

УДК 687.053.144

МАНОЙЛЕНКО О. П., ДВОРЖАК В. М.,
ГУДИМ А. Г., ШКВИРА В. В., ГРИЦАЙ І. В.

Київський національний університет технологій та дизайну, Україна

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕНЬ ТЕНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ НА ПРИКЛАДІ СИЛОВОГО РОЗРАХУНКУ НИТКОПРИТЯГАЧІВ ШВЕЙНИХ МАШИН ЧОВНИКОВОГО СТІБКА

Мета роботи полягає в порівняльному аналізі класичних методів динаміки при дослідженні важільних механізмів із застосуванням прикладних CAD/CAE-програм та методів твердотільного комп'ютерного 3D-моделювання, встановлення достовірності результатів дослідження та доцільності застосування комп'ютерного експерименту в інженерному аналізі.

Методика дослідження базується на апараті векторної алгебри; аналітичних методах кінестатичного розрахунку плоских шарнірно-важільних механізмів; методах твердотільного комп'ютерного 3D-моделювання із застосуванням CAD/CAE-систем.

Результати: отримані діаграми максимальних значень реакцій в кінематичних парах (далі – КП) механізму ниткопритягача в залежності від частоти обертання головного вала та визначена відносна похибка значень максимальних реакцій у КП механізму, які отримані аналітично та методом комп'ютерного твердотільного імітаційного 3D-моделювання.

Наукова новизна: виконано порівняння методів кінестатичного розрахунку та комп'ютерного імітаційного моделювання шарнірно-важільних механізмів, визначено відносну точності отриманих результатів значень реакцій в КП незалежними методами та доведено актуальність застосування комп'ютерного експерименту в інженерному аналізі із застосуванням CAD/CAE-систем.

Практична значимість роботи полягає у використанні отриманих результатів дослідження для модернізації або розробленні нових механізмів швейних машин човникового стібка та використанні віртуальних твердотільних 3D-моделей в інженерному аналізі при кінематичних та силових розрахунках важільних механізмів.

Ключові слова: комп'ютерне імітаційне моделювання; віртуальна модель; комп'ютерний експеримент; швейна машина; механізм ниткопритягача; кінестатичний аналіз; реакції в кінематичних парах.

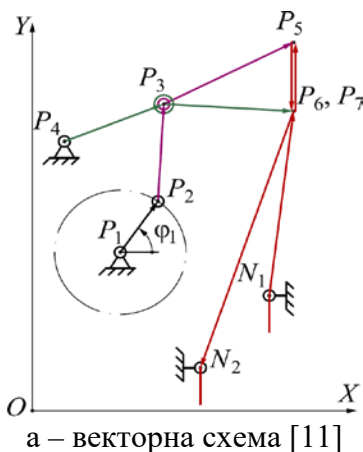
Вступ. Ґрунтовне знання кінематичних та динамічних характеристик цільових механізмів лежить в основі проєктування технологічних машин з раціональними параметрами, які впливають на їхню надійність та довговічність роботи. Для дослідження кінематики та динаміки шарнірно-важільних механізмів технологічних машин загалом використовують класичні аналітичні методи, які мають високу точність результатів та змогу автоматизувати розрахунки із залученням сучасних прикладних комп'ютерних програм. Ці методи засновані на отриманні формальних математичних виразів, що описують функції положення, у вигляді функцій кутів поворотів рухомих ланок або у вигляді функцій переміщень характерних точок механізму. У теперішній час активної інформатизації постійно вдосконалюються прикладні програмні продукти, які широко використовують для дослідження механізмів технологічних машин – це Mathcad, SolidWorks, Creo, Maple, MATLAB тощо [1–5]. Залучення інформаційних технологій пояснюється вимогами до скорочення термінів проєктування та дослідження функціонально-досконалих механізмів, підвищення ефективності роботи конструкторів. В цей же час широке застосування комп'ютерних твердотільних 3D-моделей механізмів машин при проведенні комп'ютерних експериментів та інженерних дослідженнях дозволяє гнучкіше підходити до розв'язування різного роду задач оптимізації та скоротити час розрахунків. Отримані результати дослідження у вигляді об'ємних картин (3D-епюр напружень та

деформацій), графіків кінематичних та силових параметрів (швидкостей, прискорень, реакцій, сил тертя, приведених моментів сил тощо) дозволяють встановити причино-наслідковий зв'язок між конструктивними параметрами ланок механізму, зовнішнім навантаженням, кінематичними характеристиками та внутрішнім навантаженням в ланках механізму. Разом з тим є потреба в проведенні експертної оцінки отриманих результатів дослідження з метою підтвердження їхньої точності при комплексному аналізуванні цільових механізмів з використанням прикладних комп'ютерних програмних продуктів та методів дослідження [6–8]. При цьому актуальним є питання щодо достовірності отриманих результатів при використанні комп'ютерних віртуальних твердотільних моделей для інженерного аналізу.

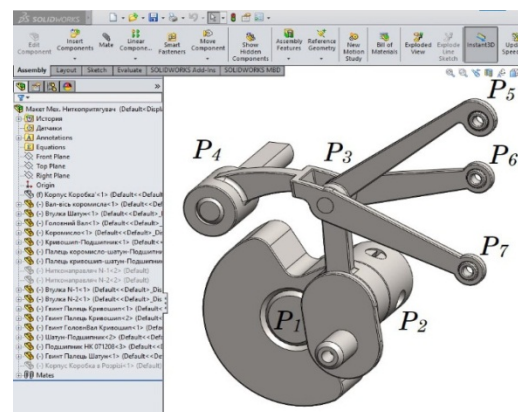
Постановка задачі. Завданням цього дослідження є порівняння результатів силового аналізу механізму, отриманих аналітичним методом на основі апарату векторної алгебри із використанням програмного продукту Mathcad, з аналогічними результатами комп'ютерного імітаційного 3D-моделювання в системі SolidWorks. Кінетостатичний аналіз шарнірно-важільного механізму ниткопритягача [9] проводився аналітичним методом з використанням математичного апарату Mathcad та методики, застосованої в роботах [10, 11]. З метою забезпечення однакових вхідних даних при розрахунках, значення маса-інерційних параметрів (маса, положення центра мас, момент інерції) ланок механізму прийнято з їх 3D-моделей. При розрахунку не враховано сили тертя та навантаження, яке виникає при роботі механізму з ниткою. Ці припущення дозволили зменшити трудомісткість та час розрахунків. Визначення реакцій в КП механізму методом комп'ютерного 3D-моделювання виконано за методикою [8, 12–14]. Точність та доцільності використання методу комп'ютерного 3D-моделювання при проведенні силового аналізу механізму встановлено шляхом порівняння значень реакцій, отриманих різними методами.

Результати досліджень. Для дослідження був обраний функціонально-досконалий механізм ниткопритягача швейної машини човникового стібка (рис. 1), який розроблений авторами [9]. Для визначення максимальних абсолютних значень сил взаємодії ланок (реакцій) у місцях їх стикання (кінематичних парах) виконуємо кінетостатичний аналіз механізму при ряді значень частот обертання ведучої ланки механізму $n = 500, 1000, \dots, 5500$ об/хв.

Кінетостатичний аналіз механізму аналітичним методом виконуємо на основі результатів геометричного синтезу, що представлені в роботі [9] та кінематичного розрахунку, послідовність виконання якого представлена в роботах [10, 11]. Для визначення максимальних значень реакцій у КП механізму (рис. 1) для кожного окремого значення частоти обертання ведучої ланки, виконуємо силовий аналіз механізму згідно з алгоритмом, представленим у роботах [15, 16].



а – векторна схема [11]



б – твердотільна 3D-модель

Рис. 1. Механізм ниткопритягача

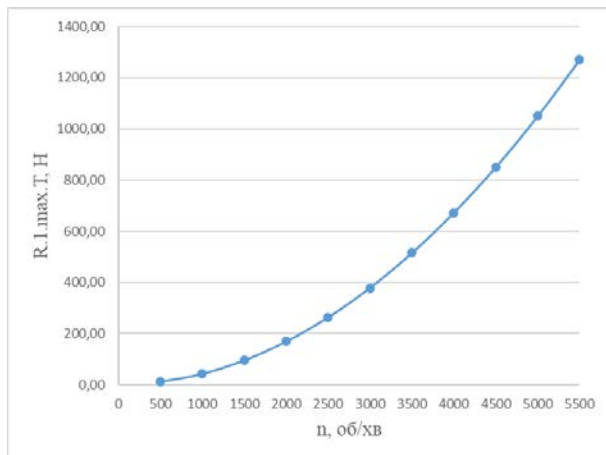
Визначені максимальні значення реакцій в КП наведені в табл. 1.

Таблиця 1

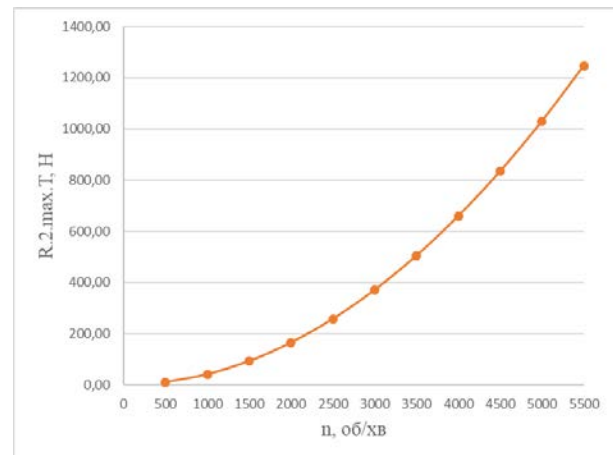
Максимальні значення реакцій в кінематичних парах, отримані з аналітичного розрахунку, залежно від частоти обертання головного вала швейної машини

n, об/хв	R _{1max} , Н	R _{2max} , Н	R _{3max} , Н	R _{4max} , Н
500	11,68	10,26	9,94	10,00
1000	43,13	41,16	40,48	41,33
1500	95,56	92,65	91,38	93,55
2000	168,97	164,75	162,63	166,67
2500	263,36	257,44	254,25	260,67
3000	378,72	370,74	366,22	375,56
3500	515,06	504,63	498,56	511,34
4000	672,37	659,13	651,25	668,01
4500	850,66	834,22	824,30	845,57
5000	1049,92	1029,91	1017,71	1044,02
5500	1270,15	1246,20	1231,48	1263,36

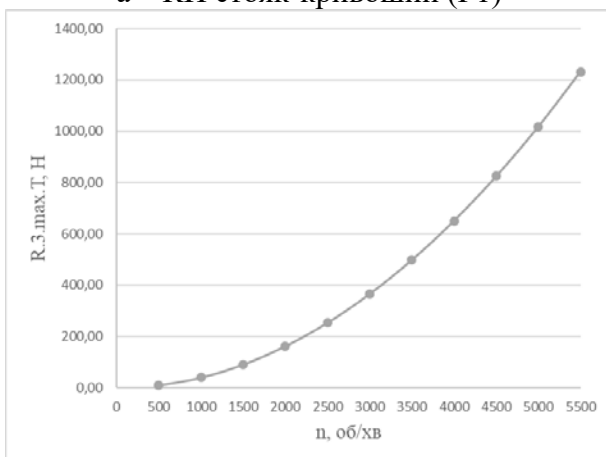
Графіки значень максимальних реакцій у КП механізму за отриманими значеннями наведені на рис. 2.



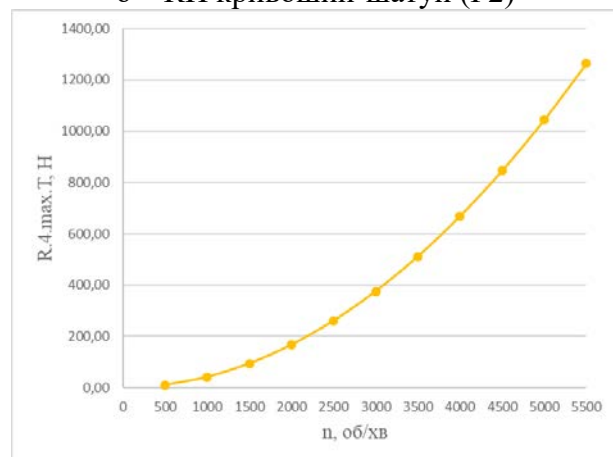
а – КП стояк-кривошип (P1)



б – КП кривошип-шатун (P2)



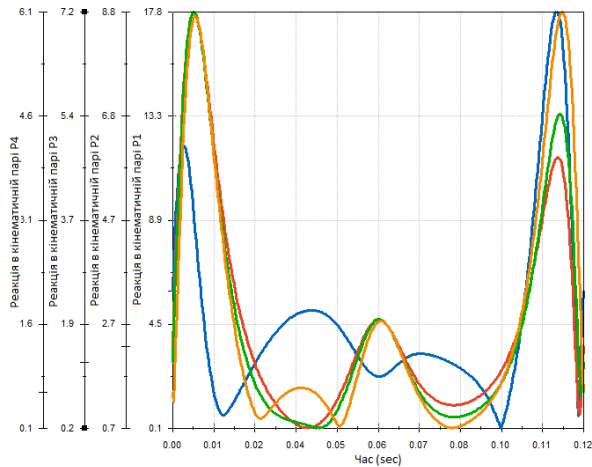
в – КП шатун-коромисло (P3)



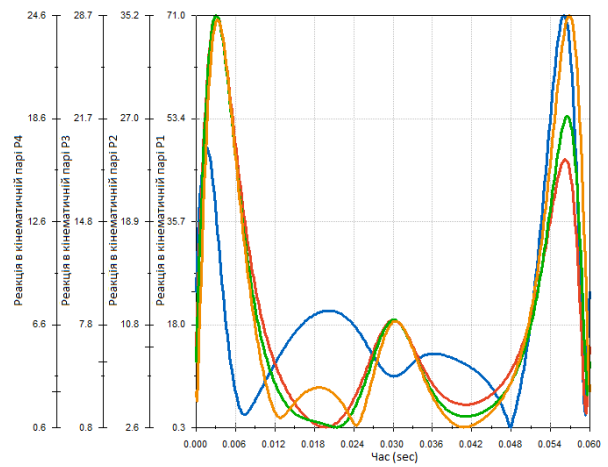
г – КП коромисло-стояк (P4)

Рис. 2. Графіки максимальних реакцій у КП механізму, отриманих з аналітичного розрахунку, залежно від частоти обертання головного вала швейної машини

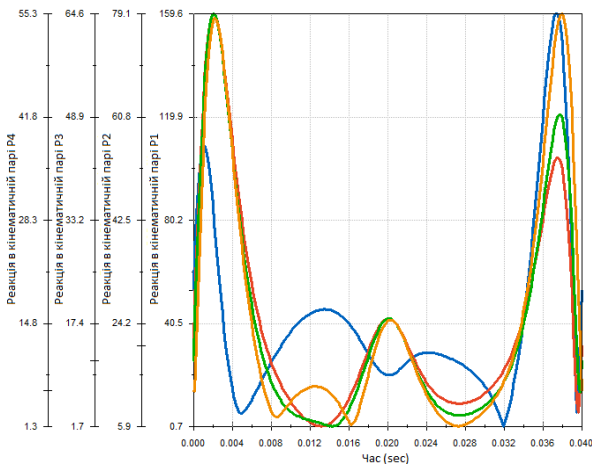
Для визначення максимальних абсолютних значень реакцій у КП механізму методом комп'ютерного 3D-моделювання [8] виконуємо силовий аналіз механізму із застосуванням програми SolidWorks Motion [12–14], яка дозволяє визначати абсолютні значення реакцій на основі 3D-моделі функціонально-досконалого механізму ниткопритягача швейної машини (рис. 16). Визначені значення реакцій в КП представлені на графіках (рис. 3, 4).



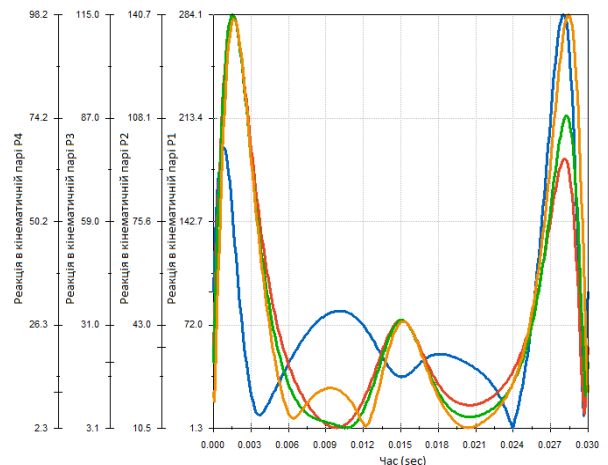
а – при $n = 500$ об/хв



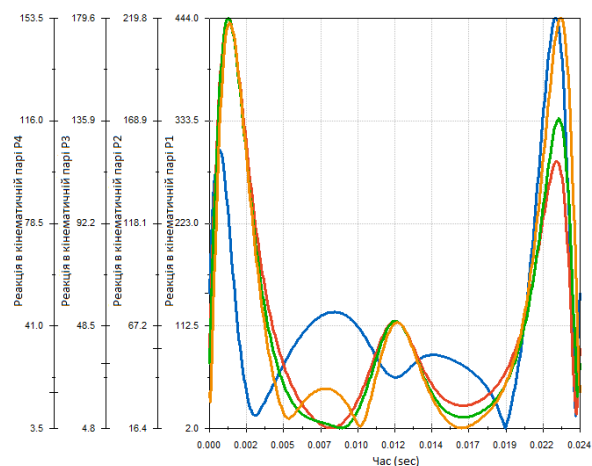
б – при 1000 об/хв



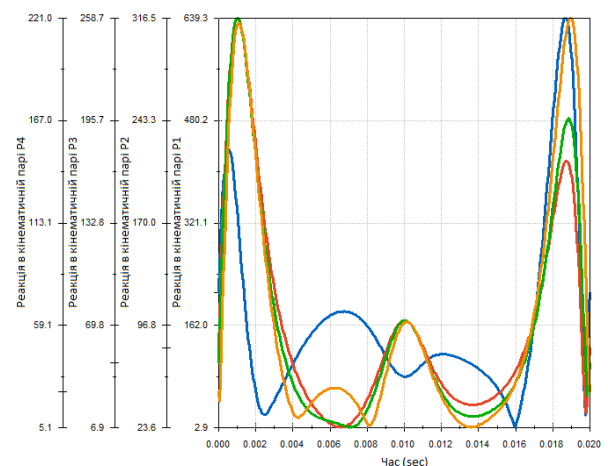
в – при $n = 1500$ об/хв



г – при 2000 об/хв

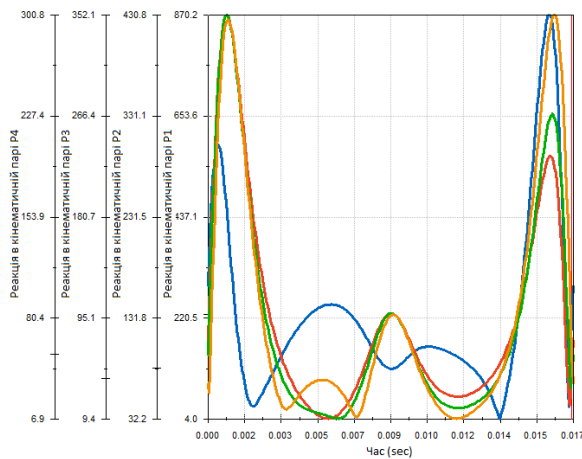


д – при $n = 2500$ об/хв

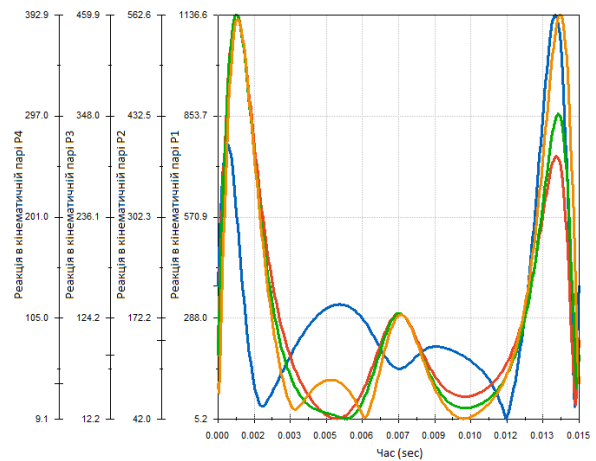


е – при 3000 об/хв

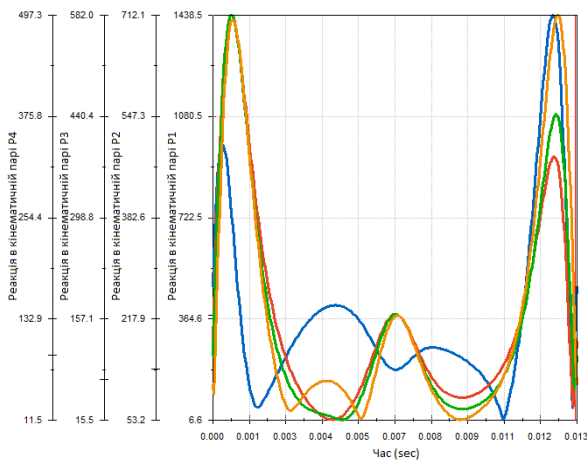
Рис. 3. Графіки реакцій в КП P1-P4 в залежності від частоти обертання ведучої ланки



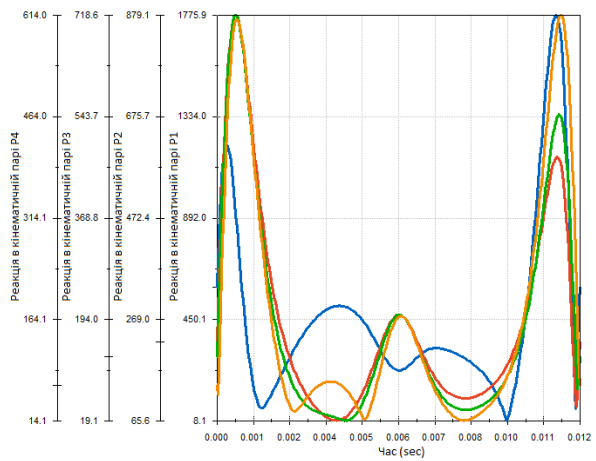
а – при $n = 3500$ об/хв



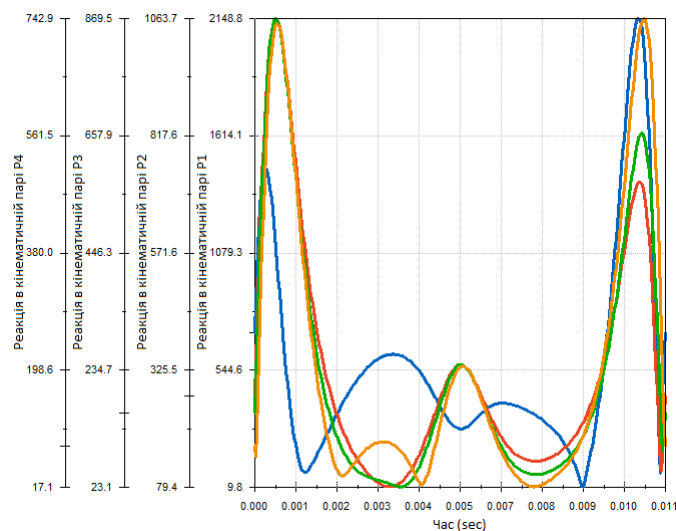
б – при 4000 об/хв



в – при $n = 4500$ об/хв



г – при 5000 об/хв



д – при $n = 5500$ об/хв

Рис. 4. Графіки реакцій в КП P1-P4 в залежності від частоти обертання ведучої ланки

На рис. 5 представлені графіки значень максимальних реакцій в КП механізму, отриманих імітаційним комп'ютерним 3D-моделюванням в SolidWorks, залежно від частоти обертання головного вала швейної машини (рис. 5).

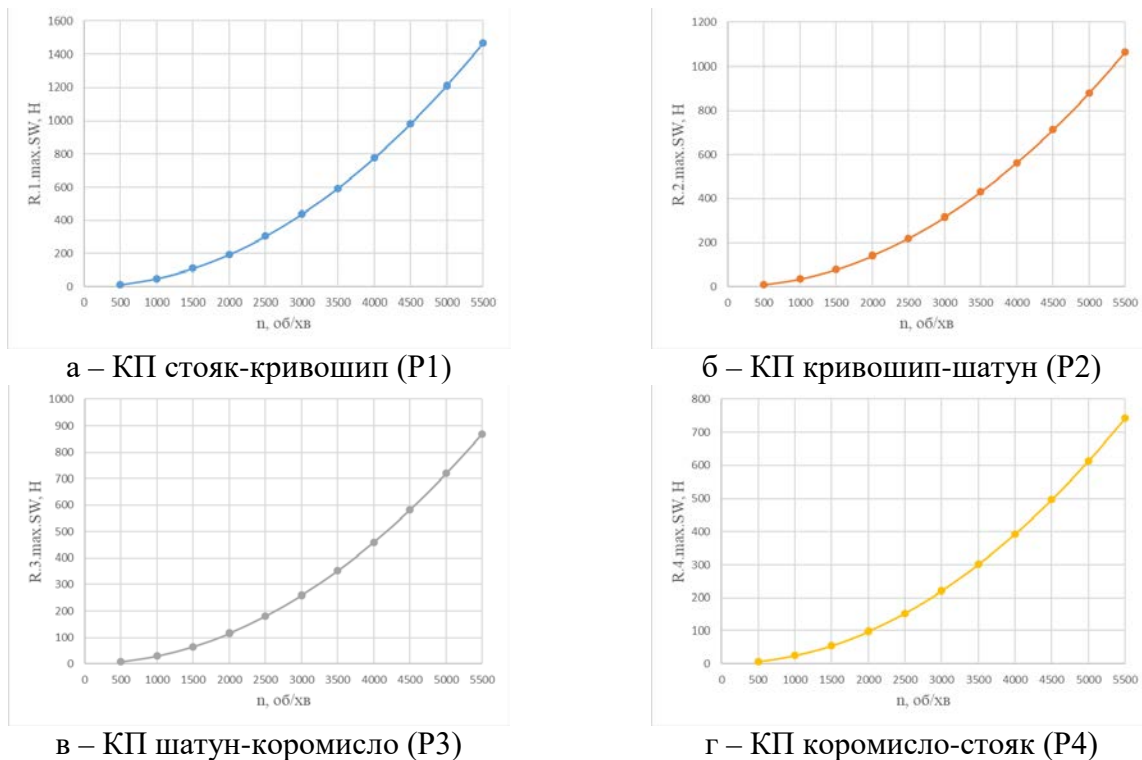


Рис. 5. Графіки максимальних реакцій у КП механізму, отриманих графічним моделюванням в SolidWorks, залежно від частоти обертання головного вала швейної машини

Експертну перевірку робимо за максимальними абсолютними значеннями реакцій в кінематичних парах, отриманими для ряду значень частот обертання ведучої ланки механізму: $n = 500, 1000, \dots, 5500$ об/хв. Для співставлення отриманих результатів визначена відносна розбіжність максимальних абсолютних значень реакцій у КП механізму та побудовані графіки розбіжностей залежно від частот обертання головного вала (рис. 6):

$$E_i = \frac{R_i^{MC} - R_i^{SW}}{R_i^{MC}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

де R_i^{MC} та R_i^{SW} – відповідно значення реакцій у КП, отриманих з розрахунку в програмах Mathcad та SolidWorks.

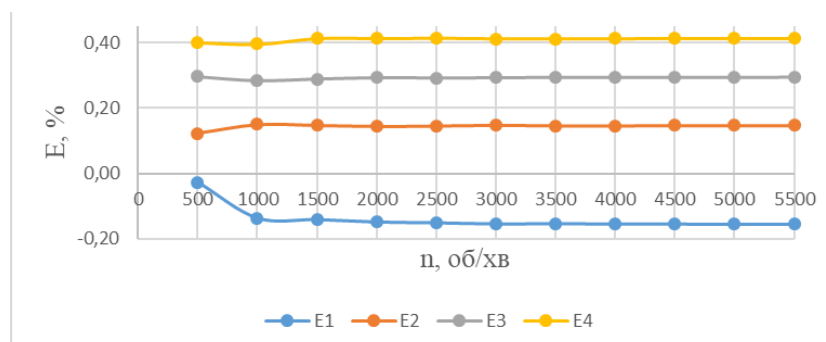


Рис. 6. Графіки відносної похибки значень максимальних реакцій у КП механізму, отриманих з аналітичного розрахунку та імітаційного 3D моделювання в SolidWorks залежно від частоти обертання головного вала швейної машини

Висновки. В результаті проведеного комплексного кінетостатичного аналізу механізму ниткопритягача швейної машини двома незалежними методами: аналітичним та методом комп'ютерного імітаційного 3D-моделювання, було отримано підтвердження, що силовий аналіз на основі 3D-моделювання в програмі SolidWorks виконаний з точністю не менше ніж 95%, що є загальноприйнятим для інженерних розрахунків. Це одночасно підтверджує те, що отримані силові характеристики при комп'ютерному віртуальному експерименті відповідають математичним моделям, що описують функції реакцій в КП механізму та можуть бути рівнозначно застосовані для дослідження важливих механізмів технологічних машин.

References

1. Mathcad Prime. URL: <http://mathcad.com.ua/> [in Russian].
2. Creo(PTC). URL: <https://www.ptc.com/>
3. Dassault Systèmes SolidWorks Corporation. URL: <https://www.solidworks.com/>
4. Maplesoft. URL: <https://www.maplesoft.com/products/Maple/>
5. The MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>.
6. Koshel', S. O., Dvorzhak, V. M., Koshel', G. V., Zalyubovskiy, M. G. (2022). Kinematic Analysis of Complex Planar Mechanisms of Higher Classes. *International Applied Mechanics* this link is disabled, 58(1): 111–122. <https://doi.org/10.1007/s10778-022-01138-1>.
7. Horobets, V. A., Manoilenko, O. P., Dvorzhak, V. M. (2013). Doslidzhennia vplyvu znachen parametriv napriamnoho mekhanizmu holky na yoho tekhnolohichnist [Study of the influence of the parameter values of the needle guide mechanism on its manufacturability]. *Khmelnyskiy: Bulletin of the KhNU*, 3: 56–62. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vchnu_tekh_2013_3_13 [in Ukrainian].
8. Vorokh, D. M., Chyzh, P. R., Yevdokymenko, A. V., Marchenko, V. A., Fedko, I. M., Manoilenko, O. P., Plieshko, S. A. (2020). Dynamic analysis of the movement mechanism of sewing machine materials”, materialy I Vseukrainskoi konferentsii zdobuvachiv vyshchoi osvity i molodykh uchenykh [Proceedings of the All-Ukrainian Conference of Graduates of Higher Education and Young Scientists]. *Innovatyka v osviti, nauksi ta biznesi: vyklyky ta mozhyvosti – Innovation in education, science and business: challenges and opportunities* (Kyiv, Ukraine, 17 November), P. 201–207 [in Ukrainian].
9. Hudym, A. H., Dvorzhak, V. M. (2021). Metrychnyi syntez funktsionalno-doskonaloho mekhanizmu nytkoprytiahacha shveinoi mashyny [Metric synthesis of the functionally perfect mechanism of the thread attractor of the sewing machine]. *Proceedings from Mechatronic systems: innovations and engineering: V Mizhnardna naukovo-praktychna konferenciia* (4 lystopada 2021 r., m.

Література

1. Mathcad Prime. URL: <http://mathcad.com.ua/>
2. Creo(PTC). URL: <https://www.ptc.com/>
3. Dassault Systèmes SolidWorks Corporation. URL: <https://www.solidworks.com/>
4. Maplesoft. URL: <https://www.maplesoft.com/products/Maple/>
5. The MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>.
6. Koshel' S. O., Dvorzhak V. M., Koshel' G. V., Zalyubovskiy M. G. Kinematic Analysis of Complex Planar Mechanismms of Higher Classes. *International Applied Mechanics* this link is disabled. 2022. № 58(1). P. 111–122. <https://doi.org/10.1007/s10778-022-01138-1>
7. Горобець В. А., Манойленко О. П., Дворжак В. М. Дослідження впливу значень параметрів напрямного механізму голки на його технологічність. *Вісник ХНУ. Серія: Технічні науки*. 2013. №3. С. 56–62. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vchnu_tekh_2013_3_13.
8. Ворох Д. М., Чиж П. Р., Євдокименко А. В., Марченко В. А., Федько І. М., Манойленко О. П., Плешко С. А. Динамічний аналіз механізму переміщення матеріалів швейної машини. *Інноватика в освіті, науці та бізнесі: виклики та можливості: матеріали I Всеукраїнської конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених* (17 листопада 2020 р., м. Київ). Київ: КНУТД, 2020. С. 201–207.
9. Гудим А. Г., Дворжак В. М. Метричний синтез функціонально-досконалого механізму ниткопритягача швейної машини. *Мехатронні системи: інновації та інжиніринг: тези доповідей V-ої Міжнар. наук.-практ. конф.* (4 листопада 2021 р., м. Київ). Київ: КНУТД, 2021. С. 36–37.

Kyiv) – 5nd International Scientific and Practical Conference, Kyiv, P. 36–37 [in Ukrainian].

10. Dvorzhak, V. M., Pysarenko, D. D., Shevel, S. O., Karpenko, R. V., Dykusal, V. I., Petrivskyi, M. O. (2021). Doslidzhennia sharnirno-vazhilnoho mekhanizmu nytkoprytiahacha shveinoi mashyny [Research of the hinge-lever mechanism of the thread puller of the sewing machine]. *Tekhnolohiyi ta dizayn*, 1 (38). URL: https://er.knutd.edu.ua/bitstream/123456789/17363/1/td_2021_N1_09.pdf [in Ukrainian].

11. Pysarenko, D. D., Dvorzhak, V. M. (2020). Doslidzhennia mekhanizmu nytkoprytiahacha shveinykh mashyn [Research of the mechanism of a thread attractor of sewing machines]. *Proceedings from Mechatronic systems: innovations and engineering: IV Mizhnardna naukovopraktychna konferenciia (22 zhovtnia 2020 r., m. Kyiv) – 4nd International Scientific and Practical Conference*, Kyiv, p. 54 [in Ukrainian].

12. What's new SolidWorks 2021. URL: <https://bayanbox.ir/view/6803509840423761839/What-is-new-in-Solidwoks-2021.pdf>.

13. Tickoo, S. (2017). *SolidWorks 2017 for Designers*. CADCIM Technologies, USA, 223 p.

14. Verma, G., Weber, M., (2017). *SolidWorks 2017 Black Book, CADCAMCAE Works*, USA, 518 p.

15. Dvorzhak, V. M. (2017). Analitichne doslidzhennia dynamiky tyповykh dvokryvoshypnykh mekhanizmiv tekhnolohichnykh mashyn lehkoї promyslovosti [Analytical study of dynamics of typical two-crank mechanisms of technological light industry machines]. *Bulletin of the KNUVD*, 5: 54–64 [in Ukrainian].

16. Dvorzhak, V. M. (2019). Sylovyi analiz mekhanizmu kolyvalnoho rukhu vushkovykh holok osnovoviazalnoi mashyny [Force analysis of the mechanism of oscillating movement of the eyelets of the basic knitting machine]. *Bulletin of the KNUVD*, 3 (134): 26–35 [in Ukrainian].

10. Дворжак В. М., Писаренко Д. Д., Шевель С. О., Карпенко Р. В., Дикусар В. І., Петрівський М. О. Дослідження шарнірно-важільного механізму ниткопритягача швейної машини. *Технології та дизайн*. 2021. № 1 (38). URL: https://er.knutd.edu.ua/bitstream/123456789/17363/1/td_2021_N1_09.pdf.

11. Писаренко Д. Д., Дворжак В. М. Дослідження механізму ниткопритягача швейних машин. *Мехатронні системи: інновації та інжиніринг: тези доповідей IV-ої Міжнар. наук.-практ. конф. (22 жовтня 2020 р., м. Київ)*. Київ: КНУТД, 2020. С. 54.

12. What's new SolidWorks 2021. URL: <https://bayanbox.ir/view/6803509840423761839/What-is-new-in-Solidwoks-2021.pdf>.

13. Tickoo S. *SolidWorks 2017 for Designers*. CADCIM Technologies, 2017. 223 p.

14. Verma G., Weber M. *SolidWorks 2017 Black Book. CADCAMCAE Works*, 2017. 518 p.

15. Дворжак В. М. Аналітичне дослідження динаміки типових двокривошипних механізмів технологічних машин легкої промисловості. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Технічні науки*. 2017. № 5. С. 54–64.

16. Дворжак В. М. Силовий аналіз механізму коливального руху вушкових голок основов'язальної машини. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Технічні науки*. 2019. № 3 (134). С. 26–35.

MANOILENKO OLEKSANDR

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor of Department of Mechanical
Engineering, Kyiv National University
of Technologies and Design, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-5670-4977>
Scopus Author ID: 57194469280
E-mail: manoilenko.op@knutd.edu.ua

HUDYM ANDRII

Postgraduate, Department of Mechanical Engineering,
Kyiv National University of Technologies
and Design, Ukraine
E-mail: Andrew.Gennadiievich@gmail.com

DVORZHAK VOLODYMYR

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor of Department of Mechanical
Engineering, Kyiv National University
of Technologies and Design, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-1693-9106>
Scopus Author ID: 57814664800
Researcher ID: P-5907-2018
E-mail: dvorzhak.vm@knutd.edu.ua

SHKVYRA VOLODYMYR

Master, Department of Mechanical Engineering,
Kyiv National University of Technologies
and Design, Ukraine
E-mail: Vova231081@gmail.com

HRYTSAI IHOR

Master, Department of Mechanical Engineering,
Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine
E-mail: 8005301@ukr.net

**MANOILENKO O. P., DVORZHAK V. M., HUDYM A. H.,
SHKVYRA V. V., HRYTSAI I. V.**

Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine

**COMPARATIVE ANALYSIS OF TECHNOLOGICAL EQUIPMENT RESEARCH
METHODS ON THE EXAMPLE OF FORCE CALCULATION OF THREAD
TAKE-UP LEVERS OF LOCKSTITCH SEWING MACHINES**

Purpose of the work consists in a comparative analysis of classical methods of dynamics when researching lever mechanisms using applied CAD/CAE programs and methods of solid-state computer 3D modeling, establishing the reliability of the research results and the feasibility of using a computer experiment in engineering analysis.

Methodology of research is based on the apparatus of vector algebra; analytical methods of kinetostatic calculation of flat hinge-lever mechanisms; methods of solid-state computer 3D modeling using CAD/CAE systems.

Findings: diagrams of the maximum values of reactions in kinematic pairs (KP) of the thread take-up lever mechanism depending on the rotation frequency of the main shaft were obtained, and the relative error of the values of the maximum reactions in the KP of the mechanism, which were obtained analytically and by the method of computer solid-state simulation 3D modeling, was determined.

Originality consists in the comparison of the methods of kinetostatic calculation and computer simulation modeling of hinge-lever mechanisms, the relative accuracy of the obtained results of the reaction values in the KP was determined by independent methods, and the relevance of the use of a computer experiment in engineering analysis with the use of CAD/CAE systems was proven.

Practical value of the work consists in the use of the obtained research results for the modernization or development of new lockstitch sewing machine mechanisms and the feasibility of using virtual solid-state 3D models in engineering analysis for kinematic and force calculations of lever mechanisms.

Keywords: computer simulation; virtual model; computer experiment; sewing machine; thread take-up lever mechanism; kinetostatic analysis; reactions in kinematic pairs.