] + (m \cdot g - L \cdot p) r_5 \cdot \sin \gamma_p. \quad (20)$$

Отримані за виразом (20) значення сумарного моменту графічно зображені на рис. 7. Як видно із залежностей,  $M_{\Sigma r}$  спочатку зростає до пікового значення, після чого спадає до нуля. Максимальне пікове значення  $M_{\Sigma r} = 66,4$  Н·м зафіксоване для механізму, приведена маса якого  $m_{np} = 30$  кг, радіус кривошипа  $r_5 = 0,3$  м і частота обертання ножа  $n = 80$  об/хв. Мінімальне пікове значення  $M_{\Sigma r} = 41,2$  Н·м отримане для

механізму, параметри якого такі:  $m_{np} = 30$  кг,  $r_5 = 0,3$  м і  $n = 80$  об/хв. За результатами аналітичних досліджень можна зробити такі висновки:

- на основі аналізу прийнятої для розгляду схеми силового навантаження механізму встановлено, що його різальний інструмент навантажений технологічним зусиллям внаслідок розрізування стрічки, відцентровими, інерційними та гравітаційними силами, які в сукупності створюють сумарний крутний момент на валу коромисла;
- домінуючими силовими навантаженнями є дотичні сили інерції приведених мас механізму та технологічні навантаження внаслідок поперечного розрізування картонного полотна;
- отримані значення сумарного моменту від силових навантажень механізму від кута повороту коромисла, які можуть бути використані для інженерних розрахунків під час проектування аркушерізального обладнання.

## Література

1. Кривошей В.М., Пилипенко С.Ф. Пакувальний картон в Україні // Упаковка. — 2010. — № 5. — С. 27–29.
2. Регей І.І., Сенчина К.Я. Розрізування картонної стрічки на аркуші (кінематика пристрою з кулісним приводом) // Упаковка. — 2010. — № 6. — С. 32–34.
3. Банах Ю.О. Удосконалення плоского висікального преса шляхом нівелювання впливу пружних деформацій привода: Дис. канд. техн. наук: 05.05.01. — Л., 2004. — 168 с.

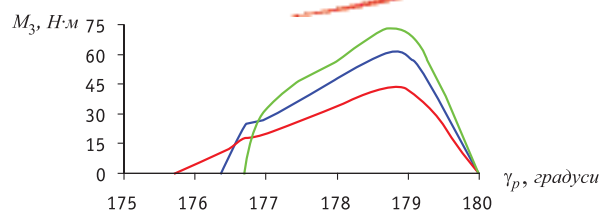


Рис. 5. Залежність моменту від сили різання в зоні розрізування стрічки від кута повороту коромисла для:  $r_5 = 0,18$  м (—);  $r_5 = 0,25$  м (—);  $r_5 = 0,3$  м (—)

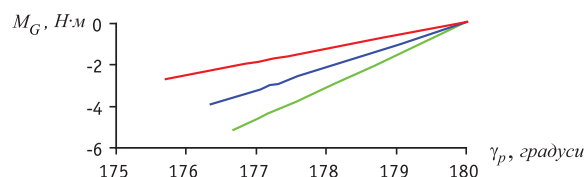


Рис. 6. Залежність моменту від ваги елементів механізму в зоні розрізування стрічки від кута повороту коромисла для:  $m_{np} = 20$  кг,  $r_5 = 0,18$  м (—);  $m_{np} = 25$  кг,  $r_5 = 0,25$  м (—);  $m_{np} = 30$  кг;  $r_5 = 0,3$  м (—)

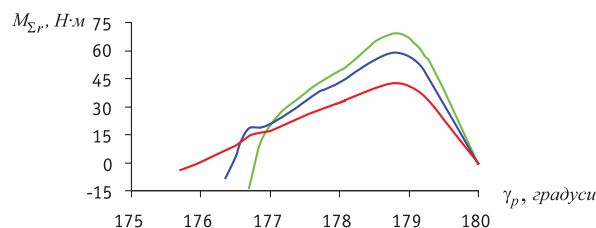


Рис. 7. Залежність сумарного моменту від силових навантажень механізму в зоні розрізування стрічки від кута повороту коромисла для:  $m_{np} = 20$  кг,  $r_5 = 0,18$  м,  $n = 60$  об/хв (—);  $m_{np} = 25$  кг,  $r_5 = 0,25$  м,  $n = 70$  об/хв (—);  $m_{np} = 30$  кг;  $r_5 = 0,3$  м;  $n = 80$  об/хв (—)

## Исследование энергосиловых характеристик кулисно-рычажного механизма при разрезании картонной ленты

К.Я. Сенчина

В статье предложена схема кулисно-рычажного механизма для разрезания картонной ленты на листы. На основе разработанной методики автором проведен его силовой анализ, по результатам которого выявлены максимальные значения нагрузок и исследован характер изменения суммарных крутящих моментов в течение кинематического цикла.

Ключевые слова: картонная лента; листорезальное устройство; кулисно-рычажный механизм; технологическое усилие.

## Research of powery descriptions of scene-lever mechanism at scission of cardboard ribbon

K.Y. Senchina

There is proposed the scheme scene-lever mechanism for cutting cardboard strip on the sheet. Based on the developed technique conducted its power analysis, the results of which revealed maximum loads and nature of the change given, the total torque during the kinematic cycle.

Key words: cardboard ribbon; sheet-cutting device; scene-lever mechanism; technological effort.