ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 621.924.7

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.1-2/01>**Залюбовський М.Г.**

Відкритий міжнародний університет розвитку людини «Україна»

Панасюк І.В.

Київський національний університет технологій та дизайну

Малишев В.В.

Відкритий міжнародний університет розвитку людини «Україна»

ДОСЛІДЖЕННЯ РЕАКЦІЙ У КІНЕМАТИЧНИХ ПАРАХ СТАТИЧНО ВИЗНАЧЕНОГО ПРОСТОРОВОГО МЕХАНІЗМУ МАШИНИ ДЛЯ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ

Перспективним типом обладнання, яке використовується для реалізації процесів змішування сипких дрібнодисперсних речовин, а також галтувальних технологічних операцій обробки дрібних металевих та пластмасових деталей (шліфування та полірування виробів вільним абразивом, відділення деталей від ливників, заокруглення гострих країв тощо) вважаються машини, у яких робочі ємкості виконують складний просторовий рух. Із застосуванням таких машин значно зростає продуктивність виконання технологічних операцій з одночасним зменшенням енерговитрат. За допомогою системи автоматизованого проектування SolidWorks–2016 виконано 3D-моделювання та подальше силове дослідження одного з варіантів статично визначеного просторового семиланкового механізму машини для обробки деталей із видовженою робочою ємкістю, у якій тяжкий вал кінематично з'єднаний із додатковою рухомою ланкою – повзуном. У ході виконання силового дослідження визначено реакції в усіх обертових та поступальних кінематичних парах машини, досліджено вплив зміни міжосьової відстані робочої ємкості на приріст максимальних значень реакцій у кінематичних парах машини. Установлено, що характер зміни максимальних значень радіальних та осьових складників реакцій у кожній кінематичній парі просторового механізму залежить від значення коефіцієнта Δ , який характеризує відношення міжосьової довжини проміжного шатуна (робочої ємкості) до міжосьової довжини тягового та тяжкого шатунів машини. Максимальні значення осьових реакцій (майже з лінійною залежністю) зростали зі збільшенням коефіцієнта Δ . Для всіх радіальних складників реакцій спостерігалось їх зменшення за коефіцієнта $\Delta=1,2$ та приріст із лінійною залежністю з подальшим збільшенням коефіцієнта Δ . Отримані результати досліджень можуть бути використані відповідними машинобудівними підприємствами на стадії проектування галтувального обладнання з ємкостями, що виконують складний просторовий рух.

Ключові слова: обертова кінематична пара, реакції, робоча ємкість, міжосьова відстань.

Постановка проблеми. У 1966 році швейцарською фірмою Willy A. Bachofen (WAB) [1] розроблено змішувач [2, с. 145] для сипких дрібнодисперсних речовин [3, с. 1925], що є «базовою» конструкцією машини, у якій робоча ємкість виконує складний просторовий рух. Згодом авторами було доведено [4, с. 150–174], що «базову» конструкцію машини зі складним просторовим рухом робочої ємкості можна успішно використовувати для виконання різних галтувальних технологічних операцій обробки металевих та полімерних

деталей [5, с. 25–26; 6, с. 31–33], при цьому процес обробки буде відбуватися значно інтенсивніше. «Базова» конструкція машини, в основі якої використовується просторовий шестиланковий механізм, має суттєвий недолік – наявність пасивного (надлишкового) зв'язку [7, с. 5], який негативно впливає на експлуатаційні властивості машини, може призвести до передчасного її виходу з ладу [8, с. 1040]. Авторами розроблено інші, статично визначені просторові механізми машини зі складним рухом робочих ємкостей, у структурі яких

відсутня наявність надлишкового зв'язку. Однією з таких конструкцій є машина [9, с. 70–72], в якій тяжкий вал кінематично з'єднаний з додатковою рухомою ланкою – повзуном, в основі якої використовується семиланковий просторовий шарнірний механізм. За рахунок зміни просторового кінематичного ланцюга машини виникає можливість варіювання міжосьовою відстанню проміжного шатуна (робочої ємкості). Важливим аспектом раціонального використання розробленої конструкції машини є її силове дослідження, суть якого полягає у визначенні впливу зміни міжосьової відстані робочої ємкості на максимальні значення реакцій у кінематичних парах машини, визначенні граничного значення міжосьової відстані проміжного шатуна, за якої реакції в кінематичних парах машини будуть перевищувати максимальні значення реакцій у кінематичних парах «базової» конструкції машини.

Постановка завдання. Метою роботи є визначення та аналіз реакцій в усіх обертових та поступальних кінематичних парах просторового статично визначеного семиланкового механізму машини без надлишкового зв'язку за допомогою САПР SolidWorks, дослідження впливу зміни міжосьової відстані проміжного шатуна (робочої ємкості) на максимальні значення реакцій у кінематичних парах машини.

Виклад основного матеріалу дослідження. Було розроблено конструкцію машини, в якій тяжкий вал кінематично з'єднаний із додатковою рухомою ланкою – повзуном, що представлено на рис. 1. Машина містить станину 1, тяговий 2 та тяжкий 3 вали, причому тяговий вал 2 встановлений у підшипниковій опорі станини 1, а тяжкий вал 3 (з можливістю обертання) кінематично з'єднаний із повзуном 4, який рухомо встановлено у станині з можливістю зворотно-поступального переміщення вздовж горизонтальної напрямної 5. Тяговий 2 та тяжкий 3 вали шарнірно з'єднані

другими кінцями з тяговим шатуном 6 та тяжним шатуном 7 відповідно, діаметрально взаємно перпендикулярні вісі яких 8 і 9 є вісями кріплення проміжного шатуна 10 (робочої ємкості). Під час моделювання описаної конструкції машини у САПР SolidWorks основні геометричні та конструктивні параметри брали як аналогічні до параметрів промислового змішувача «Turbula T10B» («базова» конструкція машини). Відповідні геометричні та конструктивні параметри розробленої машини представлено в таблиці 1.

У цій конструкції машини, за рахунок введення в кінематичний ланцюг додаткової рухомої ланки – повзуна, виключено надлишковий (пасивний) зв'язок, а також з'являється можливість варіювання міжосьовою відстанню проміжного шатуна $l_{ш(пром)}$. Досліджували, як зміна цього геометричного параметра впливає на максимальні значення реакцій у кінематичних парах машини, а також те, за якої міжосьової відстані проміжного шатуна $l_{ш(пром)}$ реакції у кінематичних парах машини будуть перевищувати попередньо визначені у роботі [10 с. 15–17] максимальні значення реакцій у кінематичних парах «базової» конструкції машини. Силове дослідження викону-

Рис. 1. Модель розробленої конструкції машини з видовженою робочою ємкістю, в якій тяжкий вал кінематично з'єднаний із повзуном

Таблиця 1

Геометричні та конструктивні параметри розробленої машини

Геометричний параметр машини	Значення коефіцієнту Δ				
	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
Діаметр робочої ємкості d_{pe}	0,318 м				
Довжина (між торцями) робочої ємкості $l_{ц}$	0,430 м	0,480 м	0,535 м	0,590 м	0,640 м
Міжосьова відстань тягового та тяжкого шатунів $l_{ш(в)}$	0,272 м				
Міжосьова відстань проміжного шатуна $l_{ш(пром)}$	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 усіх рухомих деталей машини m_D	50 кг	52 кг	53,5 кг	55,0 кг	56,2 кг
Кутова швидкість тягового вала машини $\omega_{ведч.}$	3,3 с ⁻¹ (32 об/хв)				

валосся із застосуванням САПР SolidWorks–2016. Міжосьову відстань проміжного шатуна $l_{ш(ПРОМ)}$ поступово збільшували та спостерігали за зміною реакцій у кінематичних парах машини, для кожної реакції визначали її екстремальні значення. При цьому міжосьова відстань проміжного шатуна $l_{ш(ПРОМ)}$ була виражена коефіцієнтом Δ , який раніше було запропоновано в роботі [4, с. 87] та характеризує відношення міжосьової відстані проміжного шатуна до міжосьової відстані тягового чи тяжного шатуна машини: $l_{ш(ПРОМ)} / l_{ш(В)}$. Дослідження виконувалися для конструкції машин із такими значеннями коефіцієнта Δ : 1,2; 1,4; 1,6; 1,8; 2,0.

Визначали «граничну» міжосьову відстань проміжного шатуна, подальше видовження якої призведе до такого збільшення реакцій у кінематичних парах машини, коли вони стануть перевищувати значення реакцій у кінематичних парах «базової» конструкції машини. Схематичне зображення векторів реакцій у кінематичних парах просторового шарнірного механізму розробленої конструкції машини з видовженою робочою ємкістю, в якій тяговий вал кінематично з'єднаний із додатковою рухомою ланкою – повзунком, представлено на рис. 2.

Рис. 2. Схематичне зображення реакцій у кінематичних парах просторового механізму розробленої машини з додатковою рухомою ланкою – повзунком

Усі дослідження виконувалися на холостому ході за кутової швидкості тягового вала $3,3 \text{ с}^{-1}$. Відомо [11, с. 150–200], що такі значення кутової швидкості тягового вала для цього типорозміру машини відповідатиме реалізації водоспадного режиму руху робочого масиву, за якого будуть виникати найбільші інерційні навантаження на рухомі ланки машини. Попередні результати силового дослідження «базової» конструкції машини показали [10, с. 15–17], що всі значення реакцій у кінематичних парах машини, під час її роботи на робочому ході, були пропорційно збільшені

на одну й ту ж величину відповідно до значень реакцій у кінематичних парах машини під час її роботи на холостому ході. Таким чином, подальші порівняльні дослідження розробленої конструкції машин проводили на холостому ході.

Визначали максимальні значення реакцій R у шести обертових кінематичних парах машини та одній поступальній кінематичній парі. Значення усіх реакцій були розподілені на два складники (радіальний та осьовий): R_{AA} – осьовий складник реакції в кінематичній парі «станина – тяговий вал»; R_{AR} – радіальний складник реакції в кінематичній парі «станина – тяговий вал»; R_{BA} – осьовий складник реакції в кінематичній парі «тяговий вал – тяговий шатун»; R_{BR} – радіальний складник реакції в кінематичній парі «тяговий вал – тяговий шатун»; R_{CA} – осьовий складник реакції в кінематичній парі «тяговий шатун – проміжний шатун»; R_{CR} – радіальний складник реакції в кінематичній парі «тяговий шатун – проміжний шатун»; R_{DA} – осьовий складник реакції в кінематичній парі «проміжний шатун – тяжний шатун»; R_{DR} – радіальний складник реакції в кінематичній парі «проміжний шатун – тяжний шатун»; R_{EA} – осьовий складник реакції в кінематичній парі «тяжний шатун – тяжний вал»; R_{ER} – радіальний складник реакції в кінематичній парі «тяжний шатун – тяжний вал»; R_{FA} – осьовий складник реакції в кінематичній парі «тяжний вал – повзун»; R_{FR} – радіальний складник реакції в кінематичній парі «тяжний вал – повзун»; R_G – реакція в кінематичній парі «повзун – станина».

У таблиці 2 представлено визначені за допомогою САПР SolidWorks максимальні значення реакцій у кінематичних парах машини залежно від зміни коефіцієнта Δ , а також попередньо визначені [10, с. 15–17] значення реакцій у відповідних кінематичних парах просторового механізму базової конструкції машини, що відповідає коефіцієнту $\Delta = 1$.

На основі представлених у таблиці 2 результатів досліджень, було побудовано у вигляді графіків залежності максимальних значень реакцій у кінематичних парах досліджуваного просторового механізму від зміни коефіцієнта Δ , котрі представлені на рис. 3 (радіальні складники реакцій) та рис. 4 (осьові складники реакцій).

Таким чином, у розробленій конструкції машини (за коефіцієнта $\Delta = 1,2$) максимальні значення реакцій в усіх кінематичних парах будуть менші за максимальні значення реакцій у кінематичних парах «базової» конструкції машини. За умов збільшення значення коефіцієнта Δ збіль-

Максимальні значення реакцій в кінематичних парах машини

		Коефіцієнт Δ , що характеризує відношення $l_{ш(пром)} / l_{ш(в)}$					
		1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
Значення реакцій в кінематичних парах машини, при її роботі на холостому ході	R_{AA} , [Н]	88	80	83	85	88	140
	R_{FA} , [Н]	68	67	88	90	97	118
	R_{AR} , [Н]	405	295	450	509	602	717
	R_{FR} , [Н]	608	150	390	418	500	602
	R_{BA} , [Н]	198	190	400	478	577	700
	R_{EA} , [Н]	124	125	298	346	418	515
	R_{BR} , [Н]	294	278	285	280	307	378
	R_{ER} , [Н]	545	78	292	298	309	395
	R_{CA} , [Н]	95	30	158	190	210	263
	R_{DA} , [Н]	194	62	158	144	120	202
	R_{CR} , [Н]	325	178	283	398	550	780
	R_{DR} , [Н]	342	135	308	409	550	770
	R_G , [Н]	-----	160	480	505	580	700

Рис. 3. Залежність максимальних значень радіальних складників реакцій у кінематичних парах просторового механізму від зміни коефіцієнта Δ

шувалися й максимальні значення реакцій в усіх кінематичних парах. Однак характер зміни осьових та радіальних складників максимальних значень реакцій у кінематичних парах відрізнявся. Максимальні значення осьових складників реакцій збільшувалися лінійно з приростом коефіцієнта Δ , тоді як радіальні максимальні значення радіальних складників реакцій (за коефіцієнта $\Delta=1,2$) різко зменшилися, після чого відбулося їх поступове лінійне збільшення до коефіцієнта $\Delta=2,0$. За коефіцієнта $\Delta=1,6$ спостерігалось значне збільшення максимальних значень деяких реакцій (порівняно з максимальними значеннями

реакцій у кінематичних парах «базової» конструкції машини). Таким чином, максимальні значення реакцій R_{BA} , R_{EA} , R_{CA} та R_G збільшилися у більше ніж двічі. Максимальні значення реакцій R_{FA} та R_{AR} перевищили аналогічні максимальні значення реакцій у кінематичних парах «базової» конструкції машини на незначну величину.

Висновки. Виконано силові дослідження просторового статично визначеного семиланкового механізму машини для обробки деталей із видовженою робочою ємкістю, в якій тяжкий вал кінематично з'єднаний із додатковою рухомою ланкою – повзуном за допомогою САПР SolidWorks,

Рис. 4. Залежність максимальних значень осьових складників реакцій у кінематичних парах просторового механізму від зміни коефіцієнта Δ

зокрема визначено реакції в усіх обертових та поступальних кінематичних парах.

Досліджено вплив зміни коефіцієнта Δ , який характеризує відношення міжосьової відстані проміжного шатуна (робочої ємкості) до міжосьової відстані тягового шатуна (тяжкого шатуна) машини на максимальні значення реакцій у кінематичних парах машини.

Установлено, що досліджувану конструкцію машини раціонально використовувати в діапазоні зміни коефіцієнта $\Delta = [1,0 - 1,6]$. За коефіцієнта Δ , що перевищує 1,6, спостерігалася значне збільшення максимальних значень деяких реакцій (порівняно з максимальними значеннями реакцій у кінематичних парах «базової» конструкції машини).

Список літератури:

1. Willy A. Bachofen (WAB): сайт Willy A. Bachofen AG, Maschinenfabrik. – 2019. URL: <https://www.wab-group.com/en/> (дата звернення: 20.11.2020);
2. Решетов Л.Н. Конструирование рациональных механизмов. Изд. 2-е, переработ. и доп. Москва : Машиностроение, 1972. 256 с;
3. Chervonyj I., Listopad D., Gab A., Malyshev V., Neascu E.I., Donath C., Consratin V., Popescu A.-M. On thermodynamic possibility of retort steel components interaction with titanium chlorides and oxygen during kroll process. *Rev. Chim (Bucharest)*. 2019. Vol. 70, No 6. P. 1924–1927;
4. Залюбовський М.Г. Панасюк І.В. Малишев В.В., Машини зі складним рухом робочих ємкостей для обробки полімерних деталей: монографія. Київ: Університет «Україна», 2018. 228 с;
5. 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 capacity. *Bulletin of the Kyiv National University of Technologies and Design*. 2019. № 2. P. 24–32;
6. 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;
7. Решетов Л.Н. Конструирование рациональных механизмов. Изд. 2-е, переработ. и доп. Москва : Машиностроение, 1972. 256 с;
8. Antonyuk E. Ya., Sakhamov V. A., Koval N. I. Dynamic system of an engine with spatially rocking links: a mathematical model. *International Applied Mechanics*, 2010, 46, No. 9, P. 1039–1049.
9. 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. No. 178, issue 4, P. 69–75;

10. 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.

11. Бурмістенков О.П. Виробництво литих деталей та виробів з полімерних матеріалів у взуттєвій та шкіргалантерейній промисловості: монографія / Під заг. ред. В.П. Коновала. Хмельницький : ХНУ, 2007. 255 с.

**Zalyubovskyi M.G., Panasyuk I.V., Malyshev V.V. STUDY OF REACTIONS
IN KINEMATIC PAIRS OF STATICALLY DETERMINED SPATIAL MECHANISM
OF A MACHINE FOR PROCESSING DETAILS**

A promising type of equipment used for the implementation of processes for mixing bulk fine substances, as well as shredding technological operations for processing small metal and plastic parts (grinding and polishing products with free abrasive, separating parts from castings, rounding sharp edges, etc.) are machines with working capacity performs complex spatial motion. With the use of such machines significantly increases the productivity of technological operations while reducing energy consumption. With the help of the SolidWorks–2016 computer-aided design system, 3D modeling and further force study of one of the variants of a statically defined spatial seven-link mechanism of a machine for processing parts with elongated working capacity, in which the driven shaft is kinematically connected with an additional movable link – slider. During the force study, the reactions in all rotating and translational kinematic pairs of the machine were determined, the influence of the change of the axial distance of the working capacity on the increase of the maximum values of reactions in the kinematic pairs of the machine was investigated. It was found that the nature of changes in the maximum values of radial and axial components of reactions in each kinematic pair of the spatial mechanism depends on the value of the coefficient Δ , which characterizes the ratio of axial length of working capacity to axial length of master and slave connecting rods. The maximum values of axial reactions, almost with a linear dependence, increased with increasing coefficient Δ . For all radial components of the reactions, their decrease is observed at the coefficient $\Delta = 1.2$ and increase with linear dependence with a subsequent increase of the coefficient Δ . The obtained research results can be used by relevant machine-building enterprises at the stage of designing galvanizing equipment with tanks performing complex spatial motion.

Key words: rotational kinematic pair; reactions, working capacity, wheelbase.