

**МАРЧЕНКО МАКСИМ**

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-8645-3013>e-mail: [max@solidworks.net.ua](mailto:max@solidworks.net.ua)**ХАРЖЕВСЬКИЙ В'ЯЧЕСЛАВ**

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0003-4816-2781>e-mail: [kharzhevskiy@khmnu.edu.ua](mailto:kharzhevskiy@khmnu.edu.ua)**ТКАЧУК ВІТАЛІЙ**

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0003-0640-2740>e-mail: [tkachuk.v.p@gmail.com](mailto:tkachuk.v.p@gmail.com)**ГОРЯЩЕНКО СЕРГІЙ**

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0001-6623-2523>e-mail: [tn7@ukr.net](mailto:tn7@ukr.net)

## ВИКОРИСТАННЯ СИСТЕМИ ІНЖЕНЕРНОГО АНАЛІЗУ SOLIDWORKS MOTION ДЛЯ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ КІНЕМАТИКИ ТА ДИНАМІКИ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

В роботі розглядаються питання інженерного аналізу технічних систем засобами комп'ютерного моделювання, зокрема розрахунок кінематичних та динамічних характеристик механізмів та машин з використання системи інженерного аналізу SOLIDWORKS Motion, що дозволяє проводити чисельні експерименти з метою перевірки працездатності механізмів та машин, визначення їх характеристик, в тому числі з метою подальшої оптимізації за різними критеріями. В роботі показано розрахунки різноманітних механізмів на прикладах, що використовуються в навчальному процесі в курсі «Теорія механізмів та машин», які також можуть успішно використовуватись в процесі інженерного проектування на виробництві, та включають в себе приклади кінематичного та динамічного дослідження різноманітних механізмів.

Ключові слова: кінематика, динамічний аналіз, теорія механізмів та машин, комп'ютерне моделювання, роботи-маніпулятори.

MARCHENKO MAKSYM, KHARZHEVSKYI VIACHESLAV, TKACHUK VITALII, HORIASHCENKO SERHIY  
Khmelnitskyi National University

## THE USAGE OF COMPUTER-AIDED ENGINEERING SYSTEM "SOLIDWORKS MOTION" TO SOLVE THE PROBLEMS OF KINEMATICS AND DYNAMICS OF TECHNICAL SYSTEMS

The paper is dedicated to the problems of engineering analysis of technical systems by means of computer modeling, in particular the calculation of kinematic and dynamic characteristics of mechanisms and machines using the Computer-Aided Engineering system – SOLIDWORKS Motion, that allows to conduct numerical experiments to check the working capacity of mechanisms and machines, determine their main kinematical and dynamical characteristics, including for the purpose of further optimization according to various criteria. The paper shows results of the performed calculations of various types of mechanisms using examples used in the academic process within the course "Theory of Mechanisms and Machines", which can be also successfully used within the design process, and includes examples of kinematic and dynamic analysis of linkage mechanisms, cam mechanisms, gear trains. In particular, the paper includes the simulation of the work process of the robot-manipulator using SOLIDWORKS Motion.

It is shown that the usage of modern Computer-Aided Engineering systems (like SOLIDWORKS Motion or similar) enables to simplify the design process, shorten the design time and give an ability to carry out multi-parametric optimization procedures using different criteria, such as displacement values, velocities, accelerations, the values of reaction forces, overall dimensions etc. Besides, the usage of CAE-technologies enables to transform the academic process and makes it much more interesting for the students, who can use such technologies in their professional work in the future and become more competitive in the job market.

Key words: kinematics, dynamic analysis, theory of mechanisms and machines, computer modeling, manipulator robots.

### Постановка проблеми

Однією з основних складових економіки промислово розвинутої країни є машинобудування. У свою чергу, ступінь розвитку цієї галузі залежить від досконалості (продуктивності, точності, надійності, екологічності тощо) новостворених машин. Створити досконалу конструкцію машини неможливо без ґрунтовних знань властивостей її структури, принципів конструювання та оптимізації параметрів, технології виготовлення окремих її деталей та вузлів. Одним із «китів», на яких тримається сучасна механічна інженерія, є теорія механізмів і машин (ТММ) – наука про загальні методи дослідження властивостей механізмів і машин та проектування їхніх схем. Адже саме на початковій стадії створення машини, при виборі її структури та основних конструктивних розмірів, що визначають її кінематичну схему, закладаються основні характеристики, від яких буде залежати ступінь технічної досконалості. Тому актуальною є задача оптимального використання сучасних методів комп'ютерного моделювання технічних систем з метою визначення їх основних кінематичних та динамічних характеристик, а крім того – використання таких систем сприяє активізації навчального процесу студентів машинобудівних

спеціальностей при освоєнні науки ТММ з подальшою можливістю використовувати здобуті знання в практичній діяльності на виробництві.

**Мета роботи:** для вирішення зазначених вище задач важливим етапом є розробка математичних розрахункових моделей SOLIDWORKS для основних типів механізмів, які використовуються у сучасному машинобудуванні, з використанням системи інженерного аналізу SOLIDWORKS Motion, що дозволить як пришвидшити процес проектування на виробництві, так і реалізувати навчальний процес для студентів машинобудівних спеціальностей на сучасному рівні.

#### Аналіз літературних джерел

Одним із засобів пришвидшення процесу проектування сучасних машин та механізмів, а також для активізації навчального процесу при підготовці інженерів-механіків, є використання сучасних комп'ютерних технологій. Зокрема при таких інструментах слугують сучасні CAD/CAM/CAE-системи.

Як зазначено в роботі [1], практика використання таких систем в навчальному процесі Хмельницького національного університету показала, що найбільш оптимальним засобом комп'ютерного моделювання технічних об'єктів та їх супроводження протягом життєвого циклу є система SOLIDWORKS, яка містить всі інструменти для реалізації технічних ідей інженера – від побудови компонуального ескізу машини до створення керуючої програми для виготовлення деталей на верстаках з ЧПК. Очевидно, що така «монолітність» та інтегрованість системи SOLIDWORKS є позитивним фактором при виборі CAD/CAM/CAE-системи не тільки для навчального процесу, але й при використанні її в умовах реального виробництва.

Однією з основних CAE-складових системи SOLIDWORKS, що використовується в курсі ТММ, є інтегрований додаток SOLIDWORKS Motion. Він дозволяє досліджувати кінематику та динаміку механізмів чи машин незалежно від складності їх структури. Курс «Теорія механізмів та машин» передбачає наявність лекційних занять, виконання лабораторних та практичних робіт, а також курсового проекту. Є два аспекти використання SOLIDWORKS Motion в навчальному процесі: перший полягає в візуальному моделюванні та подальшій демонстрації на лекційних заняттях роботи механізмів, які порівняно рідко використовуються в машинобудуванні, а другий – проведення розрахунків кінематичних та динамічних параметрів таких механізмів.

Наприклад, в роботі [2] розглядаються питання проектування кулачково-цівкових механізмів та визначення їх характеристик засобами SOLIDWORKS Motion. В роботі [3] показано використання SOLIDWORKS Motion для перевірки результатів аналітично-числового кінематичного синтезу шестиланкових важільних механізмів із періодичною зупинкою вихідної ланки, що побудовані на основі чотириланкових кругових та прямолінійно-напрямних механізмів. Зокрема, в зазначеній роботі показано проведену перевірку правильності отриманого закону руху вихідної ланки, а також розраховано основні кінематичні параметри точок та ланок механізмів (траєкторій руху, переміщень, швидкостей та прискорень).

В роботі [4] розглядається основних функціонал системи інженерного аналізу SOLIDWORKS Motion, де наведено ряд прикладів та моделей, що використовуються у сучасному машинобудуванні. В роботі [5] розглядаються теоретичні основи прикладної робототехніки, зокрема питання кінематики, динаміки та керування. Як буде показано нижче, ці задачі можна також успішно розв'язувати з використанням системи SOLIDWORKS Motion. Очевидно, що для проведення кінематичних та динамічних розрахунків необхідно попередньо розробити відповідні 3D-моделі: питання твердотільного моделювання у середовищі SOLIDWORKS 2022 детально розглядаються в роботі [6], причому результати розрахунків у SOLIDWORKS Motion можна передати для розрахунків на міцність за допомогою SOLIDWORKS Simulation.

Очевидно, що циклові механізми мають різні навантаження впродовж циклу роботи, отже використання SOLIDWORKS Motion дозволяє визначити такі їх положення, де навантаження будуть максимальними, а згодом можна провести для деталей досліджуваного механізму розрахунки на міцність, жорсткість, стійкість тощо. Зазначені питання розглядаються в роботах [7-9].

#### Виклад основного матеріалу

Важливим етапом у процесі проектування машин, механізмів та загалом технічних систем є моделювання типових для машинобудування механізмів з поглибленим вивченням їх кінематичних та динамічних характеристик. Подібні задачі розв'язуються, зокрема, при вивченні студентами машинобудівних спеціальностей курсу «Теорія механізмів та машин»: при виконанні лабораторних та практичних робіт, а також при виконанні курсового проекту. Особливу зацікавленість у студентів викликають верифікаційні задачі, коли характеристики механізму, спроектованого класичними аналітичними методами, перевіряються за допомогою SOLIDWORKS Motion та встановлюється розбіжність результатів, отриманих двома методами. Такий підхід реалізується, зокрема, при дослідженні важільних, кулачкових, багатоланкових зубчастих механізмів. Наприклад, на рис. 1 показано моделі мальтійських механізмів, виконані у SOLIDWORKS, а на рис. 2 зображена комп'ютерна модель важільного шестиланкового механізму, для якого вхідною ланкою є кривошип (ланка ліворуч), що здійснює повний оберт відносно стояка, а вихідною ланкою є повзун (справа), який приймає участь у певній технологічній операції і повинен мати певний закон руху (переміщення, швидкості та прискорення).

На рис. 3, а показані результати розрахунку зазначеного механізму у SOLIDWORKS Motion, з яких видно, що отримані результати збігаються з результатами аналітичних досліджень, що виконані іншими

способами (рис. 3, б), наприклад, з аналітичними розрахунками у Mathcad, або з використанням іншого спеціалізованого математичного програмного забезпечення. При виконанні розрахунків у курсі «Теорія механізмів та машин» за темою «Силовий аналіз механізмів» студенти визначають за допомогою рівнянь кінестатики реакції в кінематичних парах та зрівноважувальну рушійну силу (момент) на вхідній ланці. В реальних умовах ці величини важливо встановити, оскільки надалі вони використовуються для розрахунків деталей механізму на міцність, а також для встановлення динамічних характеристик приводу машини в цілому.

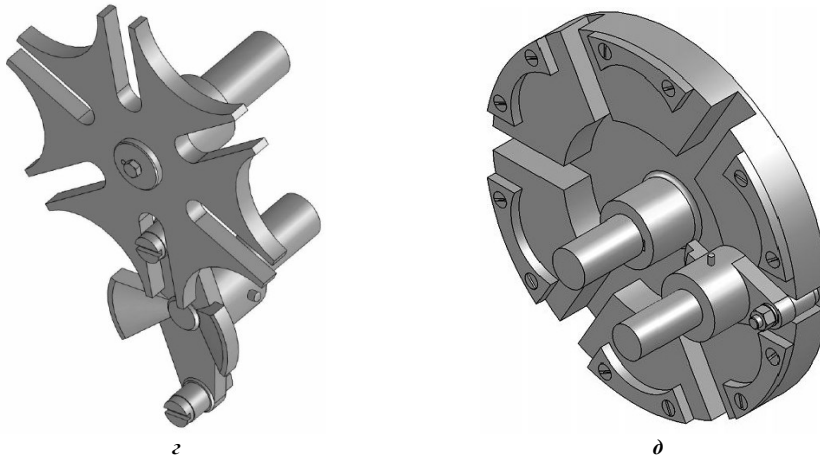


Рис. 1. SOLIDWORKS-моделі мальтійських механізмів

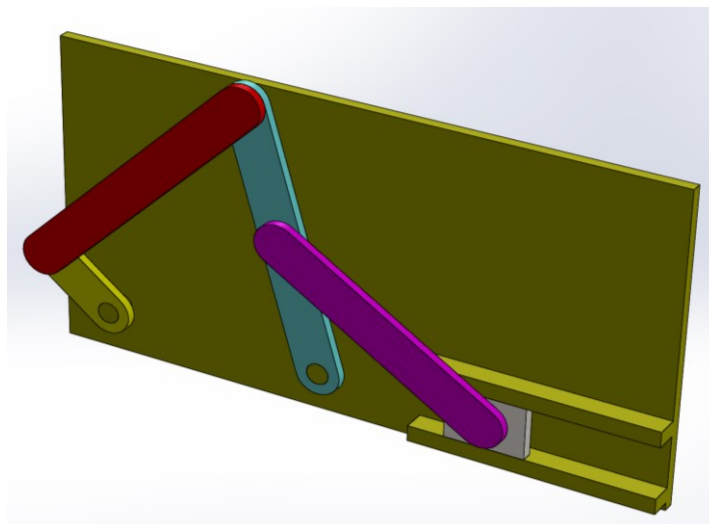
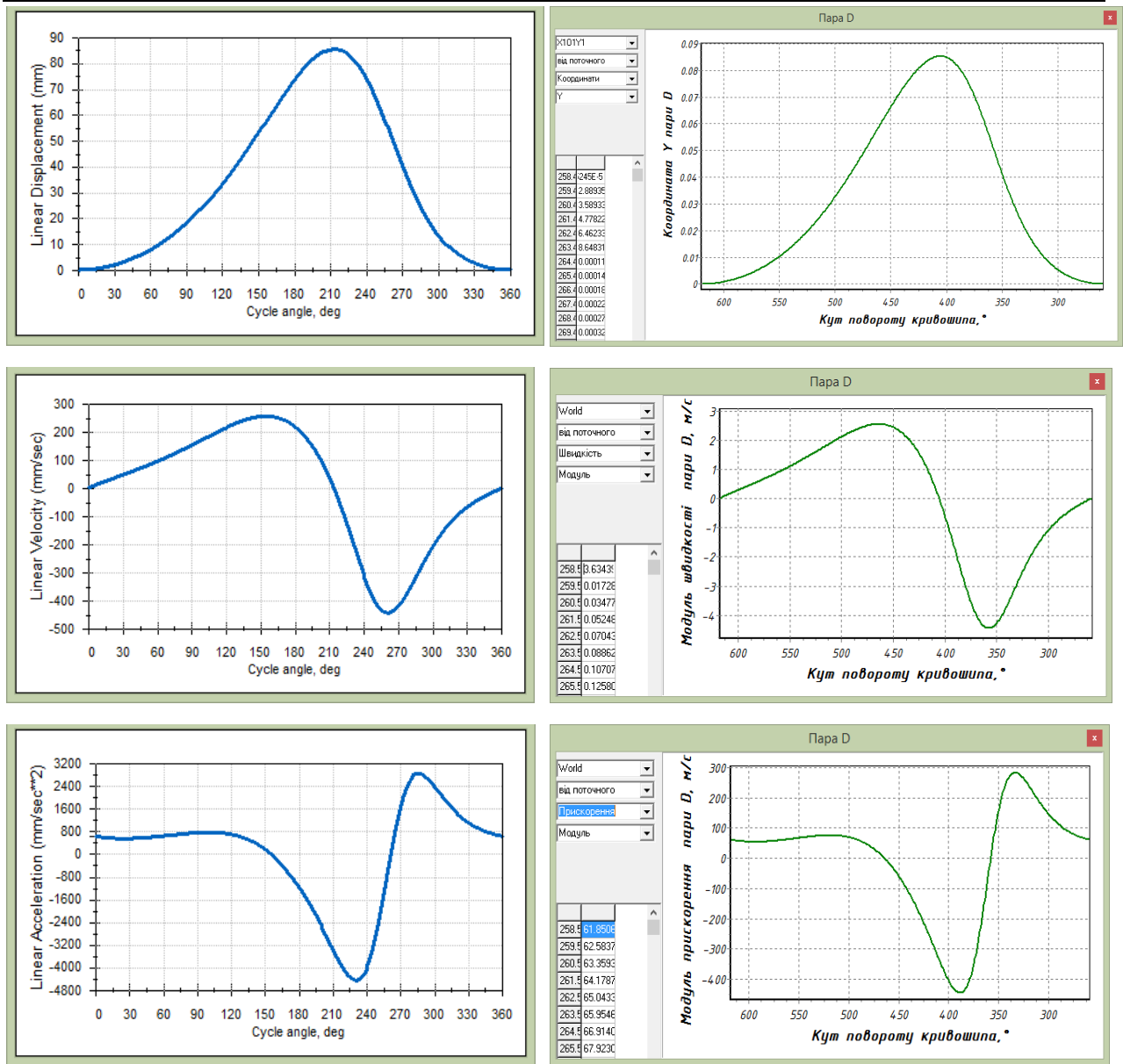


Рис. 2. Модель важільного механізму, створена в SOLIDWORKS

Необхідно зазначити, що верифікація результатів за допомогою SOLIDWORKS Motion ускладнюється через те, що на даному етапі невідомі поперечні перерізи ланок, матеріали, з яких вони виготовлені тощо, оскільки ці фактори значно впливають на масово-інерційні характеристики ланок, а отже на динаміку машини в цілому. Система комп'ютерного моделювання SOLIDWORKS надає розширені можливості встановлення мас та моментів інерції ланок, якщо існує необхідність їх визначення, враховуючи геометрію моделі, а також матеріали, з яких виготовлені окремі її деталі (рис. 4, а). Проте, як правило, такі масово-інерційні характеристики наперед задані в завданні, наприклад, як у випадку курсового проектування.

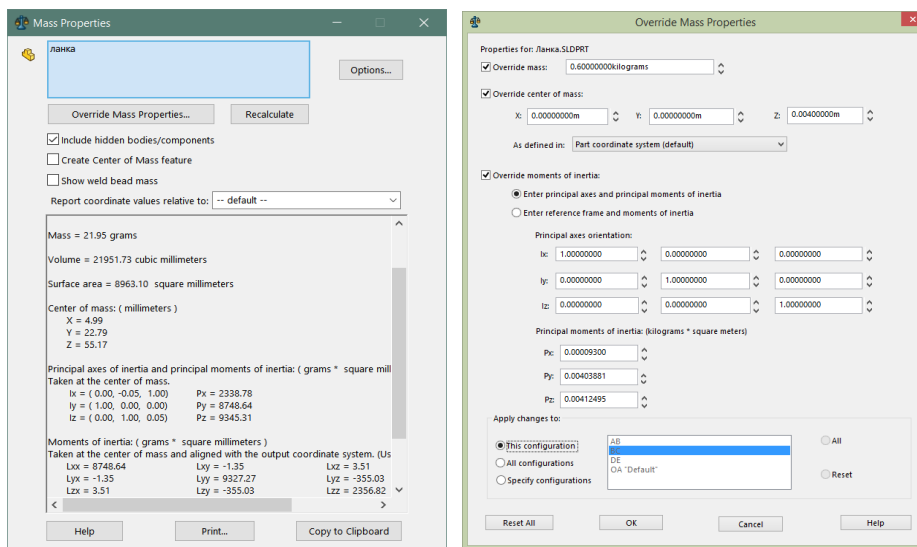
Зокрема, у завданні на курсове проектування з теорії механізмів та машин задане положення центра мас кожної з ланок, а отже існує необхідність перевизначити його в моделі SOLIDWORKS без прив'язки до конкретних геометричних розмірів ланки. У цьому випадку корисною і зручною є функція перевизначення масових характеристик «Override Mass Properties» (рис. 4, б). За допомогою зазначеної функції можна змінити загальну масу ланки, положення її центра мас, а також значення моментів інерції відносно головних осей.



а

б

Рис. 3. Закони руху вихідної ланки важільного механізму:  
а – отримані за допомогою SOLIDWORKS Motion; б – отримані за допомогою аналітичних методів



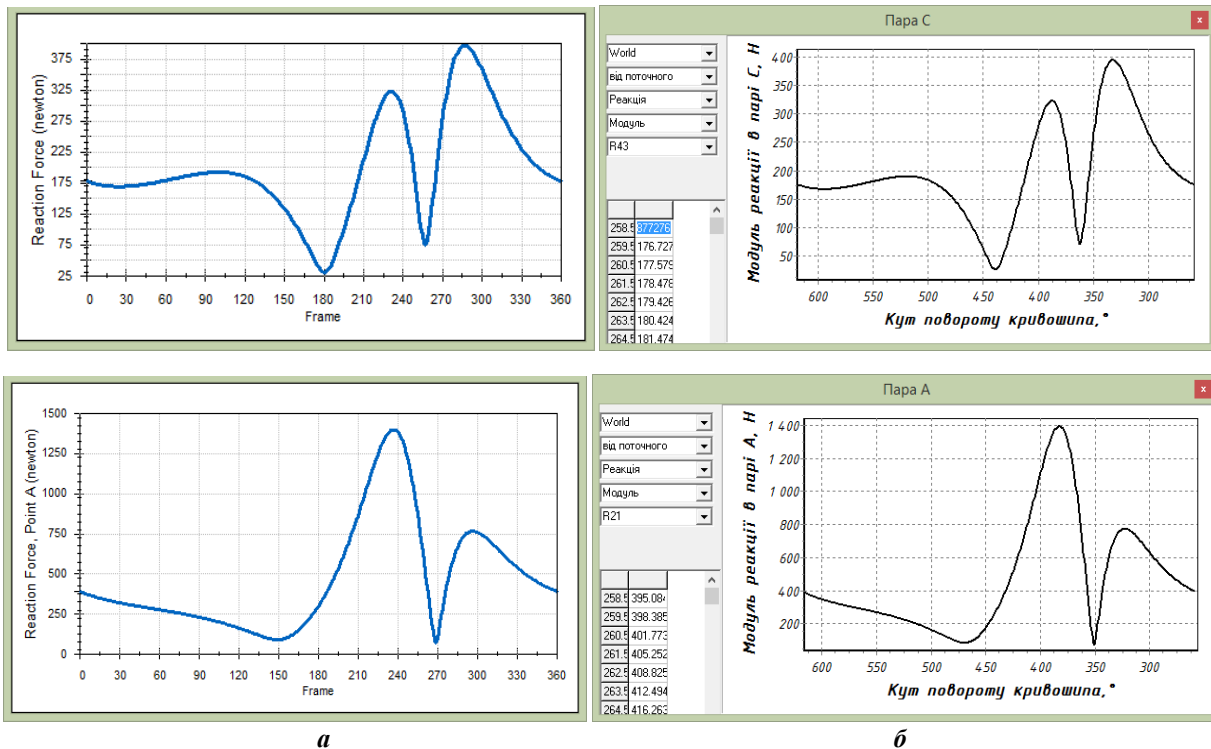
а

б

Рис. 4. Масово-інерційні характеристики ланок:  
а – діалогове вікно масово-інерційних характеристик ланки;  
б – діалогове вікно перевизначення масово-інерційних характеристик

Крім проведення кінематичного аналізу з визначенням переміщень, швидкостей та прискорень точок та ланок механізмів, у SOLIDWORKS Motion є можливість також провести кінетостатичне дослідження механізмів.

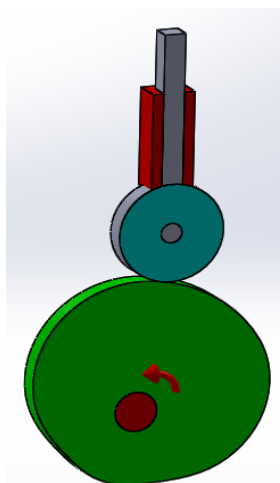
Результати кінетостатичного розрахунку важільного механізму (рис. 5, а) за допомогою SOLIDWORKS Motion досить чітко корелюються з результатами, отриманими класичними аналітичними методами (рис. 5, б).



**Рис. 5. Результати силового аналізу (реакції в кінематичних парах механізму):**  
**а** – отримані за допомогою SOLIDWORKS Motion; **б** – отримані за допомогою аналітичних методів

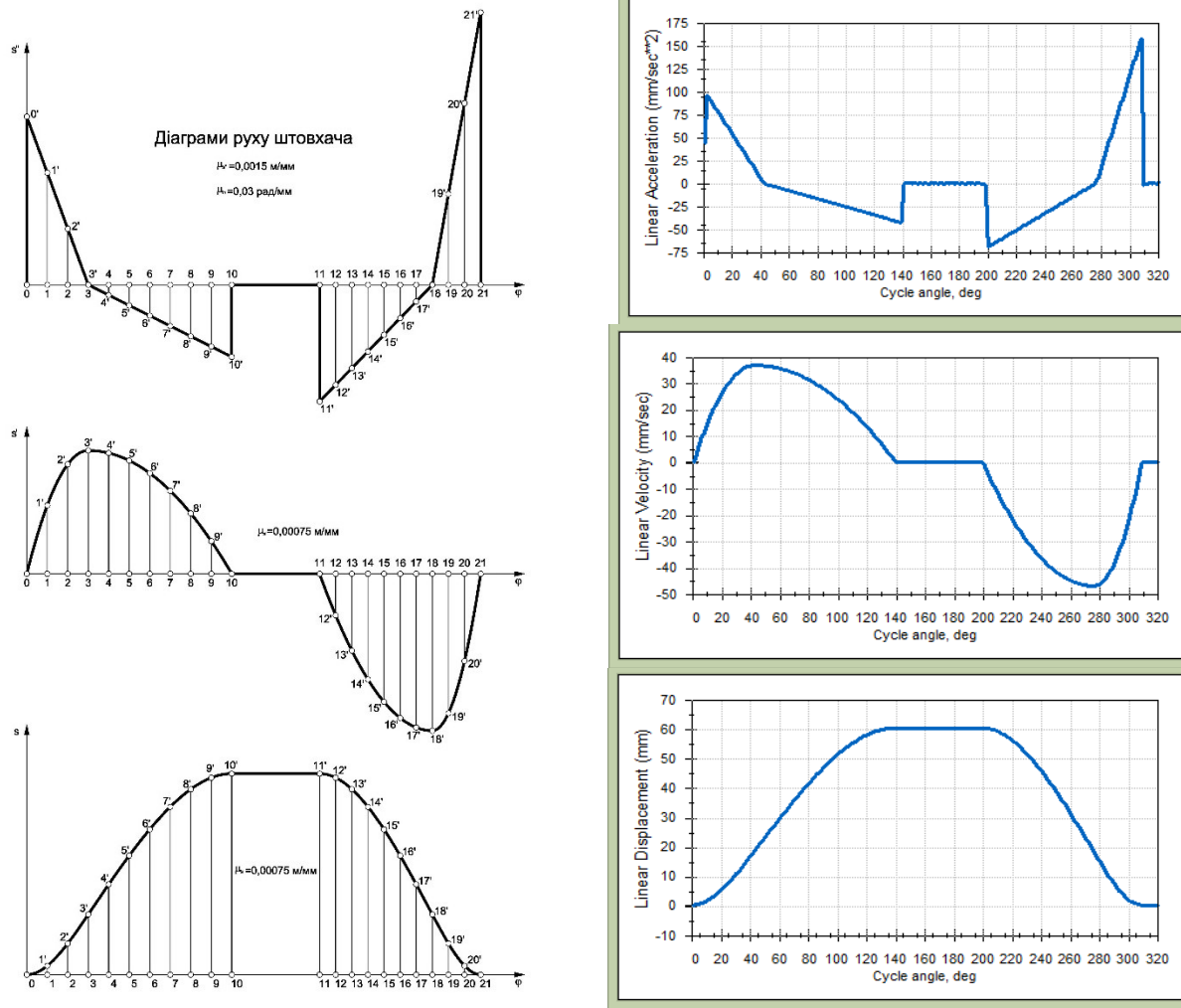
Наступною типовою задачею в структурі курсу ТММ є проектування кулачкових механізмів (рис. 6), яке полягає у визначенні геометрії профілю кулачка, який би генерував заданий закон руху вихідної ланки.

Класичний підхід при проектуванні кулачкових механізмів базується на встановленні мінімального радіуса кулачка, який би забезпечував оптимальні кути передачі, а також визначенні координат профілю кулачка, який забезпечить задану діаграму руху штовхача. В межах цього підходу студенти можуть скористатись двома методами – графічно визначити профіль з використанням таблиць інваріантів кінематичних величин, або аналітично – за допомогою відповідних функціональних залежностей (рис. 7, а). Результатом цих дій буде отримання профілю кулачка – плоскої кривої (сплайна), побудованої на основі скінченної сукупності точок. На основі цієї кривої студент буде твердотільну модель та за допомогою команди «3D-контакт» визначає реальний закон руху вихідної ланки (рис. 7, б).



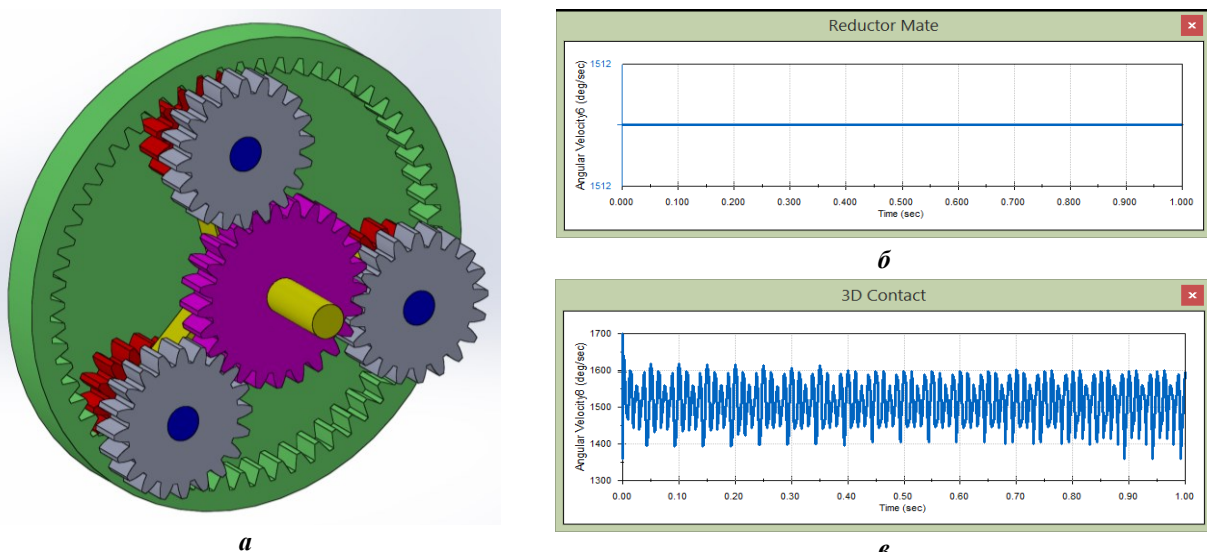
**Рис. 6. Модель кулачкового механізму**





**а** **б**  
**Рис. 7. Закони руху вихідної ланки кулачкового механізму:**  
**а – отримані за допомогою аналітичних методів; б – отримані за допомогою SOLIDWORKS Motion**

Іншою цікавою верифікаційною задачею є визначення передаточного відношення багатоланкового зубчастого механізму з рухомими осями (рис. 8, а). Студент за допомогою формули Вілліса визначає передаточне відношення планетарного редуктора при заданих в задачі кількостях зубців, а потім за допомогою параметризованих зубчастих колі складає модель, яку досліджує в SOLIDWORKS Motion.



**а** **б**  
**Рис. 8. Моделювання планетарної передачі:**  
**а – 3D-модель; б – кутова швидкість вихідної ланки, отримана при використанні функції «Редуктор»;**  
**в – кутова швидкість вихідної ланки, отримана при використанні функції «3D-контакт»**

На першому етапі за допомогою взаємозв'язку «Редуктор» встановлюються передаточні відношення між кожною парою контактуючих між собою ланок (зубчастих коліс, водила та нерухомої ланки). Після цього на вхідну ланку накладається елемент «Мотор» з панелі інструментів SOLIDWORKS Motion, проводиться розрахунок та оцінюється відсутність інтерференції між контактуючими тілами, що вказує на правильність визначення передаточних відношень. Значення кутової швидкості вихідної ланки планетарної передачі наведено на рис. 8, б.

Другий етап моделювання передбачає використання функції «3D-контакт». В процесі моделювання створюються групи контактуючих елементів, додається елемент «Мотор», проводиться розрахунок. Слід зазначити, що тривалість розрахунків на даному етапі значно більша, ніж на попередньому і залежить від кількості контактних пар та точності розрахунків, заданої в налаштуваннях проєкту. Нестабільність кутової швидкості вихідної ланки (рис. 8, в) викликана наявністю зазорів в зубчастих зачепленнях планетарної передачі, а також врахуванням пружних властивостей ланок при використанні функції «3D-контакт».

Завершальним етапом вивчення SOLIDWORKS Motion в межах курсу ТММ є моделювання інверсної кінематики роботи руки робота-маніпулятора (рис. 9). Модель робота представляє собою відкритий кінематичний ланцюг з шістьма ступенями свободи. Робочий орган (шпіндель з фрезою, хот-енд екструдера, зварювальний електрод тощо), закріплений в захваті робота здійснює складний рух по траєкторії, заданій просторовою кривою, і з заданою орієнтацією та швидкістю. Результатом моделювання є визначення кінематичних характеристик шести рушіїв (крокових чи серводвигунів), що здійснюють взаємне позиціонування ланок робота (рис. 10).

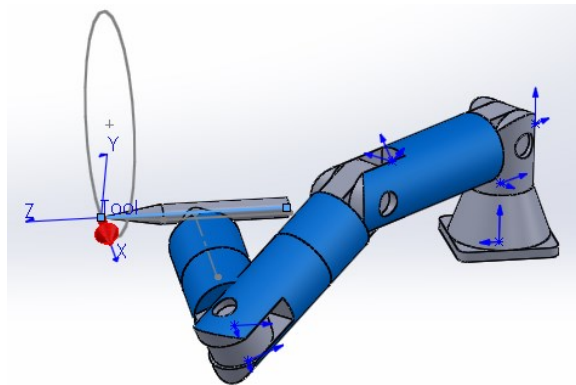


Рис. 9. Модель робота-маніпулятора, створена в SOLIDWORKS

Таблювання зазначених залежностей з заданим кроком може бути використане при програмуванні руки-маніпулятора з метою отримання заданої в завданні траєкторії руху робочого органу.

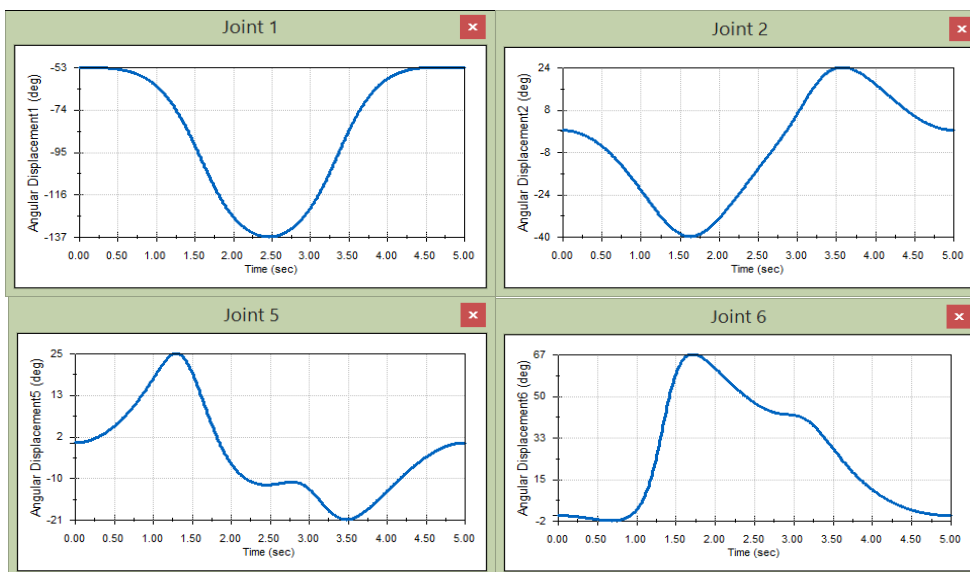


Рис. 10. Приклади передаточних функцій сервоприводів робота-маніпулятора, які забезпечують задану траєкторію руху захвата

Отже, використання системи SOLIDWORKS Motion як інженерами-конструкторами на підприємствах, так і в навчальному процесі для студентів машинобудівних спеціальностей, дозволяє значно

пришвидшити процес проектування механізмів та машин. Крім цього, використання сучасних комп'ютерних методів моделювання та інженерного аналізу активізує діяльність студентів, робить навчання більш змістовним та цікавим та сучасним, розвиває здатність здобувачів до креативного мислення. Ці чинники значно підвищують конкурентоздатність та затребуваність як існуючих, так і майбутніх фахівців-механіків на ринку праці.

Хмельницький національний університет висловлює подяку компанії Dassault Systèmes SOLIDWORKS Corp. за надане програмне забезпечення в рамках грантового фінансування, що дозволяє використовувати в навчальному процесі найсучасніше програмне забезпечення SOLIDWORKS, а також компанії Softico (м. Київ) за технічну підтримку та допомогу.

### Література

1. Kharzhevskiy V., Marchenko M. The usage of SOLIDWORKS CAD/CAM/CAE technologies in Khmelnytskyi National University //Actual problems of modern science : [collective monograph]. UTP University of Science and Technology, Bydgoszcz, Poland, 2021 – 758 p., P. 347–355.
2. Харжевський В.О., Марченко М.В., Гураль Д.І. Автоматизація проектування кулачково-цівкових механізмів у SOLIDWORKS з використанням методів оптимізації //Сучасні тенденції розвитку інженерії, технологій та транспорту: збірник тез доповідей Міжнародної науково-практичної конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених, 18-19 жовтня 2022 р. – Хмельницький : ХНУ, 2022. С. 328-333.
3. Харжевський В.О. Використання системи SOLIDWORKS Motion для перевірки результатів аналітично-числового синтезу важільних механізмів із зупинкою вихідної ланки / В.О. Харжевський // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. 2016.– №4 (239) С. 7-14.
4. Kuang-Hua Chang. Motion Simulation and Mechanism Design with SOLIDWORKS Motion: SDC Publications, 2021, ISBN: 978-1-63057-388-1. 220 p.
5. Reza N. Jazar. Theory of applied robotics : kinematics, dynamics, and control [3rd ed.], Springer, 2022. – 836 с.
6. Howard W., Musto J. Introduction to Solid Modeling Using SOLIDWORKS 2022 [18 ed.], McGraw Hill, 2022. 432 с.
7. Mustapha K. Practical Finite Element Simulations with SOLIDWORKS 2022: An illustrated guide to performing static analysis with SOLIDWORKS Simulation, Packt Publishing, 2022. 480 с.
8. Verma G. SolidWorks Simulation 2017 Black Book [4th ed.], 2016. 479 с.
9. Kurowski P. Engineering Analysis with SOLIDWORKS Simulation 2018, CRC Press. – 600 с.

### References

1. Kharzhevskiy V., Marchenko M. The usage of SOLIDWORKS CAD/CAM/CAE technologies in Khmelnytskyi National University //Actual problems of modern science : [collective monograph]. UTP University of Science and Technology, Bydgoszcz, Poland, 2021 – 758 p., P. 347–355.
2. Харжевський В.О., Марченко М.В., Гураль Д.І. Автоматизація проектування кулачково-цівкових механізмів у SOLIDWORKS з використанням методів оптимізації //Сучасні тенденції розвитку інженерії, технологій та транспорту: збірник тез доповідей Міжнародної науково-практичної конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених, 18-19 жовтня 2022 р. – Хмельницький : ХНУ, 2022. С. 328-333.
3. Харжевський В.О. Використання системи SOLIDWORKS Motion для перевірки результатів аналітично-числового синтезу важільних механізмів із зупинкою вихідної ланки / В.О. Харжевський // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. 2016.– №4 (239) С. 7-14.
4. Kuang-Hua Chang. Motion Simulation and Mechanism Design with SOLIDWORKS Motion: SDC Publications, 2021, ISBN: 978-1-63057-388-1. 220 p.
5. Reza N. Jazar. Theory of applied robotics : kinematics, dynamics, and control [3rd ed.], Springer, 2022. – 836 с.
6. Howard W., Musto J. Introduction to Solid Modeling Using SOLIDWORKS 2022 [18 ed.], McGraw Hill, 2022. 432 с.
7. Mustapha K. Practical Finite Element Simulations with SOLIDWORKS 2022: An illustrated guide to performing static analysis with SOLIDWORKS Simulation, Packt Publishing, 2022. 480 с.
8. Verma G. SolidWorks Simulation 2017 Black Book [4th ed.], 2016. 479 с.
9. Kurowski P. Engineering Analysis with SOLIDWORKS Simulation 2018, CRC Press. – 600 с.