

## СИСТЕМА АДАПТИВНОГО КЕРУВАННЯ ПРИВОДОМ АВТОМАТИЧНИХ КАВОВИХ МАШИН

*Проведено аналіз приводів сучасних автоматичних кавових машин та відомих технічних рішень щодо їх автоматизації. Визначено шляхи удосконалення приводів автоматичних кавових машин. Встановлено залежність моменту опору на валу електродвигуна приводу автоматичної кавової машини від зусилля, що діє на поршень її пресового механізму. Методологічною і теоретичною основою дослідження слугують основні положення теоретичної механіки, теорія електроприводу, теорія переробки сипких середовищ, методологія експериментальних досліджень. Проведено експериментальні дослідження роботи приводу автоматичної кавової машини. Визначено основні параметри технологічного процесу пресування кави. Результати досліджень можуть бути використані для удосконалення конструкції побутових автоматичних кавових машин.*

*Ключові слова:* кавова машина, привод, процес пресування кави, система адаптивного керування, електродвигун.

V.P. MISIATS, M.M. RUBANKA, S.A. DEMISHONKOVA

Kyiv National University of Technologies and Design

O.S. POLISHCHUK

Khmelnitsky National University

## ADAPTIVE CONTROL SYSTEM FOR AUTOMATIC COFFEE MACHINES

*Today, the market offers a huge selection of different machines for making coffee and coffee drinks, ranging from inexpensive carob coffee machines to elite automatic coffee machines made of precious wood or inlaid with precious stones. The most common equipment for making coffee include: carob coffee machines, chalda (portion) coffee machines, capsule coffee machines, Espresso-combines and household automatic coffee machines. Each of the types of the above equipment has both advantages and disadvantages.*

*The analysis of drives of modern automatic coffee machines and known technical solutions for their automation is carried out. Ways to improve the drives of automatic coffee machines are identified. The dependence of the moment of resistance on the motor shaft of the automatic coffee machine drive on the force acting on the piston of its press mechanism is established. The methodological and theoretical basis of the study are the basic provisions of theoretical mechanics, the theory of electric drive, the theory of processing of bulk media, the methodology of experimental research. The possibility of effective use of the adaptive control system of the drive of automatic coffee machines is theoretically substantiated, in the presence of the transfer function of feedback on the electric motor current and mathematical dependences that adequately describe the process of coffee pressing. Experimental researches of work of the drive of the automatic coffee machine are carried out. The main parameters of the technological process of coffee pressing are determined. The sensitivity function of the pressing system to the deviation of the loading mass from the set value is obtained. It is established that the sensitivity increases sharply exponentially with increasing mass of coffee loading into the pressing device. The research results can be used to improve the design of household automatic coffee machines. The results of the research allow to obtain the transfer functions of the coffee load weight control system according to the motor current.*

*Key words:* coffee machine, drive, coffee pressing process, adaptive control system, electric motor.

### Вступ

На сьогоднішній день на ринку товарів представлений величезний вибір різноманітних апаратів для приготування кави і кавових напоїв, починаючи з недорогих ріжкових кавоварок і закінчуючи елітними автоматичними кавовими машинами, виконаними з цінних порід дерева або інкрустованими коштовними каменями. До найбільш поширеного обладнання для приготування кави можна віднести: ріжкові кавові машини, чалдові (порційні) кавові машини, капсульні кавові машини, Espresso-комбайни та побутові автоматичні кавові машини [1-7]. Кожен із типів вищезазначеного обладнання має як свої переваги так і недоліки.

Аналітичний огляд та аналіз існуючих конструкцій апаратів та машин для приготування кави, показав, що у світі є тенденція розвитку саме автоматичних машин для приготування кави, які працюють за принципом – завантажив зерна кави, натиснув кнопку і кава періодично готується поки бункер не спорожніє.

В автоматичних кавових машинах одним із найскладніших механізмів є механізм дозування і пресування кавового порошку перед заварюванням.

Існуючі механізми пресування поршневого типу мають складну конструкцію і ряд недоліків, одним із яких це неточність дозування меленої кави за рахунок контролю часу або кількості обертів жорен кавомолки. Тому проблема підвищення ефективності роботи автоматичних кавових машин шляхом удосконалення їх приводу є актуальною та своєчасною. Оснащення приводу кавової машини системою адаптивного керування дозволить зменшити витрати електроенергії, собівартість обладнання, підвищити надійність і довговічність його роботи.

### Об'єкт та методи дослідження

Об'єктом досліджень є процеси адаптивного дозування і пресування порошку кави в автоматичних кавових машинах. При вирішенні поставлених задач були використані основні положення теоретичної

механіки, теорія електроприводу, теорія переробки сипких середовищ, методологія експериментальних досліджень.

### Постановка завдання

Враховуючи актуальність питання підвищення ефективності роботи автоматичних кавових машин, завданням досліджень є розробка системи адаптивного керування приводом з використанням математичної моделі процесу пресування порошку кави, що дозволить зменшити витрати електроенергії, собівартість, підвищити надійність і довговічність його роботи.

### Результати та їх обговорення

В автоматичних кавових машинах, наприклад, для побутового або професійного застосування, а також в області торгових автоматів необхідно точно дозувати кількість кавового порошку, що видається в камеру для настоювання машини під час кожного робочого циклу. У найбільш сучасних машинах кава завантажується у вигляді зерен, і вузол помелу, що міститься в машині, розмелює задану кількість зерен для отримання порції порошкоподібної кави, потрібної для приготування чашки кави. Деякі машини також дозволяють користувачеві в певних межах змінювати кількість кави для отримання міцнішого або слабкішого напою [8-11].

Суть роботи полягає в розробці способу управління кількістю кавового порошку, що дозується в циклі настоювання, тобто автоматичного регулювання кількості кави, що дозволяє коректувати будь-які погрішності за допомогою підтримки по суті постійного протягом часу дозування кави, тобто кількості кави по масі, також можливо надаючи користувачеві можливість регулювання цієї дози у деяких межах.

Система адаптивного керування приводом автоматичної кавової машини, має забезпечувати точне і постійне дозування протягом всього часу, тобто забезпечувати автоматичне регулювання порції або кількості кавового порошку в камері настоювання. Так, для приготування Espresso, автоматичний спосіб регулювання об'єму порції передбачає наступні етапи:

- видача заданої кількості кавового порошку в камеру настоювання;
- замикання за допомогою електричного приводу камери настоювання, після пресування порошку кави;
- реєстрація, щонайменше, одного робочого параметра електричного приводу під час, щонайменше, частини етапу замикання камери настоювання і пресування кавового порошку з тим, щоб встановити порцію кавового порошку, що видається в подальшому циклі видачі залежно від контрольованого робочого параметра.

На кожному циклі видачі певної кількості кавового порошку має здійснюватись чітке управління приводом автоматичної кавової машини, що ефективно дозується за допомогою електричного параметра двигуна, який замикає камеру настоювання. При цьому вказаний параметр є функцією кількості спресованого кавового порошку. Це дозволяє виявляти надмірну або недостатню кількість кавового порошку в порівнянні із заданою величиною. До вузла видачі застосовують дії по модифікації кількості кави, що видається під час подальшого циклу настоювання, і досягають по суті автоматичного регулювання дози, тобто кількості кави по масі.

В більшості автоматичних кавових машин видача порцій виконується за допомогою вузла помелу. Цей вузол розмелює таку кількість кавових зерен, яка потрібна під час кожного циклу. Потім кава прямо або опосередковано видається з вузла помелу в камеру настоювання. Управління електричним параметром приводу замикання камери настоювання дозволить регулювати число обертів жорен вузла помелу в подальшому циклі настоювання.

Для технічної реалізації запропонованої авторами статті системи адаптивного керування приводом автоматичної кавової машини потрібно вирішити наступні задачі:

- аналітично отримати математичну функціональну залежність моменту опору на валу електродвигуна від зусилля, що діє на поршень пресового механізму кавової машини;
- експериментально встановити залежність зусилля, що діє на поршень пресового механізму кавової машини від маси завантаженої в нього кави;
- визначити чутливість системи контролю маси кави в заварному пристрої за струмом електродвигуна, що має забезпечити необхідну точність дозування.

Аналіз конструкцій автоматичних кавоварок показав, що більшість механізмів приводу поршня заварних пристроїв є аксіальними, кривошипно-шатунними (рис. 1).

Для встановлення функціональної залежності між переміщенням повзуна (поршня) і кутом повороту валу електродвигуна (кривошипа) виконаємо їх кінематичний і силовий аналіз [12-15]. Для спрощення задачі приймемо наступні припущення:

- кутова швидкість валу електродвигуна постійна;
- зазори між ланками механізму нескінченно малі;
- ланки механізму не деформуються;
- силами інерції ланок механізму нехтуємо, через малі кутові швидкості.

Переміщення поршня в загальному вигляді можна визначити за наступним виразом:

$$S_{\varphi} = R + L - \left( R \cdot \cos\varphi + L \cdot \cos\beta \right) = R \left[ 1 + \frac{1}{\lambda} - \left( \cos\varphi + \frac{1}{\lambda} \cdot \cos\beta \right) \right], \quad (1)$$

де  $R$  – радіус кривошипа;  $L$  – довжина шатуна;  $\lambda = \frac{R}{L}$  – параметр геометричної та кінематичної подібності;  $\varphi$  – кут повороту кривошипа;  $\beta$  – кут відхилення шатуна.

На практиці аналітична формула кінематики аксіального кривошипно-шатунного механізму (1) не зручна через залежність від двох величин  $\varphi$  та  $\beta$ . Використовуючи ряд тригонометричних перетворень та враховуючи, що зазвичай  $\lambda \leq \frac{1}{3,5}$  вираз (1) можна записати в наступному вигляді:

$$S_\varphi \approx R \left[ 1 + \frac{1}{\lambda} - \cos\varphi - \frac{1}{\lambda} + \frac{\lambda^2}{\lambda \cdot 4} - \frac{\lambda^2}{\lambda \cdot 4} \cos 2\varphi \right] = R \left[ 1 + \frac{\lambda}{4} - \left( \cos\varphi + \frac{\lambda}{4} \cos 2\varphi \right) \right]. \quad (2)$$

Розглянемо сили, що діють на ланки кривошипно-шатунного механізму під час пресування чергової порції кавового порошку (рис. 2).

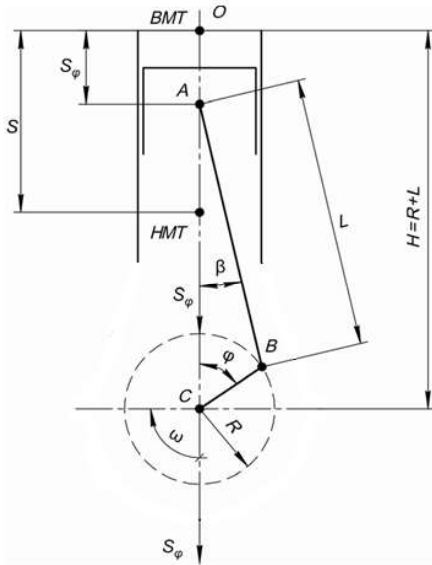


Рис. 1. Схема аксіального кривошипно-шатунного механізму

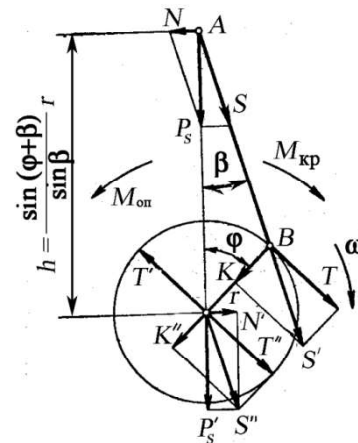


Рис. 2. Сумарні сили і моменти, що діють в кривошипно-шатунному механізімі

Сила  $P_s$ , що діє вздовж осі поршня може бути розкладена на дві складові:  $N = P_s \cdot \operatorname{tg} \beta$  – сила притиску поршня до стінок циліндра;  $S = \frac{P_s}{\cos \beta}$  – сила вздовж вісі шатуна.

Силу  $S$ , перенесену уздовж подовжньої осі шатуна в центр шатунної шийки кривошипа, позначимо через  $S'$  і розкладемо її на дві складові:  $K = S' \cos(\alpha + \beta) = P_s \cdot \frac{\cos(\alpha + \beta)}{\cos \beta}$  – нормальна складова сили, що напрямлена вздовж кривошипа;  $T = S' \sin(\alpha + \beta) = P_s \cdot \frac{\sin(\alpha + \beta)}{\cos \beta}$  – тангенціальна складова сили, що напрямлена перпендикулярно кривошипу. Сила  $T$ , це єдиний силовий фактор, що визначає крутний момент  $M_{кр}$  на валу електродвигуна:

$$M_{кр} = T \cdot R = P_s \cdot \frac{\sin(\alpha + \beta)}{\cos \beta} \cdot R = P_s R \cdot (\sin\varphi + \operatorname{tg} \beta \cos\varphi). \quad (3)$$

Для малих значень кута  $\beta$  з незначною похибкою можна записати, що  $\operatorname{tg} \beta = \lambda \sin\varphi$ . Тоді рівняння (3) можна записати в наступному вигляді:

$$M_{кр} = P_s R \cdot (\sin\varphi + \lambda \sin\varphi \cos\varphi) = P_s R \cdot \left( \sin\varphi + \frac{\lambda}{2} \sin 2\varphi \right). \quad (4)$$

Момент опору рівний за величиною та протилежний за напрямом крутному моменту на валу електродвигуна:

$$M_{он} = -P_s \cdot \frac{\sin(\alpha + \beta)}{\cos \beta} \cdot R = -P_s \cdot \frac{\sin(\alpha + \beta)}{\sin \beta} \cdot R \cdot \operatorname{tg} \beta = -T \cdot R = -M_{кр} \quad (5)$$

Аналітично отримано залежність моменту опору на валу електродвигуна привода автоматичної кавової машини від кутів, що визначають положення ланок кривошипно-шатунного механізму поршня, їх геометричних параметрів та зусилля від стиснення кавового порошку в камері заварного пристрою.

Сила, що виникає в процесі пресування кавового порошку залежить від величини переміщення поршня, його діаметру та маси завантаженої порції кавового порошку:

$$P_s = f(S_\phi; m; D), \tag{6}$$

де  $m$  – маса завантаженої порції кавового порошку;  $D$  – діаметр поршня механізму пресування кавового порошку.

Значення сили  $P_s$  за виразом (6) можна отримати виключно експериментальним шляхом. Для цього було виготовлено експериментальний стенд (рис. 3), що складається: з циліндричного товстостінного пластикового стакану 6, що має внутрішній діаметр 52 мм і висоту 50 мм; поршня 5, діаметром 51,5 мм і висотою 50 мм; П – подібної сталевій рами 4; гайки 3 з різьбленням М6х0,5, яка жорстко закріплена в центральному отворі рами 4; Гвинта 2 М6х0,5 довжиною 100 мм, який має диск 1 для можливості його ручного обертання. Циліндричний стакан встановлюється на робочу плиту електронних ваг 8 Beurer KS 34, що мають наступні характеристики: конструкція з плоскою платформою; максимальна допустима маса вантажу 15 кг; ціна поділки 1 грам; матеріал платформи загартоване скло; функція компенсації тари; розміри ШхГхВ 200х263х20 мм.

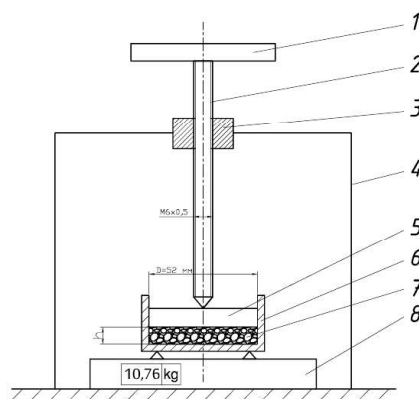


Рис. 3. Схема пристрою для випробувань меленої кави на стиснення:  
1 – поворотний диск; 2 – гвинт; 3 – гайка; 4 – рама; 5 – поршень; 6 – циліндричний стакан;

Для зважування порцій меленої кави використовували електронні ваги Domotec 1728C 0.01, які мають ціну поділки 0,01 грам і максимально допустиму масу вантажу 100 грам. Для проведення випробувань використовувалась готова мелена кави марки «Fort», яка має наступні фізичні характеристики: густина порошку в максимально можливому спресованому стані 450 кг/м<sup>3</sup> (показник отримано на основі аналізу вакуумної упаковки масою 225 грам); насипна густина порошку у вільному стані 320 кг/м<sup>3</sup> (показник отримано шляхом вимірювання об'єму певної маси порошку, що вільно наповнює мірний стакан).

Задля чистоти експерименту пустий мірний стакан було встановлено на електронні ваги Beurer KS 34, після чого здійснювалась компенсація його ваги (кнопка «ТАРА»). Після компенсації індикатор цифровий індикатор електронних ваг показував 0,0 грам.

Порції меленого кавового порошку масою 9, 10 та 11 грамів засипались у відтарований мірний стакан, в який потім вставлявся поршень.

Обертанням диску 1, гвинт 2 загвинчувався в крайнє нижнє положення, про що свідчив початок відліку електронних ваг (1...2 грами) і повертався в протилежну сторону до показання ваги 0 грам.

Потім обертанням диску за годинниковою стрілкою здійснювалось пресування кави. При цьому через кожний повний оберт (при крокові гвинта 0,5 мм гвинт переміщував поршень на 0,5 мм) фіксувались показники на цифровому дисплеї. Результати випробувань представлені в таблицях 1-3.

Таблиця 1

**Результати випробувань при стисненні 9 грам кавового порошку**

№ п/п	Виміряні показники		Розраховані показники		
	Переміщення поршня $\Delta h$ , мм	Показники ваги Р, Н	Густина $\rho(\Delta h)$ , кг/м <sup>3</sup> ·10 <sup>-3</sup>	Висота $h$ , мм	Відносна деформація $\varepsilon$ , %
1	0	0	0,32	13	0
2	0,5	2,73	0,338	12,5	3,8
3	1	5,02	0,353	12	7,6
4	1,5	9,27	0,368	11,5	11,4
5	2	17,27	0,385	11	15,2
6	2,5	32,23	0,403	10,5	19
7	3	58,85	0,423	10	22,7
8	3,5	109,44	0,445	9,5	26,5

Таблиця 2

## Результати випробувань при стисненні 10 грам кавового порошку

№ п/п	Виміряні показники		Розраховані показники		
	Переміщення поршня $\Delta h$ , мм	Показники ваги Р, Н	Густина $\rho(\Delta h)$ , кг/м <sup>3</sup> ·10 <sup>-3</sup>	Висота $h$ , мм	Відносна деформація $\varepsilon$ , %
1	0	0	0,32	14,5	0
2	0,5	3,04	0,335	14,0	4,17
3	1	3,93	0,348	13,5	6,9
4	1,5	7,58	0,362	13,0	10,3
5	2	14,58	0,376	12,5	13,8
6	2,5	26,54	0,392	12,0	17,2
7	3	45,27	0,409	11,5	20,7
8	3,5	70,98	0,427	11,0	24,1
9	4	122,45	0,447	10,5	27,6

Таблиця 3

## Результати випробувань при стисненні 11 грам кавового порошку

№ п/п	Виміряні показники		Розраховані показники		
	Переміщення поршня $\Delta h$ , мм	Показники ваги Р, Н	Густина $\rho(\Delta h)$ , кг/м <sup>3</sup> ·10 <sup>-3</sup>	Висота $h$ , мм	Відносна деформація $\varepsilon$ , %
1	0	0	0,32	16	0
2	0,5	2,42	0,334	15,5	3,1
3	1	3,87	0,345	15	6,1
4	1,5	6,53	0,357	14,5	9,2
5	2	10,58	0,369	14	12,2
6	2,5	17,58	0,383	13,5	15,3
7	3	29,21	0,398	13	18,4
8	3,5	47,57	0,414	12,5	21,4
9	4	79,06	0,431	12	24,5

Початкову висоту кавового порошку в циліндрі при різній масі завантаження було визначено за формулою:

$$h_0(m) = \frac{4 \cdot m}{\pi \cdot \rho_{нас} \cdot D^2}, \quad (7)$$

де  $\rho_{нас}$  – насипна густина меленої кави у вільному стані;  $D$  – діаметр поршня.

Густина кавового порошку при різних положеннях поршня було визначено за формулою:

$$\rho(h) = \frac{4 \cdot m}{\pi \cdot (h_0 - \Delta h) \cdot D^2}. \quad (8)$$

Висоту кавового порошку в циліндрі при різних положеннях поршня було визначено за формулою:

$$h(\Delta h) = h_0 - \Delta h. \quad (9)$$

Відносну деформацію кавового порошку при різних положеннях поршня було визначено за формулою:

$$\varepsilon(\Delta h) = \frac{h(\Delta h)}{h_0} \cdot 100. \quad (10)$$

За результатами експериментів було виконано апроксимацію чисельних даних методом найменших квадратів (використано програмне забезпечення «Graphical Analysis»). Було отримано функції залежності зусилля, що діє на поршень від його переміщення. Результати обробки даних в програмному середовищі «Graphical Analysis» представлено на рис. 4.

Отримані в результаті апроксимації даних експерименту функції мають наступний вигляд:

– при завантаженні 9 г кавового порошку

$$P_9 = 150 \cdot \exp(1,228 \cdot \Delta h) - 50; \quad (11)$$

– при завантаженні 10 г кавового порошку

$$P_{10} = 224 \cdot \exp(1,002 \cdot \Delta h) - 174; \quad (12)$$

– при завантаженні 11 г кавового порошку

$$P_{11} = 156 \cdot \exp(0,983 \cdot \Delta h) - 59; \quad (13)$$

За отриманими в результаті обробки даних експериментів функціями (11-13) було побудовано відповідні графічні залежності, які представлено на рис. 5

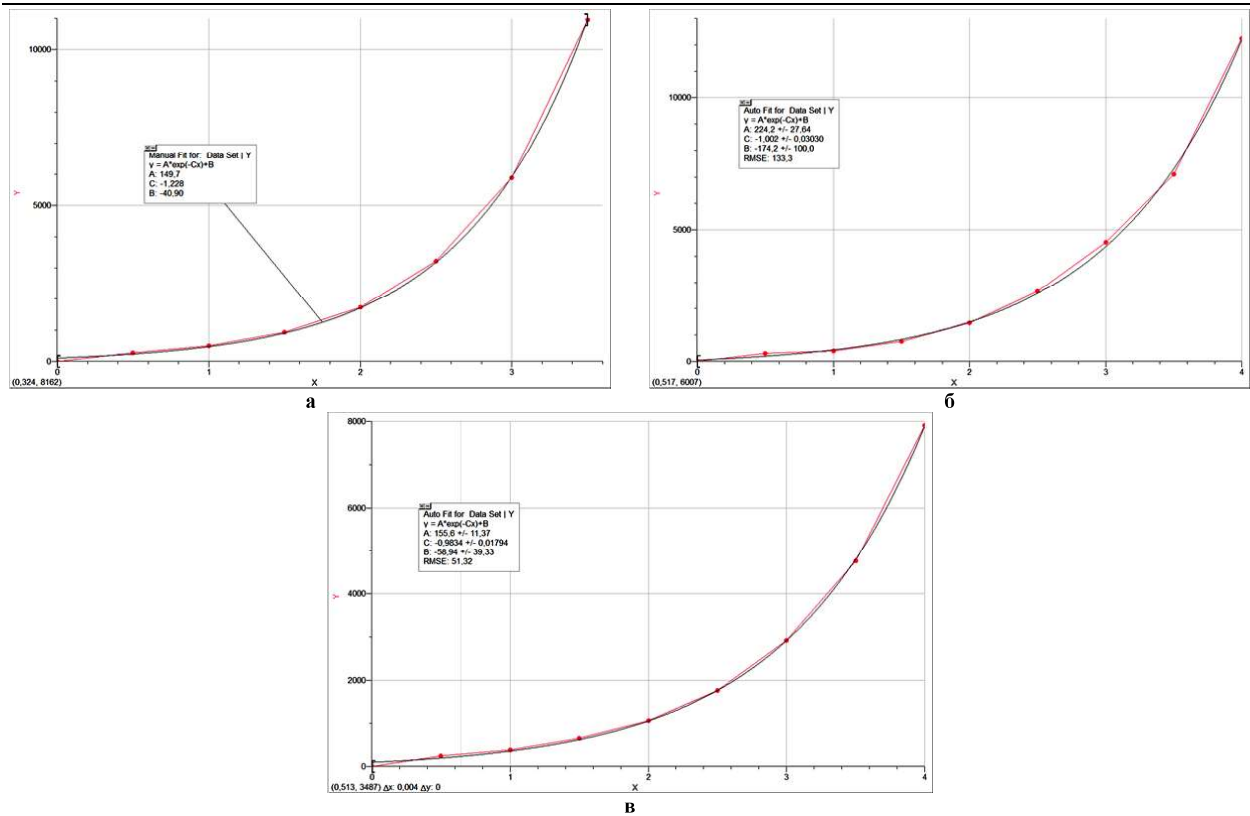


Рис. 4. Результати обробки даних експериментів в програмному середовищі «Graphical Analysis»: а – при завантаженні 9 г кавового порошку; б – при завантаженні 10 г кавового порошку; в – при завантаженні 11 г кавового порошку

З графіків на рис. 5. видно, що інтенсивність зростання навантаження на поршень зростає зі зменшенням маси завантаження. Це можна пояснити припущенням про вплив товщини шару матеріалу в камері стиснення (див. формулу (10), де в знаменнику початкова висота кавового порошку).

Для підтвердження зробленого припущення аналогічним шляхом апроксимації даних було отримано функції залежності зусилля, що діє на поршень від відносної деформації матеріалу:

– при завантаженні 9 г кавового порошку

$$P_9 = 155 \cdot \exp[0,168 \cdot \varepsilon(\Delta h)] - 52 ; \tag{14}$$

– при завантаженні 10 г кавового порошку

$$P_{10} = 233 \cdot \exp[0,144 \cdot \varepsilon(\Delta h)] - 202 ; \tag{15}$$

– при завантаженні 11 г кавового порошку

$$P_{11} = 157 \cdot \exp[0,160 \cdot \varepsilon(\Delta h)] - 63 ; \tag{16}$$

За отриманими в результаті обробки даних експериментів функціями (14-16) було побудовано графічні залежності, які представлено на рис. 6.

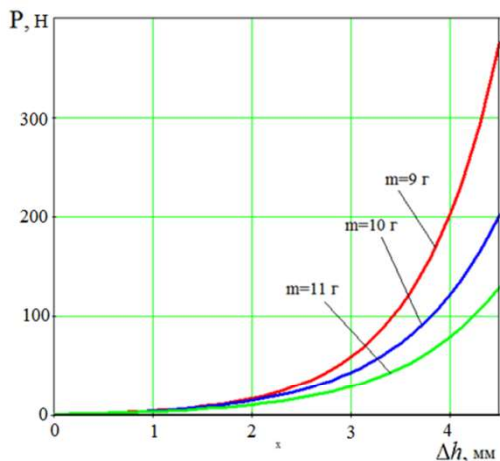


Рис. 5. Графічні залежності зусилля, що діє на поршень від його переміщення при пресуванні порцій кавового порошку різної маси

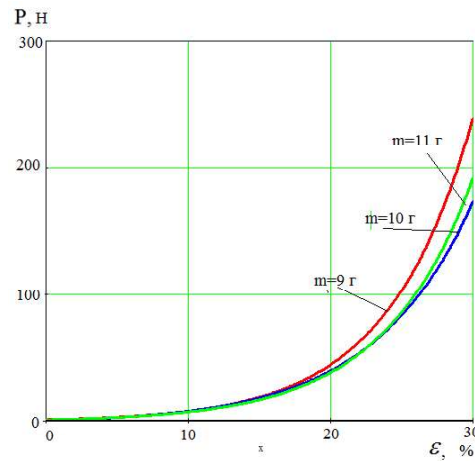


Рис. 6. Графіки залежності зусилля, що діє на поршень від відносної деформації порцій кавового порошку різної маси

З графіків на рис. 6 видно, що вони практично співпадають, тобто відносна деформація матеріалу в циліндрі може слугувати загальним (не залежним від маси завантаження) аргументом функції процесу пресування кавового порошку.

Розглянемо випадок, коли процес подрібнення кави в кавомолці автоматичної кавової машини здійснюється з відхиленням від заданої маси порції 10 грам. При цьому механізм пресування налаштований таким чином, що зусилля пресування не перевищує 100 Н.

При завантаженні в камеру пресування порошку кави різної маси, що обумовлено роботою кавомолки буде різною також висота  $h_0(m)$ . Наприклад, при коливанні маси порошку кави від 9 до 11 грам, висота заповнення камери буде змінюватись в межах, які можна визначити за формулою (7):

$$h_0(9) = \frac{4 \cdot 9}{3,14 \cdot 0,32 \cdot 10^{-3} \cdot 52^2} = 13,2 \text{ мм};$$

$$h_0(10) = \frac{4 \cdot 10}{3,14 \cdot 0,32 \cdot 10^{-3} \cdot 52^2} = 14,7 \text{ мм};$$

$$h_0(11) = \frac{4 \cdot 11}{3,14 \cdot 0,32 \cdot 10^{-3} \cdot 52^2} = 16,3 \text{ мм}.$$

Тобто різниця висот наповнення буде становити 3,1 мм.

З експоненціальної функції виду  $P = A \cdot \exp(C \cdot \Delta h) + B$  отримуємо формулу для визначення висоти матеріалу в циліндрі кавової машини в залежності від діючого зусилля:

$$\Delta h = \frac{1}{C} \ln \left( \frac{P - B}{A} \right). \quad (17)$$

Підставляючи в (17) значення коефіцієнтів з отриманих нами рівнянь (11-13) визначимо зменшення висоти «таблетки» кавового порошку при дії поршня з зусиллям 100 Н:

$$\Delta h_9 = \frac{1}{1,228} \ln \left( \frac{100 \cdot 10^2 + 50}{150} \right) = 3,4 \text{ мм};$$

$$\Delta h_{10} = \frac{1}{1,002} \ln \left( \frac{100 \cdot 10^2 + 174}{224} \right) = 3,8 \text{ мм};$$

$$\Delta h_{11} = \frac{1}{0,983} \ln \left( \frac{100 \cdot 10^2 + 59}{156} \right) = 4,2 \text{ мм}.$$

Висоту стиснутих «таблеток» після прикладення зусилля в 100 Н визначаємо за формулою (9):

$$h(3,4)_9 = 13,2 - 3,4 = 9,8 \text{ мм};$$

$$h(3,8)_{10} = 14,7 - 3,8 = 10,9 \text{ мм};$$

$$h(4,2)_{11} = 16,3 - 4,2 = 12,1 \text{ мм}.$$

Якщо механізм налаштований таким чином, що кінцеве положення поршня відповідає висоті камери 11 мм (розраховане приблизно на 10 грам), то величина стиснення кавового порошку буде:

$$\text{Для 9 грам } \Delta h(9) = 13,2 - 11 = 2,2 \text{ мм};$$

$$\text{Для 10 грам } \Delta h(10) = 14,7 - 11 = 3,7 \text{ мм};$$

$$\text{Для 11 грам } \Delta h(11) = 16,3 - 11 = 5,3 \text{ мм}.$$

За формулами (11-13) визначаємо зусилля після замикання камери:

$$P_9 = [150 \cdot \exp(1,228 \cdot 2,2) - 50] \cdot 9,8 \cdot 10^{-3} = 21,9 \text{ Н};$$

$$P_{10} = [224 \cdot \exp(1,002 \cdot 3,7) - 174] \cdot 9,8 \cdot 10^{-3} = 99,9 \text{ Н};$$

$$P_{11} = [156 \cdot \exp(0,983 \cdot 5,3) - 59] \cdot 9,8 \cdot 10^{-3} = 285,0 \text{ Н}.$$

Тобто, при такому налаштуванні порція кавового порошку масою 9 грам буде не достатньо спресованою, порція масою 10 грам буде спресована в межах заданої норми, а при пресуванні порції масою 11 г відбудеться перевантаження механізму.

Виконуємо апроксимацію чисельних результатів за методом найменших квадратів і отримуємо функцію залежності зусилля пресування від маси завантаження для випадку, що розглядається. Результат розрахунку з використанням програмного забезпечення «Graphical Analysis» представлено на рис. 7.

Отримана функція має вигляд:

$$P(m) = 2,38 \cdot \exp(0,864 \cdot m) - 3491 . \tag{18}$$

Функцію чутливості системи пресування до відхилення маси завантаження від заданого значення можна визначити диференціюванням рівняння (18):

$$\frac{dP(m)}{dm} = 2,05 \cdot \exp(0,864 \cdot m) \tag{19}$$

Графік функції чутливості системи пресування до відхилення маси завантаження від заданого значення 10 грам представлено на рис. 8.

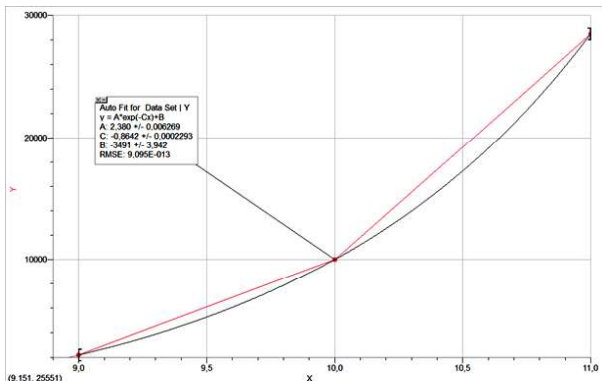


Рис. 7. Графічна залежність зусилля з яким діє поршень від маси завантаження кавового порошку, при налаштованій висоті механізму 11 мм і діаметру камери 52 мм

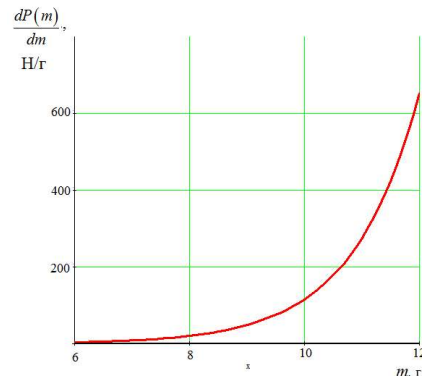


Рис. 8. Графік функції чутливості системи пресування до відхилення маси завантаження від заданого значення 10 грам

З графіка (рис. 8) видно, що чутливість системи контролю маси завантаження за зусиллям, що дії на поршень збільшуються зі збільшенням маси кавового порошку і є «нульовою» при масі 6 грам (поршень цю порцію вже не стискає)

Для контролю маси завантаження за струмом електродвигуна ми можемо тепер отримати передаточну функцію скориставшись отриманими рівняннями (4) і (18). Функція має наступний вигляд:

$$M_{кр} = [2,38 \cdot \exp(0,864 \cdot m) - 3491] \cdot R \left( \sin\varphi + \frac{\lambda}{2} \sin 2\varphi \right). \tag{20}$$

Маючи функцію (20) залежності моменту від маси завантаження і механічну характеристику двигуна постійного струму (вона лінійна), який використовується в приводі можна виконати інженерну розробку системи адаптивного керування приводом автоматичної кавової машини.

### Висновки

Теоретично підтверджено можливість ефективного використання системи адаптивного керування приводом автоматичних кавових машин, при наявності передавальної функції зворотного зв'язку за струмом електродвигуна і математичних залежностей, що адекватно описують процес пресування кави.

Отримано аналітичну залежності моменту опору на валу електродвигуна від зусилля що діє на поршень пресового механізму кавової машини, яка може бути використана для моделювання процесів пресування кавового порошку в автоматичних кавових машинах.

Експериментально визначено основні параметри пресування кавового порошку, які описані функціональними залежностями в результаті апроксимації отриманих даних.

Отримано функцію чутливості системи пресування до відхилення маси завантаження від заданого значення. Встановлено, що чутливість різко зростає по експоненті зі збільшенням маси завантаження кавового порошку в пристрій пресування.

В результаті проведених досліджень можна отримувати передаточні функції системи контролю маси завантаження за струмом електродвигуна .

### Література

1. Кавова машина [Електронний ресурс] – Режим доступу: [https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%B0%D0%B2%D0%BE%D0%B2%D0%B0\\_%D0%BC%D0%B0%D1%88%D0%B8%D0%BD%D0%B0](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%B0%D0%B2%D0%BE%D0%B2%D0%B0_%D0%BC%D0%B0%D1%88%D0%B8%D0%BD%D0%B0)
2. Як вибрати кавоварку для дому [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://brayval-coffee.com.ua/ua/kak-vybrat-kofevarku-dlya-doma/>
3. Як обрати кавоварку: характеристика приладів та рекомендації [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://v10.com.ua/statti/rekomendatsiji/jak-obrati-kavovarku-harakteristika-priladiv-ta-rekomendatsiji.html>



4. Выбор кофеварки [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://coffe-master.ru/vybor-kofevarki/>
5. Кавоварка для дому: різновиди, особливості, критерії вибору [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://erc.ua/erc-reviews/19195/kavovarka-dlia-domu-riznovidi-osoblivosti-kritieriyi-viboru/>
6. Основні типи кавомашин [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.procoffee.com.ua/blog/tpost/60dt89cu5c-osnovn-tipi-kavomashin>
7. Рао С. Пособие профессионального баристы / С. Рао. – М. : Студия Артемия Лебедева, 2017. – 200 с.
8. Пат. 10085588 US, МПК А47J 31/40 (2006.01), А47J 31/42 (2006.01), А47J 31/36 (2006.01). Method for automatic adjustment of the quantity of coffee and coffee machine using said method / Gianni Remo, Adelmo Pilone, Riccardo Ziani ; заявник та патентовласник KONINKLIJKE PHILIPS N.V. - № 2008/000097 ; заявл. 15.02.2008 ; опубл. 02.10.2018.
9. Пат. 4659023 US, МПК В02С 25/00. Process and an apparatus for the proportioning of coffee powder in a coffee machine / Frei Hans-Peter, Schmed Arthur ; заявник та патентовласник Gesamat AG, Ballwil, Switzerland. - № 643735 ; заявл. 24.08.1984 ; опубл. 21.04.1987.
10. Пат. 5492054 US, МПК А47J 31/00. Coffee maker with a metering device / Schneeberger Gerard ; заявник та патентовласник Prodana AG, Switzerland. - № 289192 ; заявл. 11.08.1994 ; опубл. 20.02.1996.
11. Пат. 19629239 DE, МПК А47J 31/24, А47J 31/34, А23F 5/26. Vorrichtung zur selbsttätigen Zubereitung von Kaffee / Greiwe Hansdieter ; заявник та патентовласник Pulaх AG, Deutschland. - № 196292395 ; заявл. 19.06.1997 ; опубл. 22.01.1998.
12. Бурдуковский В.Г. Оборудование кузнечно-штамповочных цехов. Кривошипные машины: учеб. пособие / В.Г. Бурдуковский, Ю.В. Инатович.— Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2018.— 168 с.
13. Артоболевський І.І. Теорія механізмів і машин : пер. з 3-го рос. вид. : підручник для машинобудівних вузів / І. І. Артоболевський. - К. : Держтехвидав, 1957. - 696 с.
14. Кіницький Я.Т. Теорія механізмів і машин : підручник / Я. Т. Кіницький. - К. : Наукова думка, 2002. – 662 с.

## References

1. Kavova mashyna [Coffee machine] URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%B0%D0%B2%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D0%BC%D0%B0%D1%88%D0%B8%D0%BD%D0%B0> (Last accessed: 25.01.2021) [in Ukrainian].
2. Yak vybraty kavovarku dlia domu [How to choose a coffee machine for home] URL: <https://brayval-coffee.com.ua/ua/kak-vybrat-kofevarku-dlya-doma/> (Last accessed: 25.01.2021) [in Ukrainian].
3. Yak obraty kavovarku: kharakterystyka pryladiv ta rekomendatsii [Choosing a coffee machine, instrument specifications and recommendations] URL: <https://v10.com.ua/statti/rekomendatsiji/jak-obrati-kavovarku-harakteristika-priladiv-ta-rekomendatsiji.html> (Last accessed: 25.01.2021) [in Ukrainian].
4. Vybor kofevarki [Choosing a coffee machine] URL: <http://coffe-master.ru/vybor-kofevarki/> (Last accessed: 25.01.2021) [in Russian].
5. Kavovarka dlia domu: riznovydy, osoblyvosti, kryterii voboru [Coffee machine for home: varieties, especially the selection criteria] URL: <https://erc.ua/erc-reviews/19195/kavovarka-dlia-domu-riznovidi-osoblivosti-kritieriyi-viboru/> (Last accessed: 25.01.2021) [in Ukrainian].
6. Osnovni typy kavomashyn [The main types of coffee machines] URL: <https://www.procoffee.com.ua/blog/tpost/60dt89cu5c-osnovn-tipi-kavomashin> (Last accessed: 25.01.2021) [in Ukrainian].
7. Rao, S. (2017). *Posobie professional'nogo baristy* [Professional Barista's Guide]. Moscow: Studiya Artemiya Lebedeva [in Russian].
8. Gianni Remo, Adelmo Pilone, Riccardo Ziani, inventors. Method for automatic adjustment of the quantity of coffee and coffee machine using said method. United States patent US 10085588. 2018 Oct 2.
9. Frei Hans-Peter, Schmed Arthur, inventors. Process and an apparatus for the proportioning of coffee powder in a coffee machine. United States patent US 4659023. 1987 Apr 21.
10. Schneeberger Gerard, inventor. Coffee maker with a metering device. United States patent US 5492054. 1996 Feb 20.
11. Greiwe Hansdieter, inventor. Vorrichtung zur selbsttätigen Zubereitung von Kaffee. Deutschland patent DE 19629239. 1998 Jan 22.
12. Burdukovskiy, V.G. (2018). *Oborudovanie kuznechno-shtampovochnykh tsekhov. Krivoshipnye mashiny* [Equipment for forging and stamping shops. Cranking machines]. Ekaterinburg: Izdatel'stvo Urals'kogo universiteta [in Russian].
13. Artobolevs'kyj, I.I. (1957). *Teoriia mekhanizmv i mashyn* [Theory of mechanisms and machines]. Kyiv: Derzhtekhvydav [in Ukrainian].
14. Kinyts'kyj, Ya.T. (2002). *Teoriia mekhanizmv i mashyn* [Theory of mechanisms and machines]. Kyiv: Naukova dumka [in Ukrainian].

Рецензія/Peer review : 27.01.2021 р.

Надрукована/Printed :10.03.2021 р.