

УДК 621.924.7

¹ЗАЛЮБОВСЬКИЙ М. Г., ²ПАНАСЮК І. В.,

¹МАЛИШЕВ В. В., ²СКІДАН В. В.

¹ Відкритий міжнародний університет розвитку людини «Україна», м. Київ, Україна

² Київський національний університет технологій та дизайну, Україна

КІНЕТОСТАТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ШАРНІРНИХ ПРОСТОРОВИХ МЕХАНІЗМІВ ГАЛТУВАЛЬНИХ МАШИН (ЧАСТИНА 1: ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЗМУ З ДОДАТКОВОЮ РУХОМОЮ ЛАНКОЮ – КОРОМИСЛОМ)

Мета. Кінетостатичне дослідження статично визначеного шарнірного просторового механізму без надлишкового (пасивного) зв'язку з додатковою рухомою ланкою – коромислом машини для обробки деталей, у якій робоча ємкість виконує складний просторовий рух.

Методика. Суть кінетостатичного дослідження полягала у визначенні радіальних та осьових складових реакцій в усіх обертальних кінематичних парах шарнірного статично визначеного просторового механізму машини для обробки деталей, при її роботі на холостому ході. Кінетостатичне дослідження реалізувалося із застосуванням системи автоматизованого проектування SolidWorks-2016 із попереднім виконанням 3D моделювання даної конструкції машини з додатковою рухомою ланкою – коромислом.

Результати. У ході проведення кінетостатичного дослідження виконано 3D моделювання машини з додатковою рухомою ланкою – коромислом в системі автоматизованого проектування SolidWorks-2016, визначено максимальні значення радіальних та осьових складових реакцій в усіх обертальних кінематичних парах машини для обробки деталей, досліджено вплив зміни міжосьової відстані проміжного шатуна (робочої ємкості) на приріст максимальних значень реакцій в усіх обертальних кінематичних парах.

Наукова новизна. Встановлено взаємозв'язок між міжосьовою довжиною проміжного шатуна (робочої ємкості) та зміною максимальних значень реакцій в усіх обертальних кінематичних парах машини для обробки деталей. В результаті цього виникає можливість визначити гранично допустиму міжосьову довжину проміжного шатуна для забезпечення довговічної роботи машини.

Практична значимість. Встановлено, що характер зміни максимальних значень радіальних та осьових складових реакцій у кожній обертальній кінематичній парі просторового механізму залежить від значення коефіцієнту, який характеризує відношення міжосьової довжини проміжного шатуна (робочої ємкості) до міжосьової довжини ведучого чи веденого шатунів машини. Визначено діапазон зміни даного коефіцієнту, в межах якого раціонально виконувати проектування даної конструкції машини. Отримані результати можуть бути використані у відповідних конструкторських бюро машинобудівних підприємств на стадії проектування галтувального обладнання зі складним просторовим рухом робочих ємкостей.

Ключові слова: кінематичні пари; максимальні значення реакцій; шатун; складний просторовий рух.

Вступ. Підвищення продуктивності виготовлення пластмасових та металевих деталей значною мірою залежить від скорочення часу підготовчих та фінішних оздоблювально-зачищувальних операцій [1, 2]. До таких операцій відносяться полірування та шліфування деталей [3, 4] у рухомих ємкостях абразивом у вигляді вільних гранул, відділення відлитих деталей від ливників [5] тощо. На ці операції витрачається до 80% технологічного часу. Проведення фінішної оздоблювально-зачищувальної обробки часто виконується ручним способом або засобами малої механізації [6], що є малоефективним способом. Відоме застосування галтувальних машин з обертальним рухом робочої ємкості [7], а також вібраційних машин, однак, дані типи обладнання, зазвичай, мають низьку продуктивність та

значні енергозатрати. Підвищення продуктивності фінішних оздоблювально-зачищувальних технологічних операцій обробки пластмасових та металевих деталей можна досягти інтенсифікацією руху технологічного середовища (деталі та наповнювач) у робочих ємкостях за рахунок забезпечення їх складного просторового переміщення. Перспективним типом обладнання вважаються машини [8], робочі ємкості яких виконують складний просторовий рух. Доведено [9], що саме такий рух робочих ємкостей сприяє підвищенню інтенсивності руху робочого масиву. В результаті чого досягається значне підвищення продуктивності виконання фінішних оздоблювально-зачищувальних технологічних операцій з одночасним зменшенням енерговитрат. Таким чином, достеменно різнобічне дослідження галтувального обладнання зі складним просторовим рухом робочих ємкостей є актуальною задачею на сьогоднішній день.

Постановка завдання. У 60-х роках 20 століття швейцарською фірмою Willy A. Bachofen (WAB) [10] було розроблено змішувач [11, 12] для сипких дрібнодисперсних речовин, просторовий шарнірний механізм якого став «базовим». Автори статті довели успішність використання такої галтувальної машини, де ємкість переміщається за складною просторовою траєкторією, для реалізації інших оздоблювально-зачисних технологічних операцій.

В основі «базової» конструкції галтувальної машини використовується просторовий шарнірний шестиланковий механізм, що має суттєвий недолік – наявність пасивного (надлишкового) зв'язку [13], який створює негативний вплив під час експлуатації даної машини та, навіть, може призвести до раптового повного виходу конструкції з ладу. Таким чином, було спроектовано дещо відмінне [14, 15], але фактично аналогічне за принципом роботи, галтувальне устаткування без пасивного зв'язку. Одним із варіантів такого устаткування є конструкція [16], де ведений вал рухомо з'єднанується з додатковою ланкою – коромислом з горизонтальною віссю обертання. Дана конструкція утворює собою семиланковий шарнірний просторовий механізм. Після додання у кінематичний ланцюг просторового механізму цієї ланки виникає можливість змінювати міжосьову відстань проміжного шатуна (робочої ємкості), цим самим впливати на зміну режимів руху сипкого середовища. Таким чином, за допомогою САПР SolidWorks важливо виконати кінетостатичне дослідження даної конструкції машини, зокрема, дослідити, як зміна міжосьової відстані проміжного шатуна (робочої ємкості), впливає на максимальні значення реакцій в кінематичних парах машини, визначити гранично допустиму величину міжосьової відстані проміжного шатуна, збільшення якої призведе до перевищення максимальних значень реакцій у кінематичних парах «базової» конструкції машини.

Результати дослідження. Розроблена конструкція машини, у якій ведений вал кінематично з'єднаний з додатковою рухомою ланкою – коромислом, що має горизонтальну вісь обертання. Модель машини, яка виконана у САПР SolidWorks, представлена на рис. 1.

Машина складається зі станини 1, ведучого 2 та веденого 3 валів. Ведучий вал 2 встановлений у підшипниковій опорі станини 1, ведений вал 3 кінематично з'єднаний з коромислом 4, яке рухомо встановлено в станині 1 та виконує коливальний рух у вертикальній площині відносно горизонтальної вісі. Ведучий 2 та ведений 3 вали шарнірно з'єднані другими кінцями з ведучим шатуном 5 та веденим шатуном 6 відповідно, діаметрально взаємоперпендикулярні вісі яких 7 і 8 є вісями кріплення проміжного шатуна 9. Проміжним шатуном 9 являється робоча ємкість машини. При моделюванні описаної конструкції машини у САПР SolidWorks основні геометричні та конструктивні параметри приймали аналогічними до параметрів промислового змішувача «Turbula T10B» («базова» конструкція машини). Геометричні та конструктивні параметри змодельованої конструкції машини представлені у табл. 1.

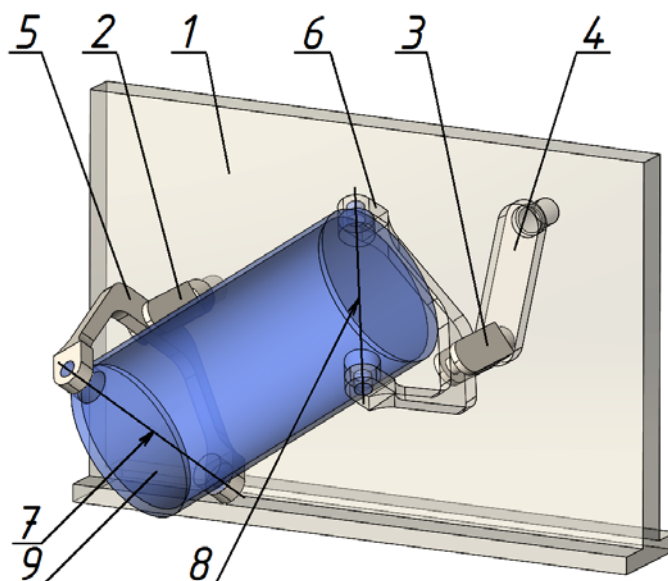


Рис. 1. Модель розробленої конструкції машини

Таблиця 1

Геометричні та конструктивні параметри змодельованої конструкції машини

Конструктивні параметри машини	Коефіцієнт λ				
	1,20	1,40	1,60	1,80	2,00
Зовнішній діаметр ємкості d_{PE}	0,318 м				
Довжина вісі ємкості l_{Π}	0,430 м	0,480 м	0,535 м	0,590 м	0,640 м
Відстань між осями ведучого та веденого шатунів $l_{\Pi(V)}$	0,272 м				
Міжосьова відстань проміжного шатуну $l_{\Pi(ПРОМ)}$	0,330 м	0,380 м	0,435 м	0,490 м	0,540 м
Об'єм робочої ємкості V_{PE}	0,032 м ³	0,036 м ³	0,041 м ³	0,045 м ³	0,050 м ³
Маса ланок машини, які є рухомими m_D	50,1 кг	52,2 кг	53,5 кг	55,0 кг	56,2 кг
Кутова швидкість ведучого валу машини $\omega_{ведч.}$	3,2 с ⁻¹ (31 об/хв)				

За рахунок введення в кінематичний ланцюг додаткової рухомої ланки коромисла, виключено надлишковий зв'язок, що дає можливість варіювати міжосьовою відстанню проміжного шатуну $l_{\Pi(ПРОМ)}$. Досліджували, як зміна даного геометричного параметру впливає на максимальні значення реакцій у кінематичних парах машини, а також при якій міжосьовій відстані проміжного шатуну $l_{\Pi(ПРОМ)}$ реакції у кінематичних парах машини будуть перевищувати попередньо визначені у роботі [17] максимальні значення реакцій у кінематичних парах «базової» конструкції машини. Кінетостатичне дослідження виконувалося із застосуванням САПР SolidWorks-2016. Міжосьову відстань проміжного шатуну $l_{\Pi(ПРОМ)}$ поступово збільшували та спостерігали за зміною реакцій у кінематичних парах машини. Для кожного типу реакцій визначалися її максимальні та мінімальні значення. Відстань між осями проміжного шатуну $l_{\Pi(ПРОМ)}$ була виражена коефіцієнтом λ , який раніше був запропонований у роботі [8] та характеризує відношення міжосьової відстані проміжного шатуну до міжосьової відстані ведучого чи веденого шатуну машини: $l_{\Pi(ПРОМ)} / l_{\Pi(V)}$. Дослідження виконувалися для конструкції машин з такими значеннями коефіцієнту λ : 1,2; 1,4; 1,6; 1,8; 2,0.

Визначали «граничну» міжосьову відстань проміжного шатуну, подальше видовження якої призведе до такого збільшення реакцій у кінематичних парах машини, коли вони перевищать реакції у кінематичних парах машини, яку прийнято за «базову». Графічне

представлення реакцій цього розробленого просторового механізму, де вал, що є веденим рухомо з'єднаний з введеною новою ланкою – повзуном представлено на рис. 2.

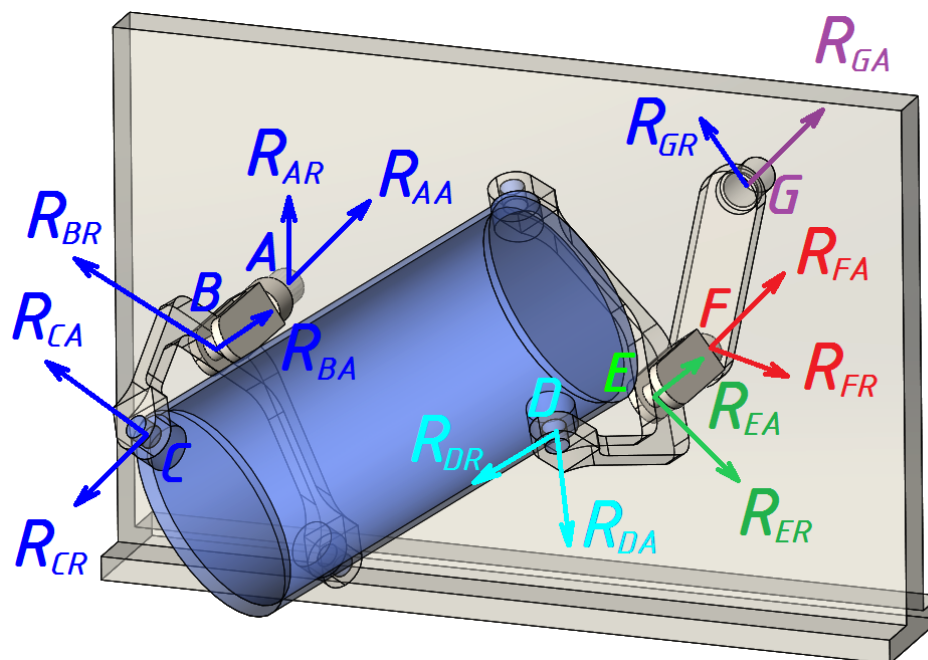


Рис. 2. Розрахункова схема реакцій у кінематичних парах просторового механізму розробленої машини

Усі дослідження виконувалися на холостому ході при кутовій швидкості ведучого валу $3,2 \text{ c}^{-1}$. Саме при такій кутовій швидкості ведучого валу машини буде реалізуватися водоспадний режим руху сипкого робочого середовища у середині ємкості, будуть виникати найбільші інерційні навантаження на рухомі ланки та кінематичні пари машини. Результати силового дослідження «базової» конструкції машини, які представлені у роботі [17] показали, що усі значення реакцій у кінематичних парах машини, при її роботі на робочому ході, були на однаковий відсоток збільшені по відношенню до величини реакцій у кінематичних парах цієї ж машини, але коли вона працювала на холостому ході. Таким чином, подальші порівняльні дослідження розробленої конструкції машин проводили лише на холостому ході.

Визначали максимальні значення реакцій R в таких кінематичних парах: A, B, C, D, E, F, G . Їх значення розподіляли на дві групи: група радіальних реакцій та група осьових реакцій: R_{AA} – осьова реакція у кінематичній парі «станина – вал, що є ведучим»; R_{AR} – радіальна реакція у кінематичній парі «станина – вал, що є ведучим»; R_{BA} – осьова складова реакції в кінематичній парі «ведучий вал – ведучий шатун»; R_{BR} – радіальна складова реакції в кінематичній парі «ведучий вал – ведучий шатун»; R_{CA} – осьова складова реакції в кінематичній парі «ведучий шатун – проміжний шатун»; R_{CR} – радіальна складова реакції в кінематичній парі «ведучий шатун – проміжний шатун»; R_{DA} – осьова складова реакції в кінематичній парі «проміжний шатун – ведений шатун»; R_{DR} – радіальна складова реакції в кінематичній парі «проміжний шатун – ведений шатун»; R_{EA} – осьова складова реакції в кінематичній парі «ведений шатун – ведений вал»; R_{ER} – радіальна складова реакції в кінематичній парі «ведений шатун – ведений вал»; R_{FA} – осьова складова реакції в кінематичній парі «ведений вал – коромисло»; R_{FR} – радіальна складова реакції в кінематичній парі «ведений вал – коромисло»; R_{GA} – осьова складова реакції в кінематичній парі «коромисло – станина»; R_{GR} – радіальна складова реакції в кінематичній парі «коромисло – станина».

Далі, значення (максимальні) реакцій в залежності від зміни коефіцієнту λ , що визначалися за допомогою SolidWorks-2016 були зведені до табл. 2. Також і тій само таблиці представлено значення реакцій, що утворювалися у кінематичних парах «базового» просторового механізму галтувальної машини, при коефіцієнті $\lambda=1$.

Таблиця 2

Максимальні значення реакцій у кінематичних парах машини при різних значеннях коефіцієнту λ

		Коефіцієнт λ					
		1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
Значення реакцій в кінематичних парах машини	R_{AA} , [Н]	88	80	101	128	165	198
	R_{FA} , [Н]	68	68	98	120	138	169
	R_{AR} , [Н]	405	420	465	502	576	633
	R_{FR} , [Н]	608	380	350	443	600	798
	R_{BA} , [Н]	198	169	190	220	260	310
	R_{EA} , [Н]	124	90	112	155	210	290
	R_{BR} , [Н]	294	238	251	280	318	382
	R_{ER} , [Н]	545	313	300	345	408	576
	R_{CA} , [Н]	95	70	78	83	91	100
	R_{DA} , [Н]	194	82	76	78	80	82
	R_{CR} , [Н]	325	168	215	301	400	585
	R_{DR} , [Н]	342	180	242	368	540	798
	R_{GA} , [Н]	-----	105	145	177	205	228
	R_{GR} , [Н]	-----	428	406	406	515	690

Згідно результатів досліджень, представлених у табл. 2 було створено відповідні графічні залежності максимальних значень реакцій у кінематичних парах шарнірного просторового механізму від зміни коефіцієнту λ , які представлені на рис. 3 (радіальні складові реакцій) та рис. 4 (осьові складові реакцій).

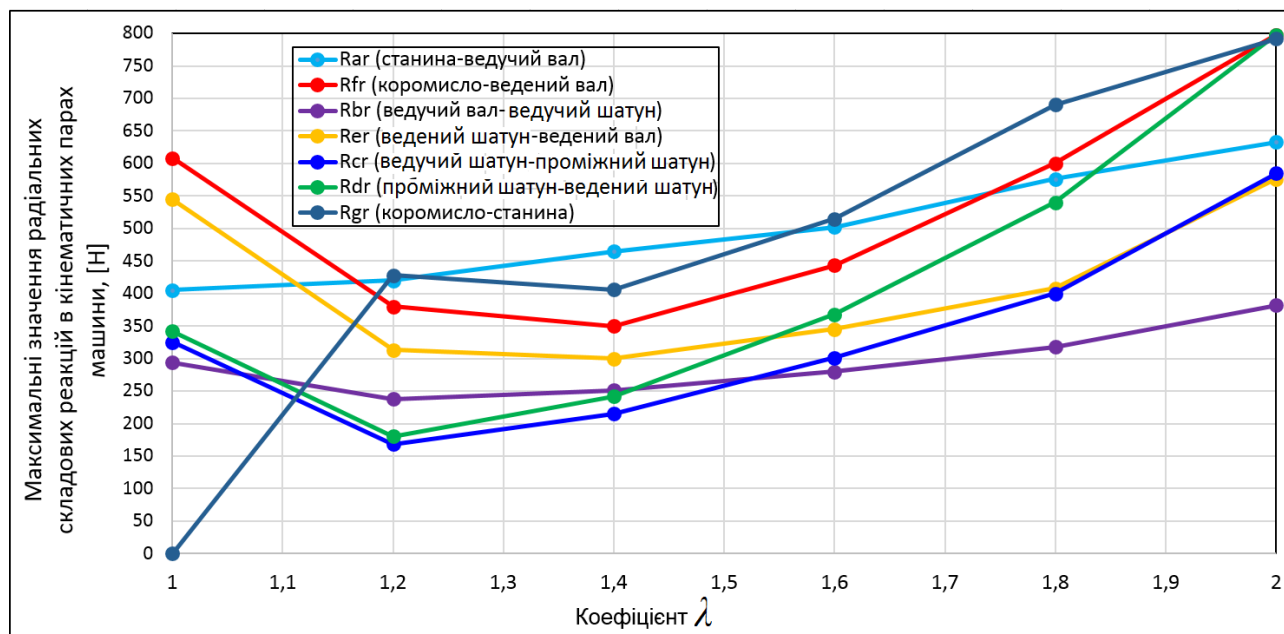


Рис. 3. Залежність максимальних значень радіальних складових реакцій в кінематичних парах просторового механізму від зміни коефіцієнту λ

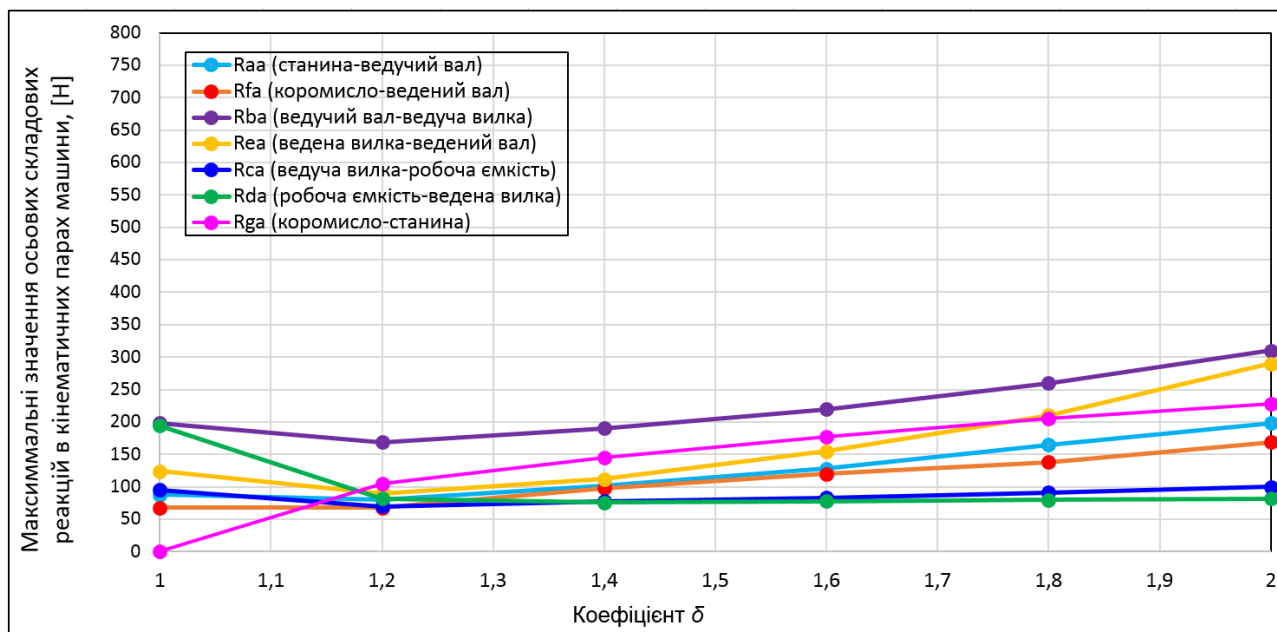


Рис. 4. Залежність значень реакцій, що є осьовими, від коефіцієнту λ у кінематичних парах просторового механізму

Таким чином, у даній конструкції машини, при коефіцієнті $\lambda = 1,2$ утворюються найменші значення реакцій в усіх кінематичних парах, які є меншими за екстремальні значення цих само реакцій у кінематичних парах «базового» механізму галтувальної машини. Зі збільшенням коефіцієнту λ відбувалося й збільшення максимальних значень реакцій в усіх кінематичних парах: осьові складові реакцій мали незначний приріст, в той час, як деякі радіальні складові реакцій (R_{GR} , R_{FR} , R_{ER}) зменшувалися до значення коефіцієнту $\lambda = 1,4$. При перевищенні коефіцієнту $\lambda = 1,4$ приріст радіальних складових реакцій значно збільшився. У досліджуваній конструкції машини при коефіцієнті $\delta = 1,8$ максимальні значення семи із дванадцяти реакцій перевищили максимальні значення тих само реакцій у «базовій» конструкції машини. При коефіцієнті $\delta = 2,0$ максимальні значення восьми із дванадцяти реакцій значно перевищили максимальні значення тих само реакцій у «базовій» конструкції машини. Реакції R_{CR} та R_{DR} перевищили значення тих само реакцій в «базовій» конструкції машини майже у два рази.

Висновки.

1. За допомогою САПР SolidWorks виконано кінетостатичне дослідження просторового статично визначеного семиланкового шарнірного механізму машини для обробки деталей з новою введеною рухомою ланкою – коромислом, що має горизонтальну вісь обертання, зокрема, визначено реакції в усіх обертальних та кінематичних парах.

2. Досліджено вплив зміни коефіцієнту λ , який характеризує відношення міжосьової відстані проміжного шатуна (робочої ємкості) до міжосьової відстані ведучого шатуна (веденого шатуна) машини на приріст максимальних значень реакцій в усіх кінематичних парах машини.

3. Встановлено, що досліджувану конструкцію машини раціонально використовувати в діапазоні зміни коефіцієнту $\lambda = [1,0-1,8]$. При коефіцієнті $\lambda > 1,6$ спостерігалось значне збільшення максимальних значень більшості реакцій у порівнянні з максимальними значеннями реакцій у кінематичних парах «базової» конструкції машини.

References

1. Zaliubovskiy, M. G., Panasiuk, I. V., Malyshev, V. V. (2020). Perspektivni tekhnologii obrobky detalei ta zmishuvannya sypkykh rehovyn u rukhomykh robochykh yemkostiakh (chastyna 1: sposoby tekhnolohichnykh operatsii) [Advanced technologies for processing parts and mixing bulk materials in mobile working tanks (part 1: methods of technological operations)]. *Vcheni zapysky Tavriiskoho natsionalnoho universytetu imeni V. I. Vernadskoho. Seriya: tekhnichni nauky – Scientific notes of Tavriya National University named after V. I. Vernadsky. Series: technical sciences*, No. 2, Vol. 31 (70), P. 29–35 [in Ukrainian].
2. Burmistenkov, O. P., Zlotenko, B. M., Konoval, V. P., Panasiuk, I. V., Skyba, M. Ye., Syniuk, O. M. (2007). Vyrobnystvo lytykh detalei ta vyrobiv z polimernykh materialiv u vzuttievii ta shkirhalantereinii promyslovosti: monohrafiia [Production of cast parts and products from polymeric materials in the footwear and leather goods industry: monograph]. Khmelnytsk. 255 p. [in Ukrainian].
3. Zalyubovskiy, M. G., Panasyuk, I. V., Smirnov, Y. I., Klaptsov, Y. V., Malyshev, V. V. (2019). Experimental investigation of the handling process of polymeric units in a machine with a compacted space movement of working container. *Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu tekhnologii ta dyzainu – Bulletin of Kyiv National University of Technologies and Design*, No. 2 (132), P. 24–32.
4. Zalyubovskiy, M. G., Panasyuk, I. V., Smirnov, Y. I., Kuznetsova, O. O., Malyshev, V. V. (2019). Analytical determination of the time of handling process of polymeric details in a machine with a complex movement of working container. *Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu tekhnologii ta dyzainu – Bulletin of Kyiv National University of Technologies and Design*, No. 3 (134), P. 9–17.
5. Zaliubovskiy, M. G., Panasiuk, I. V., Malyshev, V. V. (2019). Eksperymentalne vyznachennia enerhii neobkhidnoi dlia viddilennia metalevykh detalei vid luvnykiv [Experimental determination of the energy required to separate metal parts from castings]. *Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu tekhnologii ta dyzainu – Bulletin of Kyiv National University of Technologies and Design*, No. 6 (140), P. 9–17 [in Ukrainian].
6. Shvartc, A. I. (1987). Mekhanizatsiia i avtomatizatsiia proizvodstva formovykh RTI: uchebnoe posobie dlia rabocheho obrazovaniia [Mechanization and automation of the production of molded rubber goods: a textbook for workers' education]. Moscow: Khimiia. 176 p. [in Russian].
7. Pershin, V. F., Odnolko, V. G., Pershina, S. V. (2009). Pererabotka sypuchikh materialov v mashinakh barabannogo tipa: monografiia [Processing of bulk materials

Література

1. Залюбовський М. Г., Панасюк І. В., Малишев В. В. Перспективні технології обробки деталей та змішування сипких речовин у рухомих робочих ємкостях (частина 1: способи технологічних операцій). *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: технічні науки*. 2020. № 2, Том 31 (70). С. 29–35.
2. Бурмістенков О. П., Злотенко Б. М., Коновал В. П., Панасюк І. В., Скиба М. Є., Синюк О. М. Виробництво литих деталей та виробів з полімерних матеріалів у взуттєвій та шкіргалантерейній промисловості: монографія. Хмельницьк, 2007. 255 с.
3. Zalyubovskiy M. G., Panasyuk I. V., Smirnov Y. I., Klaptsov Y. V., Malyshev V. V. Experimental investigation of the handling process of polymeric units in a machine with a compacted space movement of working container. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну*. 2019. № 2 (132). P. 24–32.
4. Zalyubovskiy M. G., Panasyuk I. V., Smirnov Y. I., Kuznetsova O. O., Malyshev V. V. Analytical determination of the time of handling process of polymeric details in a machine with a complex movement of working container. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну*. 2019. № 3 (134). P. 9–17.
5. Залюбовський М. Г., Панасюк І. В., Малишев В. В. Експериментальне визначення енергії необхідної для відділення металевих деталей від ливників. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну*. 2019. № 6 (140). С. 9–17.
6. Шварц А. И. Механизация и автоматизация производства формовых РТИ: учебное пособие для рабочего образования. М.: Химия, 1987. 176 с.
7. Першин В. Ф., Однолько В. Г., Першина С. В. Переработка сыпучих материалов в машинах барабанного типа:

- in drum-type machines: monograph]. Moscow: Mashinostroenie. 220 p. [in Russian].
8. Zaliubovskiy, M. G., Panasiuk, I. V., Malyshev, V. V. (2018). Mashyny zi skladnym rukhom robochykh yemkosti dlia obrobky polimernykh detalei: monohrafiia [Machines with complex movement of working tanks for processing of polymeric details: monograph]. Kyiv: Universytet "Ukraina". 228 p. [in Ukrainian].
9. Zaliubovskiy, M. G., Panasiuk, I. V., Malyshev, V. V. (2020). Perspektyvni tekhnolohii obrobky detalei i zmishuvannia sypanykh rehovyn u rukhomykh robochykh yemkostiakh (chastyna 2: typu obladnannia z rukhomymu yemkostiamy) [Promising technologies for processing parts and mixing bulk materials in mobile working tanks (part 2: types of equipment with moving tanks)]. *Vcheni zapysky Tavriiskoho natsionalnoho universytetu imeni V. I. Vernadskoho. Seriya: tekhnichni nauky – Scientific notes of Tavriya National University named after V. I. Vernadsky. Series: technical sciences*, No. 3, Vol. 31 (70), P. 7–13 [in Ukrainian].
10. Willy A. Bachofen (WAB) (2020). Website Willy A. Bachofen AG, Maschinenfabrik. URL: <https://www.wab-group.com/en/>.
11. Marigo, M. (2012). Discrete Element Method Modelling of Complex Granular Motion in Mixing Vessels: Evaluation and Validation: dissertation EngD. The University of Birmingham, UK.
12. Mayer-Laigle, C., Gatumel, C., Berthiaux, H. (2015). Mixing dynamics for easy flowing powders in a lab scale Turbula mixer. *Chemical Engineering Research and Design*. March 2015, Vol. 95, P. 248–261.
13. Reshetov, L. N. (1972). Konstruirovaniye ratsionalnykh mekhanizmov [Designing rational mechanisms]. 2nd ed., rev. and enl. Moscow: Mashinostroenie. 256 p. [in Russian].
14. Zalyubovskii, M. G., Panasyuk, I. V. (2020). On the study of the basic design parameters of a seven-link Spatial mechanism of a part processing machine. *International Applied Mechanics*, April 2020, Vol. 56, Iss. 1, P. 54–64.
15. Zaliubovskiy, M. G., Panasiuk, I. V., Smirnov, Yu. I., Malyshev, V. V. (2020). Synthesis and research of the tumbling machine spatial mechanism. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, Vol. 178, Iss 4. P. 69–75.
16. Patent №108488, МПК В01F 11/00. Mashyna dlia obrobky detalei [Machine for processing parts] / Zaliubovskiy M. G., Panasiuk I. V., zaiavnyk ta patentovlasnyk Kyivskiy natsionalnyi universytet tekhnolohii ta dyzainu [applicant and patent owner Kyiv National University of Technology and Design] – монографія. М.: Машиностроение, 2009. 220 с.
8. Залюбовський М. Г., Панасюк І. В., Малишев В. В. Машина зі складним рухом робочих ємкостей для обробки полімерних деталей: монографія. К.: Університет "Україна", 2018. 228 с.
9. Залюбовський М. Г., Панасюк І. В., Малишев В. В. Перспективні технології обробки деталей і змішування сипких речовин у рухомих робочих ємкостях (частина 2: типи обладнання з рухомими ємкостями). *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки*. 2020. № 3, Том 31 (70). С. 7–13.
10. Willy A. Bachofen (WAB): сайт Willy A. Bachofen AG, Maschinenfabrik. 2020. URL: <https://www.wab-group.com/en/>.
11. Marigo M. Discrete Element Method Modelling of Complex Granular Motion in Mixing Vessels: Evaluation and Validation: dissertation EngD. The University of Birmingham, UK., 2012.
12. Mayer-Laigle C., Gatumel C., Berthiaux H. Mixing dynamics for easy flowing powders in a lab scale Turbula mixer. *Chemical Engineering Research and Design*. March 2015. Vol. 95. P. 248–261.
13. Решетов Л. Н. Конструирование рациональных механизмов. Изд. 2-е, переработ. и доп. М.: Машиностроение, 1972. 256 с.
14. Zalyubovskii M. G., Panasyuk I. V. On the study of the basic design parameters of a seven-link Spatial mechanism of a part processing machine. *International Applied Mechanics*. April 2020. Vol. 56. Iss. 1. P. 54–64.
15. Zaliubovskiy M. G., Panasiuk I. V., Smirnov Yu. I., Malyshev V. V. Synthesis and research of the tumbling machine spatial mechanism. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2020. Vol. 178. Iss 4. P. 69–75.
16. Патент №108488, МПК В01F 11/00. Машина для обробки деталей / Залюбовський М. Г., Панасюк І. В., заявник та патентовласник Київський національний університет технологій та дизайну –

№u201511872; zaiav. 01.12.2015, opub. 25.07.2016, biul. № 14 [in Ukrainian].

17. Zaliubovskiy, M. G., Panasiuk, I. V., Malyshev, V. V. (2020). Sylove doslidzhennia prostorovoho shestylankovoho mekhanizmu mashyny dlia obrobky detalei (chastyna 1: doslidzhennia pry roboti mashyny na kholostomu khodi) [Power study of the spatial six-link mechanism of the machine for machining parts (part 1: study when the machine is idling)]. *Vcheni zapysky Tavriiskoho natsionalnoho universytetu imeni V. I. Vernadskoho. Serii: tekhnichni nauky – Scientific notes of Tavriya National University named after VI Vernadsky. Series: technical sciences*, No. 5, Vol. 31 (70), P. 13–18 [in Ukrainian].

№u201511872; заяв. 01.12.2015, опуб. 25.07.2016, бюл. № 14.

17. Залюбовський М. Г., Панасюк І. В., Малишев В. В. Силове дослідження просторового шестиланкового механізму машини для обробки деталей (частина 1: дослідження при роботі машини на холостому ході). *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: технічні науки*. 2020. № 5, Том 31 (70). С. 13–18.

ZALIUBOVSKIY MARK

Open University of Human Development
"Ukraine", Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-6258-0088>
E-mail: markzaliubovskiy@gmail.com

MALYSHEV VICTOR

Open University of Human Development
"Ukraine", Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-2756-3236>
E-mail: viktor.malyshev.igic@gmail.com

PANASYUK IGOR

Kyiv National University of
Technologies and Design, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-6671-4266>
ResearcherID: D-4255-2017
E-mail: panasjuk1961@gmail.com

SKIDAN VLADYSLAVA

Kyiv National University of
Technologies and Design, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-8358-9759>
E-mail: v.v.skidan@ukr.net

¹ЗАЛЮБОВСКИЙ М. Г., ²ПАНАСЮК И. В., ¹МАЛЫШЕВ В. В., ²СКИДАН В.В.

¹ Открытый международный университет развития человека «Украина», г. Киев, Украина

² Киевский национальный университет технологий и дизайна, Украина

**КИНЕТОСТАТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ШАРНИРНЫХ
ПРОСТРАНСТВЕННЫХ МЕХАНИЗМОВ ГАЛТОВОЧНЫХ МАШИН
(ЧАСТЬ 1: ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМ
ПОДВИЖНЫМ ЗВЕНОМ – КОРОМЫСЛОМ)**

Цель. Кинестатическое исследование статически определенного шарнирного пространственного механизма без избыточной (пассивной) связи с дополнительным подвижным звеном – коромыслом машины для обработки деталей, в которой рабочая емкость выполняет сложное пространственное движение.

Методика. Суть кинестатического исследования заключалась в определении радиальных и осевых составляющих реакций во всех вращательных кинематических парах шарнирного статически определенного пространственного механизма машины для обработки деталей, при ее работе на холостом ходу. Кинестатическое исследование реализовалось с применением системы автоматизированного проектирования SolidWorks 2016 с предварительным выполнением 3D моделирования данной конструкции машины с дополнительным подвижным звеном – коромыслом.

Результаты. В ходе проведения кинестатического исследования выполнено 3D моделирование машины с дополнительным подвижным звеном – коромыслом в системе автоматизированного проектирования SolidWorks 2016, определены максимальные значения радиальных и осевых составляющих реакций во всех вращательных кинематических парах машины для обработки деталей, исследовано влияние изменения межосевого расстояния промежуточного шатуна (рабочей емкости) на прирост максимальных значений реакций во всех вращательных кинематических парах.

Научная новизна. Определена взаимосвязь между межосевым расстоянием промежуточного шатуна (рабочей емкости) и изменением максимальных значений реакций во всех вращательных кинематических парах машины для обработки деталей. В результате этого возникает возможность определить предельно допустимое межосевое расстояние промежуточного шатуна для обеспечения долговечной работы машины.

Практическая значимость. Определено, что характер изменения максимальных значений радиальных и осевых составляющих реакций в каждой вращательной кинематической паре пространственного механизма зависит от значения коэффициента, характеризующего отношение межосевой длины промежуточного шатуна (рабочей емкости) до межосевой длины ведущего или ведомого шатунов машины. Определен диапазон изменения данного коэффициента, в рамках которого рационально выполнять проектирование данной конструкции машины. Полученные результаты могут быть использованы в соответствующих конструкторских бюро машиностроительных предприятий на стадии проектирования галтовочного оборудования со сложным пространственным движением рабочих емкостей.

Ключевые слова: кинематические пары; максимальные значения реакций; шатун; сложное пространственное движение.

¹ZALYUBOVSKIY M. G., ²PANASYUK I. V., ¹MALYSHEV V. V., ²SKIDAN V.V.

¹ Open International University of Human Development "Ukraine", Kyiv, Ukraine

² Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine

KINETOSTATIC STUDIES OF HINGED SPATIAL MECHANISMS OF GALLING MACHINES (PART 1: RESEARCH OF THE MECHANISM WITH AN ADDITIONAL MOBILE ROCKER LINK)

Goal. Kinetostatic study of a statically determined hinged spatial mechanism without redundant (passive) connection with an additional movable link – a rocker arm of a machine for processing parts, in which the working container performs complex spatial movement.

Methodology. The essence of the kinetostatic research was to determine the radial and axial components of the reactions in all rotational kinematic pairs of the hinged statically defined spatial mechanism of the machine for processing parts, when it is idling. The kinetostatic study was implemented using the SolidWorks 2016 computer-aided design system with preliminary 3D modeling of this machine design with an additional moving link – a rocker.

Results. In the course of the kinetostatic study, 3D modeling of a machine with an additional movable link – a rocker arm in the SolidWorks 2016 computer-aided design system was carried out, the maximum values of the radial and axial components of reactions in all rotational kinematic pairs of the machine for processing parts were determined, the effect of changing the center distance of the intermediate connecting rod (working capacity) on the increase in the maximum values of the reactions in all rotational kinematic pairs.

Scientific novelty. The relationship between the center distance of the intermediate connecting rod (working capacity) and the change in the maximum values of the reactions in all rotational kinematic pairs of the machine for processing parts is determined. As a result, it becomes possible to determine the maximum permissible center distance of the intermediate connecting rod to ensure the durable operation of the machine.

Practical significance. It is determined that the nature of the change in the maximum values of the radial and axial components of the reactions in each rotational kinematic pair of the spatial mechanism depends on the value of the coefficient characterizing the ratio of the center-to-center length of the intermediate connecting rod (working capacity) to the center-to-center length of the driving or driven connecting rods of the machine. The range of variation of this coefficient has been determined, within which it is rational to design this machine design. The results obtained can be used in the corresponding design bureaus of machine-building enterprises at the stage of designing tumbling equipment with a complex spatial movement of working containers.

Keywords: kinematic pairs; maximum reaction values; connecting rod; complex spatial motion.