

ЗАЛЮБОВСЬКИЙ М. Г.

ЗВО «ВІДКРИТИЙ МІЖНАРОДНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РОЗВИТКУ ЛЮДИНИ «УКРАЇНА»

ORCID ID: 0000-0001-6258-0088

e-mail: markzalubovskiy@gmail.com

ПАНАСЮК І. В.

Київський національний університет технологій та дизайну

ORCID ID: 0000-0001-6671-4266

e-mail: panasyuk1961@gmail.com

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПОТУЖНОСТІ ГАЛТУВАЛЬНОЇ МАШИНИ ЗІ СКЛАДНИМ РУХОМ РОБОЧОЇ ЄМКОСТІ, ЩО СПОЖИВАЄТЬСЯ НА ЇЇ ВЕДУЧОМУ ВАЛУ

Робота присвячена експериментальному визначенню енергетичних параметрів машини зі складним рухом робочої ємкості. Розроблено експериментальну установку галтувальної машини, у якій робоча ємкість виконує складний просторовий рух, де є можливість варіювати в необхідному діапазоні двома факторами впливу. Були проведені експериментальні дослідження моменту опору та потужності, що споживається на ведучому валу такої машини при її роботі із завантаженим робочим масивом до ємкості із застосуванням аналого-цифрового двоканального USB-осцилографа ВМ-8020. На основі повного факторного експерименту отримано рівняння регресії в натуральних величинах. Рівняння регресії описує залежність максимальної потужності, що споживається машиною на ведучому валу, від маси сипкого середовища та кутової швидкості ведучого валу. Встановлено, що потужність машини, яка споживається на її ведучому валу, збільшується зі збільшенням маси сипкого середовища, яке завантажують до робочої ємкості, а також зі збільшенням кутової швидкості ведучого валу машини. Експериментальним шляхом виконано перевірку попередньо отриманих аналітичних залежностей та підтверджено їх адекватність.

**Ключові слова:** галтувальна машина, потужність, ведучий вал, галтування, робоча ємкість.

ZALYUBOVSKIY MARK G.

Open International University of Human Development "Ukraine"

PANASYUK IGOR V.

Kyiv National University of Technology and Design

## EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE POWER OF A REPLACING MACHINE WITH COMPLEX MOVEMENT OF THE WORKING CAPACITY CONSUMED ON ITS LEADING SHAFT

The work is devoted to the experimental determination of the energy parameters of a machine with a complex movement of the working capacity. An experimental installation of a galvanizing machine has been developed, in which the working capacity performs a complex spatial movement, where it is possible to vary in the required range by two factors of influence. Experimental studies of the moment of resistance and power consumed on the drive shaft of such a machine during its operation with a loaded working array to the tank using a digital two-channel USB-oscilloscope VM-8020. On the basis of a complete factorial experiment, the regression equation in natural quantities is obtained. The regression equation describes the dependence of the maximum power consumed by the machine on the drive shaft on the mass of the bulk medium and the angular velocity of the drive shaft. It is established that the power of the machine consumed on its drive shaft increases with increasing mass of bulk medium, which is loaded into the working tank, as well as with increasing angular velocity of the driving shaft of the machine. The previously obtained analytical dependences were checked experimentally and their adequacy was confirmed.

**Key words:** shredding machine, power, drive shaft, shredding, working capacity.

**Постановка задачі.** Значна кількість деталей різних галузей промисловості потребує виконання фінішних оздоблювально-зачисних операцій [1], зокрема, для надання деталі належного вигляду. Це може бути шліфування та полірування поверхонь виробів [2], очищення металевих деталей від продуктів корозії, відділення металевих [3] чи полімерних деталей [4] від ливників тощо. Зазвичай, такі операції виконуються із застосуванням галтувального обладнання з рухомими ємкостями. Окрім того, на виконання таких операцій витрачається до 80% технологічного часу [5].

Для таких типів галтувального обладнання актуальними є дослідження енергетичних параметрів, зокрема потужності, яка споживається на ведучому валу такої машини при виконанні відповідних технологічних операцій та моменту опору ведучого валу. Дослідження енергетичних параметрів дасть можливість раціоналізувати процес обробки деталей з точки зору зменшення енерговитрат.

Таким чином, проведення експериментальних досліджень потужності, що споживається на ведучому валу машини зі складним просторовим рухом робочої ємкості, є актуальною задачею для подальшого розвитку даної галузі промисловості України в цілому.

**Аналіз досліджень та публікацій.** Відома значна кількість робіт [6, 7] щодо дослідження потужності, що споживається при роботі обертових барабанів, а також вібраційних машин. У роботі [8] виконані дослідження статичного моменту опору ведучого валу галтувальної машини зі складним просторовим рухом робочої ємкості. У роботі [9] проводилися дослідження статичного моменту опору ведучого валу, який створювався масою сипкого середовища, завантаженого до ємкості. У статті [10]

наведені результати досліджень динамічного моменту опору на ведучому валу, утвореного переміщенням сипкого масиву у ємкості.

**Виділення не вирішених частин.** У зазначених вище літературних джерелах відсутня інформація про узагальнення методів визначення енергетичних параметрів гальтувальних машин зі складним рухом робочої ємкості. У той само час, методика визначення потужності, що споживається при роботі обертових барабанів, а також вібраційних машин не може бути адаптованою для гальтувальних машин зі складним просторовим рухом робочих ємкостей в силу кардинальних відмінностей конструкцій. Окрім того, усі, попередньо отримані, результати аналітичних досліджень енергетичних параметрів машин зі складним просторовим рухом робочих ємкостей потребують перевірки експериментальним шляхом.

**Формулювання цілей.** Суть даної роботи полягає у проведенні експериментального дослідження потужності гальтувальної машини зі складним рухом робочої ємкості, що споживається на її ведучому валу

**Виклад основного матеріалу. Опис експериментальної установки.** Для проведення досліджень щодо визначення потужності машини, що споживається на її ведучому валу, було розроблено експериментальну установку машини зі складним просторовим рухом робочої ємкості, фото якої представлено на рис. 1 (а), кінематична схема установки з електричною схемою підключення електродвигуна представлена на рис. 1 (б).

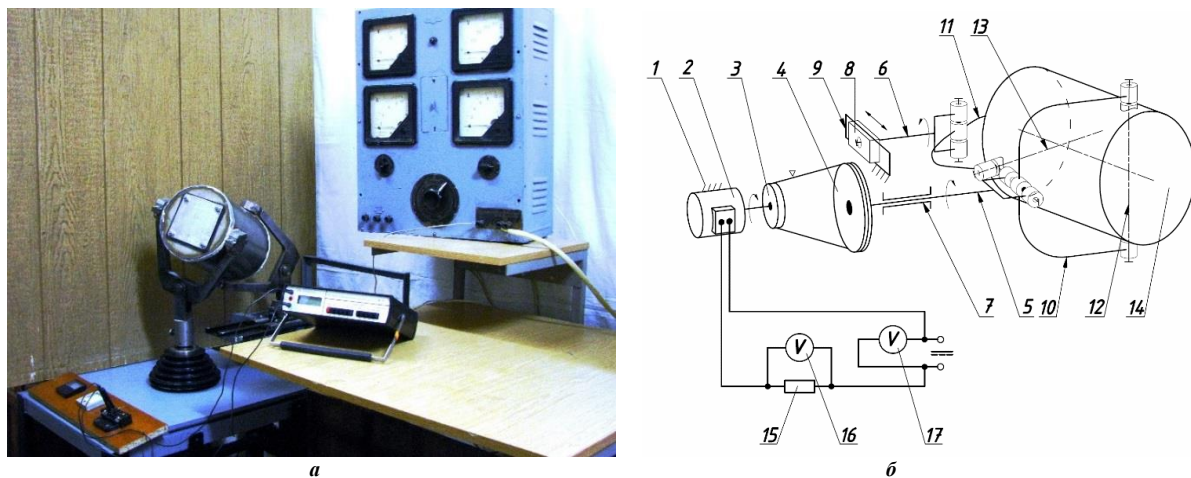


Рис. 1. а – фото експериментальної установки машини зі складним просторовим рухом робочої ємкості, б – кінематична схема установки

Установка містить станину 1, в якій розміщений електродвигун постійного струму 2, на валу якого закріплений ведучий шків 3 клинопасової передачі, ведений шків 4 жорстко з'єднаний з ведучим валом 5. Ведучий 5 та ведений 6 вали закріплені в підшипникових опорах 7 та 8 відповідно, при цьому ведучий вал 5 встановлений в підшипниковій опорі 7 нерухомо, а ведений вал 6 встановлений в підшипниковій опорі 8 з можливістю її зворотно-поступального переміщення вздовж горизонтальної напрямної 9. Крім того, ведучий 5 та ведений 6 вали кінематично з'єднані з вилками 10 та 11 відповідно, діаметрально взаємно перпендикулярні вісі яких 12 та 13 являються осями кріплення робочої ємкості 14. В свою чергу, електродвигун 2 через шунт 15 під'єднаний до блоку живлення постійного струму з можливістю регулювання на ньому значення вихідної напруги. В електричному колі електродвигуна встановлені вольтметри 16 та 17 аналого-цифрового двоканального USB-осцилографа ВМ-8020. За допомогою вольтметра 16 можна записати зміну напруги на шунті 15, а за допомогою вольтметра 17 – зміну напруги на джерелі живлення.

Працює установка наступним чином. При увімкненні електродвигуна 2, розташованого в станині 1, постійний обертовий рух через пасову передачу, утворену ведучим 3 та веденим 4 шківками передається на ведучий вал 5 встановлений в підшипниковій опорі 7, та вилку 10, котра через вісь 12 обертає робочу ємкість 14, надаючи їй складного просторового переміщення з обертанням навколо власної осі. Такий рух робочої ємкості 14 передається через вісь 13 на вилку 11, від вилки 11, на ведений вал 6, котрий встановлений в підшипниковій опорі 8.

Використання рухомої підшипникової опори 8 з можливістю її зворотно-поступального переміщення вздовж горизонтальної напрямної 9 дає можливість уникнути заклинювання просторового механізму машини [11], що зумовлене неточним виготовленням деталей машини. Технічна характеристика експериментальної установки представлена в таблиці 1.

Попередніми аналітичними дослідженнями [5, 8–10] було встановлено, що потужність машини, яка споживається на її ведучому валу, залежить від таких основних параметрів: кутова швидкість ведучого валу машини, маса робочого середовища завантаженого до ємкості, сумарна маса рухомих ланок, які виконують просторовий рух.

При створенні експериментальної установки в її конструкцію була закладена можливість зміни в необхідному діапазоні перших двох параметрів, маса рухомих ланок була незмінною.

Таблиця 1

## Технічна характеристика експериментальної установки

1.	Маса рухомих ланок, які виконують просторовий рух, кг	$m_{\text{ланок}} = 9,6$
2.	Відстань між осями ведучого та веденого валів, м	$l_{QO} = 0,38$
3.	Форма робочої ємкості	циліндрична
4.	Відстань, на яку робоча ємкість виступає за вісь кріплення вилки, м	$l_B = 0,05$
5.	Міжосьова відстань робочої ємкості, м	$l_{PC} = 0,21$
6.	Довжина робочої ємкості, м	$l_{\text{Ц}} = 0,29$
7.	Діаметр робочої ємкості, м	$d_{PC} = 0,2$
8.	Об'єм робочої ємкості, м <sup>3</sup>	$V = 0,0088$ (8,8 л)
9.	Номинальна потужність електродвигуна, кВт	$P = 0,25$
10.	Діапазон зміни напруги живлення, В	$U = [0 \div 30]$
11.	Передаточне відношення клинопасової передачі	$i = 6,2:1$

Застосування в приводі установки двигуна постійного струму з можливістю регулювання вихідної напруги на блоці живлення дозволило варіювати кутову швидкість ведучого валу. До робочої ємкості завантажувалося сипке робоче середовище різної маси при заповненні її на 50% від загального об'єму згідно рекомендацій у [12]. Ведучому валу надавалося відповідна кутова швидкість, після чого, за допомогою аналого-цифрового двоканального USB-осцилографа BM-8020, котрий був під'єднаний до електронної обчислюваної машини записували: першим каналом – за один оберт ведучого валу зміну напруги на джерелі живлення електродвигуна, паралельно другим каналом – зміну напруги на шунті, який був послідовно під'єднаний в електричне коло електродвигуна. Попередньо шунт був відкалібрований до характеристики: 50 мВ – 1А. За виміряною напругою на клеммах шунта, можна було встановити значення сили струму, яке проходить в електричному колі:

$$I = \frac{U_{\text{виміряне}}}{50}, \quad (1)$$

де  $U_{\text{виміряне}}$  – значення напруги на клеммах шунта, [мВ].

За відомою методикою [13], на основі вимірянних значень сили струму та напруги джерела живлення, визначили потужність, що споживається електродвигуном, після чого, врахувавши значення ККД клинопасової передачі [14], встановлювали потужність на ведучому валу, що споживається машиною.

**Постановка задачі та планування експерименту. Вибір та обґрунтування факторів, які впливають на досліджуваний процес.** В ході проведення експерименту слід вирішити наступні задачі: 1. Дослідити вплив кутової швидкості ведучого валу та маси сипкого середовища завантаженого до робочої ємкості на зміну потужності машини, що споживається; 2. Отримати математичну модель, яка описує вплив обраних факторів на потужність машини, що споживається; 3. Перевірити відповідність аналітично розрахованих [8–10] та експериментально встановлених значень потужності машини, що споживається.

Поставлені задачі можуть бути вирішені шляхом проведення повного факторного експерименту [15, 16]. При плануванні експерименту у якості факторів були використані: кутова швидкість ведучого валу машини  $\omega_{\text{ведуч}}^{\text{машини}}$  та маса сипкого середовища  $m_c$ . За вихідний параметр обрано максимальну потужність машини, що споживається  $P_{\text{MAX}}$  на її ведучому валу. Діапазон варіювання кутової швидкості ведучого валу машини прийнято в межах від 3,1 рад/с до 3,8 рад/с. При таких кутових швидкостях обертання ведучого валу експериментальної установки буде утворюватися змішаний та водоспадний режими руху сипкого середовища, що рекомендовані [17] для технологічних операцій шліфування, полірування, відділення деталей від ливників. Діапазон варіювання маси сипкого середовища прийнято в межах від 4 кг до 6 кг. Частинки сипкого середовища мали гранулометричний склад аналогічний тому, що використовують при поліруванні полімерних деталей.

Використовуючи співвідношення, які пов'язують кодовані  $X_i$  та натуральні  $C_i$  значення факторів визначимо інтервали варіювання та значення факторів на рівнях варіювання. Усі необхідні дані для планування повного факторного експерименту представлені в таблиці 2.

Таблиця 2

## Дані для планування повного факторного експерименту

Рівні факторів та інтервали їх варіювання					
Найменування та позначення факторів	Кодовані позначення	Рівні варіювання			Інтервал варіювання $\Delta_i$
		-1	0	+1	
$m_c$ – маса сипкого середовища, кг	$X_1$	4	5	6	1
$\omega_{\text{ведуч}}^{\text{машини}}$ – кутова швидкість ведучого валу, рад/с	$X_2$	3,1	3,45	3,8	0,35

**Порядок проведення та обробка даних експерименту.** На основі таблиці 2 було створено матрицю планування та робочу матрицю (таблиця 3) згідно якої проводився сам експеримент. Отримані графіки зміни напруги на джерелі живлення та на клеммах шунта за один оберт ведучого валу, що записані за допомогою самописця двоканального USB-осцилографа BM-8020 для чотирьох паралельних дослідів, представлені на рис. 2 – рис. 5. Максимальні значення напруги на джерелі живлення та на клеммах шунта визначені з графіків представлених на рис. 2 – рис. 5 та записані до таблиці 3.

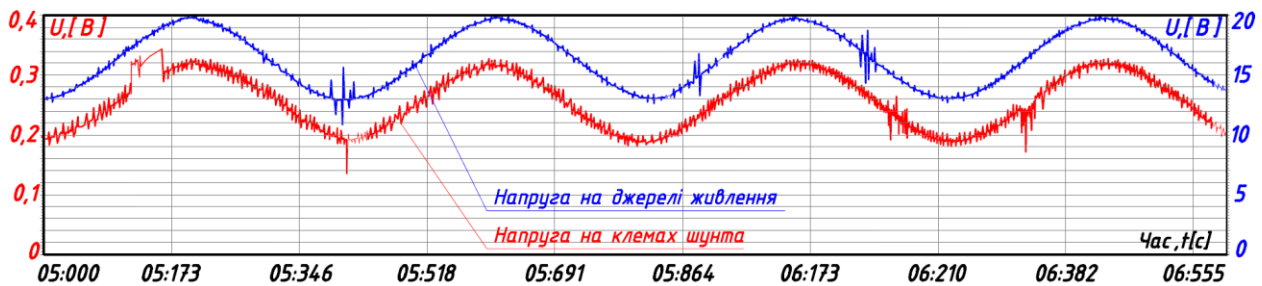


Рис. 2. Графік зміни напруги на джерелі живлення та на клеммах шунта за один повний оберт ведучого валу машини при завантаженій масі сипкого середовища в 6 кг до ємкості та кутовій швидкості ведучого валу в 3,8 рад/с

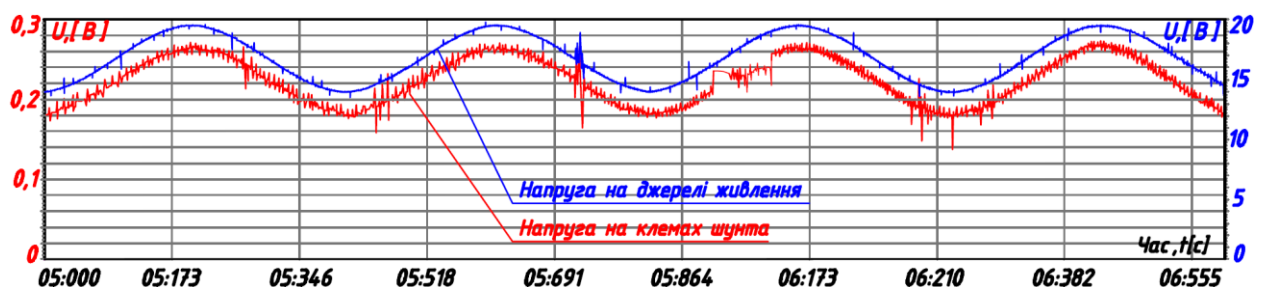


Рис. 3. Графік зміни напруги на джерелі живлення та на клеммах шунта за один повний оберт ведучого валу машини при завантаженій масі сипкого середовища в 4 кг до ємкості та кутовій швидкості ведучого валу в 3,8 рад/с

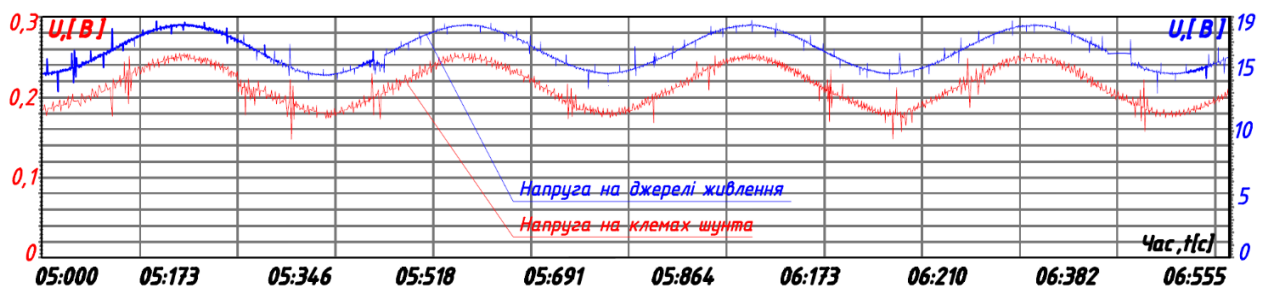


Рис. 4. Графік зміни напруги на джерелі живлення та на клеммах шунта за один повний оберт ведучого валу машини при завантаженій масі сипкого середовища в 6 кг до ємкості та кутовій швидкості ведучого валу в 3,1 рад/с

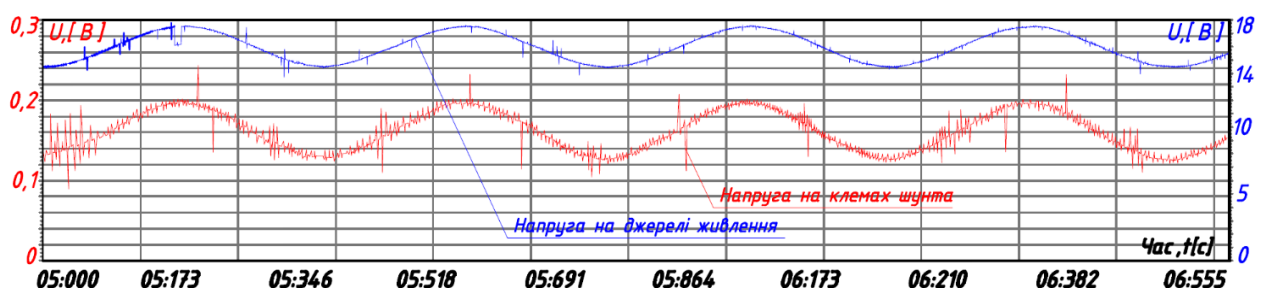


Рис. 5. Графік зміни напруги на джерелі живлення та на клеммах шунта за один повний оберт ведучого валу машини при завантаженій масі сипкого середовища в 4 кг до ємкості та кутовій швидкості ведучого валу в 3,1 рад/с

Таблиця 3

	Матриця планування		Робоча матриця		Значення $Y_{ui}$ в окремих спостереженнях				
					$Y_{u1}$	$Y_{u2}$	$Y_{u3}$	$Y_{u4}$	$Y_{u5}$
	$X_1$	$X_2$	$m$ , кг	$\omega$ , рад/с	$P_{max}$ , Вт	$P_{max}$ , Вт	$P_{max}$ , Вт	$P_{max}$ , Вт	$P_{max}$ , Вт
1	+	+	6	3,8	120,2	120,0	121,8	119,8	121,0
2	-	+	4	3,8	99,0	99,7	95,2	99,2	97,0
3	+	-	6	3,1	87,0	86,4	86,5	85,0	88,6
4	-	-	4	3,1	67,0	68,4	66,5	65,0	65,5

Повна потужність електродвигуна  $P$ , який працює на постійному струмі визначається як:

$$P = UI, \quad (2)$$

де  $U$  – напруга джерела живлення, [В];  $I$  – сила струму електродвигуна, [А].

Значення потужності машини, що споживається на її ведучому валу визначали, враховуючи те, що крутний момент від вала електродвигуна до ведучого валу машини передавався за допомогою клинопасової передачі. Коефіцієнт корисної дії клинопасової передачі становить:  $\eta=0,95$  [14], тому:

$$P = UI\eta. \quad (3)$$

В роботі [8] встановлено, що значення потужності, яке споживається машиною за один повний оберт її ведучого валу, має 8 точок екстремумів. Тому визначали лише максимальні значення потужності  $P_{MAX}$  для кожного паралельного експерименту на основі максимальних значень напруги джерела живлення  $U_{MAX}$  (графіки на рис. 2 – рис. 5) та розрахованих максимальних значень сили струму  $I_{MAX}$  електродвигуна. Таким чином, рівняння (3) матиме вигляд:

$$P_{MAX} = U_{MAX} I_{MAX} \eta. \quad (4)$$

В свою чергу, максимальні значення сили струму визначали на основі максимальних значень напруги, вимірюваної на клеммах шунта згідно виразу (1). Максимальні значення розрахованої за виразом (4) потужності, що споживається на ведучому валу машини для окремих чотирьох експериментів та п'яти паралельних дослідів кожного експерименту наведені в таблиці 3.

Значимість коефіцієнтів та адекватність регресійної моделі визначались за загальновідомою методикою [16], використовуючи при цьому критерії Стюдента та Фішера [16] відповідно з гарантованою вірогідністю 95%. Дисперсія відтворюваності розраховувалася за відомими формулами та подальшою перевіркою однорідності на основі критерія Кохрена [15].

Обробка отриманих результатів експерименту виконувалася із використанням програмного забезпечення системи математичного моделювання MathCAD. Таким чином, було отримано рівняння регресії:

$$Y = 92,94 + 10,69X_1 + 16,35X_2 + 0,58X_1X_2. \quad (5)$$

Рівняння (5) адекватно описує досліджуваний процес, так як розрахований критерій Фішера  $F_p=3,501$  є меншим від табличного значення  $F_t=4,5$ .

Далі проводилася перевірка значущості коефіцієнтів рівняння регресії за відомою методикою [15]. На основі розрахунків встановлено, що коефіцієнт подвійної взаємодії 0,58 є незначущим, а отже виключається з моделі. Таким чином, рівняння регресії матиме вигляд:

$$Y = 92,94 + 10,69X_1 + 16,35X_2. \quad (6)$$

Після перерахунків значущих коефіцієнтів регресії, отримали рівняння регресії в натуральних значеннях:

$$P_{MAX} = -121,72 + 10,7m_c + 46,71\omega_{ведуч}. \quad (7)$$

Рівняння (7) описує залежність максимальної потужності  $P_{MAX}$ , що споживається машиною на ведучому валу, від маси сипкого середовища  $m_c$  та кутової швидкості ведучого валу  $\omega_{ведуч}$ . Аналіз отриманого рівняння показав, що потужність машини, яка споживається на її ведучому валу збільшується зі збільшенням маси сипкого середовища, яке завантажується до робочої ємкості, а також зі збільшенням кутової швидкості ведучого валу машини. Враховуючи величини коефіцієнтів при змінних, можна відзначити, що вклад такого фактору як кутова швидкість ведучого валу значно більший, ніж фактору, який відповідає масі сипкого середовища, тобто кутова швидкість ведучого валу має більший вплив на потужність машини, що споживається на її ведучому валу.

Далі виконували перевірку відповідності аналітично розрахованих (згідно рівняння, яке

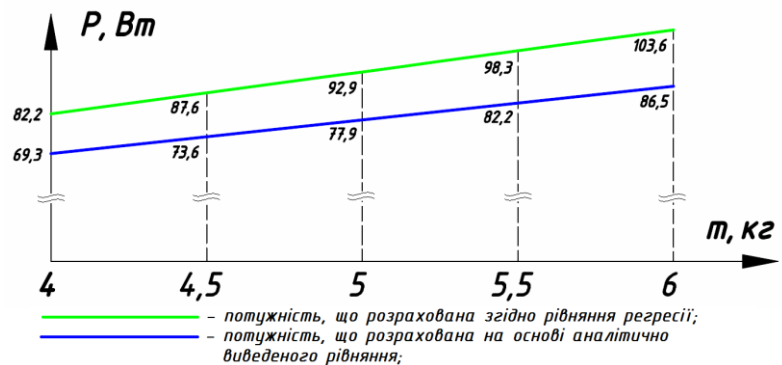


Рис. 6. Графік залежності потужності, що споживається машиною від зміни маси сипкого середовища, завантаженого до робочої ємкості

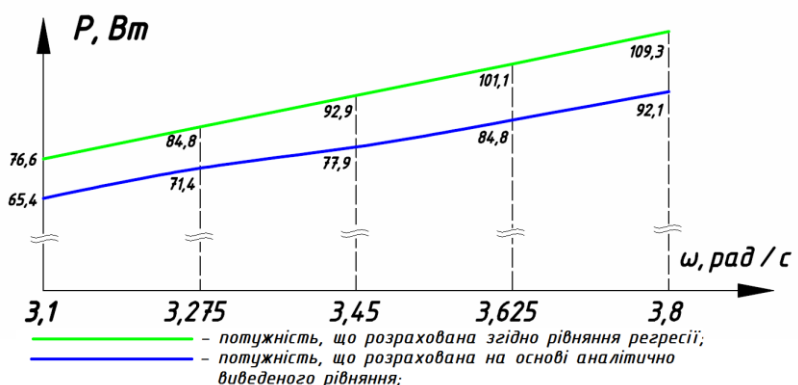


Рис. 7. Графік залежності потужності, що споживається машиною від зміни кутової швидкості ведучого валу



отримане у роботі [18]) та розрахованих за допомогою рівняння регресії (7) значень потужності, що споживається машиною. Зокрема, визначали зміну потужності окремо для двох випадків: 1) потужності, що споживається в залежності від зміни у встановлених межах варіювання маси сипкого робочого середовища, яке завантажувалося до робочої ємкості, при цьому кутова швидкість ведучого валу приймалася сталою та відповідала нульовому рівню варіювання фактору (3,45 рад/с); 2) потужності, що споживається в залежності від зміни у встановлених межах варіювання кутової швидкості ведучого валу, при цьому маса сипкого середовища була незмінною та відповідала нульовому рівню варіювання фактору (5 кг).

На основі розрахованих значень було отримано графіки зміни потужності, яка розрахована на основі аналітично виведеного рівняння, що отримане у роботі [18], а також потужності, яка розрахована згідно з рівнянням регресії (7). Таким чином, на рис. 6 представлено графік залежності потужності, що споживається машиною від зміни маси сипкого середовища, завантаженого до робочої ємкості, а на рис. 7 – графік залежності потужності, що споживається машиною від зміни кутової швидкості ведучого валу.

Проаналізувавши отримані графіки залежності, що представлені на рис. 6 та рис. 7, встановлено, що середня розбіжність між розрахунковим та експериментально встановленим значенням потужності машини, що споживається становить: 16,1% у випадку, якщо варіювати величиною маси сипкого середовища завантаженого до робочої ємкості при сталій кутовій швидкості ведучого валу машини та 15,7%, якщо змінювати величину кутової швидкості ведучого валу машини при постійній масі сипкого середовища, завантаженого до робочої ємкості. Така розбіжність між розрахунковим та експериментально встановленим значенням пояснюється тим, що при визначенні потужності розрахунковим методом не враховувалися втрати потужності на тертя у кінематичних парах машини, в опорах валів, в поступальній кінематичній парі веденого валу з напрямною, втрати на нагрів обмоток електродвигуна. Відомо [7], що більшість з них приймаються постійними для відповідного значення кутової швидкості ведучого валу машини. Втрати на тертя не є універсальними і їх потрібно розрахувати за відомими методами під час проектування вже конкретної машини з індивідуальними конструктивними особливостями.

### Висновки

1. Розроблено експериментальну установку машини зі складним просторовим рухом робочої ємкості, описано принцип її роботи.
2. Проведено експериментальне дослідження потужності галтувальної машини зі складним рухом робочої ємкості, що споживається на її ведучому валу.
3. На основі проведеного експериментального дослідження отримані математичні закономірності, що описують вплив кутової швидкості ведучого валу та маси сипкого середовища завантаженого до робочої ємкості на зміну потужності, що споживається на ведучому валу машини.
4. Виконано перевірку попередньо отриманих аналітичних залежностей. На основі порівняння відповідності аналітично розрахованих та експериментально встановлених значень потужності, що споживається на ведучому валу машини, підтверджено адекватність попередньо отриманих аналітичних залежностей.

### Література

1. Панасюк І.В. Особливості оздоблювально-зачищувальної обробки деталей легкої промисловості технологічним середовищем / І.В. Панасюк, О.П. Бурмістенков, М.Г. Залюбовський // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки – 2013. – № 3. – С. 190–194.
2. Zalyubovskiy M.G. Experimental investigation of the handling process of polymeric units in a machine with a compacted space movement of working capacity / M.G. Zalyubovskiy, I.V. Panasyuk, Y.I. Smirnov, Y.V. Klaptsov, V.V. Malyshev // Bulletin of the Kyiv National University of Technologies and Design. – 2019. – Vol. 2 (132). – P. 24–32.
3. Залюбовський М.Г. Експериментальне дослідження впливу геометрії металевих відливок деталей замка «блискавка» на особливості їх обробки в галтувальній машині / М.Г. Залюбовський, І.В. Панасюк // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. – 2020. – № 2 (144). – С. 24–32.
4. Бурмістенков О.П. Виробництво литих деталей та виробів з полімерних матеріалів у взуттєвій та шкіргалантерейній промисловості : монографія / О.П. Бурмістенков, Б.М. Злотенко, В.П. Коновал, І.В. Панасюк, М.Є. Скиба, О.М. Синюк. – Хмельницький, 2007. – 255 с.
5. Залюбовський М.Г. Машини зі складним рухом робочих ємкостей для обробки полімерних деталей : монографія / М.Г. Залюбовський, І.В. Панасюк, В.В. Малишев. – К. : Університет «Україна», 2018. – 228 с.
6. Модестов В.Б. Определение мощности смесителя, необходимой при смешивании сыпучих материалов / В.Б. Модестов // "Химическое и нефтегазовое машиностроение". – 2003. – № 3. – С. 7–8.
7. Модестов В.Б. Смесители сыпучих и пастообразных материалов : монография / В. Б. Модестов ; МОНМС Украины, Восточноукр. нац. ун-т им. В. Даля, Технол. ин-т. – Луганск, 2011. – 353 с.
8. Залюбовський М.Г. Дослідження статичного моменту опору ведучого валу галтувальної машини зі складним просторовим рухом робочої ємкості / М.Г. Залюбовський // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2021. – № 1 (293). – С. 86–92.
9. Залюбовський М.Г. Визначення статичного моменту опору ведучого валу галтувальної машини,

створеного масою сипкого середовища у робочій ємкості / М.Г. Залюбовський, І.В. Панасюк // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2021. – № 2 (295). – С. 116–122.

10. Залюбовський М.Г. Дослідження динамічного моменту опору ведучого валу галтувальної машини, утвореного переміщенням сипкого масиву у робочій ємкості / М.Г. Залюбовський, І.В. Панасюк, В.В. Малишев // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2021. – № 3 (297). – С. 94–99.

11. Zaliubovskiy M. G. Synthesis and research of the tumbling machine spatial mechanism / M. G. Zaliubovskiy, I. V. Panasiuk, Yu. I. Smirnov, V. V. Malyshev // *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. – 2020. – 178, issue 4. – P. 69–75.

12. Marigo M. Developing Mechanistic Understanding of Granular Behaviour in Complex Moving Geometry using the Discrete Element Method. Part A: Measurement and Reconstruction of Turbulent Motion using Positron Emission Particle Tracking / M. Marigo, D. L. Cairns, M. Davies, M. Cook, A. Ingram, E. H. Stitt // *CMES: Computer Modeling in Engineering & Sciences*. – 2010. – No. 3 (Vol. 59). – P. 217–238.

13. Малинівський С. М. Загальна електротехніка : підручник / С. М. Малинівський. – Львів : Бескид Біт, 2003. – 640 с.

14. Піпа Б.Ф. Деталі машин : підручник / Піпа Б.Ф., Хомяк О.М., Марченко А.І. – Київ : КНУТД, 2011. – 358 с.

15. Гусейнов Ф.Г. Планирование эксперимента в задачах электроэнергетики / Гусейнов Ф.Г., Мамедяров О.С. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 151 с.

16. Тихомиров В.Б. Планирование и анализ эксперимента (при проведении исследований в легкой и текстильной промышленности) / Тихомиров В.Б. – М. : Легкая индустрия, 1974. – 262 с.

17. Panasyuk I. Driving machine shaft angular velocity impact on motion conditional change of granular medium in working reservoir for components compounding and process / I. Panasyuk, M. Zalyubovskiy // *Metallurgical and Mining Industry*. – 2015. – № 3. – P. 260–264.

18. Залюбовський М.Г. Аналітичне дослідження потужності, яка споживається на ведучому валу галтувальної машини зі складним рухом робочої ємкості / М.Г. Залюбовський, І.В. Панасюк, В.В. Малишев // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2021. – № 4 (299). – С. 106–111.

#### References

1. Panasiuk I.V. Osoblyvosti ozdobiuvanno-zachyshchuvalnoi obrobky detalei lehkoї promyslovosti tekhnolohichnym seredovyshchem / I.V. Panasiuk, O.P. Burmistenkov, M.H. Zaliubovskiy // *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky* – 2013. – № 3. – S. 190–194.

2. Zalyubovskiy M.G. Experimental investigation of the handling process of polymeric units in a machine with a compacted space movement of working capacity / M.G. Zalyubovskiy, I.V. Panasyuk, Y.I. Smirnov, Y.V. Klaptsov, V.V. Malyshev // *Bulletin of the Kyiv National University of Technologies and Design*. – 2019. – Vol. 2 (132). – P. 24–32.

3. Zaliubovskiy M.H. Eksperymentalne doslidzhennia vplyvu heometrii metalevykh vidlyvok detalei zamka «blyskavka» na osoblyvosti yikh obrobky v haltuvnii mashyni / M.H. Zaliubovskiy, I.V. Panasiuk // *Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu tekhnolohii ta dyzainu*. – 2020. – № 2 (144). – S. 24–32.

4. Burmistenkov O.P. Vyrobnystvo lytykh detalei ta vyrobiv z polimernykh materialiv u vzuttievii ta shkirhalantereinii promyslovosti : monohrafiia / O.P. Burmistenkov, B.M. Zlotenko, V.P. Konoval, I.V. Panasiuk, M.Ie. Skyba, O.M. Syniuk. – Khmelnytskyi, 2007. – 255 с.

5. Zaliubovskiy M.H. Mashyny zi skladnym rukhom robochok yemkosti dlia obrobky polimernykh detalei : monohrafiia / M.H. Zaliubovskiy, I.V. Panasiuk, V.V. Malyshev. – K. : Universytet «Ukraina», 2018. – 228 s.

6. Modestov V.B. Opredelenie moshchnosti smesytelia, neobkhodymoi pry smeshyvannyi syrpykhk materialov / V.B. Modestov // *"Khymicheskoe y neftezhazovoe mashynostroenie"*. – 2003. – № 3. – S. 7–8.

7. Modestov V.B. Smesyteli syrpykhk y pastobraznykh materialov : monohrafiia / V. B. Modestov ; MONMS Ukrainy, Vostochnoukr. nats. un-t ym. V. Dalia, Tekhnol. yn-t. – Luhansk, 2011. – 353 с.

8. Zaliubovskiy M.H. Doslidzhennia statychnoho momentu oporu veduchoho valu haltuvnoi mashyny zi skladnym prostorovym rukhom robochoi yemkosti / M.H. Zaliubovskiy // *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky*. – 2021. – № 1 (293). – S. 86–92.

9. Zaliubovskiy M.H. Vyznachennia statychnoho momentu oporu veduchoho valu haltuvnoi mashyny, stvorenoho masoiu sypkoho seredovyshcha u robochii yemkosti / M.H. Zaliubovskiy, I.V. Panasiuk // *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky*. – 2021. – № 2 (295). – S. 116–122.

10. Zaliubovskiy M.H. Doslidzhennia dynamichnoho momentu oporu veduchoho valu haltuvnoi mashyny, utvorenoho peremishchenniam sypkoho masivu u robochii yemkosti / M.H. Zaliubovskiy, I.V. Panasiuk, V.V. Malyshev // *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky*. – 2021. – № 3 (297). – S. 94–99.

11. Zaliubovskiy M. G. Synthesis and research of the tumbling machine spatial mechanism / M. G. Zaliubovskiy, I. V. Panasiuk, Yu. I. Smirnov, V. V. Malyshev // *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. – 2020. – 178, issue 4. – R. 69–75.

12. Marigo M. Developing Mechanistic Understanding of Granular Behaviour in Complex Moving Geometry using the Discrete Element Method. Part A: Measurement and Reconstruction of Turbulent Motion using Positron Emission Particle Tracking / M. Marigo, D. L. Cairns, M. Davies, M. Cook, A. Ingram, E. H. Stitt // *CMES: Computer Modeling in Engineering & Sciences*. – 2010. – No. 3 (Vol. 59). – R. 217–238.

13. Малинівський С. М. Загальна електротехніка : підручник / С. М. Малинівський. – Львів : Бескид Біт, 2003. – 640 с.

14. Піпа Б.Ф. Деталі машин : підручник / Піпа Б.Ф., Хомяк О.М., Марченко А.І. – Київ : КНУТД, 2011. – 358 с.

15. Huseinov F.H. Planirovaniye eksperymenta v zadachakh elektroenergetiki / Huseinov F.H., Mamediarov O.S. – M. : Energoatomizdat, 1988. – 151 s.

16. Tykhomyrov V.B. Planirovaniye y analiz eksperymenta (pry provedenyyi yssledovanyi y lehkoї y tekstylnoi promyshlennosti) / Tykhomyrov V.B. – M. : Lehkaia yndustryia, 1974. – 262 s.

17. Panasyuk I. Driving machine shaft angular velocity impact on motion conditional change of granular medium in working reservoir for components compounding and process / I. Panasyuk, M. Zalyubovskiy // *Metallurgical and Mining Industry*. – 2015. – № 3. – P. 260–264.

18. Zaliubovskiy M.H. Analitichne doslidzhennia potuzhnosti, yaka spozhyvaietsia na veduchomu valu haltuvnoi mashyny zi skladnym rukhom robochoi yemkosti / M.H. Zaliubovskiy, I.V. Panasiuk, V.V. Malyshev // *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky*. – 2021. – № 4 (299). – S. 106–111.