

УДК 621.798.4

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИВОДА ПЛИТИ ШТАНЦЮВАЛЬНОГО ПРЕСА ІЗ ЕКСЦЕНТРИКОВИМ МЕХАНІЗМОМ ШЛЯХОМ КОРИГУВАННЯ РУХУ

Н. М. Кандяк, Ю. І. Остафійчук

*Національний університет «Львівська політехніка»,  
вул. С. Бандери, 12 Львів, 79013, Україна*

*Розроблена методика коригування руху натискної плити штанцювального преса із ексцентриковим механізмом її привода, що уможливує покращення кінематичних та динамічних характеристик механізму привода. Проаналізовано застосування різних законів періодичної руху натискної плити преса та представлено рекомендації їхнє застосування залежно від типу преса та умов його експлуатації. Запропоновано застосування серводвигуна для задання та корегування закону періодичного руху натискної плити. Виведено математичні залежності розрахунку часових інтервалів, необхідних для керування серводвигуном. Проведено моделювання в системі Autodesk Inventor із застосуванням модуля Dynamic Simulation, що підтверджує правильність продемонстрованих рекомендацій та показана можливість надання змінної швидкості приводної ланки за попередньо визначеними параметрами. Задання закону періодичного руху натискної плити доцільно використовувати в процесі подальших експериментальних досліджень з метою виявлення впливу закону періодичного руху плити на енергосилові параметри процесу штанцювання.*

**Ключові слова:** *ексцентриковий механізм, привод, штанцювальний прес, пакування, розрахунок, закон періодичного руху, поліном, коригування, кінематична схема.*

**Постановка проблеми.** Розвиток промисловості зумовлює зростання попиту на картонне пакування, що, у свою чергу, призводить до збільшення обсягів виробництва пакувальної продукції, зокрема картонних розгортки. Для виготовлення таких розгортки застосовують плоскі, плоско-циліндрові або ротаційні штанцювальні преси, серед найбільшого поширення набули штанцювальні преси, в яких реалізовано плоский спосіб штанцювання [1]. Оскільки ключову роль у процесі виготовлення пакувань відіграють штанцювальні преси то підвищення ефективності їхньої роботи призводитиме до зниження собівартості продукції. Рухомі елементи штанцювальних пресів, зокрема натискна плита, мають значну масу та працюють на високих швидкостях, що є причиною виникнення значних інерційних навантажень, що впливають на споживану потужність привода і штанцювального преса в цілому.

Традиційно розвиток штанцювального устаткування пов'язаний з розробленням нових механізмів привода натискної плити, що часто ускладнює конструкцію

та підвищує вартість обладнання. Тому актуальним завданням є підбір оптимального закону руху натискної плити, за якого забезпечуються найбільш сприятливі умови роботи преса. Це дозволить зменшити навантаження на елементи механізму привода та покращити його кінематичні характеристики без істотних конструктивних змін штанцювального преса.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Аналіз наукових джерел засвідчує, що модернізація приводів штанцювальних пресів активно проводиться з метою покращення їхніх динамічних і кінетостатичних характеристик. Це зумовлено тим, що привод є одним із найвідповідальніших і найбільш енерговитратних вузлів штанцювального обладнання. Навіть незначні вдосконалення в конструкції приводів можуть забезпечити суттєву економію енергоресурсів і призвести до зменшення собівартості виготовлення картонного пакування.

Серед сучасних напрямів розвитку можна відзначити розроблення нових типів приводів штанцювальних пресів із використанням ексцентрикових механізмів. Так, у патенті [2] представлено конструкцію привода натискної плити преса, який приводиться в рух чотирма ексцентриковими механізмами, що отримують обертання через кінчну передачу. Така кінематична схема забезпечує рівномірне притискання плити під час штанцювання та рівномірний розподіл зусиль між ексцентриками.

Для визначення технологічних навантажень процесу штанцювання Терницький С. В. провів експериментальні дослідження [3], у межах яких визначено зусилля штанцювання для різних типів картону. На основі отриманих експериментальних даних були виведені аналітичні залежності для визначення зусиль висікання, які можуть бути використані під час розрахунку потужності привода.

На основі експериментальних даних, отриманих в роботі [4, 5], що були використані для аналітичного обґрунтування методики коригування руху в ексцентриковому механізмі, планується проведення досліджень зміни зусилля штанцювання за різних законів періодичного руху натискної плити задля виявлення їхнього впливу на енергосилові параметри механізму преса.

Проведений аналіз свідчить, що основні напрями удосконалення приводів штанцювальних пресів зосереджені переважно на розробленні нових типів механізмів [6, 7], які, попри свої переваги, ускладнюють конструкцію та підвищують вартість обладнання. Водночас дослідження впливу закону руху натискної плити на енергосилові та кінематичні параметри механізму залишаються недостатньо вивченими та згадуються лише в окремих працях.

**Мета статті.** Метою дослідження є вдосконалення закону періодичного руху привода натискної плити штанцювального преса з подальшим аналізом його впливу на енергоспоживання та зусилля. Для її досягнення було отримано математичні моделі для реалізації руху із змінною швидкістю та визначено часові інтервали керування сервоприводом, що забезпечують задану траєкторію руху.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** На рис. 1 представлено розрахункову схему ексцентрикового механізму, для визначення математичних залежностей для коригування руху натискної плити за різних законів її руху.

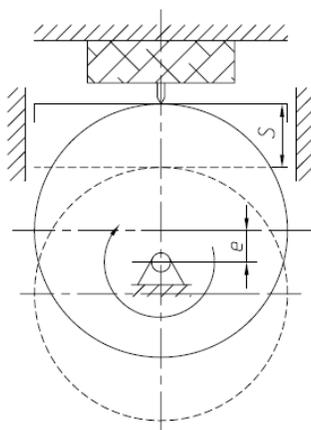


Рис. 1. Розрахункова схема ексцентрикового механізму

Переміщення повзуна визначаємо за наступною залежністю:

$$S = e \cdot (1 - \cos(\varphi)), \quad (1)$$

де  $e$  – ексцентриситет,  $\varphi$  – кут повороту кривошипа.

Для здійснення корекції руху натискної плити преса із залежності (1) визначаємо кут повороту кривошипа за залежністю:

$$\varphi = ar \cos\left(1 - \frac{S}{e}\right). \quad (2)$$

Класифікацію та опис законів періодичного руху виконавчих ланок, що застосовуються при проектуванні кулачкових механізмів, подано в роботі [8]. Запропоновано методику розрахунку в інваріантній формі, де закон руху записаний у вигляді поліноміальної функції. Для автоматизації розрахунків закони періодичного руху натискної плити пропонується задавати у вигляді поліноміальної функції, де математичний запис інваріантів переміщення має такий вигляд

$$a_k = A_2 \cdot k^2 + A_3 \cdot k^3 + A_4 \cdot k^4 + A_5 \cdot k^5 + A_6 \cdot k^6 + A_7 \cdot k^7, \quad (3)$$

де  $A_2, A_3, \dots$  коефіцієнти полінома,  $k = t / T$  – відносний час;  $t$  – поточні значення часу руху вихідної ланки;  $T$  – тривалість переміщення під час робочого або зворотного ходів  $\epsilon$  в межах  $0 \leq k \leq 1$ .

Значення коефіцієнтів полінома визначаються відповідно до обраного закону періодичного руху та наведені в таблиці. 1.

Підставивши значення переміщення натискної плити у інваріантній формі  $a_k$  у залежність (2) для визначення кута повороту кривошипа, визначаємо коригуючий кут повороту кривошипа:

$$\varphi_k = ar \cos\left(1 - \frac{a_k \cdot 2 \cdot e}{e}\right). \quad (4)$$

Таблиця 1

**Коефіцієнти полінома для законів періодичного руху**

| № п/п | Діаграма пришивдшень                     | Коефіцієнти полінома для $a_k$ |       |       |        |       |       |
|-------|--|--------------------------------|-------|-------|--------|-------|-------|
|       |  | $A_2$                          | $A_3$ | $A_4$ | $A_5$  | $A_6$ | $A_7$ |
| 1     | Синусоїда                                | 0                              | 6,25  | 3,75  | -27,75 | 26,25 | -7,5  |
| 2     | Поліном 3-ї ст «Шуна»                    | 0                              | 10    | -15   | 6      | 0     | 0     |
| 3     | 2.1 (поліном 7-ї степені, $\alpha=5,6$ ) | 0                              | 2     | 25    | -66    | 56    | -16   |
| 4     | 2.8 (поліном 7-ї степені, $\alpha=4,2$ ) | 0                              | 16    | -45   | 60     | -42   | 12    |
| 5     | Косинусоїда                              | 2,466                          | 0,136 | -2,67 | 1,068  | 0     | 0     |
| 6     | 1.3 (поліном 5-ї степені, $\alpha=-3$ )  | 2,1                            | 1,6   | -4,5  | 1,8    | 0     | 0     |
| 7     | 1.5 (поліном 5-ї степені, $\alpha=-5$ )  | 1,5                            | 4     | -7,5  | 3      | 0     | 0     |

Значення швидкості визначається як похідна від функції переміщення, помножена на кутову швидкість:

$$\omega_k = -\frac{A_2 \cdot k \cdot -4 + A_3 \cdot k^2 \cdot -6 + A_4 \cdot k^3 \cdot -8 + A_5 \cdot k^4 \cdot -10 + A_6 \cdot k^5 \cdot -12 + A_7 \cdot k^6 \cdot -14}{\sqrt{1 - ((A_2 \cdot k^2 + A_3 \cdot k^3 + A_4 \cdot k^4 + A_5 \cdot k^5 + A_6 \cdot k^6 + A_7 \cdot k^7) \cdot -2 + 1)}} \cdot [\omega_1]. \quad (5)$$

Наприклад, при заданні закону періодичного руху натискної плити штанцювального преса типу синусоїда для ексцентрикового механізму з параметрами  $e = 10$  мм та продуктивністю преса 120 циклів за хвилину, кінематичні залежності будуть мати наступний вигляд (рис. 2).

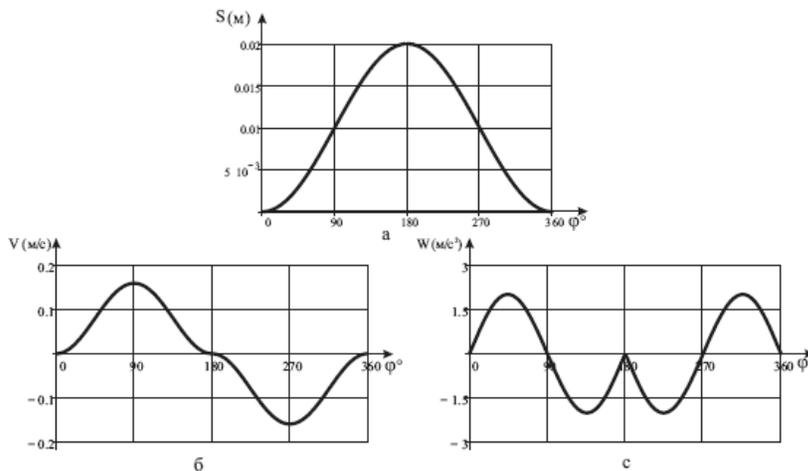


Рис. 2. Кінематичні залежності ексцентрикового механізму:

а) – переміщення, б) – швидкість, в) – прискорення натискної плити

Для забезпечення синусоїдального закону руху натискної плити штанцювального преса коригуючий кут повороту кривошипа матиме вигляд (рис. 3). Штрихова лінія показує рух кривошипа з постійною кутовою швидкістю (базовий механізм), а суцільна лінія відображає рух із застосованою корекцією.

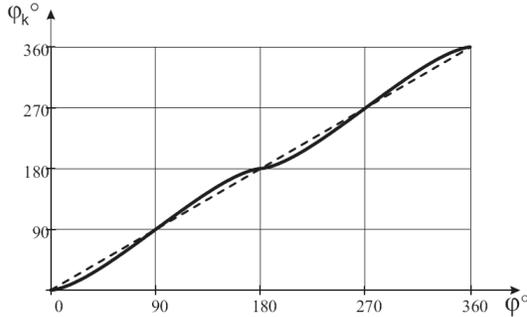


Рис. 3. Зміна кута повороту кривошипа

Графіки швидкості для двох законів руху наведені на рис. 4: штрихова лінія відображає постійну кутову швидкість базового механізму, а суцільна - швидкість із корекцією.

У базовому ексцентриковому механізмі закон періодичного руху плити близький до косинусоїдного. Тому застосування синусоїдального закону руху або близьких до нього є некоректним, оскільки для цього необхідно зміщувати фазу руху на  $90^\circ$ , що призводить до зменшення швидкості кривошипа до нуля і негативно впливає на навантаження приводу механізму. У зв'язку з цим для такого типу механізму рекомендовано використовувати закони руху, близькі до косинусоїдного (рис. 1а).

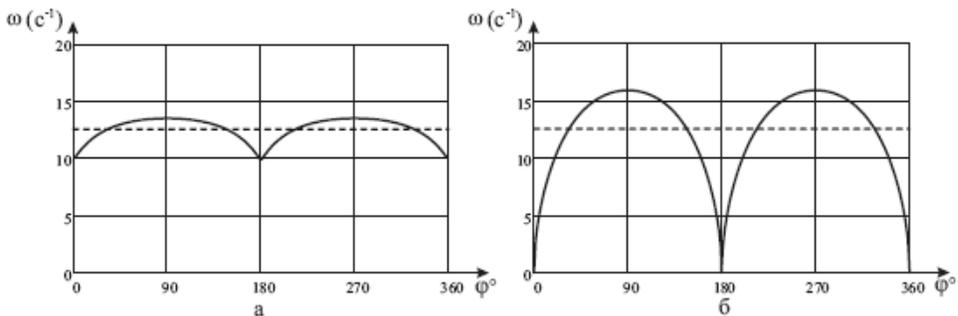


Рис. 4. Швидкість кривошипа:

а) для закону руху 1.5 (поліном 5-ї степені,  $\alpha=-5$ ), б) для закону руху синусоїда

Для забезпечення змінної швидкості обертання кривошипа застосовується сервопривод, параметрами якого є «крок», «інтервал» та «напрямок». Тому для управління таким приводом необхідно визначити часові інтервали, відповідно до яких задасться закон періодичного руху.

Спочатку визначається період одного циклу механізму

$$t = \frac{60 \cdot 1000000}{n}, \quad (6)$$

де  $n$  – швидкість обертання кривошипа.

Оскільки визначена залежність коригуючого кута має нерівномірні часові інтервали, її необхідно представити у вигляді сплайна та виконати інтерполяцію для визначення точних часових проміжків.

Масив значень часових інтервалів визначається за наступною залежністю:

$$rx = \frac{\varphi_k}{2\pi \cdot t}. \quad (7)$$

Значення кута повороту присвоюємо наступній змінній

$$ry = \varphi. \quad (8)$$

Для отримання нових значень виконується інтерполяція за допомогою вбудованих функцій у системі MathCad [9, 10].

$$\varphi_k = \text{int } \text{erp}(\text{lspline}(rx, ry), rx, ry, k), \quad (9)$$

$$T_k = \text{int } \text{erp}(\text{lspline}(ry, rx), ry, rx, k), \quad (10)$$

де  $k$  – це новий інтервал між значеннями.

Для представлення функції у вигляді полінома використовується функція *lspline* в середовищі MathCad, а для інтерполяції застосовується функція *interp*, яка виконує лінійну інтерполяцію, тобто визначає проміжні значення функції, записаної у поліноміальній формі.

Проміжкові значення інтервалів визначаємо за наступною залежністю:

$$T_p = T_k - T_{k-1}. \quad (11)$$

На рис. 5 представлена графічна залежність інтервалів часу від кута повороту кривошипа.

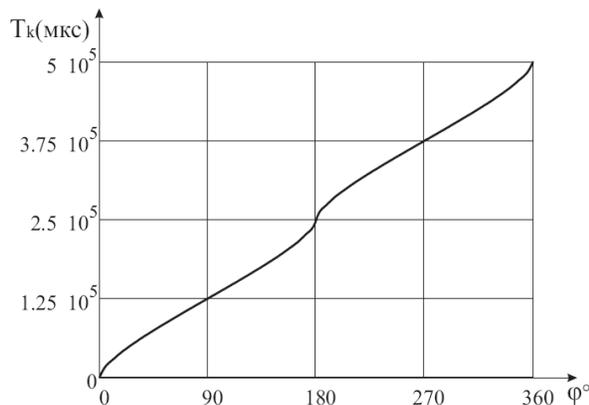


Рис. 5. Графічна залежність інтервалів повороту кривошипа

Для підтвердження теоретичних викладок було виконано моделювання роботи механізму в системі Autodesk Inventor із використанням модуля Dynamic Simulation, де задаються необхідні параметри для відтворення руху механізму [11].

На рис. 6 показано діалогове вікно для налаштування кривошипа зі змінною швидкістю.

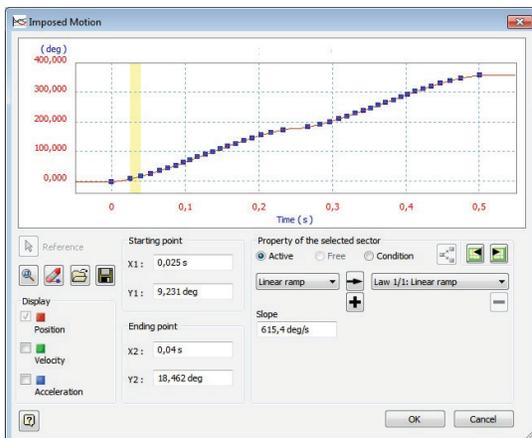


Рис. 6. Завдання закону руху

Виконавши моделювання руху ексцентрикового механізму за допомогою модуля Dynamic Simulation, отримано графічні залежності швидкості та прискорення плити штанцювального преса, характер зміни яких підтверджує теоретичні викладки.

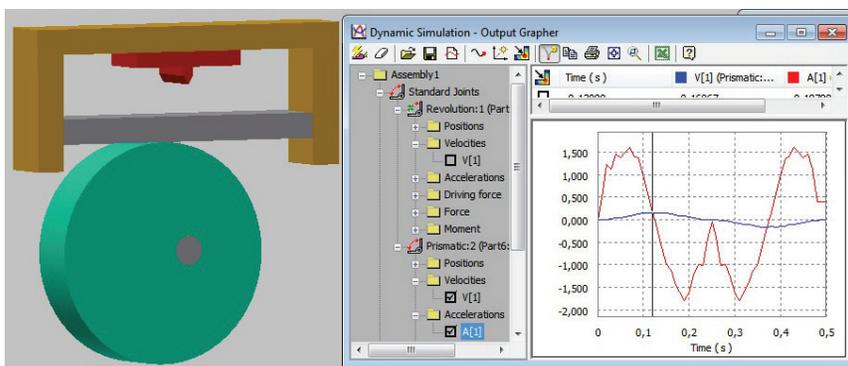


Рис. 7. Моделювання руху механізму за заданим законом руху

**Висновки.** Розроблено методику корекції руху натискної плити штанцювального преса з ексцентриковим механізмом для подальшого дослідження впливу закону періодичного руху натискної плити на енергетичні та силові параметри. Виведено математичні залежності для визначення коригуючого кута повороту кривошипа механізму привода натискної плити та часових інтервалів керування приводом. На основі проведених розрахунків обґрунтовано вибір закону періодичного руху натискної плити. Підтвердження теоретичних викладок здійснено шляхом моделювання роботи механізму в програмі Autodesk Inventor із використанням модуля Dynamic Simulation, де задано обертання кривошипа зі змінною

швидкістю відповідно до розробленої методики. Результати моделювання відтворюють заданий закон періодичного руху натискної плити штанцювального преса, що створює основу для подальших досліджень впливу закону періодичного руху на технологічні зусилля штанцювання.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Регей І. І. Споживче картонне пакування (матеріали, проектування, обладнання для виготовлення) : навч. посіб. Львів : УАД, 2011. 144 с.
2. Прес штанцювального автомата: пат. 120823 України: МПК В26F 1/40 (2006.01), В31В 50/14 (2017.01), В31В 50/88 (2017.01), В30В 1/26 (2006.01). Регей І. І, Книш О. Б., Іваськів Б. Р., Терницький С. В., Бегень П. І.; заявник та власник пат. Регей І. І, Книш О. Б. № а2019 02645; заявл. 18.03.2019; опубл. 10.02.2020. Бюл. № 3. 3 с.
3. Терницький С.В. Підвищення ефективності технологічного процесу в плоских штанцювальних пресах : дис. канд. техн. наук : 05.05.01. Львів, 2013. 151 с.
4. Oleh Knysh, Ivan Rehei, Nazar Kandiak, Serhij Ternytskyi, Bohdan Ivaskiv. Experimental evaluation of eccentric mechanism power load of movable pressure plate in die-cutting press. *Acta Mechanica et Automatica. Faculty of Mechanical Engineering Bialystok University of technology.* 2022. Vol. 16 no. 3. P. 266-273. DOI 10.2478/ama-2022-0032.
5. Іваськів Б. Р Удосконалення штанцювальних пресів застосуванням засобу подачі картонних заготовок за бокові поля та механізмів привода натискної плити з обмеженим ходом : автореферат дис. ... д.філософ : 133 /; Українська академія друкарства. — 2024р.
6. SV Ternytskyi, II Rehei, NM Kandiak, IA Radikhovskiy, OI. Mlynko, Experimental Research of Paperboard Cutting in Die Cutting Press with the Screw–Nut Transmission of Drive Mechanism of a Movable Pressure Plate. *Acta Mechanica et Automatica.* 2021. Pp. 122 – 131. (Q3). DOI 10.2478/ama-2021-0017.
7. Четербух О.Ю. Визначення впливу закону періодичного руху приводного механізму рухомої натискної плити на кінематичні параметри плоскоштанцювального преса. / Четербух О.Ю., Шахбазов Я.О. // Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні. [Національний університет «Львівська політехніка»]. – 2023. – № 57. – С. 75 – 81.
8. Полюдов О.М. Механіка поліграфічних і пакувальних машин: навч. посіб. Львів: УАД, 2005. 177 с.
9. Науково-технічні обчислення засобами MathCAD та MS Excel. Навч. посібник. – Рівне: НУВГП, 2014. – 252 с.
10. Теорія механізмів і машин в системі Mathcad: Навчальний посібник. – Хмельницький: РВЦ ХНУ, 2014. – 324 с.
11. Динамічне моделювання механізмів верстатів та машин в Autodesk Inventor: навч. посіб. Навчальне електронне видання. [для студ. вищ. навч. закл.] / В. М. Гейчук, С. В. Вакуленко. - Київ: НТУУ «КПІ», 2015. – 167 с.

### REFERENCES

1. Rehei, I. I. (2011). *Spozhyvche kartonne pakovannia (materialy, proektuvannia, obladnannia dlia vyhotovlennia)*. Lviv: UAD.

2. Rehei, I. I., Knysh, O. B., Ivaskiv, B. R., Ternytskyi, S. V., & Behen, P. I. (2019). Preshtantsiuvanoho avtomata [Patent UA 120823]. Ukraine. Zayavl. 18.03.2019; Opubl. 10.02.2020.
3. Ternytskyi, S. V. (2013). Pidvyshchennia efektyvnosti tekhnolohichnogo protsesu v ploskikh shtantsiuvalnykh presakh (Cand. techn. sci. diss.). Lviv.
4. Knysh, O., Rehei, I., Kandiak, N., Ternytskyi, S., & Ivaskiv, B. (2022). Experimental evaluation of eccentric mechanism power load of movable pressure plate in die-cutting press. *Acta Mechanica et Automatica*, 16(3), 266–273. <https://doi.org/10.2478/ama-2022-0032>.
5. Ivaskiv, B. R. (2024). Udoskonalennia shtantsiuvalnykh presiv z zastosuvanniam zasobu podachi kartonnykh zahotovok za boki ta mekhanizmiv pryvodu natsysknoi plyty z обмеzenym khodom [Autoref. diss. Dr. phil.]. Ukrainian Academy of Printing.
6. Ternytskyi, S. V., Rehei, I. I., Kan-diak, N. M., Radikhovskiy, I. A., & Mlynko, O. I. (2021). Experimental research of paperboard cutting in die cutting press with the screw–nut transmission of drive mechanism of a movable pressure plate. *Acta Mechanica et Automatica*, 15(2), 122–131. <https://doi.org/10.2478/ama-2021-0017>.
7. Cheterbukh, O. Yu., & Shakhbazov, Ya. O. (2023). Vyznachennia vplyvu zakonu peryodychnoho rukhu pryvodnogo mekhanizmu rukhomoi natsysknoi plyty na kinematychni parametry ploskoshtantsiuvanoho presa. *Avtomatyzatsiia vyrobnychykh protsesiv u mashynobuduvanni ta prykladobuduvanni*, 57, 75–81.
8. Poludov, O. M. (2005). *Mekhanika poligrafichnykh i pakuvalnykh mashyn: Navchalnyi posibnyk*. Lviv: UAD.
9. Naukovo-tekhnicni obchyslennia zasobamy MathCAD ta MS Excel. (2014). Rivne: NUVHP.
10. Teoriia mekhanizmiv i mashyn v systemi MathCAD. (2014). Khmelnytskyi: RVC KhNU.
11. Heichuk, V. M., & Vakulenko, S. V. (2015). *Dynamichne modeliuвання mekhanizmiv verstativ ta mashyn v Autodesk Inventor [Navchalne elektronne vydannia]*. Kyiv: NTUU «KPI».

doi: 10.32403/0554-4866-2025-2-90-118-127

## **RESEARCH ON THE DRIVE OF THE DIE-CUTTING PRESS PLATE WITH AN ECCENTRIC MECHANISM BY MEANS OF MOTION CORRECTION**

N. M. Kandiak, Y. I. Ostafiychuk

*Polytechnic National University,  
12 Bandery St, Lviv, 79013, Ukraine  
nazar.m.kandiak@lpnu.ua*

*The article proposes the technique for correcting the trajectory of the pressure plate in a die-cutting press based on an eccentric mechanism. This technique optimises the kinematic and dynamic characteristics of the equipment comprehensively and ensures effective control over the energy-force parameters of the die-cutting process for cardboard blanks. In contrast to standard methods, which often require developing and*

*implementing complex additional mechanisms, the proposed approach involves a flexible modification of the pressure plate motion law by applying a servodrive, which does not necessitate significant and costly structural changes to the press basic architecture.*

*A set of mathematical dependencies was derived for the practical implementation of this technique. These define two key parameters: the corrective crank rotation angle and the precise time intervals for the control system, which ensure the necessary realisation of the specified motion law. The choice of the optimal motion law was thoroughly justified based on an in-depth analysis of the eccentric mechanism kinematics and an assessment of its inertial load dynamics, allowing for determining its most rational operational mode.*

*The validity and soundness of the obtained theoretical results were confirmed through dynamic simulation in the Autodesk Inventor environment, explicitly using the Dynamic Simulation module. The simulation results clearly confirm the precise correspondence of the actual pressure plate movement to the programmed law, which, in turn, indicates the achievement of the main goals – a significant reduction in dynamic loads on the press main drive and ensuring high overall operational smoothness.*

*The proposed technique opens up broad prospects for further scientific research. In particular, it has the potential for studying the influence of various motion laws on the energy efficiency of the technological process, the accuracy of the die-cutting operation, and the further optimisation of production costs in the packaging manufacturing industry.*

**Keywords:** *eccentric mechanism, drive, die-cutting press, packaging, calculation, motion law, polynomial, correction, kinematic scheme.*

*Стаття надійшла до редакції 17.09.2025.*

*Received 17.09.2025.*