

Б.П. Валецький, Т.І. Четвержук, В.А Єрьомін, С.П. Шимчук

Луцький національний технічний університет

## ІНЖИНІРИНГ ПЛАНЕТАРНОГО РЕДУКТОРА У SOLIDWORKS

У роботі досліджуються аспекти інженерного аналізу планетарного редуктора із застосуванням засобів комп'ютерного моделювання *SOLIDWORKS*. Особливу увагу приділено аналізу кінематичних та динамічних характеристик за допомогою системи інженерного аналізу *SOLIDWORKS Motion*, яка дозволяє здійснювати чисельні експерименти. Вони спрямовані на перевірку працездатності механізмів і машин, визначення їх основних характеристик, а також на подальшу оптимізацію систем за різними критеріями.

**Ключові слова:** кінематика, динамічний аналіз, теорія механізмів та машин, комп'ютерне моделювання, редуктор.

B. Valetskyi, T. Chetverzhuk, V.Yeremin, S. Shymchuk

## ENGINEERING ANALYSIS OF A PLANETARY GEARBOX IN SOLIDWORKS

This paper explores the engineering analysis of a planetary gearbox using *SOLIDWORKS* computer modeling tools. Special attention is given to the kinematic and dynamic analysis using the *SOLIDWORKS Motion* simulation system, which enables numerical experiments. These experiments are aimed at evaluating the performance of mechanisms and machines, determining their key characteristics, and optimizing systems based on various criteria.

**Keywords:** kinematics, dynamic analysis, theory of mechanisms and machines, computer modeling, gearbox.

**Вступ.** У країнах із розвинутою машинобудівною галуззю спостерігається активний розвиток інжинірингу на базі тривимірного моделювання (3D). Водночас наявні 3D моделі недостатньо враховують специфічні особливості функціонування вузлів і деталей спряжень. В умовах сучасного ринку, коли вітчизняне машинобудування прагне до конкурентоспроможності, гнучкості та високої ефективності, вирішення цієї проблеми стає актуальним завданням [1].

Інжиніринг базується на розробці, модифікації та контролі впровадження технологічних, організаційних і фінансово-економічних моделей технічних систем відповідно до визначених цілей. Фахівці інжинірингових компаній працюють з різними моделями на фізичних носіях, орієнтуючись на принципи теорії подібності та моделювання. Вони взаємодіють як з віртуальними, так і з реальними об'єктами: спершу створюють цифрову модель, потім супроводжують її перетворення в реальний об'єкт, а в процесі експлуатації коригують віртуальну модель відповідно до параметрів реального обладнання, будівель і споруд, що входять до технологічного циклу виробництва.

Інжиніринг представляє собою високоточну технологію, яка забезпечує відтворення реальних деталей у цифровому просторі. Завдяки цьому процесу можливо виконати оцифровування об'єкта та створити його електронну модель з детальним описом всіх характеристик і функцій [2]. Ця технологія також дозволяє здійснити повне прототипування деталі, а також відновити конструкторську, технологічну і експлуатаційну документацію.

**Мета роботи:**

1. Моделювання багатоланкового зубчастого механізму з рухомими осями, використовуючи бібліотеку дизайну, орієнтуючись на метричний стандарт ISO.
2. Провести розрахунок за допомогою формули Вілліса кількості зубців і дільного кола для сонячної, вінцевої та планетної шестерні.
3. Провести моделювання планетарної передачі з урахуванням різних варіантів її реалізації в *SOLIDWORKS Motion*.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Планетарна передача, також відома як епіциклічна, складається з сонячної шестерні, вінцевої (коронної) шестерні та чотирьох планетарних шестерень. Сонячна і коронна шестерні постійно обертаються навколо власних осей, а планетарні шестерні здійснюють обертання як навколо своєї осі, так і навколо сонячної шестерні, коли водило перебуває у фіксованому стані. Якщо зафіксувати сонячну або вінцеву шестерню, планетарні шестерні обертатимуться не лише навколо власної осі, а й навколо сонячної шестерні. Вони рухаються як уздовж зовнішньої сторони сонячної шестерні, так і по внутрішній стороні коронної [3].



Рис.1. Алгоритм проектування

Сонячна та планетарні шестерні мають зовнішнє циліндричне зачеплення, а вінцева – внутрішнє. Планетарна система дозволяє реалізувати три різні швидкості передавання руху: одну зворотну та дві прямі.

Застосування планетарної передачі [4]:

- 1) використовується у задніх механізмах токарних верстатів, підйомниках, блоках блоків, наручних годинниках тощо;
- 2) широко застосовується в автоматичних коробках передач автомобілів;
- 3) використовується в велосипедах для регулювання потужності обертання педалей, як автоматично, так і вручну;
- 4) знаходить застосування у системах передачі потужності між двигуном внутрішнього згоряння та електродвигуном.

Табл. 1

**Вхідні параметри передач**

| Параметри шестерень | Модуль (м) у мм | Ділильна окружність у мм | Кількість зубів |
|---------------------|-----------------|--------------------------|-----------------|
| Вінцева             | 2.5             | 115                      | 46              |
| Сонячна             | 2.5             | 35                       | 14              |
| Планетна            | 2.5             | 40                       | 16              |

За допомогою додатку SolidWorks Toolbox в складальне креслення можна додавати готові стандартні вироби. Всі шестерні створюються з параметричної секції. Перейшовши до бібліотеки та панелі ієструментів Toolbox, вибираємо відповідний стандарт. Використовуємо метричний стандарт ISO (International Organization for Standardization).

Анімація – це дослідження руху, яке моделює зміни положення й зовнішнього вигляду компонента в часі. Дослідження анімації можна створити для відображення рухів деталей у механізмі [5]. Крім цього, анімацію можна використовувати в презентаціях і маркетингових матеріалах.

Дослідження руху є графічним моделюванням руху моделей, збірок. У дослідження руху можна включити властивості видимості (такі як освітлення і перспектива камери). Дослідження руху не змінюють збірку або її властивості. Можна використовувати спряження SolidWorks для обмеження руху компонентів в збірці при моделюванні руху моделі. При виконанні дослідження руху можна використовувати MotionManager, інтерфейс на базі часової шкали, який включає наступні інструменти дослідження руху [6].

У нижній частині графічної області відобразиться MotionManager. Він містить у собі набір інструментів, який дозволяє визначати дослідження руху. Доступність інструментів залежить від створюваного типу дослідження. Для даної моделі як типу дослідження (ліва верхня частина MotionManager) установлене значення Анімація

На першому етапі моделювання встановлюються передаточні відношення між контактуючими ланками механізму (сателітами, водилом та вінцевою шестернею) через функціональний зв'язок «RotaryMotor». Після цього до вхідної ланки застосовується елемент «RotaryMotor» з інструментарію SOLIDWORKS Motion, виконується розрахунок кінематичних параметрів та перевіряється відсутність інтерференції між контактуючими тілами, що свідчить про коректність заданих передаточних відношень.

Другий етап моделювання передбачає використання функції «Solid Body Contact». В ході розрахунків формуються групи контактуючих елементів, додається елемент «RotaryMotor», і здійснюється аналіз кінематичних параметрів. Слід враховувати, що тривалість обчислень на даному етапі істотно перевищує попередню через збільшену кількість контактних пар та задані параметри точності в налаштуваннях проєкту. Нестабільність кутової швидкості вихідної ланки обумовлена наявністю технологічних зазорів у зубчастих зачепленнях планетарного механізму, а також впливом пружних властивостей елементів при застосуванні функції «Solid Body Contact».

Такий підхід дозволяє комплексно оцінити вплив контактних взаємодій на динаміку механізму та забезпечити точність його кінематичних параметрів.

**Результати дослідження:** Аналіз руху проводимо для різних випадків (рис.3.):

- 1) Вхідна швидкість становить 200 об/хв., однакова для всіх випадків.
- 2) Матеріал однаковий для всіх елементів і передач.
- 3) Вибір зон контакту відбувається однаково для всіх випадків.

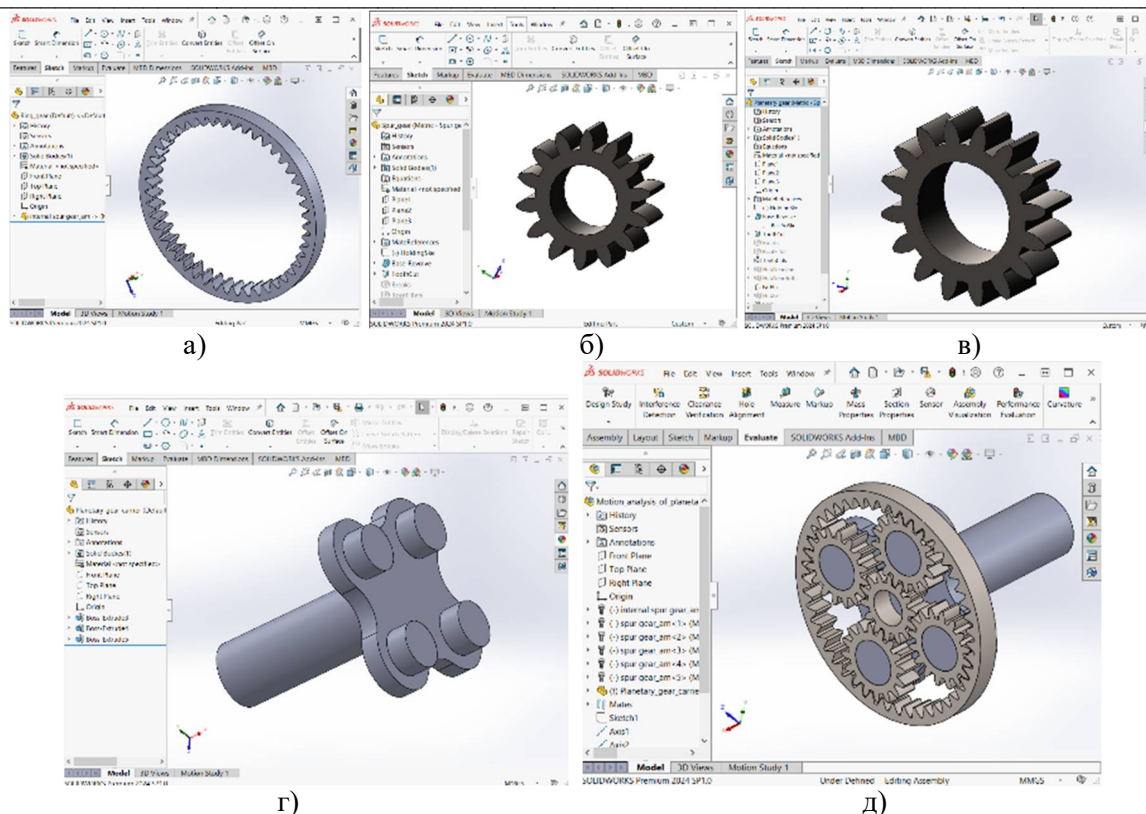


Рис.2. Загальний вигляд деталей планетарного редуктора: а) – вінцева (коронна) шестерня, б) – сонячна (центрально) шестерня, в) – планетарна шестерня, г) – водило, д) - збірка редуктора

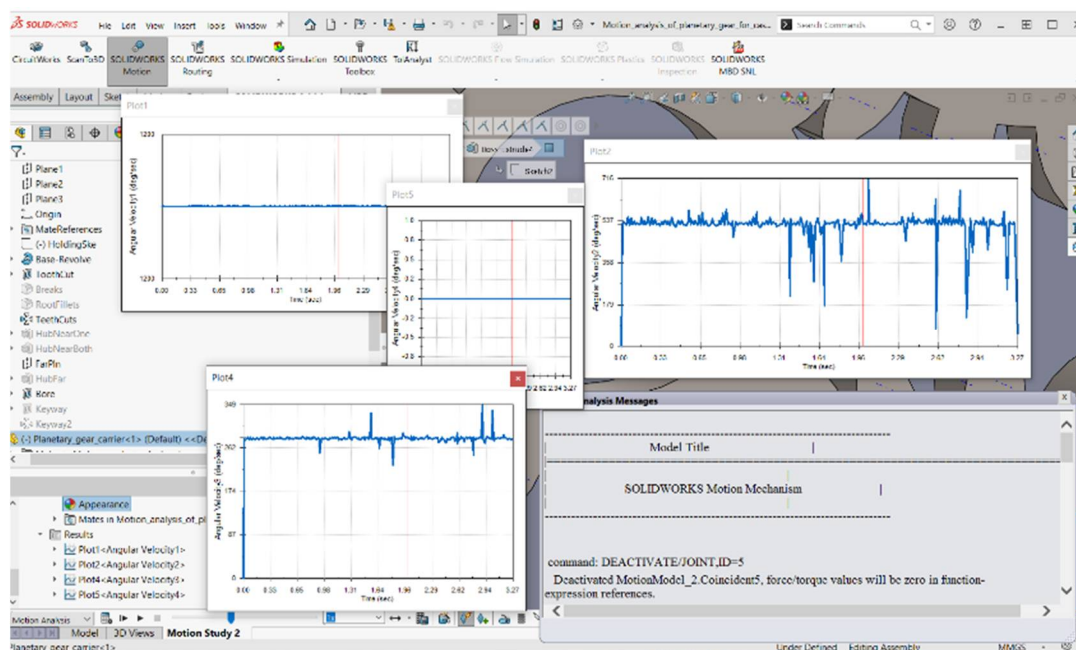


Рис. 3. Дослідження руху моделі збірки планетарного редуктора

**Випадок 1.** Вінцева шестерня нерухома, сонячна шестерня – вхідна, а водило – вихідне.

Вінцева шестерня повинна закріплена, а сонячна шестерня має вхідну швидкість 200 об/хв проти годинникової стрілки. Отже, планетарна передача буде обертатися навколо сонячної шестерні, на додаток до обертання навколо власної осі. Сонячна шестерня обертається проти годинникової стрілки, а планетарні – за годинниковою стрілкою. Водило обертається за годинниковою стрілкою (рис.4.).

Вінцева шестерня фіксується вручну, кутова швидкість вінця дорівнює нулю (рис.4, а).

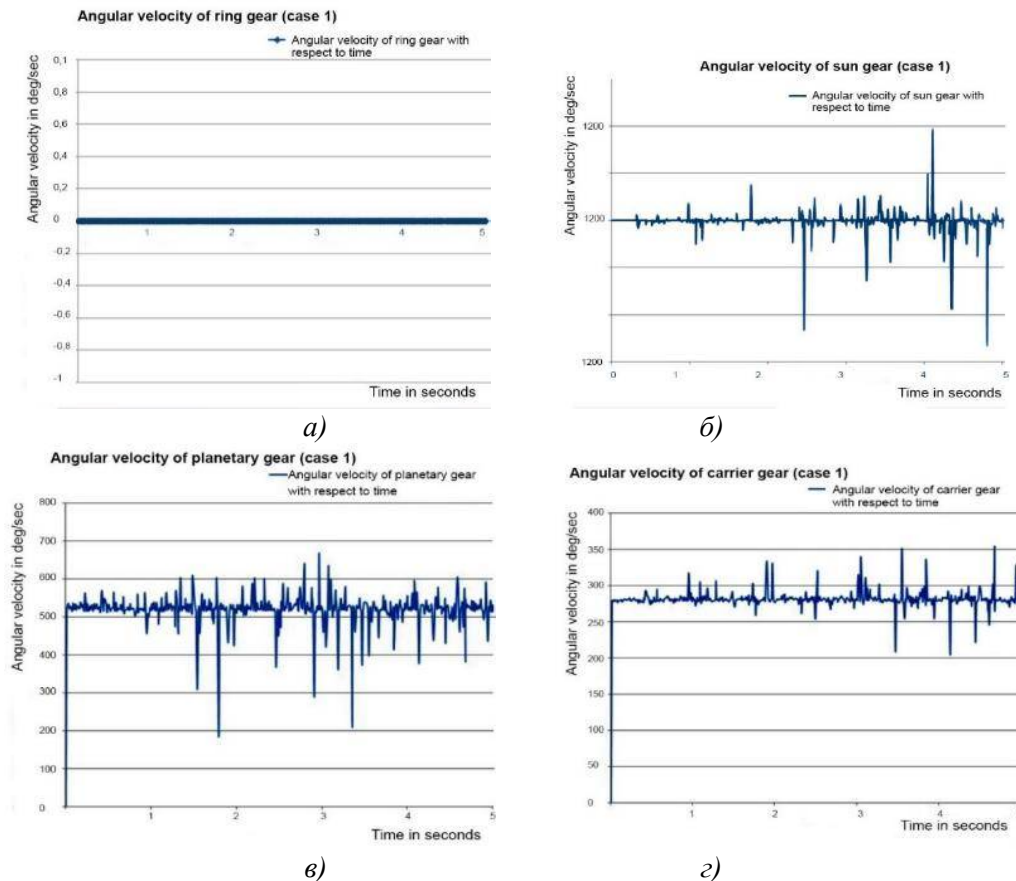


Рис. 4. Кутові швидкості: а) – вінця, б) – сонячної шестерні, в) – планетарної шестерні, г) – водила

Планетарна передача допомагає передавати потужність від сонячної шестерні до водила. Планетарна та сонячна шестерні з'єднані між собою, передавальне число між планетарною та сонячною шестернями становить 0,43. Це означає, що на 67 % швидкість зменшилася порівняно зі швидкістю сонячної передачі.

**Випадок 2.** Сонячна шестерня – фіксована, корона є входом, а водило є вихід (рис.5).

Закріплена сонячна шестерня, забезпечує вхідну швидкість корони 200 об/хв за годинниковою стрілкою. Вільне відповідне концентричне коло для чотирьох планетарних шестерень, воно обертається навколо власної осі з тим, що обертається навколо сонячної шестерні за годинниковою стрілкою. Носій також обертається за годинниковою стрілкою.

В даному випадку вінцеве колесо є вхідним, і його кутова швидкість становить 1200 град/сек. Воно передає потужність на планетарні шестерні, причому, планетарна шестерня є веденим колесом, а кільцева шестерня - ведучим. Передавальне відношення між короною та планетарною передачею в 1,90 рази перевищує вхідну швидкість, але крутний момент був пониженим.

Вхідна швидкість така ж, як і в попередньому випадку, але кутова швидкість менша, оскільки радіус від осі до зовнішнього діаметра більший, ніж у попередньому випадку 1.

Кутова швидкість планетарної передачі на 90% вища за кутову швидкість корони.

Для випадку 2 виводиться водило, кутова швидкість приблизно 1200 град/с. Відношення швидкостей між планетарною передачею та водилом становить 0,68 (рис.5., г).

Зафіксоване водило, момент подається на сонячну шестерню швидкість 200 об/хв за годинниковою стрілкою. Зафіксоване відповідне концентричне коло для чотирьох планетарних шестерень, воно обертається навколо власної осі проти годинникової стрілки. Кільцева шестерня обертається проти годинникової стрілки.

В цьому випадку водило нерухоме, решта шестерень знаходяться в плаваючому стані. Кутова швидкість відсутня (рис.6., а). Кутова швидкість корони є вихідною для цього випадку. Це передача заднього ходу, коли потрібен високий крутний момент при низькій швидкості. Таким чином, швидкість була зменшена в 0,70 рази від швидкості входу до швидкості виходу.

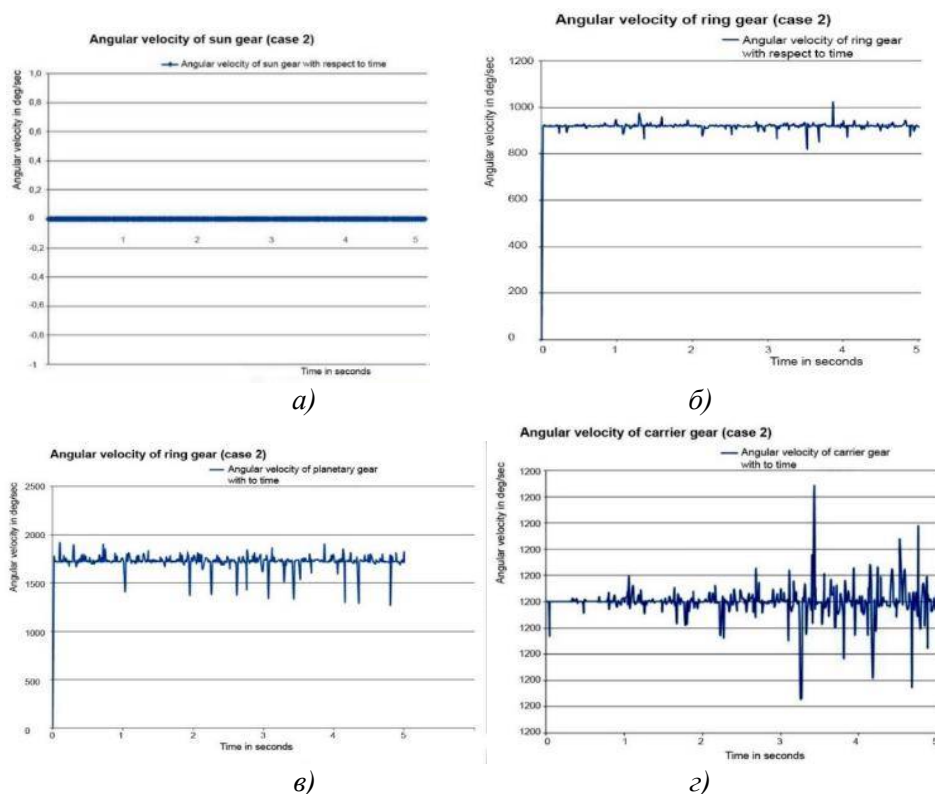


Рис.5. Діаграми кутових швидкостей: а) – зубчастого вінця, б) – планетарної передачі, в) – сателіта, г) – водила

**Випадок 3.** Водило фіксоване, сонячна шестерня вхідна, а вінцева шестерня вихідна.

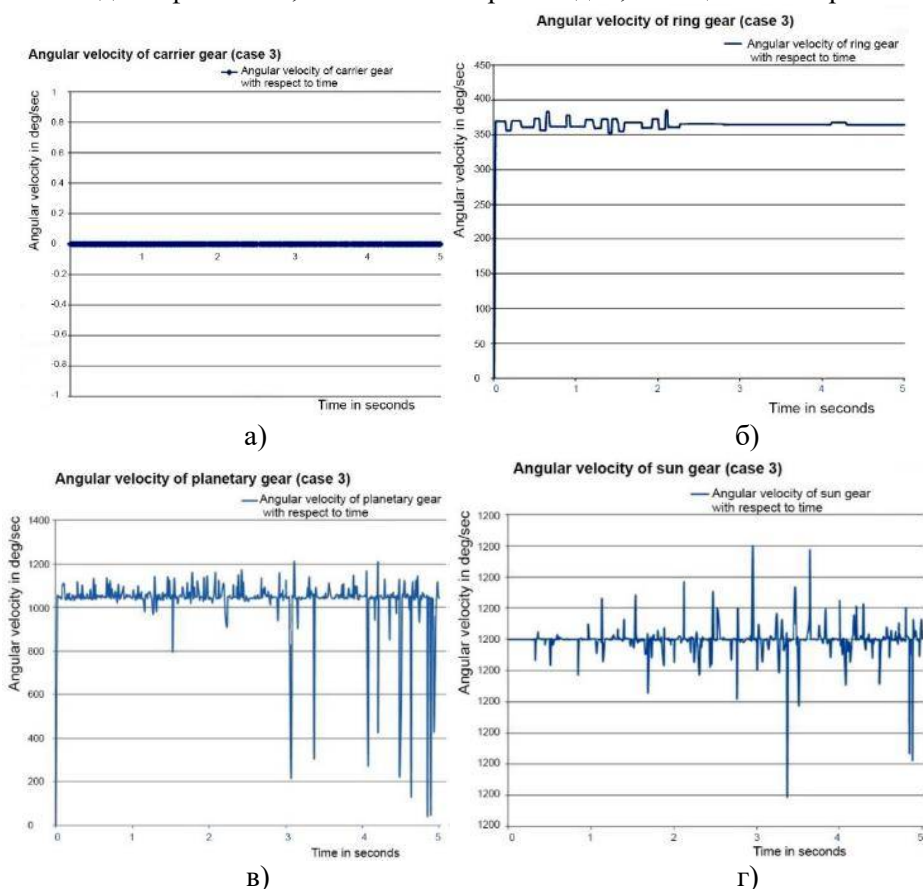


Рис.6. Діаграми кутових швидкостей: а) водило, б) – корона, в) - планетарної передачі, г) сонячної шестерні

Вхідна швидкість сонячної шестерні становить 1200 град/с, вона є постійною протягом періоду часу (рис.6.).

**Висновки.** Було проведено дослідження варіантів приводів планетарного редуктора за однакових параметрів (таблиця 2.).

Табл. 2

**Результати досліджень варіантів планетарного редуктора**

|                         | Варіант 1                   | Варіант 2                   | Варіант 3                               |
|-------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------------------|
| Напрямок руху           | Вперед                      | Вперед                      | Назад                                   |
| Тип передачі            | Низькошвидкісна             | Високошвидкісна             | Низькошвидкісна                         |
| Передавальне відношення | 0,23                        | 0,23                        | 0,30                                    |
| Вихідна швидкість       | в 0,77 рази менша за вхідну | в 0,77 рази менша за вхідну | в 0,70 рази менша за швидкість на вході |

Моделювання для всіх випадків, було успішно виконано з додатковим розрахуванням передавального числа для швидкості на вході та швидкості на виході.

SolidWorks є однією з базових систем автоматизованого проектування, що дозволяє спроектувати вироби або компоненти будь-якої складності, а також є популярною програмою для створення 3D моделей.

Розглядаючи функціональні і предметні області інжинірингу, важливо розуміти особливості інженерної діяльності. Рішення системних проблем, що мають монетарний аспект, можна розділити на політичні, економічні та технічні завдання. Ці категорії взаємопов'язані і включають аспекти інших категорій. Наприклад, політичні завдання враховують економічні та технічні аспекти, а економіка і техніка діють в політичному контексті.

#### **Список використаних джерел інформації:**

1. Системи 3D моделювання: Навчальний посібник/ Пальчевський Б.О., Валецький, Б.П., Вараніцький Т.Л. / Луцьк., 2016. - 176с.
2. Ворошук В.Я., Вітенько. Т.М. Інжиніринг та 3D моделювання в середовищі Solidworks: навч. посібник. Тернопіль: ФОП Паляниця В.А., 2023. 164с. ISBN 978-617-7875-69-6
3. Теорія механізмів і машин [Текст] : підручник / Я. Т. Кіницький ; НАН України. - К. : Наукова думка, 2002. - 659 с. ISBN 966-00-0740-X
4. Теорія механізмів і машин у прикладах і задачах: навч. посіб. / В. М. Арендаренко, І. А. Дудніков ; за заг. ред. В. М. Арендаренка ; Полтав. держ. аграр. акад. - Суми : Університетська книга, 2020. - 173 с. : іл. - ISBN 978-966-680-958-5
5. Kurowski P.M. Engineering Analysis with Solidworks Simulation 2018. USA: SDC Publications, 2018. – 597 p.
6. Dassault Systèmes. SolidWorks web help [Електронний ресурс] / 10 Dassault Systèmes // Dassault Systèmes. – 2022. – Режим доступу до ресурсу: [https://help.solidworks.com/2022/english/SolidWorks/SWHelp\\_List.html?id=1dc6a66356f34be18a445f5fe4c67de3#Pg0](https://help.solidworks.com/2022/english/SolidWorks/SWHelp_List.html?id=1dc6a66356f34be18a445f5fe4c67de3#Pg0)

**Рецензент: Повстаной Олександр Юрійович**, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій Луцького національного технічного університету.