

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-361-41>

УДК 621.924.7

ЗАЛЮБОВСЬКИЙ МАРК

Київський національний університет технологій та дизайну
<https://orcid.org/0000-0002-9183-2771>
 e-mail: markzalubovskiy@gmail.com

ЗЛОТЕНКО БОРИС

Київський національний університет технологій та дизайну
<https://orcid.org/0000-0002-0870-8535>
 e-mail: zlotenco@ukr.net

ВОЛЯНИК ОЛЕКСІЙ

Київський національний університет технологій та дизайну
<https://orcid.org/0000-0002-7278-0910>
 e-mail: volyanik.oy@knutd.edu.ua

РАДЧЕНКО АНТОН

Відкритий міжнародний університет розвитку людини «Україна»
 e-mail: markzalubovskiy@gmail.com

КОНСТРУЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИВОДУ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ КАРДАННОЇ ПЕРЕДАЧІ ДЛЯ ГАЛТУВАЛЬНОГО ОБЛАДНАННЯ

У статті розглянуто проблему вдосконалення приводу обладнання «Turbula» галтувального типу з камерою, що рухається за просторовою траєкторією. Реалізовано експериментальні дослідження переміщення технологічного середовища всередині камери обладнання «Turbula» галтувального типу, за якої ведений вал обертається з нерівномірною кутовою швидкістю. Встановлено, що такий режим обробки створює нерівномірну інтенсивність переміщення середовища між протилежними торцями камери у протилежно направлених напрямках, що унеможливує рівномірну обробку деталей і обмежує та звужує технологічні можливості машини. На основі аналітичних досліджень сформульовано раціональну залежність зміни кутової швидкості ведучого валу, за якої пікові значення кутових швидкостей обертання ведучого і веденого валів розміщуються у протифазі з однаковими амплітудними значеннями. Це дозволяє досягти рівномірного переміщення наповнення камери під час усього процесу обробки. Реалізація запропонованої залежності дає змогу забезпечити сталі і симетричний режим обробки впродовж усього технологічного циклу. На основі отриманих виразів із застосуванням системи автоматизованого проектування «SolidWorks-2016» побудовано модель та виконано параметричний розрахунок системи приводу, що включає карданну передачу. Обґрунтовано необхідність дотримання певного значення кута між осями валів карданного механізму, а також просторове розташування елементів приводу, за якого осі кріплення його основних вузлів розміщені в одній площині. Розроблена конструкцію приводу, здатного реалізувати визначену залежність зміни кутової швидкості. Отримані результати можуть бути використані для створення нових та модернізації існуючих моделей галтувальних машин із підвищеною ефективністю дії. Результати досліджень можуть успішно застосовуватися на етапі проектування подібного обладнання у відповідних конструкторських організаціях машинобудівних підприємств.

Ключові слова: автомобілебудування, просторовий механізм, галтувальна машина, просторовий рух.

ZALYUBOVSKIY MARK, ZLOTENKO BORYS, VOLIANYK OLEKSIY

Kyiv National University of Technology and Design

RADCHENKO ANTON

Open International University of Human Development "Ukraine"

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF A DRIVE WITH A CARDAN TRANSMISSION FOR TUMBLING EQUIPMENT

The article addresses the issue of improving the drive of a "Turbula"-type tumbling machine with a working chamber that performs a complex spatial motion. Experimental studies were conducted on the movement of the processing media inside the chamber of the "Turbula"-type tumbling machine, in which the driven shaft rotates with a non-uniform angular velocity. It was found that such a processing mode results in non-uniform intensity of media movement between the opposite ends of the chamber in opposing directions, which prevents uniform surface treatment of parts and significantly limits the technological capabilities of the machine. Based on analytical studies, a rational dependence of the driving shaft's angular velocity variation was formulated, wherein the peak values of the angular velocities of the driving and driven shafts are in antiphase and have equal amplitude values. This enables uniform intensity of media movement between the opposite ends of the working chamber in opposing directions. Implementation of the proposed angular velocity law ensures a stable and symmetric treatment mode throughout the entire processing cycle. Using the obtained expressions and SolidWorks-2016 CAD system, a 3D model was developed and a parametric calculation of the drive system, including a cardan transmission, was carried out. The necessity of maintaining a specific angle between the axes of the cardan mechanism shafts and spatial positioning of the drive elements—such that the axes of its key joints lie in the same plane—was substantiated. A drive design was developed that is capable of realizing the specified angular velocity law. The results can be applied in the development of new or modernization of existing tumbling machines with improved operational efficiency. These findings can be effectively used at the design stage by engineering departments of machine-building enterprises.

Keywords: automotive engineering, spatial mechanism, tumbling machine, spatial motion.

Стаття надійшла до редакції / Received 07.10.2025

Прийнята до друку / Accepted 11.01.2026

Опубліковано / Published 29.01.2026



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© Залюбовський Марк, Злотенко Борис, Воляник Олексій, Радченко Антон

Постановка задачі

Сьогодні галтувальні машини активно використовуються в багатьох галузях промисловості. Описаний метод обробки використовують переважно для деталей, до яких не висуваються високі вимоги щодо точності геометричних розмірів, а якість обробленої поверхні визначається, переважно органолептичним шляхом. Наприклад, у автомобілебудуванні після лиття або механічної обробки [1] піддають галтуванню більшість фурнітурних елементів, зокрема шліфуються й поліруються полімерні декоративні елементи салону, очищаються від продуктів корозії автомобільні диски. У легкій промисловості [2, 3] методом галтування здійснюється полірування гудзиків [4], відокремлюються ливникові залишки на металевих елементах «блискавки» [5], а також обробляються полімерні деталі взуття – підбори, набійки, п'яткові частини підосви тощо. Аналогічний спосіб обробки використовується в машинобудуванні та приладобудуванні – для очищення металевих компонентів від іржі або інших забруднень.

Аналогічні пристрої з рухомими ємностями різних конструкцій і характеру руху використовуються також для змішування дрібнодисперсних сипких матеріалів [6, 7].

Залежно від конкретної технологічної задачі, застосовуються різні типи галтувального обладнання [8]. Деякі зразки техніки є морально застарілими і мають низьку продуктивність, тоді як інші [9] розраховані лише на обмежене коло операцій. Найперспективнішими вважаються машини, робочі камери яких здійснюють складний просторовий рух [8].

Одним із прикладів такого обладнання є галтувальна машина типу «Turbula», що була вперше розроблена у 1966 році швейцарською компанією Willy A. Bachofen (WAB) [10]. Робоча камера в такій машині здійснює одночасні переміщення у трьох взаємно перпендикулярних площинах, а також обертається навколо своєї осі.

Зазвичай, галтувальні машини, які відповідають конструктивному виконанню типу «Turbula», потребують оснащення спеціальними складними конструкціями приводів, що мають різні технологічні призначення – відтворення потрібного закону зміни кутової швидкості обертання на ведучому валу та поєднання двох складових переміщення ведучої ланки тощо. Таким чином, одним із перспективних завдань на сьогодні є синтез та подальше аналітичне дослідження спеціальних конструкцій механічних приводів галтувальних машин типу «Turbula», що мають різне функціональне призначення.

Аналіз досліджень та публікацій

У праці [11] синтезовано та досліджено спеціальну конструкцію приводу, яка утворена шарнірним кривошипно-кулісним механізмом та забезпечує реалізацію необхідного закону зміни кутової швидкості на ведучому валу машини. Для машин типу «Turbula», просторові механізми яких є статично визначеними використовують наступні конструкції приводів: у [12] здійснено синтез конструкцій механічних приводів, які дозволяють передавати крутний момент на ведучий вал машини та, додатково, одночасно забезпечувати його зворотно-поступальне переміщення вздовж напрямної на необхідну величину. Схожа конструкція механічного приводу, яка досліджена у [13], використовується в машині де ведучий вал додатково здійснює коливальне переміщення. Для машин типу «Turbula», просторові механізми яких мають подвійний ступінь рухомості також були розроблені та успішно досліджені відповідні конструкції механічних приводів, що дозволяють передавати крутний момент на дві ведучі ланки. Кожна конструкція приводу має свої характерні особливості, що зумовлює потребу в індивідуальному підході до її синтезу, геометричного проектування та технічного обслуговування.

Виділення невіршених частин. Як показано у науковій праці [8], характерною особливістю просторового механізму машин типу «Turbula», навіть за умови постійної кутової швидкості ведучого валу, є обертання веденого валу з нерівномірною кутовою швидкістю. При таких експлуатаційних особливостях, вал ведений буде обертатися з кутовою швидкістю, яка буде непостійною, причому коефіцієнт її нерівномірності становить 1,5 [8]. За результатами попередніх досліджень [14], встановлено, що така нерівномірність обертання веденого валу в механізмі машин типу «Turbula» може спричинити просторове переміщення торців робочої камери з різною інтенсивністю, що, може негативно сказатися на реалізації відповідного галтувального технологічного процесу. Таким чином, важливим аспектом є синтез, з подальшим аналітичним дослідженням, такої конструкції приводу, який буде забезпечувати раціональне функціонування машини, зокрема буде нівелювати нерівномірність обертального руху валу веденого та буде створювати умови, котрі будуть реалізувати одну й ту ж саму інтенсивність руху вмісту камери під час її просторового переміщення.

Формулювання цілі статті. Здійснити синтез спеціального механічного приводу машини «Turbula», що буде забезпечувати необхідний характер руху рухомих ланок, а також виконати подальше аналітичне дослідження конструкції приводу з точки зору визначення геометричних параметрів.

Виклад основного матеріалу

Попередні дослідження, які детально висвітлені у [8] показали, що обертання валу веденого, що є нерівномірним у механізмі машин типу «Turbula» спричиняє просторовий рух торців камери із різною інтенсивністю. Зокрема, частина камери, яка кінематично пов'язана з вилкою, яка є веденою, зазнає циклічних різких прискорень та уповільнень, тоді як протилежна частина, з'єднана з ведучим валом, рухається більш рівномірно. Це створює ситуацію, коли наповнення камери, реагуючи на швидку зміну положення її частини у просторі, переміщується між торцями камери з неоднаковою інтенсивністю, навіть за сталої кутової швидкості обертання валу ведучого.

Внаслідок переміщення наповнення камери у протилежних напрямках одночасно проявляються ознаки водоспадного, каскадного та й змішаного режимів його руху. Така комбінація різнотипних режимів, наприклад,

може викликати нерівномірність впливу абразивного середовища на поверхню деталей, які піддаються поліруванню чи шліфуванню, що, своєю чергою, може призводити до зниження якості обробки, нерівномірного зняття шару матеріалу та загального зниження ефективності.

Також, раптова зміна просторового положення будь-якого торця камери може спричинити ударний вплив на оброблювані деталі, що особливо критично за високих кутових швидкостей ведучого валу. Це, у свою чергу, може призводити до пониження протікання процесів обробки та істотного звуження області застосування гальувального обладнання у його «базовій» конструктивній формі.

Наприклад, при проведенні експериментального дослідження, за швидкості обертання ведучого валу в 5,8 рад/с характер руху середовища робочої камери наближався до водоспадного режиму. Водночас була очевидною різниця в інтенсивності переміщення середовища залежно від напрямку руху – від одного торця робочої камери до іншого. Зокрема, при русі в напрямку торця, кінематично з'єднаного з вилкою веденою, інтенсивність переміщення була суттєво нижчою порівняно з рухом у протилежному напрямку. Просторові особливості руху технологічного середовища в середині робочої камери, за умови кутової швидкості 5,8 рад/с, детально проілюстровано на рис. 1.

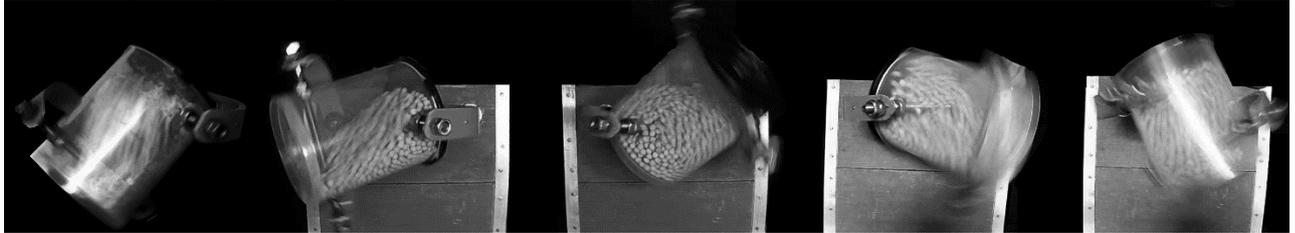


Рис. 1. Особливості руху технологічного середовища в середині робочої камери

Для визначення характеру обертання валу веденого було проведено кінематичне дослідження механізму машини типу «Turbula» за допомогою системи автоматизованого проектування «SolidWorks-2016». Ведучому валу було задано рівномірне обертання з постійною кутовою швидкістю. Нульовим значенням кута повороту валу ведучого вважалось таке просторове положення рухомих елементів, за якого вісь кріплення вилки ведучої до камери розташована в горизонтальній площині. На рисунку 2 представлено графік, що відображає співвідношення між кутовою швидкістю валу веденого та кутом, на який буде здійснено поворот валу ведучого.

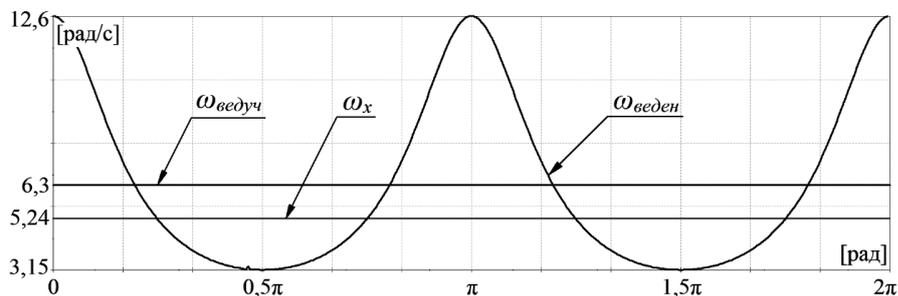


Рис. 2. Графік співвідношення між кутовою швидкістю валу веденого та кутом, на який буде здійснено поворот валу ведучого

За умови сталої швидкості обертання $\omega_{ведуч}$ валу ведучого, кутова швидкість обертання $\omega_{веден}$ валу веденого, змінюється відповідно до певної залежності в межах визначеного діапазону. Оскільки ця залежність не залежить від пропорційного масштабування геометричних характеристик ланок механізму, її можна вважати універсальною для конструкції машини будь-якого масштабного коефіцієнту. Протягом одного повного оберту веденого валу амплітудні значення його кутової швидкості будуть змінюються 4 рази.

Величина кутової швидкості, котра відповідає умовному положенню горизонтальної вісі абсцис ω_x , приймається як базове для аналізу змін, а розрахований коефіцієнт, що характеризує нерівномірність обертального руху веденого валу становитиме:

$$\delta_1 = \frac{\omega}{\omega_{веден}^{max} \omega_{веден}^{min}} = 1,5, \quad (1)$$

де $\omega_{веден}^{max}$ та $\omega_{веден}^{min}$ пікові величини функції, що описує зміну кутової швидкості на веденому валу.

Розрахунковим методом отримали закон зміни кутової швидкості на веденому валу, який утворюється, коли ведучий обертається рівномірно:

$$\omega_{веден} = 0,83\omega_{ведуч} + 0,75\omega_{ведуч} \sin\left(2\varphi + \frac{\pi}{2}\right) + \left|0,42\omega_{ведуч} \sin\left(2\varphi + \frac{\pi}{2}\right)\right|. \quad (2)$$

Якщо $0,42\omega_{ведуч} \sin\left(2\varphi + \frac{\pi}{2}\right) \geq 0$, а $x \in \left[-\frac{\pi}{4} + \pi n; \frac{\pi}{4} + \pi n\right]$, то:

$$\omega_{веден} = 0,83\omega_{ведуч} + 1,17\omega_{ведуч} \sin\left(2\varphi + \frac{\pi}{2}\right). \quad (3)$$

Формула (3) представляє ту частину кривої на графіку, що розміщена над віссю ω_x .

Отже, якщо $0,42\omega_{ведуч} \sin\left(2\varphi + \frac{\pi}{2}\right) < 0$, тобто $x \in \left[\frac{\pi}{4} + \pi n; \frac{3\pi}{4} + \pi n\right]$, то:

$$\omega_{\text{веден}} = 0,83\omega_{\text{ведуч}} + 0,33\omega_{\text{ведуч}} \sin\left(2\varphi + \frac{\pi}{2}\right), \quad (4)$$

де φ – кут, на який буде повернуто ведений вал.

Вираз (4) характеризує ту складову кривої, що розташована нижче горизонтальної вісі абсцис.

Для необхідності розширення функціональних можливостей цього обладнання виникає потреба у впровадженні такого просторового руху камери, яке забезпечувало б рівномірну інтенсивність руху наповнення між її торцевими частинами в зустрічних напрямках, а також дозволяло б підтримувати єдиний режим руху протягом усього процесу обробки деталей.

Як зазначено у [8], досягнення таких умов можливе шляхом усунення різниці між граничними піковими значеннями повних прискорень точок, які умовно розміщені в центрах протилежних торців робочої камери. Для цього вали машини повинні були б обертатися з кутовою швидкістю, яка є сталою. Проте, особливості конструкції просторового механізму не дозволяють реалізувати такий рух. Таким чином, розв'язання поставленої задачі полягає в забезпеченні ведучому валу обертання з змінною нерівномірною кутовою швидкістю. Це дозволить зменшити амплітуду коливань пікових значень кутової швидкості обертання валу веденого. Таким чином, необхідно синхронізувати циклічні зміни кутових швидкостей обох валів так, щоб їх пікові значення були розташовані у протифазі та мали однакову амплітуду. Відповідно, закон кутової швидкості валу ведучого повинен мати такий вигляд:

$$\omega_{\text{ведуч}} = \omega_{\text{серед}} - \omega_{\text{ампл}} \sin\left(2\varphi + \frac{\pi}{2}\right), \quad (5)$$

де $\omega_{\text{ампл}}$ – амплітудне значення коливань кутової швидкості обох валів; $\omega_{\text{серед}}$ – середнє значення кутової швидкості валу.

Зміна кутової швидкості валу веденого буде у протилежній фазі щодо коливань кутової швидкості валу ведучого. Ця залежність буде оберненою і описуватиметься наступним виразом:

$$\omega_{\text{веден}} = \omega_{\text{серед}} + \omega_{\text{ампл}} \sin\left(2\varphi + \frac{\pi}{2}\right). \quad (6)$$

Враховуючи, що пікові значення функцій, що описують зміну кутових швидкостей обох валів, мають бути ідентичними за амплітудою, то виконується наступна умова:

$$\omega_{\text{ампл}} = \frac{\omega}{\frac{\omega_{\text{ведуч}}^2}{\max_{\text{ведуч}}^{\min}} = \frac{\omega}{\frac{\omega_{\text{веден}}^2}{\max_{\text{веден}}^{\min}}}, \quad (7)$$

де $\omega_{\text{ведуч}}^{\max}$ та $\omega_{\text{ведуч}}^{\min}$ пікові значення кутових швидкостей валів.

Середня кутова швидкість, як ведучого, так і веденого валів може бути розраховане за наступною формулою:

$$\omega_{\text{серед}} = \frac{\omega}{\frac{\omega_{\text{ведуч}}^2}{\max_{\text{ведуч}}^{\min}} = \frac{\omega}{\frac{\omega_{\text{веден}}^2}{\max_{\text{веден}}^{\min}}}. \quad (8)$$

Відповідно до значення коефіцієнта нерівномірності δ_1 , який визначений у праці [], екстремальні значення функції, що описує зміну кутової швидкості веденого валу відносно сталої кутової швидкості валу ведучого, виявилися асиметричними. Існує припущення, що той коефіцієнт нерівномірності, за якого амплітуди екстремумів обох залежностей – кутових швидкостей ведучого і веденого валів будуть однаковими, має визначатися як величина, обернено пропорційна до коефіцієнта нерівномірності, отриманого для веденого валу:

$$\delta_2 = \frac{1}{\delta_1} = 0,67. \quad (9)$$

Таким само способом встановимо пікові значення для $\omega_{\text{ведуч}}$:

$$\omega_{\text{ведуч}}^{\max} = \frac{\omega_{\text{веден}}^{\max}}{\delta_1} \quad (10)$$

$$\omega_{\text{ведуч}}^{\min} = \frac{\omega_{\text{веден}}^{\min}}{\delta_1} \quad (11)$$

Таким чином, відповідно до виразу (7), амплітудне значення коливань кутової швидкості як ведучого, так і веденого валів складатиме $\omega_{\text{ампл}} = 2,1$, а середня кутова швидкість, розрахована за виразом (8), дорівнює $\omega_{\text{серед}} = 6,3$.

Для підтвердження достовірності отриманих аналітичних результатів було проведено комп'ютерне моделювання в середовищі САПР «SolidWorks-2016». У моделі машини ведучому валу було задано обертання відповідно до залежності зміни кутової швидкості, показаної у рівнянні (5), із використанням попередньо розрахованих екстремальних значень. Після цього була визначена відповідна залежність для веденого валу. Графічне зображення змін кутової швидкості обох валів упродовж одного повного оберту наведено на рисунку 3.

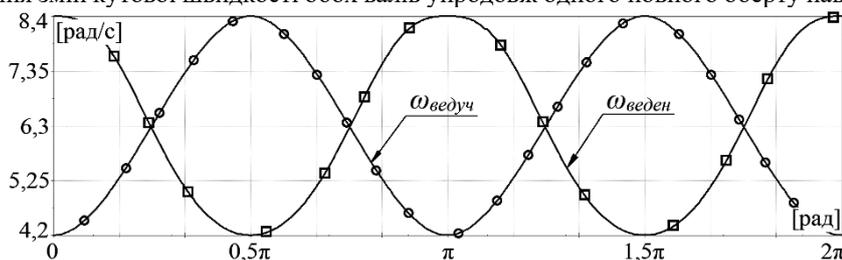


Рис. 2. Графічне зображення змін кутової швидкості обох валів упродовж одного повного оберту

У результаті проведених досліджень вдалося реалізувати циклічну зміну кутових швидкостей обох валів машини саме так, щоб їх пікові значення перебували у протифазі й мали однакову амплітуду. При цьому, під час реалізації закону зміни кутової швидкості валу з ведучого гідно з виразом (5), діапазон зміни кутової швидкості валу веденого, котрий описаний рівнянням (6), виявився еквівалентним йому.

Крім того, за допомогою програмного забезпечення «SolidWorks-2016» було проаналізовано максимальні значення повних прискорень точок, які умовно відповідають центрам протилежних торців робочої камери. Було виявлено, що максимальні повні прискорення в цих точках стали однаковими. Це свідчить про те, що протилежні торці робочої камери здійснюють просторовий рух з співставною інтенсивністю. Таким чином, створено умови, за яких забезпечується рівномірний рух наповнювача між торцями камери в зустрічних напрямках, що, своєю чергою, сприяє стабільному режиму переміщення протягом усієї роботи обладнання.

На підставі проведеного дослідження було спроєктовано конструкцію приводу [15], що дає змогу відтворити заданий закон кутової швидкості обертання валу ведучого. Горизонтальна проекція машини висвітлена на рис. 3 (а), її кінематична схема, що включає технологічний привід – на рис. 3 (б).

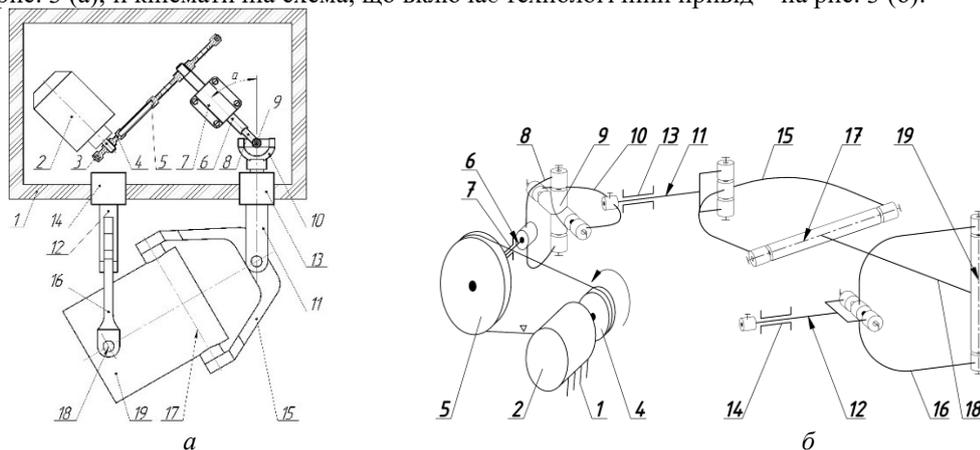


Рис. 3 (а) – горизонтальна проекція машини, рис. 3 (б) – кінематична схема машини

Принцип роботи галтувальної машини полягає в наступному. Після запуску електродвигуна (позиц. 2), встановленого в корпусі (позиц. 1) машини, постійне обертання передається із задіянням круглопасової передачі, яка містить шків: ведучий (позиц. 4) та ведений (позиц. 5), на вилку (позиц. 8), яка є ведучою та належить карданній передачі. Вилка (позиц. 8) виготовлена заодно з приводним валом вилку (позиц. 6), що встановлений у втулці вилку (позиц. 7). Далі, обертання через карданну передачу перетворюється на нерівномірний обертальний рух вилки веденої (позиц. 10), у відповідності до отриманого закону, що представлений виразом (5). При цьому, між віссю валу (позиц. 6) та віссю валу (позиц. 11) виникає кут α . Обертання вилки (позиц. 10), що є нерівномірним, передається потім на вилку (позиц. 15). Вилка (позиц. 15), обертаючись навколо осі (позиц. 17), забезпечує просторовий та обертальний рухи робочої камери 19. Обертальний рух передається від робочої камери (позиц. 19) через вісь (позиц. 18) на вилку ведену (позиц. 16), а вже звідти – на вал (позиц. 12), що є веденим і встановлений у втулці (позиц. 14). Вал (позиц. 12), що є веденим, обертається у відповідності до закону, який описаний рівнянням (6).

Щоб забезпечити реалізацію необхідного закону кутової швидкості на валу ведучому (позиц. 11), слід правильно встановити величину кута α між осями валів карданної передачі – зокрема, між віссю привідного валу 6 і віссю валу ведучого (позиц. 11). У праці [14] представлені відповідні аналітичні вирази (12) та (13), які описують кінематику роботи карданної передачі:

$$\frac{\omega_2^{max}}{\omega_1 \cos \alpha} = \frac{1}{\cos \alpha} \quad (12)$$

$$\frac{\omega_2^{min}}{\omega_1 \cos \alpha} = \frac{1}{\cos \alpha} \quad (13)$$

де ω_1 – стала кутова швидкість першої вилки, яка належить карданній передачі приводу; ω_2^{max} , ω_2^{min} – пікові значення кутової швидкості другої вилки, яка належить карданній передачі приводу. Враховуючи конструкція машини, справедливим буде:

$$\omega_2^{max} = \frac{\omega_1}{\cos \alpha} \quad (14)$$

$$\omega_2^{min} = \frac{\omega_1}{\cos \alpha} \quad (15)$$

Із виразів (14) та (15) виокремимо ω_1 , зрівнявши між собою, приймаючи до уваги рівняння (14) та (15):

$$\omega_1 = \frac{\omega_2^{min} \cos \alpha}{1} = \frac{\omega_2^{min} \cos \alpha}{1} \quad (16)$$

З виразом (16) здійснено тригонометричні перетворення:

$$\cos^2 \alpha = \frac{\omega_2^{min}}{\omega_2^{max}} \quad (17)$$

Пікові значення кутової швидкості з формули (17) представимо з урахуванням їх середнього значення:

$$\cos^2 \alpha = \frac{\frac{(2\omega_{\text{сєр}})}{3}}{\frac{(4\omega_{\text{сєр}})}{3}}. \quad (18)$$

Спростивши рівняння (18), отримали:

$$\cos^2 \alpha = 0,5. \quad (19)$$

З урахуванням тригонометричного виразу для пониження степеня, запишемо рівняння (19):

$$\frac{1+\cos 2\alpha}{2} = 0,5. \quad (20)$$

Спростивши вираз (20), отримаємо:

$$\cos 2\alpha = 0. \quad (21)$$

Далі, виразимо кут α

$$\alpha = 0,5 \cdot \arccos 0 = 45^\circ. \quad (21)$$

Отже, було визначено, що кут α між осями валів карданної передачі, потрібний для реалізації отриманого закону кутової швидкості (5), має становити 45° .

Для забезпечення ефективної та узгодженої роботи машини під час обробки деталей важливо, щоб найбільші значення кутової швидкості, згідно із залежністю (5), яка реалізується на вилці (позиц. 10), відповідали положенням вилки (позиц. 15) ведучої, при яких вісь її обертання 17 перебуває у вертикальному положенні. Водночас мінімальні значення тієї ж залежності мають збігатися з положеннями, коли вісь 17 розташована горизонтально. Іншими словами, для досягнення синхронізації руху потрібно, щоб вісь вилки (позиц. 10) карданної передачі та вісь кріплення (позиц. 17) вилки (позиц. 15) розташовувалися в одній площині.

Висновки

Досліджено рух робочої камери обладнання «Turbula» галтувального типу, встановлено особливості її просторового переміщення, в тому числі, разом із наповненням. У процесі аналітичних досліджень встановлено раціональну закономірність зміни кутової швидкості валу ведучого, яка, у разі практичної реалізації, забезпечує симетричний та збалансований характер переміщення наповнювача між торцями камери в зустрічних напрямках. Такий кінематичний режим сприяє усуненню локальних перепадів інтенсивності руху середовища, що, у свою чергу, дозволяє підтримувати сталу динаміку обробки деталей упродовж усього технологічного циклу та підвищує загальну ефективність галтувального процесу.

На основі отриманих результатів розроблено конструкцію приводу з використанням карданної передачі, яка дозволяє реалізувати цю залежність зміни кутової швидкості на ведучому валу машини. Встановлено необхідний кут між валами карданної передачі, який відповідає утворенню закону зміни кутової швидкості з необхідними піковими значеннями.

Література

1. Залюбовський М.Г. Машини та обладнання підприємств: навч. Посібник / М.Г. Залюбовський, В.В. Малишев. – К.: Університет «Україна», 2020. – 120 с.
2. Бурмістенков, О.П. Основи теорії та практична реалізація пристроїв для зачищувальної обробки формових деталей із полімерних матеріалів / О. П. Бурмістенков, І. В. Панасюк. – К.: НМК ВО, 1993. – 64 с.
3. [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. – Хмельниц., 2007. – 255 с.
4. Zalyubovskiy M.G. Experimental investigation of the handling process of polymeric units in a machine with a compacted space movement of working capacity / Zalyubovskiy M.G., Panasyuk I.V., Smirnov Y.I., Klaptsov Y.V., Malyshev V.V. // Bulletin of the Kyiv National University of Technologies and Design – 2019. – Vol. 2 (132). – P. 24 – 32.
5. Залюбовський М.Г. Експериментальне дослідження впливу режимів руху робочого масиву та об'єму заповнення ємкості на інтенсивність відділення металевих деталей від ливників / М.Г. Залюбовський, І.В. Панасюк // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну – 2020. – №1 (142). – С. 27-38.
6. Marigo M. Developing Mechanistic Understanding of Granular Behaviour in Complex Moving Geometry using the Discrete Element Method. Part A: Measurement and Reconstruction of TurbulaMixer 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, Vol. 59 (3). – P. 217-238.
7. Marigo M. Developing Mechanistic Understanding of Granular Behaviour in Complex Moving Geometry using the Discrete Element Method. Part B: Investigation of Flow and Mixing in the Turbula mixer / M. Marigo, D. L. Cairns, M. Davies, A. Ingram, E. H. Stitt // Powder Technology. – 2011, Vol. 212. – P. 17-24.
8. Залюбовський М.Г. Основи проектування машин зі складним рухом робочих ємкостей для фінішної обробки дрібних деталей: монографія / М.Г. Залюбовський, І.В. Панасюк – Київ: КНУТД, 2022. – 352 с.
9. Zalyubovskii M. G. Studying the main design parameters of linkage mechanisms of part-processing machines with two working barrels / M. G. Zalyubovskii, I. V. Panasyuk // International Applied Mechanics, 56, No. 6, November 2020, 762 – 772.
10. Willy A. Bachofen (WAB): сайт Willy A. Bachofen AG, Maschinenfabrik. – 2025 [Електронний ресурс]. URL: <https://www.wab-group.com/en/mixing-technology/products/> (дата відвідування: 22.10.2025).

11. Zalyubovskii M. Synthesis and research of the spatial eight-link mechanism of the barreling machine / M. Zalyubovskii, S. Koshel, O. Koshel, L. Akimova // *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2024, issue 4, 42 – 49.
12. Залюбовський М.Г. Синтез та аналітичне дослідження просторового механізму з двома ступенями рухомості галтувальної машини / М.Г. Залюбовський, І.В. Панасюк, О.С. Кошель, Г.В. Кошель // *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки* – 2024. – №4 (339). – С. 80 – 90.
13. Залюбовський М.Г. Параметричний синтез статично визначених просторових механізмів галтувальних машин / М.Г. Залюбовський, О.О. Заїка, О.С. Кошель, Г.В. Кошель // *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки* – 2024. – №1 (331). – С. 347 – 355.
14. Zalyubovskii M. G. Modeling and designing the barreling machine drive with complex spatial motion of the container / M.G. Zalyubovskii, I.V. Panasyuk, S.O. Koshel', G.V. Koshel' // *International Applied Mechanics*, 58, No. 4, July 2022, 472 – 480.
15. 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.

References

1. Zaliubovskiy M.H. Mashyny ta obladnannia pidpriemstv: navch. Posibnyk / M.H. Zaliubovskiy, V.V. Malyshev. – K.: Universytet «Ukraina», 2020. – 120 s.
2. Burmistenkov, O.P. Osnovi teorii ta praktychna realizatsiia prystroiv dlia zachyshchuvanoi obrobky formovykh detalei iz polimernykh materialiv / O. P. Burmistenkov, I. V. Panasiuk. – K.: NMK VO, 1993. – 64 s.
3. Burmistenkov O.P. Vyrobnystvo lytykh detalei ta vyrobiv z polimernykh materialiv u vzuttievii ta shkirhalanterinii promyslovosti: monohrafiia / O. P. Burmistenkov, B. M. Zlotenko, V. P. Konoval, I. V. Panasiuk, M. Ye. Skyba, O. M. Syniuk. – Khmelnyts., 2007. – 255 s.
4. Zalyubovskiy M.G. Experimental investigation of the handling process of polymeric units in a machine with a compacted space movement of working capacity / Zalyubovskiy M.G., Panasyuk I.V., Smirnov Y.I., Klaptsov Y.V., Malyshev V.V. // *Bulletin of the Kyiv National University of Technologies and Design* – 2019. – Vol. 2 (132). – P. 24 – 32.
5. Zaliubovskiy M.H. Eksperymentalne doslidzhennia vplyvu rezhymiv rukhu robochoho masyvu ta ob'emu zapovnennia yemkosti na intensyvniat viddilennia metalevykh detalei vid luvnykiv / M.H. Zaliubovskiy, I.V. Panasiuk // *Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu tekhnolohii ta dyzainu* – 2020. – №1 (142). – S. 27-38.
6. Marigo M. Developing Mechanistic Understanding of Granular Behaviour in Complex Moving Geometry using the Discrete Element Method. Part A: Measurement and Reconstruction of TurbulaMixer 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, Vol. 59 (3). – P. 217-238.
7. Marigo M. Developing Mechanistic Understanding of Granular Behaviour in Complex Moving Geometry using the Discrete Element Method. Part B: Investigation of Flow and Mixing in the Turbula mixer / M. Marigo, D. L. Cairns, M. Davies, A. Ingram, E. H. Stitt // *Powder Technology*. – 2011, Vol. 212. – P. 17-24.
8. Zaliubovskiy M.H. Osnovy proektuvannia mashyn zi skladnym rukhom robochykh yemkosteii dlia finishnoi obrobky dribnykh detalei: monohrafiia / M.H. Zaliubovskiy, I.V. Panasiuk – Kyiv: KNUVD, 2022. – 352 s.
9. Zalyubovskii M. G. Studying the main design parameters of linkage mechanisms of part-processing machines with two working barrels / M. G. Zalyubovskii, I. V. Panasyuk // *International Applied Mechanics*, 56, No. 6, November 2020, 762 – 772.
10. Willy A. Bachofen (WAB): сайт Willy A. Bachofen AG, Maschinenfabrik. – 2025 [Електронний ресурс]. URL: <https://www.wab-group.com/en/mixing-technology/products/> (дата відвідування: 22.10.2025).
11. Zalyubovskii M. Synthesis and research of the spatial eight-link mechanism of the barreling machine / M. Zalyubovskii, S. Koshel, O. Koshel, L. Akimova // *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2024, issue 4, 42 – 49.
12. Zaliubovskiy M.H. Syntez ta analitychne doslidzhennia prostорового mekhanizmu z dvoma stupeniamy rukhomosti haltuvальноi mashyny / M.H. Zaliubovskiy, I.V. Panasiuk, O.S. Koshel, H.V. Koshel // *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky* – 2024. – №4 (339). – С. 80 – 90.
13. Zaliubovskiy M.H. Parametrychnyi syntez statychno vyznachenyykh prostоровyykh mekhanizmiv haltuvальnykh mashyn / M.H. Zaliubovskiy, O.O. Zaika, O.S. Koshel, H.V. Koshel // *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky* – 2024. – №1 (331). – С. 347 – 355.
14. Zalyubovskii M. G. Modeling and designing the barreling machine drive with complex spatial motion of the container / M.G. Zalyubovskii, I.V. Panasyuk, S.O. Koshel', G.V. Koshel' // *International Applied Mechanics*, 58, No. 4, July 2022, 472 – 480.
15. Patent №109083, МПК В01F 11/00, В24В 31/00. Mashyna dlia obrobky detalei / Zaliubovskiy M.H., Panasiuk I.V., zaiavnyk ta patentovlasnyk Kyivskiy natsionalnyi universytet tekhnolohii ta dyzainu – №u201601467; zaiav. 18.02.2016, opub. 10.08.2016, biul. № 15.