

УДК 621.9

ПАНАСЮК І.В., ЗАЛЮБОВСЬКИЙ М.Г.

Київський національний університет технологій та дизайну

## ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ ФІНІШНОЇ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ В ОБЕРТОВИХ ЄМКОСТЯХ

**Мета.** Розробити енергоефективні машини зі складним рухом робочих ємкостей для фінішної обробки деталей та отримати залежності для визначення потужності, що ними споживається.

**Методика.** Розробка й дослідження конструктивних та кінематичних параметрів машини виконувалася з використанням системи автоматизованого проектування SolidWorks 2012, експериментальні дослідження проводилися на спеціально розробленій експериментальній установці зі складним просторовим рухом робочої ємкості.

**Результати.** Розроблено конструкції машин зі складним просторовим рухом робочих ємкостей, які забезпечують високопродуктивну фінішну обробку деталей в масі. Проведено аналітичне дослідження потужності, що споживається на ведучому валу машини зі складним просторовим рухом робочих ємкостей. Отримано рівняння, що дозволяє розраховувати максимальне значення потужності, що споживається на ведучому валу машини. Показано, що запропоновані устаткування і методи обробки більш енергоефективні (в 2 – 3 рази) ніж традиційні.

**Наукова новизна.** Встановлено взаємозв'язок між кутовою швидкістю ведучого валу, розмірами робочої ємкості, масою ланки машини та робочого середовища завантаженого до ємкості та потужністю, що споживається на ведучому валу машини для обробки деталей в масі.

**Практична значимість.** Отримано рівняння, що дозволяє розраховувати максимальне значення потужності, що споживається на ведучому валу машини, а також розроблено нові конструкції машин зі складним просторовим рухом в яких застосовуються приводи, що дозволяють реалізувати необхідний закон зміни кутової швидкості.

**Ключові слова:** потужність, що споживається, робоча ємкість, енергоефективність.

**Вступ.** При виготовленні дрібних типових деталей легкої промисловості, в яких якість поверхні можна оцінити органолептичним методом, застосовують обробку технологічним середовищем в робочих ємкостях, що виконують переміщення з різним характером руху. Підвищення продуктивності та одночасне зменшення енерговитрат при виготовленні таких деталей значною мірою залежить від скорочення часу підготовчих та фінішних оздоблювально-зачищувальних операцій. На ці операції витрачається до 80% технологічного часу.

**Постановка проблеми.** У легкій промисловості невеликі типові деталі та вироби (фурнітура, гудзики, застібки) виготовляються механічною обробкою або литтям. Ці деталі потребують проведення дуже трудомісткої подальшої фінішної оздоблювально-зачищувальної обробки, яка здебільшого виконується із застосуванням галтувальних барабанів з обертальним рухом робочих ємкостей та вібраційних машин. Однак, ці машини мають низьку продуктивність при значних енергозатратах. Так для обробки відповідних деталей необхідна безперервна робота таких машин упродовж 30 – 40 годин. Тому необхідно забезпечити обробку деталей при зменшенні енерговитрат. Одним зі шляхів розв'язання проблеми є застосування обладнання зі складним просторовим рухом робочих ємкостей. При такому способі обробки деталей робоче середовище рухатиметься значно інтенсивніше при меншому споживанні енергоресурсів машиною.

**Актуальність проблеми.** Скорочення часу фінішної обробки невеликих типових деталей (фурнітура, гудзики, застібки, машинобудівні деталі, що дозволяють проводити безрозмірну обробку) в масі, зменшення енерговитрат дозволить значно підвищити продуктивність процесу виготовлення та знизити собівартість таких деталей. Враховуючи масштаби виробництва цих деталей задача дослідження досить актуальна.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Аналіз опублікованих робіт щодо скорочення енерговитрат при обробці деталей в масі показав, що відомі методи розрахунку потужності [1], що споживається галтувальними машинами з обертальними робочими ємкостями та вібраційними машинами. Практично відсутня інформація, щодо визначення енергетичних характеристик устаткування для обробки деталей в робочих ємкостях зі складним просторовим рухом, а також уніфікованих принципів визначення потужності, що споживається такими машинами у процесі роботи.

**Основні результати дослідження.** У роботі [2] встановлено, що для отримання сприятливих умов для високопродуктивної обробки дрібних деталей абразивом у вигляді вільних гранул в середині робочої ємкості зі складним просторовим рухом необхідно забезпечити реалізацію закону зміни кутової швидкості на ведучому валу машини  $\omega^{ведуч}$ :

$$\omega^{ведуч} = \omega_{сер} - \omega_{ампл} \sin\left(2\varphi + \frac{\pi}{2}\right), \quad (1)$$

де  $\varphi$  – кут повороту ведучого валу машини, [рад];  $\omega_{ампл}$  – це різниця по модулю між екстремумами кутової швидкості та її середнім значенням, [рад/с].

Реалізувати необхідний закон зміни кутової швидкості (1) можна за рахунок спеціальних розроблених конструкцій приводів, а саме: кривошипно-кулісного приводу [3], приводу зі шарніром Гука [4] та приводу з двома ведучими валами та двома шарнірами Гука [5].

На рис. 1 представлено машину, в конструкції якої використовується приводу зі шарніром Гука та приводу з двома ведучими валами та двома шарнірами Гука.

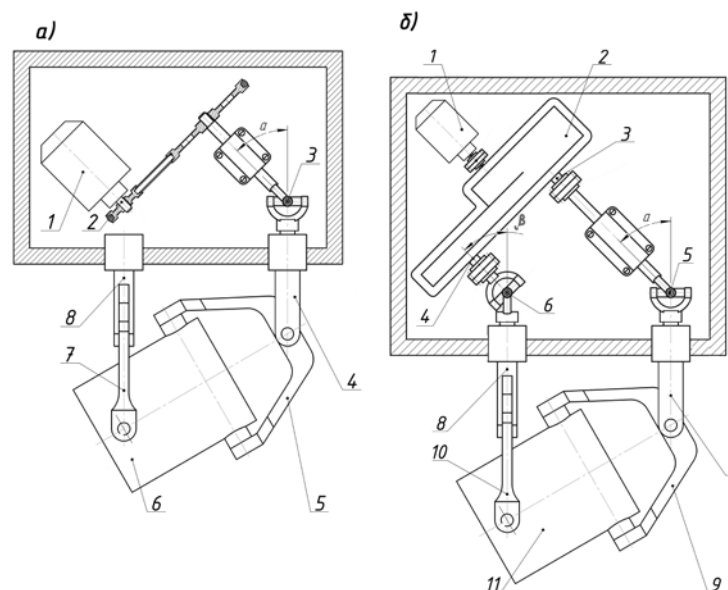


Рис. 1. Машини зі складним рухом робочих ємкостей із застосуванням: а) приводу з шарніром Гука, б) з двома ведучими валами та двома шарнірами Гука

Для (рис. 1.а) 1 – електродвигун, 2 – пасова передача, 3 – шарнір Гука, 4 – ведучий вал, 5 – ведуча вилка, 6 – робоча ємкість, 7 – ведена вилка, 8 – ведений вал. Для (рис 1.б) 1 – електродвигун, 3 та 4 – швидкохідні вали двохпоточного редуктора 2, 5 та 6 – шарніри Гука, 7 та 8 – ведучі вали, 9 та 10 – ведучі вилки, 11 – робоча ємкість. Кути  $\alpha$  між осями шарнірів Гука становлять  $45^\circ$ .

Максимальну потужність, що споживається запропонованою машиною на її ведучому валу  $P_{MAX}$  [Вт] визначали на основі максимального моменту опору:

$$P_{MAX} = M_{OP}^{MAX} \omega^{ведуч}, \quad (2)$$

де  $M_{OP}^{MAX}$ , [Нм] – максимально можливий момент опору, який виникає на ведучому валу машини;  $\omega^{ведуч}$ , [рад/с] – максимальне значення кутової швидкості з яким можливе обертання ведучого валу машини під час її експлуатації.

Встановлено, що при роботі машини зі складним рухом робочої ємкості момент опору на ведучому валу змінюватиметься декілька разів за один його оберт і може мати від'ємні значення. Для зручності процес аналітичного дослідження моменту опору на ведучому валу машини був розділений на декілька етапів: на 1-му етапі досліджувався статичний момент опору створений масою ланок машини, на 2-му етапі досліджувався статичний момент опору створений масою робочого середовища завантаженого до ємкості, на 3-му етапі – динамічний момент опору, що утворюється від переміщення робочого середовища в середині ємкості та просторового руху ланок машини.

Були встановлені умовні центри рівноваги машини відносно яких визначатимуться відповідні моменти сил, а також положення машини при яких будуть виникати максимальні значення моменту опору на ведучому валу. Таким положенням відповідають кути повороту ведучого валу в  $54^\circ$ ,  $126^\circ$ ,  $234^\circ$  та  $306^\circ$ . За кут повороту ведучого валу рівного  $0^\circ$  прийнято таке положення машини, при якому вісь кріплення ведучої вилки з робочою ємкістю займатиме вертикальне положення.

Отримані рівняння для визначення статичного моменту опору  $\overline{M}_{OP}$  створеного масою ланок машини для наступних кутів повороту  $\varphi$  ведучого валу:

$$1. \varphi = (306^\circ \div 54^\circ) \text{ та } \varphi = (126^\circ \div 234^\circ).$$

$$\overline{M}_{OP} = \overline{G}_E \left( \frac{2}{3} l_{QO} - |0,5 l_{QO} \cos \varphi| \right) - \overline{G}_F \left( \frac{1}{3} l_{QO} - (0,25 l_{QO} - 0,25 l_{QO} \cos 2\varphi) \right), \quad (3)$$

де  $\overline{G}_F$  та  $\overline{G}_E$  – сили тяжіння створені масою ланок машини, які діятимуть у точках F та E відповідно, [н],  $l_{QO}$  – відстань між осями ведучого та веденого валів, [м].

$$2. \varphi = (54^\circ \div 126^\circ) \text{ та } \varphi = (234^\circ \div 306^\circ).$$

$$\overline{M}_{OP} = \overline{G}_F \left( \frac{2}{3} l_{QO} - (0,25 l_{QO} - 0,25 l_{QO} \cos 2\varphi) \right) - \overline{G}_E \left( \frac{1}{3} l_{QO} - |0,5 l_{QO} \cos \varphi| \right). \quad (4)$$

Максимальні значення статичного моменту опору ведучого валу машини можна визначити за рівнянням:

$$\overline{M}_{OP} = \frac{1}{3} \overline{G}_E l_{QO} = \frac{1}{3} \overline{G}_F l_{QO}. \quad (5)$$

Отримано рівняння для визначення максимального значення статичного моменту опору

$M_{OPGm}$ , створеного силою тяжіння, що діє на робоче середовище:  
 $M_{OPGm} = 2zm_C g l_{QO}$ ,

де  $g$  – прискорення вільного падіння,  $[м/с^2]$ ;  $m_C$  – маса робочого середовища завантаженого до ємкості,  $[кг]$ ;  $z$  – безрозмірний коефіцієнт, що характеризує співвідношення розмірів робочої ємкості.

Отримано рівняння для визначення максимального значення динамічного моменту опору  $\overline{M}_{OP.Fin}$ , створеного переміщенням робочого середовища в середині ємкості та просторовим рухом ланок машини:

$$\overline{M}_{OP.Fin} = (\omega^{ведуч} )^2 \cdot l_{QO}^2 (0,42m_{\Sigma} + 0,08m_E), \quad (6)$$

де  $\omega^{ведуч}$  – кутова швидкість ведучого валу машини,  $[рад/с]$ ;  $m_{\Sigma}$  – маса робочого середовища завантаженого до ємкості та половина маси ланок машини  $m_E$ , які виконують просторовий рух,  $[кг]$ .

Встановлено, що повний максимальний момент опору на ведучому валу машини визначається, як векторна сума максимальних моментів усіх сил, що діють на завантажене робоче середовище до ємкості та на рухомі ланки машини, які виконують просторовий рух відносно відповідного центру рівноваги машини:

$$\overline{M}_{OP}^{MAX} = \sum \overline{M}_{F_i}^{O'(Q')} \quad \text{або} \quad \overline{M}_{OP}^{MAX} = \overline{M}_{OP} + \overline{M}_{OP.Gm} + \overline{M}_{OP.Fin}. \quad (7)$$

З урахування рівняння (2) та (7) отримано загальний вираз для визначення максимальної потужності, що споживається машиною зі складним рухом робочої ємкості на її ведучому валу:

$$P_{MAX} = l_{QO} \left( 0,33m_F g + \sigma_{x\%} m_C g + (\omega^{ведуч} )^2 l_{QO} (0,42m_{\Sigma} + 0,08m_E) \right) \omega^{ведуч}, \quad (8)$$

де  $\sigma_{x\%}$  – коефіцієнт, що характеризує габаритні параметри машини;  $m_F, m_E$  – половина сумарної маси ланок машини, які виконують просторовий рух,  $[кг]$ ;

При аналітичному дослідженні нехтували втратами потужності на тертя в кінематичних парах машини, в опорах валів та на нагрів обмоток електродвигуна.

На основі визначеної за рівнянням (8) максимальної потужності, що споживається на ведучому валу машини виникає можливість підібрати електродвигун.

З метою оцінки енергоефективності розроблених конструкцій порівняємо потужність, що споживається машиною зі складним просторовим рухом робочої ємкості та машиною з обертальною робочою ємкістю для конкретного випадку.

Нехай для обох типів машин була використана циліндрична робоча ємкість з об'ємом  $V=0,1 м^3$  (діаметр ємкості –  $d=0,4 м$ , висота ємкості –  $h=0,8 м$ ), що була заповнена робочим середовищем (деталі, абразив та буферний розчин) сумарною масою  $m_C=60 кг$  на 50% від загального об'єму ємкості.

Інші дані для визначення потужності, що споживається машиною зі складним рухом робочої ємкості:  $l_{QO}=1,1 м$ ,  $m_F=m_E=20 кг$ ,  $m_{\Sigma}=80 кг$ ,  $\sigma_{x\%} = 0,2$ ,  $\omega^{ведуч}=2,1 рад/с$  (кутова

швидкість ведучого валу машини, що забезпечує реалізацію змішаного режиму руху робочого середовища [6]).

Після підстановки усіх вище представлених даних у рівняння (8), отримали максимальне значення потужності, що споживатиметься на ведучому валу машини зі складних просторовим рухом робочої ємкості під час виконання технологічної операції обробки деталей легкої промисловості:  $P_{MAX} = 816 \text{ Вт}$ .

У свою чергу, у роботі [1] наведено вираз для визначення максимального значення потужності, що споживається машиною з обертальною робочою ємкістю:

$$P_{MAX.оберт.} = R_{Ц} m g \omega_{кр}, \quad (9)$$

де  $R_{Ц}$  – відстань від центру тяжіння завантаженого матеріалу до осі обертання при 50%-му завантаженні робочої ємкості, [м];  $m$  – сумарна маса робочого середовища  $m_c$  та робочої ємкості  $m_{PC}$ , [кг];  $g$  – прискорення вільного падіння, [м/с<sup>2</sup>],  $\omega_{кр}$  – критична кутова швидкість обертання робочої ємкості, [рад/с], визначається як:

$$\omega_{кр} = \sqrt{\frac{g}{R_{Ц}}}. \quad (10)$$

Запишемо необхідні дані для визначення потужності, що споживатиметься машиною з обертальною робочою ємкістю:  $R_{Ц} \approx 0,1 \text{ м}$ ,  $m = m_c + m_{PC} = 60 + 20 = 80 \text{ кг}$ , визначена за виразом (10) критична кутова швидкість обертання барабану  $\omega_{кр.} \approx 9,9 \text{ рад/с}$ .

Після підстановки усіх вищепредставлених даних у вираз (9), отримаємо максимальне значення потужності, що споживатиметься машиною з обертальною робочою ємкістю під час виконання технологічної операції обробки деталей:  $P_{MAX.оберт} = 776 \text{ Вт}$ .

Окрім цього, проведені авторами порівняльні експерименти показали що обробка деталей в машині зі складним просторовим рухом робочої ємкості потребує в 2,5 – 3 рази менше часу, ніж аналогічна обробка в галтувальних машинах з обертальним барабаном чи вібраційних машинах. Таким чином, розрахуємо кількість енергії, що споживатиметься для кожного типу машин за повний цикл обробки деталей, приймаючи час обробки деталей у машині з обертальною робочою ємкістю  $t_{оброб} = 40 \text{ год}$ . Відповідно, час обробки у машині зі складним просторовим рухом робочої ємкості складатиме:  $t_{оброб} = 16 \text{ год}$ .

Кількість енергії спожита за повний цикл обробки в машині з обертальною робочою ємкістю становитиме приблизно 31 кВт·год, в той час, як кількість енергії спожита за повний цикл обробки в машині зі складним просторовим рухом складатиме приблизно 13,1 кВт год.

**Висновки.** Розроблено машини зі складним просторовим рухом робочих ємкостей, в конструкціях яких застосовуються приводи, що здатні реалізувати необхідний закон зміни кутової швидкості на ведучому валу. Отримано вираз (8) для розрахунку максимального значення потужності, що споживається на ведучому валу машини зі складним просторовим рухом робочої ємкості. Аналітично та експериментально підтверджено, що обробка деталей в машині, робоча ємкість якої виконує складний просторовий рух є значно енергоефективнішою за аналогічну обробку деталей в машинах з обертальними робочими ємкостями.

Подальша оптимізація конструкцій машин зі складним рухом робочої ємкості та параметрів технологічного процесу забезпечить подальше підвищення енергоефективності фінішної обробки дрібних деталей.

### Література

1. 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;
2. Панасюк І.В. Визначення закону зміни кутової швидкості ведучого валу машини для обробки деталей зі складним рухом робочої ємкості / І.В. Панасюк, М.Г.Залюбовський // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну – 2015. – №5. – С. 40-46;
3. Патент №105556, МПК В01F 11/00. Машина для обробки деталей / Залюбовський М.Г., Панасюк І.В., заявник та патентовласник Київський національний університет технологій та дизайну - №u201509212; заяв. 25.09.2015, опуб. 25.03.2016, бюл. № 6;
4. Патент №109083, МПК В01F 11/00, В24В 31/00. Машина для обробки деталей / Залюбовський М.Г., Панасюк І.В., заявник та патентовласник Київський національний університет технологій та дизайну - №u201601467; заяв. 18.02.2016, опуб. 10.08.2016, бюл. № 15;
5. Патент №110417, МПК В01F 11/00. Машина для обробки деталей / Залюбовський М.Г., Панасюк І.В., заявник та патентовласник Київський національний університет технологій та дизайну - №u201603277; заяв. 30.03.2016, опуб. 10.10.2016, бюл. № 19.
6. Панасюк І.В. Визначення залежності режиму руху робочого середовища у ємкості зі складним рухом від кутової швидкості ведучого валу / І.В.Панасюк, М.Г.Залюбовський // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну – 2015. – №1. – С. 43-52.

### References

1. Modestov V. (2011) *Smesyately syypuchykh y pastoobraznykh materyalov: monohrafiya* [Mixers for loose and pasty materials: monograph]. Luhansk [in Ukraine].
2. Panasiuk I.V., Zaliubovskyi M.H. (2015). *Vyznachennia zakonu zminy kutovoi shvydkosti veduchoho valu mashyny dlia obrobky detalei zi skladnym rukhom robochoi yemkosti* [The determination of the law of changing the angular velocity of the driving shaft of the machine for the processing of parts with a complex motion of the working tank] *Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu tekhnolohii ta dyzainu – Bulletin of the Kiev National University of Technology and Design*, 5, 40–46 [in Ukraine].
3. Zaliubovskyi M.H, Panasiuk I.V inventors (2015). *Mashyna dlia obrobky detalei* [Machine for details processing]. Ukrainian patent, no.105556.
4. Zaliubovskyi M.H, Panasiuk I.V inventors (2016). *Mashyna dlia obrobky detalei* [Machine for details processing]. Ukrainian patent, no.109083.
5. Zaliubovskyi M.H, Panasiuk I.V inventors (2016). *Mashyna dlia obrobky detalei* [Machine for details processing]. Ukrainian patent, no.110417.
6. Panasiuk I.V., Zaliubovskyi M.H. (2015). *Vyznachennia zalezhnosti rezhymu rukhu robochoho seredovyshcha u yemkosti zi skladnym rukhom vid kutovoi shvydkosti veduchoho valu* [The determination of the dependence of the mode of movement of the working medium in a container with a complex movement from the angular velocity of the drive shaft] *Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu tekhnolohii ta dyzainu – Bulletin of the Kiev National University of Technology and Design*, 1, 43–52 [in Ukraine].

## ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ФИНИШНОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ ВО ВРАЩАЮЩИХСЯ ЕМКОСТЯХ ПАНАСЮК И.В., ЗАЛЮБОВСКИЙ М.Г.

*Київський національний університет технологій та дизайну*

**Цель.** Разработать энергоэффективные машины со сложным движением рабочих емкостей для финишной обработки деталей и получить зависимости для определения мощности, что ими потребляется.

**Методика.** Разработка и исследование конструктивных и кинематических параметров машины выполнялась с использованием системы автоматизированного проектирования SolidWorks 2012, экспериментальные исследования проводились на специально разработанной экспериментальной установке со сложным пространственным движением рабочей емкости.

**Результаты.** Разработаны конструкции машин со сложным пространственным движением рабочих емкостей, которые обеспечивают высокопроизводительную финишную обработку деталей в массе. Проведено аналитическое исследование мощности, потребляемой на ведущем валу машины со сложным пространственным движением рабочих емкостей. Получено уравнение, позволяющее рассчитывать максимальное значение потребляемой мощности на ведущем валу машины. Показано, что предлагаемые оборудование и методы обработки более энергоэффективны (в 2 – 3 раза), чем традиционные.

**Научная новизна.** Установлена взаимосвязь между угловой скоростью ведущего вала, размерами рабочей емкости, массой звеньев машины и рабочей средой загруженной в емкость и мощностью, потребляемой на ведущем валу машины для обработки деталей в массе.

**Практическая значимость.** Получено уравнение, позволяющее рассчитывать максимальное значение потребляемой мощности на ведущем валу машины, а также разработаны новые конструкции машин со сложным пространственным движением в которых применяются приводы, которые позволяют реализовать требуемый закон изменения угловой скорости.

**Ключевые слова:** потребляемая мощность, рабочая емкость, энергоэффективность.

## ENHANCEMENT OF THE ENERGY EFFICIENCY OF THE PROCESS OF FINE PROCESSING OF DETAILS IN RELIABLE COSTS

PANASJUK I.V., ZALJUBOVSKIY M.G.

Kiev National University of Technology and Design

**Goal.** Develop energy-efficient machines with a complex movement of working tanks for the finishing of parts and obtain dependencies to determine the power they consume.

**Method.** The development and research of constructive and kinematic parameters of the machine was carried out using the SolidWorks 2012 automated design system, and experimental research was carried out on a specially designed experimental installation with a complex spatial movement of the working capacity.

**Results.** The designs of machines with complex spatial movement of working tanks are developed, which provide high-performance finishing of parts in mass. The analytical study of the power consumed on the driving shaft of the machine with the complex spatial movement of the working tanks has been carried out. An equation is obtained which allows to calculate the maximum value of the power consumed on the driving shaft of the machine. It is shown that the proposed equipment and methods of processing are more energy efficient (in 2 - 3 times) than traditional ones.

**Scientific novelty.** An interconnection between the angular speed of the drive shaft, the dimensions of the working tank, the mass of the machine links and the working medium loaded to the capacity and the power consumed on the driving shaft of the machine for machining parts in mass are established.

**Practical significance.** An equation is obtained which allows to calculate the maximum value of the power consumed on the driving shaft of the machine, and also new designs of machines with complex spatial motion are developed in which drives are used that allow to realize the necessary law of change of angular velocity.

**Key words:** power consumption, working capacity, energy efficiency.