

**Національний технічний університет України**  
**«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ**  
**імені Ігоря Сікорського»**  
**НАВЧАЛЬНО - НАУКОВИЙ МЕХАНІКО-МАШИНОБУДІВНИЙ**  
**ІНСТИТУТ**  
Кафедра конструювання машин

**«До захисту допущено»**

Завідувач кафедри  
Юрій ДАНИЛЬЧЕНКО  
(підпис) (власне ім'я, прізвище)  
“ ” \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**Дипломний проєкт**  
на здобуття ступеня бакалавра  
за освітньо-професійною програмою  
**«Конструювання та дизайн машин»**  
зі спеціальності 131 «Прикладна механіка»  
на тему: Колісний рушій наземного дрону на пружних елементах

Виконав:  
студент 4 курсу, групи МВ-12 Сорвін Ігор Вікторович  
(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Керівник проєкту Саленко Олександр Федорович д.т.н., професор  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Рецензент к.т.н., доцент кафедри технології машинобудування

Кореньков В.М.  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали) (підпис)

Засвідчую, що у цьому дипломному проєкті немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Київ – 2025 року

**Національний технічний університет України**  
**«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**  
**Навчально – науковий механіко-машинобудівний інститут**

**Кафедра конструювання машин**

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 131 «Прикладна механіка»

Освітньо-професійною програмою «Конструювання та дизайн машин»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Юрій ДАНИЛЬЧЕНКО

(підпис)

(власне ім'я, прізвище)

“ \_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**ЗАВДАННЯ**

**на дипломний проєкт студенту**

Сорвін Ігор Вікторович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дипломного проєкту Колісний рушій наземного дрону на пружних елементах \_\_\_\_\_

керівник проєкту Саленко Олександр Федорович д.т.н., професор \_\_\_\_\_ ,  
 (прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «29» травня 2025 р. № 1835-с

2. Термін подання студентом дипломного проєкту «\_\_» \_\_2025 р.

3. Вихідні дані до проєкту

Призначення: колісний рушій для наземного дрона.

Максимальна швидкість: 25 км/год ( $\approx 7$  м/с).

Максимальне навантаження на рушій: 150 кілограм.

4. Зміст пояснювальної записки ,перелік завдань, які потрібно розробити

Розділ 1 Введення

Розділ 2 Фізичне та математичне моделювання

Розділ 3 Техніко-економічний аналіз виробу, що проєктується

Розділ 4 Розрахунок на міцність деталей вузла рушія

Розділ 5 Висновки про доцільність застосування розробленого виробу та сфери його використання.

---

5. Перелік графічно-ілюстративного матеріалу:
  1. Види наземних рушіїв.
  2. Патенто-інформаційний пошук.
  3. Дослідний експеримент обох варіант рушіїв.
  4. Складальний кресленик колісного рушія з пружними елементами типу напівресора.
  5. Складальний кресленик кришки піввісі.
  6. Деталювання усіх деталей рушія.
  7. Розрахунок на міцність пружних елементів та оригінальних деталей рушія.
  8. Розрахунок опору кочення.
  9. Розрахунок собівартості виробу
6. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєктування	Термін виконання етапів дипломного	Примітка
1	Визначення типів рушіїв та їх особливості	01.03.2025	Виконано
2	Проведення патентного пошуку аналогів проєктуємого виробу	01.04.2025	Виконано
3	Фізичне моделювання	04.04.2025	Виконано
4	Математичне моделювання	15.04.2025	Виконано
5	Аналіз техніко-економічних показників проєктуємого виробу	25.04.2025	Виконано
6	Розрахунок на міцність деталей вузла рушія	07.05.2025	Виконано
7	Оформлення конструкторської документації	20.05.2025	Виконано
8	Висновок про доцільність та сфери використання розробленого виробу	02.06.2025	Виконано

Студент

Ігор СОРВІН

Керівник проєкту

Олександр САЛЕНКО

## РЕФЕРАТ

У даному дипломному проєкті розглянуто питання щодо аналізу сучасних діючих конструкцій рушіїв різних типів та розробки оригінальної конструкції колісного рушія на пружних елементах для подальшого використання в складі наземного логістичного дрону.

В якості демпфуючих елементів підвіски транспортного засобу запропоновано альтернативне використання пружних елементів безпосередньо вмонтованих в склад колісного рушія.

Після детального аналізу діючих та запатентованих конструкцій для подальших досліджень обрано дві принципово різні конструкції вищезгаданих рушіїв, а саме: перший варіант – з поперечним розташуванням пружних елементів типу напівресора на маточині та другий варіант – з повзводним розташуванням пружних елементів типу п'ятка-стопа.

За допомогою фізичного моделювання в системі Autodesk Inventor було спроектовано 3D моделі прототипів обох варіантів рушіїв та за допомогою 3D друку виготовлені дві пари макетних зразків в масштабі 5:1.

Макетні зразки використані для проведення експерименту щодо порівняння тих чи інших експлуатаційних властивостей обох типів, після проведення аналізу та оцінки був обраний пріоритетний варіант колісного рушія.

За допомогою вбудованого модулю аналізу напружень у Autodesk Inventor було здійснено математичне моделювання та проведені розрахунки пружних елементів на міцність, а також розрахунок сили опору кочення.

Враховуючи отримані результати, для подальшого проєктування та розробки був проведений вибір матеріалів та комплектуючих, а також вибрані конструкторські, технологічні та експлуатаційні рішення.

Надалі, для обраного типу колісного рушія з пружними елементами напівресора була розроблена конструкторська документація, а саме: складальний кресленик зі специфікацією та його деталювання (робочі креслення).

При проведенні техніко-економічного аналізу спроектованого виробу, з урахуванням його призначення у складі логістичного наземного дрону, були обрані та розраховані пріоритетні показники якості.

Для підтвердження надійності подальшої роботи спроектованого виробу за допомогою вбудованого модулю аналізу напружень у Autodesk Inventor було проведено розрахунки усіх складових одиниць колісного рушія.

З урахуванням отриманих результатів та закладених експлуатаційних властивостей спроектованого рушія з пружними елементами типу напівресора, зроблено висновки щодо доцільності застосування його у спеціальних транспортних засобах, включаючи логістичні наземні дрони. Після виготовлення дослідного зразка та проведення його експериментальних випробувань можливе подальше доопрацювання конструкції рушія з ціллю поліпшення якості та експлуатаційних властивостей.

**Ключові слова:** колісний рушій, пружний елемент, напівресора, логістичний наземний дрон.

## ABSTRACT

This diploma project addresses the issue of analyzing modern operating designs of various types of engines and developing an original design of a wheeled engine on elastic elements for further use as part of a ground logistics drone.

As damping elements of the suspension of a transport conflict, an alternative use of elastic elements only mounted in the wheeled engine is proposed.

After a detailed analysis of the actions and patented designs, two different basic designs of the aforementioned engines were selected for further research, namely: the first option - with a transverse arrangement of elastic elements of the half-spring type on the hubs and the second option - with a semi-upright type of arrangement of elastic elements heel-foot.

Using physical modeling in the Autodesk Inventor system, 3D models of prototypes of both engine variants were designed and two pairs of mock-up samples were manufactured using 3D printing on a scale of 5:1.

Mock-ups used to conduct an experiment to compare certain operational properties of both types, after analysis and evaluation, the priority variant of the wheeled engine was selected.

Using the built-in stress analysis module in Autodesk Inventor, mathematical modeling was carried out and calculations of elastic elements for strength were performed, as well as the calculation of rolling resistance force.

Taking into account the results obtained, materials and components were selected for further design and development, as well as design, technological and operational solutions were selected.

Subsequently, design documentation was developed for the selected type of wheeled engine with elastic elements of a half-spring, namely: an assembly drawing with a specification and its detailing (working drawings).

When conducting a feasibility analysis of the designed product, taking into account its purpose as part of a logistical ground drone, important quality indicators were selected and calculated.

To confirm the reliability of the further operation of the designed product, calculations of all the components of the wheeled engine were carried out using the built-in stress analysis module in Autodesk Inventor.

Taking into account the results obtained and the inherent operational properties of the designed engine with elastic elements of the half-spring type, conclusions were drawn regarding the feasibility of its use in special vehicles, including logistical ground drones. After manufacturing a prototype and conducting experimental tests, further refinement of the design is possible in order to improve the quality and operational properties.

## ЗМІСТ

<b>РЕФЕРАТ</b> .....	4
<b>1 ВСТУП</b> .....	9
1.1    Визначення терміну рушій. Типи рушіїв та їх область застосування.....	9
1.2    Рушії наземних транспортних засобів (НТЗ), їх типи та порівняння. Колесо, як основний застосовуваний тип рушія НТЗ .....	14
1.3    Еволюція колеса, типи коліс, основні переваги та недоліки .....	19
1.4    Обґрунтування вибору металопружного пружинного колеса .....	29
1.4.1    Плоске колесо з пружними елементами типу «спиця», конструктивний аналог «п'ята-стопа».....	29
1.4.2    Сферичне колесо з пружними елементами типу «напівресора», конструктивний аналог «колесо марсохода».....	31
1.5    Патентно-інформаційний пошук та дослідження аналогів .....	32
<b>2 ФІЗИЧНЕ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ</b> .....	36
2.1    Фізичне моделювання.....	36
2.1.1    Розробка 3D моделей обох варіантів прототипів рушіїв за допомогою CAD-системи Autodesk Inventor Professional 2025 (загальний вигляд).....	36
2.1.2    Масштабне моделювання за допомогою 3D принтера обох варіантів рушіїв.....	40
2.1.3    Опис експерименту та порівняння отриманих результатів.....	43
2.1.4    Висновки щодо вибору варіанта .....	54
2.2    Математичне моделювання.....	56
2.2.1    Розрахунок пружних елементів на міцність з урахуванням діючих умов навантажень.....	56
2.2.2    Розрахунок опору кочення.....	65

2.3. Вибір матеріалів та комплектуючих, конструкторських, технологічних та експлуатаційних рішень для обраного виду рушія .....	78
<b>3 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИЙ АНАЛІЗ ВИРОБУ, ЩО ПРОЄКТУЄТЬСЯ</b>	<b>82</b>
3.1 Методологія визначення показників якості продукції.....	82
3.2 Аналіз та вибір пріоритетних показників якості виробу .....	84
3.2.1 Експлуатаційні показники .....	85
3.2.2 Конструктивні показники .....	90
3.2.3 Технологічні показники .....	91
3.2.4 Економічні показники .....	94
3.3 Аналіз планової собівартості виробу. Висновки за результатами техніко-економічного аналізу та оптимізація виробу .....	95
<b>4 РОЗРАХУНОК НА МІЦНІСТЬ ДЕТАЛЕЙ ВУЗЛА РУШІЯ.....</b>	<b>99</b>
4.1 Розрахунок маточини на міцність.....	99
4.2 Розрахунок піввісі на міцність.....	103
4.3 Розрахунок підшипника маточини.....	104
4.4 Розрахунок шпонкового з'єднання .....	104
4.5 Розрахунок різьбового з'єднання .....	105
<b>5 ВИСНОВКИ ПРО ДОЦІЛЬНІСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ РОЗРОБЛЕНОГО ВИРОБУ ТА СФЕРИ ЙОГО ВИКОРИСТАННЯ.....</b>	<b>106</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....</b>	<b>108</b>
<b>ДОДАТКИ.....</b>	<b>112</b>

## 1 ВСТУП

### 1.1 Визначення терміну рушій. Типи рушіїв та їх область застосування

На початку роботи необхідно визначитись з термінологією, бо незважаючи на те, що сучасна людина кожен день стикається з найрізноманітнішими видами рушіїв, не кожен з нас певною мірою розуміє цей термін згідно з його науковим трактуванням.

Окрім того сучасна теорія автомобіля, як і кожна інша наука, не мають єдиної універсальної класифікації, тож пропонуємо визначитись з вищезазначеним терміном згідно підручника «Теорія експлуатаційних властивостей автомобіля» доктора технічних наук професора Солтуса А.П., а саме: «під рушієм розуміють механізм, який забезпечує контакт автомобіля з опорною поверхнею» [1]. Тобто це само колесо або кінцівки, весло або вітрило, повітряний гвинт або сопло реактивної тяги тощо, саме без двигуна або іншої рушійної сили, як то вітра або мускулів людини.

Слід зазначити що деякі джерела можуть трактувати термін рушій і в ширшому значенні, а саме визначати його як пристрій або засіб для надання руху певній сутності: транспортному засобу, двигуну; сила, що спонукає до чогось-небудь [2]. Таке трактування більше підпадає під термін рушійна сила у вищезгаданому підручнику, а власне: «рушійною силою автомобіля є колова сила на ведучих колесах, яка викликана крутним моментом двигуна» [1].

В західному науковому середовищі теж існує свій термін, це французьке слово Propulsion (дослівно англійською Pro - вперед та Pellere - рухати), що означає створення сили шляхом будь-якої комбінації штовхання або тягнення для зміни поступального руху об'єкта, при цьому рушійна система складається з джерела механічної енергії (двигуна) та рушія (засобу перетворення цієї енергії в рушійну силу) [3]. Тобто в науковому та технічному сенсі західний термін описує власне силову установку що забезпечує рух транспортного засобу та має аналогічне значення саме з рушійною силою в українській термінології.

Після визначення головного терміну доцільно розглянути основні типи рушіїв та галузі їх застосування, яких в наш час винайдено та сконструйовано вже достатньо багато, адже людина кожен день намагається знайти нові та розробити більш технологічні типи рушіїв, які зможуть підняти рівень корисної дії, або взагалі перевернути наш погляд на світ.

Все, за допомогою чого ми зараз переміщуємось у просторі, будь то на поверхні, у воді, повітрі або у космосі, має у своїй основі певний тип рушія, за допомогою якого ми і змінюємо свої координати. Розглянемо основні типи та види рушіїв згідно їх середовища застосування в нижчевказаних таблицях:

**Таблиця 1.1 – На/в воді**

Назва рушія	Склад рушія	Принцип дії	Застосування
Гребний гвинт	Складається з певної кількості лопатей, але більше одного, які розміщені радіально на маточині на однаковій відстані один від одного, повернутих на однаковий кут відповідно до площини обертання. По суті це водометний гвинт з одним витком спіралі Архімеда [4]	Лопаті гвинта обертаючись, захоплюють масу води та відкидають її назад, що і надає їй заданий момент імпульсу, в свою чергу сила реакції води, що відкидає рушія, передають імпульс лопатям гвинта, лопаті через маточину - гребному валу, вал через головний упорний підшипник на корпус судна [4]	Кораблі, катера, підводні човни
Гребне колесо	Велике колесо з лопатями, які занурюють у воду. По конструкції воно аналогічне водяному колесу, з тією різницею, що не потік води приводить в рух колесо, а навпаки колесо використане для руху транспортного засобу [5]	При обертанні колеса, лопать (інша назва плиця) занурюючись у воду, відштовхується від неї за рахунок імпульсу переданого силою реакції води, що і призводить до руху самого судна [5]	Колісні пароплави
Крильчастий рушія (рушія Фойта-Шнайдера)	Рушія складається з круглої пластини, що обертається навколо вертикальної вісі, з певною кількістю вертикальних лопатей, при цьому кожна лопать обертається навколо вертикальної вісі по епіциклоїді за допомогою внутрішнього механізму, який змінює кут атаки лез у синхронізації з обертанням пластини, так щоб кожна лопать забезпечувала поштовх у будь-якому положенні [6]	При обертанні рушія лопаті з циклоїдальним рухом створюють опір у воді, та відштовхуються від неї за рахунок імпульсу переданого силою реакції води, що і призводить до руху самого судна. Можливість швидко змінювати кут і напрямом лопатей в межах від 0° до 360° о дозволяє дуже добре маневрувати судном і в стані майже миттєво змінити його опір [6]	Плавучі крани, пороми, буксири

## Кінець таблиці 1.1

Назва рушія	Склад рушія	Принцип дії	Застосування
Водомет	Водометний рушій складається, як правило, з імпелера (гвинта) з валом, водоводу (водометної труби), апарату, що керує напрямом та реверсивно-кермового пристрою. Водоводи розташовуються усередині або зовні корпусу судна, їх ефективність залежить від форми, місця розташування та конструкції водозабірників, та зазвичай нижча, ніж у гребного гвинта [7]	У водоводі, що являє собою профільовану трубу, водяний потік прискорюється гребним гвинтом (енергією згоряння палива, або тиском стисненого газу) це забезпечує спрямований викид струменя через випускний отвір в кормі. Маса води, що відкидається з певним імпульсом, створює опір рушія, що і призводить судно в рух [7]	Човни, катера, військова техніка
Весло	Довга жердина з рукою та потовщенням на другому кінці у формі лопаті, якій занурюють у воду. Зазвичай наводиться до руху ручною силою [8]	Ідентичній принципу дії важеля. Маса води, що відкидається від лопаті за допомогою ручної сили та важеля з певним імпульсом, створює опір рушія, що і призводить човен в рух	Наразі лише для малих човнів

## Таблиця 1.2 – У повітрі

Назва рушія	Склад рушія	Принцип дії	Застосування
Вітрило	Найпростіше вітрило це шматок тканини встановлений на своє місце, зазвичай на щоглу, за допомогою такелажу. Вітрила більшого розміру зшивають із кількох шматків тканини. Зараз при виробленні парусів використовується матеріал дакрон, нейлон або кевлар [9]	Натягнута поверхня під впливом сили вітру створює рушійну тягу, що передається через щоглу на сам корпус судна. Для досягнення найбільшої корисної дії полотнищу надають таку форму, щоб готове вітрило, наповнене вітром мало добре обтічну вигнуту форму, що в розрізі нагадує крило птаці [9]	Вітрильні судна, яхти, буєра
Повітряний гвинт (пропелер)	Складається з лопатей та маточини, які кріпляться на валу за допомогою втулки. Ідею повітряного гвинта у 1475 року запропонував Леонардо да Вінчі [10]	Обертаючись за допомогою двигуна, лопаті захоплюють повітря та спрямовують його протилежно до напрямку руху з додатковою швидкістю, створюючи тягу і перетворюють крутний момент двигуна в силу тяги. Перед гвинтом створюється зона зниженого тиску, за гвинтом підвищеного [10]	Літаки, гвинтокрили автожири, судна на повітряній подушці

## Кінець таблиці 1.2

Назва рушія	Склад рушія	Принцип дії	Застосування
Рушійне сопло (реактивне сопло)	Складається з камери згорання, звуженої частини, сопла Лавалю та камери охолодження [11]	Гарячий газ високого тиску утворений в камері згорання прямує до звуженої частини, де він переходить зі стану високого тиску до стану високої швидкості, потім через сопло Лавалю виходить направлений потік газу, що забезпечує транспортний засіб реактивною тягою [11]	Літаки, військові засоби
Махаючий рушій	Крила та каркас	За рахунок реакцій повітря з площинами рушія, яким надається маховий поступально-коливальний рух, виникає підйомна сила [12]	Орнітоптери
Повітряна подушка	Вентилятори, повітряна подушка	Вентилятори утворюють великий об'єм повітря у повітряній подушці, який трохи перевищує атмосферний тиск, що і утворює підйомну силу [13]	Військова техніка, судна, піщані катера

Таблиця 1.3 – У космосі

Назва рушія	Склад рушія	Принцип дії	Застосування
Рушійне (реактивне) сопло	Складається з камери згорання, звуженої частини, сопла Лавалю та охолодження [11]	У камері згорання утворюється гарячий газ високого тиску, потім він прямує до звуженої частини, де переходить зі стану високого тиску до стану високої швидкості, далі через сопло Лавалю виходить направлений потік газу який і створює реактивну тягу [11]	Ракети, космічні кораблі
Сонячне вітрило	Складається з каркасу та натягнутого на цей каркас спеціального дзеркального матеріалу [14]	За допомогою тиску фотонів на дзеркальну поверхню, які випромінюються сонячним світлом або лазером, створюється сила, що рухає космічний апарат [14]	Космічні кораблі, супутники
Фотонний	Гіпотетичний ракетний двигун, де джерелом енергії є тіло, яке випромінює світло. На сьогодні існує багато технологічних проблем що унеможливають його виготовлення [15]	Фотон має імпульс, відповідно з цим при витіканні з ракетного двигуна світло створює реактивну тягу. Теоретично цей двигун може розвинути тах тягу та досягти до швидкості світла	Космічні кораблі, супутники

Таблиця 1.4 – На землі

Назва рушія	Склад рушія	Принцип дії	Застосування
Колісний	Диск, який вільно обертається або закріплений на обертовій осі, що і дозволяє встановленому на ній тілу котитися, а не ковзати [16]	Крутний момент прикладений навколо осі колеса, призводить до перетворення кутового переміщення в поступовий рух транспортного засобу. За допомогою колеса робота відбувається не проти сили тертя ковзання а проти сили тертя кочення, яка в штучних умовах доріг суттєво менша [16]	Автомобілі, потяги, велосипеди, тощо
Пневмокопковий	Гумова еластична шина спеціальної конструкції, яка призначена для підвищення прохідності машин при русі на ґрунтах з низькою несучою здатністю [17]	Такий самий як і у колісного рушія, але тиск на ґрунт значно менший, через збільшену контактну поверхню [17]	Трактора та інша техніка підвищеної прохідності
Роторно-фрезерний	Являє собою комплект вузьких металевих роторів у виді дискових фрез великого діаметра, кожен з яких монтується разом з спеціальною лижою	Спеціальні фрези прорізають сніговий покрив на глибину 30-50 см, досягаючи щільної мерзлої поверхні і забезпечуючи транспортному засобу стабільний поступальний рух, тоді як лижі одночасно знижують загальний питомий тиск машини і утримують її на сніговій цілині або крижаному насті	Експериментальний зразок ГАЗ-69
Плазуновий (гусеничний)	Як правило гусеничний рушій, залежно від транспортного засобу, складається з ведучого колеса, гусеничної стрічки, опорних та підтримуючих катків, та механізму натягу з «лінивцями» [18]	За рахунок перемотування гусеничних стрічок створюється тягове зусилля, що і призводить до руху машини, при цьому велика площа контакту гусениць із ґрунтом забезпечує низький тиск на ґрунт, менший навіть за тиск ноги людини	Трактора, танки, інша різноманітна військова та спеціальна техніка
Напівплазуновий та лижно-гусеничний	Складається з гусеничного і колісного (або лижного), що використовуються на транспортному засобі одночасно [19]	Навантаження від задньої частини машини ділиться між опорними котками гусеничної стрічки, що створює мінімальний питомий тиск на поверхню. Поворот здійснюється керованими колесами, гальмуванням відповідної гусениці або комбінованим способом [19]	Снігоболотохід, військова та спеціальна техніка

## Кінець таблиці 1.4

Назва рушія	Склад рушія	Принцип дії	Застосування
Шнековий	Конструкція рушія являє собою два гвинти Архімеда з особливо міцного матеріалу, які розташовані вздовж осі руху транспортного засобу [20]	Під час обертання твірної лінії шнека навколо нерухомої осі з постійною кутовою швидкістю водночас утворюється поступальний рух шнека вздовж згаданої осі, що і призводить до руху транспортний засіб [20]	Шнеко-роторні машини, деякі види всюдиходів
Кінцівки	Шарніри, які нагадують кінцівки живих створінь [21]	За допомогою синхронізованого руху шарнірів відбувається переставляння штучних ніг, що і призводить до зміни положення транспортного засобу у просторі [21]	Крокоходи, роботи
Маглев	Магніти, ротор, статор, система керування [22]	За рахунок властивостей електромагнітної сили, яку створюють електромагніти, потяг чи трамвай піднімається над направляючою поверхнею і рухається в заданому напрямку [22]	Потяги

## 1.2 Рушії наземних транспортних засобів (НТЗ), їх типи та порівняння. Колесо, як основний застосовуваний тип рушія НТЗ

Так як темою даного дипломного проєкту є рушії для наземного транспортного засобу (НТЗ) в цьому розділі більш детально буде розглянуто саме цей тип рушіїв.

Вище вже було зазначено особливості конструкції та принцип дії кожного з «наземних» рушіїв, але не розглянуті їх переваги та недоліки. Тож обговоримо плюси та мінуси різних типів рушіїв НТЗ.

Пневмокатковий – перевагами є підвищене зчеплення з поверхнею, підвищена прохідність, малий тиск на ґрунт або асфальт. Недоліки: мала вантажопідйомність та малий ресурс при пересуванні на твердому покритті [17].



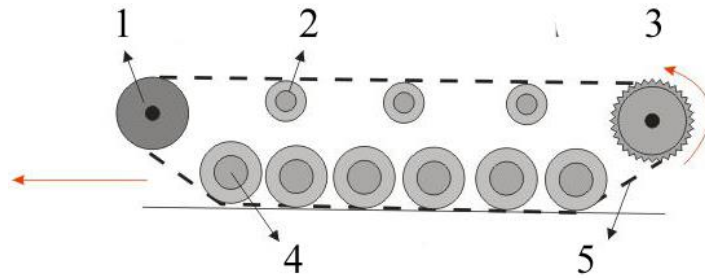
**Рисунок 1.1** – Трактор Ford на пневмокаткових шинах [17]

Роторно-фрезерний – це був одиничний експериментальний зразок, тому говорити про переваги та недоліки немає сенсу.



**Рисунок 1.2** – ГАЗ – 69 з роторно-фрезерним рушієм [23]

Плазуновий – переваги це малий тиск на ґрунт, завдяки високій площі контакту з поверхнею як і у пневмокаткового, підвищена прохідність та маневреність, надійність. Недоліками можна вважати високу вартість виробництва та обслуговування, шум і вібрації, швидкість нижча порівняно з його прямим конкурентом колісним рушієм [18].



*Умовні позначки:*

- 1 – напрямне колесо
- 2 – підтримувальний каток
- 3 – тягове колесо
- 4 – опорний каток
- 5 – гусениця

**Рисунок 1.3** – плазунний рушій [18]

Напівплазунний - це поєднання колісного рушія та плазунного. Переваги і недоліки цього рушія такі як і у колісного з плазунним разом.



**Рисунок 1.4** – Авто Citroën P17 з напівплазунним рушієм [24]

Шнековий – переваги це висока прохідність та маневреність в умовах бруду, снігу і льоду, в якості водохідного рушія (на амфібіях) може рухатися боком по відносно твердому ґрунту. Недолік – не можливе пересування по

асфальту або бетону, при пересуванні по м'яким ґрунтам шнекороторні рушії всюдихода завдають значної шкоди природі, знищуючи поверхневий шар [20].



**Рисунок 1.5** – Шнекохід Residue Solutions MudMaster[25]

Кінцівки - перевагою такого типу рушія може бути висока прохідність. Недоліки – складність конструкції, невисока надійність, високі енерговитрати для виконання корисної роботи, висока собівартість в зв'язку з новітністю та недосконалістю сучасних технологій виробництва [21].



**Рисунок 1.6** – Крокохідний робот Big Dog [26]

Маглев (магнітна левітація) - перевагами є те, що види транспорту з таким типом рушія можуть розвивати швидкість до 1000 км/год, мають тривалий термін експлуатації, низький рівень шуму та вібрацій, високі показники екологічності. Недоліки – висока вартість та складність побудови супутньої інфраструктури [22].



**Рисунок 1.7 - Шанхайський маглев [27]**

Колісний – перевагами цього типу рушія є відносно висока швидкість руху, порівняно з іншими рушіями колісний краще підходить до пересування по твердим покриттям. Ключовою перевагою є простота та універсальність, він набагато простіший у ремонті та обслуговуванні. Технологію виготовлення даного виробу за тисячі років цивілізації людина довела до «ідеалу», що разом з його універсальністю робить в теперішній час даний вид рушія найпопулярнішим.

Недоліками колісного рушія є відносно низький рівень прохідності на екстремальних ділянках та погане зчеплення з дорогою в складних погодних і кліматичних умовах які пов'язані з його точковим контактом з поверхнею. Саме

ці недоліки колісного рушія не дають йому змогу замінити всі інші типи рушіїв [16].



**Рисунок 1.8 – Колесо [28]**

### **1.3 Еволюція колеса, типи коліс, основні переваги та недоліки**

Ще у 3500 році до нашої ери у Месопотамії було винайдено перше колесо. Воно не дуже схоже на звичне для нас, але це початок, який має сучасний результат. Раніше колеса виготовляли з цільного чурбана, їх просто вирізали з стволів дерев. Тоді колесо ще не мало маточини і спиць [29].



**Рисунок 1.9 – Перше колесо [29]**

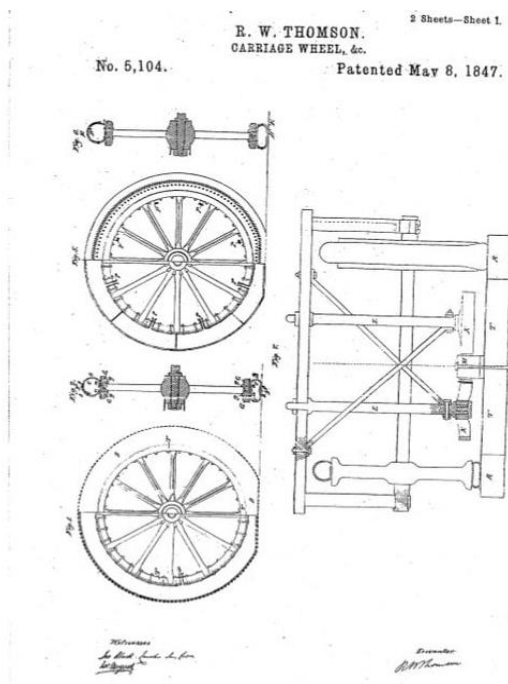
Але у 2-му тисячолітті до нашої ери, у Малій Азії, конструкцію колеса вдосконалили додавши до неї спиці, маточину та обід. Воно було вже схоже на те, що ми звикли бачити зараз, але все одно ще далеко до ідеалу[29].



**Рисунок 1.10** – Колесо зі спицями [30]

Після того ще довго не відбувалося певного прориву в покращенні експлуатаційних якостей колеса, усім було зручно їм користуватися, таке колесо було дешеве, усі вміли його робити та не потрібні були спеціальні навички для його ремонту.

У 1846 році першу пневматичну шину розробив та запатентував англієць Роберт Уільям Томсон. Його шина була виготовлена з двох основних частин: камери та зовнішнього покриття. Камера була виготовлена з декількох шарів тканини, які він пропитав у каучуці, а зовнішнє покриття було зроблено зі з'єднаних заклепками шматків шкіри. В той же час колесо Томсона складалось саме з дерев'яного колеса зі спицями, вставленого в дерев'яний обід оббитий металевим обручем. Але після смерті Томсона його винахід так і не знайшов свою популярність через складність виготовлення та високу вартість використовуваних матеріалів [31].



**Рисунок 1.11** – Перша пневматична шина та патент Томсона [32], [33]

А ось вже шотландець Джон Данлоп, натягнувши на велосипед свого сина садовий шланг для поливу і наповнивши його повітрям, отримав першу повноцінну пневматичну шину. Він запатентував свій винахід 23 липня 1888 року [31].



**Рисунок 1.12** – Велосипедна шина Данлопа [34]

У 1890 році Чальд Кінгстон Уелтч запропонував модифікацію пневматичної шини шляхом відокремлення камери від покриття, для забезпечення жорсткості та пружності в шину пропонувалося по краям вставляти дротові кільця і саджати їх на обід з поглибленням до центру. В цей же час англієць Бартлетт та француз Дідье розробили досить технологічні засоби монтажу та демонтажу шин. Саме ці дві події і зробили винахід Данлопа доступним для широкого використання на автомобілях [31].

Першими, хто використав пневматичні шини на авто були Андре та Едуард Мішлен. Вже у 1895 році відбулася перша гонка, де використали пневматичні шини [31].

В теперішній час в основному використовують два типи шин: камерні та безкамерні, але починаючи з 2004 року компанія Michelin почала розробки нового типу безповітряних шин. Їх особливість полягає в тому, що вони не можуть здутися або лопнути, що покращує їх термін служби та витривалість.

Незважаючи на те що разом з Michelin інші компанії почали розробку подібних шин, ця технологія ще занадто дорога, тому й у масове виробництво вона поки ще не надійшла. Окрім цього треба зауважити ще й те що такі шини мають і певні недоліки: нерегульована жорсткість, вібрації та невелика швидкість (не вище 80 км/год) також накладають обмеження на їх використання [35].



**Рисунок 1.13** – Безповітряна шина Michelin Uptis 2019 рік [35]

Металопружні колеса вперше з'явилися ще у 1865 році, задовго до активного використання пневматичної шини. Тоді їх конструкція дещо відрізнялася від конструкції сучасних металопружних коліс, але сенс розробки залишився таким самим, як і тоді: головна задача - збільшити плавність ходу транспортного засобу. Наприкінці ХХ сторіччя їх ставили на англійські мотоцикли «Квадрант», а на початку ХХ-го їх почали використовувати і на деяких моделях авто.

Як правило замість еластичної гумової покритишки ставили пружини з металевими ґрунтозачепами, тобто жорсткі спиці колеса фактично замінили на пружинні елементи. Конструкторами того часу була винайдена велика кількість пружин колес, особливістю конструкції котрих була наявність металевих пружних елементів, як то пружні маточини або спиці, котрі і забезпечували зменшення динамічного впливу нерівностей доріг на транспортний засіб та призначались в першу чергу для підвищення плавності ходу авто.

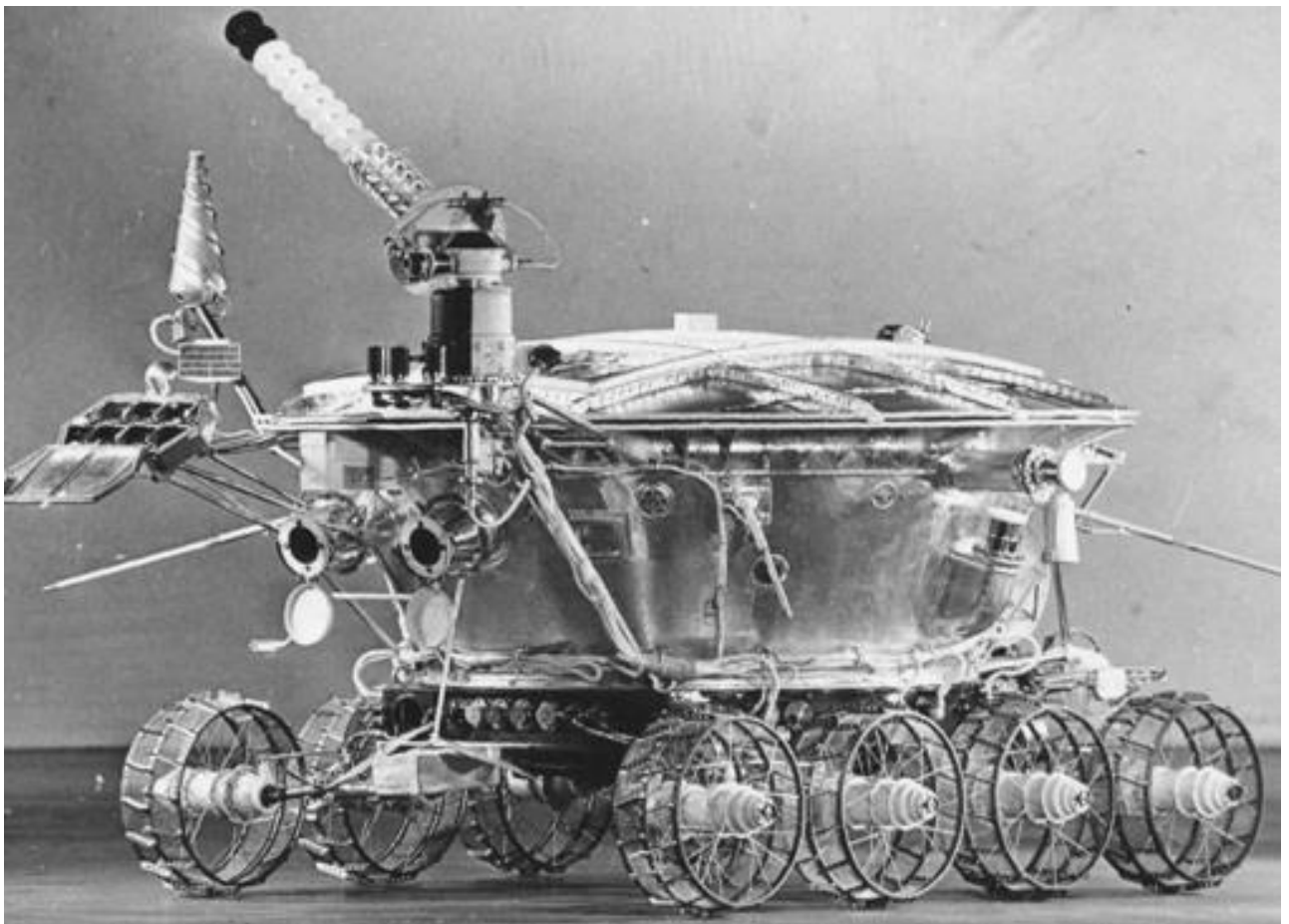
В першу світову війну промисловість не поспівала у повній мірі забезпечувати гумовими шинами усі армійські автомобілі, саме з цієї причини в той час Німеччина достатньо активно використовувала так звані пружні колеса.



**Рисунок 1.14** – Німецький автомобіль з пружинними колесами 1917 рік [36]

При опануванні космосу та дослідженні інших планет сонячної системи перед вченими повстало завдання винайдення нових та модифікації існуючих типів коліс. Така задача постала перед ними в зв'язку з тим, що середовище на інших планетах відрізняється від нашого та земні технології не підходять для їх дослідження. Колеса луноходів, марсоходів та інших дослідницьких машин відрізняються від звичних для нас, бо мають певну специфіку роботи: через інші поверхневі умови, гравітаційні сили, кліматичні та атмосферні умови звичайні пневматичні шини не підходили для такого виду завдання.

У 1970-х роках відбулась перша висадка на поверхню Місяця. Першим транспортним засобом, який проїхався по поверхні Місяця був апарат спроектований у СРСР під назвою “Лунохід-1”. Його колеса були зроблені з жорсткого обода покритого дротяною сіткою та спицями велосипедного типу.



**Рисунок 1.15** – Перший планетохід “Лунохід-1” [37]

Останнім транспортним засобом, який проїхався Місяцем був Lunar Roving Vehicle (LRV). Він міг розвивати швидкість близько 16 км/год. Його колеса склалися з великих гнучких коліс зроблених з дротяної сітки та жорсткими внутрішніми рамами, які виконували функцію запобігання надмірному прогину. До каркаса були прикріплені протекторні смужки, які покращували плавучість у м'якому місячному ґрунті, але водночас дозволяли каркасу відхилитися [38].



**Рисунок 1.16** – Колесо Lunar Roving Vehicle [39]

Згодом вчені зрозуміли особливості місячного середовища і вже мали деякі міркування з приводу проектування коліс для Місяця. Особливості даного середовища такі як значні перепади температур від  $-230$  до  $130$  °С, вплив сонячної радіації, та велика кількість частинок пилу накладають суворі обмеження маси та об'єму [38].

Wheel type:	Rigid rim	Pneumatic	Wire mesh	Spiral spring	Hoop spring	Elliptical	Cone	Hubless
Example reference:	Gromov 2003	Goodyear 1969	GM 1970a	Markow 1963	Bendix 1965	Markow 1963	Grumman 1970	Lockheed 1972
Criteria	Method	Weighting factor						
Mechanical reliability	J	0.15	5.0	4.7	4.7	1.7	4.0	1.9
Soft ground performance	C/E	0.14	7.3	<b>8.7</b>	<b>8.7</b>	8.2	8.3	<b>8.7</b>
Weight	C	0.14	<b>8.7</b>	2.5	4.5	1.0	5.8	0.5
Ride comfort	J	0.13	<b>9.0</b>	3.0	5.0	6.0	2.0	3.0
Obstacle performance	C	0.10	<b>7.4</b>	6.4	6.4	6.8	<b>7.4</b>	6.4
Stability	J	0.08	7.0	2.8	5.7	4.3	7.0	2.8
Wear resistance	J	0.08	5.3	<b>6.0</b>	<b>6.0</b>	<b>6.0</b>	5.3	<b>6.0</b>
Steerability	J/E	0.06	5.8	2.0	2.0	4.1	6.6	2.0
Environmental compatibility	J	0.06	6.0	7.0	7.0	6.0	6.0	3.0
Development risk and cost	J	0.06	8.0	8.0	8.0	4.0	5.3	2.7
Total	1.0	Eliminated	<b>7.1</b>	5.0	5.8	4.7	5.6	3.8

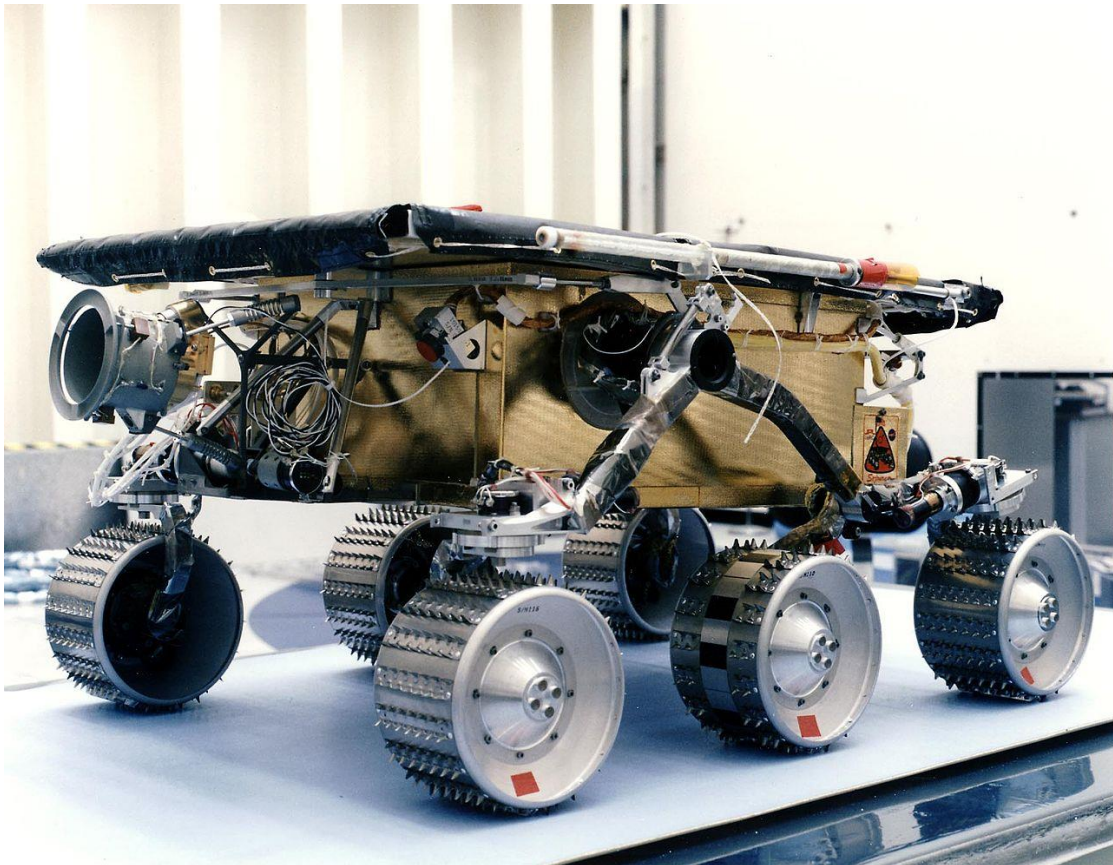
Key : C = Calculation, E = Experiment, J = Engineering judgment

Figure 8.—Wheel concept matrix.  
[After Dr. M.G. Bekker (Bekker 1985). High scores are shown in red.]

Рисунок 1.17 – Матриця концепції колеса [38]

Наступним небесним тілом, поверхню якого людство почало досліджувати став Марс. Його середовище було агресивніше, ніж на Місяці і команді науковців було кинуте новий виклик. Наразі існує три сімейства марсоходів.

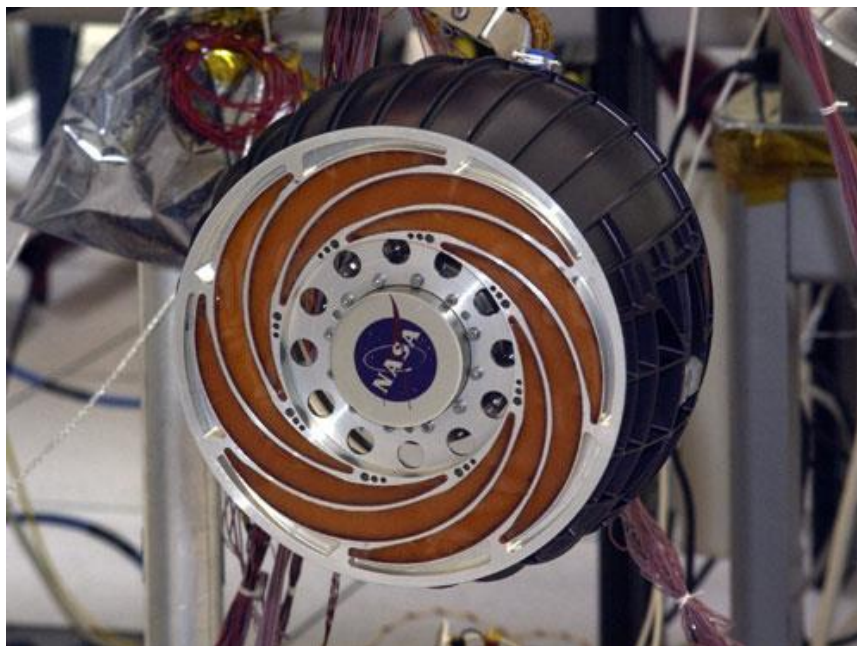
Почалось усе у 1997 року з планетохода “Sojourner”. Він був першим марсоходом та мав невеликі розміри і масу 11,5 кг, від чого потім відмовилися, бо корисне навантаження таких малогабаритних транспортних засобів не дозволяло нести на собі потрібну кількість обладнання для дослідження Марсу. Його колеса були зроблені із алюмінію, а шиповані протектори були зроблені з нержавіючої сталі. Для вивчення абразивного стирання коліс, на ободі лівого середнього колеса “Sojourner” було нанесено тонкі шари алюмінію, нікелю та платини [40].



**Рисунок 1.18 – Марсохід “Sojourner” [40]**

“Opportunity” став другим важливим щаблем в вивченні Марса. Цей марсохід вже мав масу 185 кг та міг виконувати більш широкий спектр завдань. Він пропрацював 14 років замість запланованих дев'яносто трьох днів. Його

колеса вже мали іншу будову, вчені відмовилися від шипованих протекторів та замінили на звичайні поперечні протектори [41].



**Рисунок 1.19** – Колесо “Opportunity” [42]

Третім сімейством марсоходів стали “Curiosity” та “Perseverance”, їх корисне навантаження вже складало понад 800 кг. При створенні “Curiosity” вчені змінили форму протекторів, що не пішло цьому колесу на користь: тверде та гостре каміння скельних порід попробували колеса “Curiosity”. І вже при проєктуванні “Perseverance” вчені повернулися до протекторів аналогічних використовуваним на “Opportunity”.



*CURIOSITY*

*PERSEVERANCE*

**Рисунок 1.20** – Колеса “Curiosity” та “Perseverance” [43]

## 1.4 Обґрунтування вибору металопружного пружинного колеса

Металопружні пружинні колеса набувають популярності через освоєння такої галузі, як робототехніка та дронотехніка. Ці колеса більш надійні, витривалі, потребують меншого обслуговування, це і дає змогу використовувати їх в більш агресивних умовах. Вони не бояться перепаду температур, проколів, порізів та всього іншого, чого бояться звичайні пневматичні колеса.

Основний недолік металопружних пружинних колес є маса, бо при більшій вазі вище рівень вібрацій, менше корисне навантаження та дорожче виробництво.

У наших реаліях ці колеса можна було б використовувати на спеціальній техніці, наприклад на розміновувачах або на транспортних дронах.

Призначення та умови експлуатації вищезазначеної техніки закладають певні показники якості нашого вузла в складі виробу, а саме:

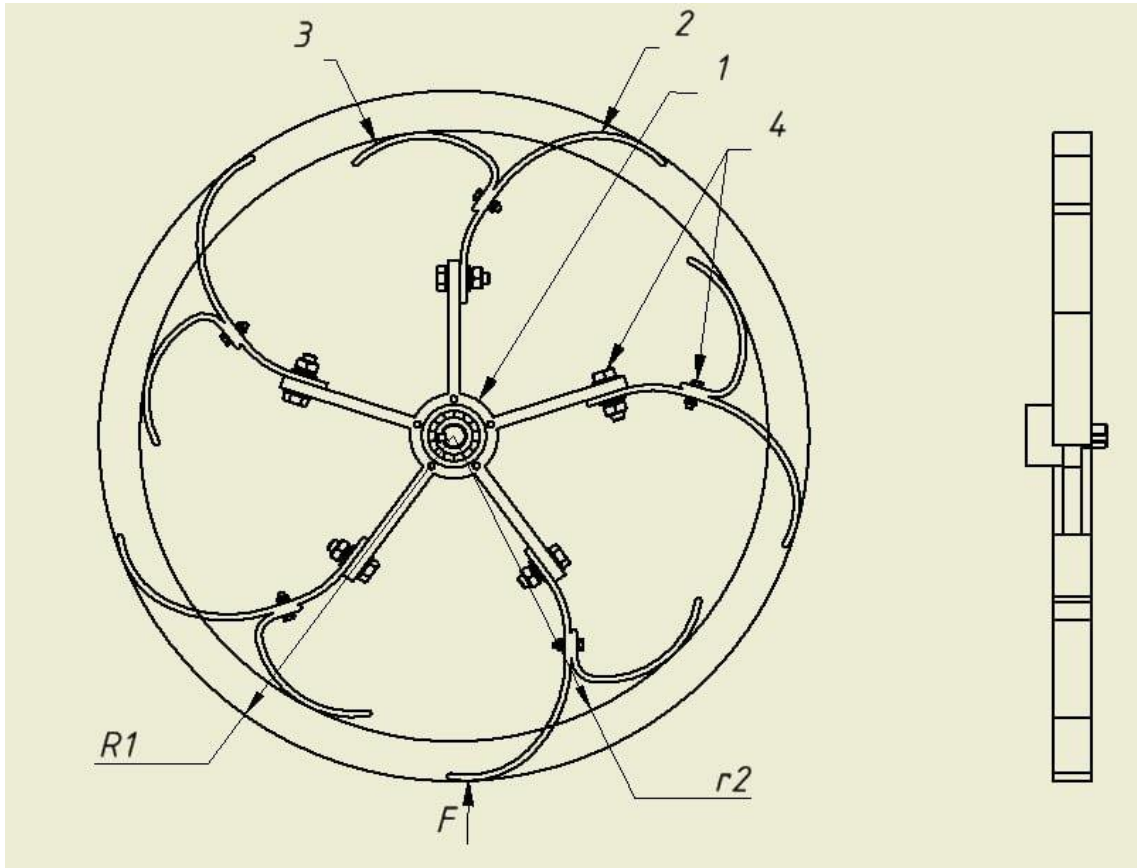
- Прокідність;
- Ремонтопридатність;
- Міцність та надійність;
- Дешевизна.

### 1.4.1 Плоске колесо з пружними елементами типу «спиця», конструктивний аналог «п'ята-стопа»

Така форма опорної поверхні застосовується на рушіях типу крокохід при конструюванні роботів-андроїдів а також при протезуванні нижніх кінцівок людей-інвалідів.

В нашому випадку є доцільність спроби розміщення за допомогою елементів кріплення (4) певної кількості пружних елементів (2) і (3), аналогів людської ступні та п'яти, на колесо, а саме на спиці маточини (1), яка в свою чергу обертається з певним крутним моментом на ведучій піввісі. Під дією

навантаження та виникаючої сили реакції опору  $F$  складовий з двох частин пружний елемент «ступня-п'ята» повинен по черзі прогинатися в точці контакту з поверхнею на певну задану величину, що теоретично в свою чергу змусить пружні елементи по черзі описувати в процесі обертання криві певних змінних



радіусів  $R_1 - r_2$ .

<i>Умовні позначки:</i>	1 – маточина;
$F_1$ – сила реакції опори;	2 – дугоподібний пружний елемент ступня;
$R_1 - r_2$ – max та min радіуси обертання точок опору пружних елементів;	3 – дугоподібний пружний елемент п'ята;
	4 – елементи кріплення;

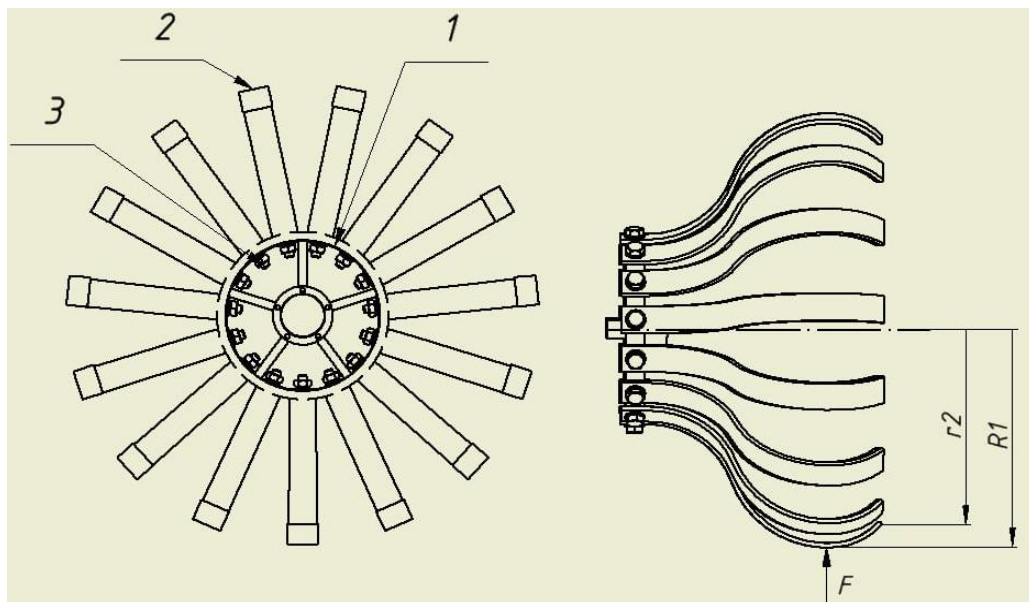
**Рисунок 1.21 – Схема колеса з пружними елементами типу «спиця»**

Таким розташуванням пружних елементів ми забезпечимо простоту та надійність конструкції, певну плавність ходу та невисоку собівартість вузла.

### 1.4.2 Сферичне колесо з пружними елементами типу «напівресора», конструктивний аналог «колесо марсохода»

Подібна сферична форма опорної поверхні застосовується на колісних рушійх для планетоходів, це дозволяє значно збільшити пляму контакту та свою чергу зменшити навантаження на ґрунт у точці контакту під час руху транспортного засобу.

В нашому випадку є доцільність спроби розміщення за допомогою елементів кріплення (3) певної кількості пружних елементів (2), аналогів автомобільної «напівресори», на колесо, а саме по всьому діаметру циліндричної поверхні маточини (1), яка, як і в першому варіанті, в свою чергу обертається з певним крутним моментом на ведучій піввісі. Під дією навантаження та виникаючої сили реакції опору  $F$  пружній елемент «напівресора» також повинен прогинатися в площині контакту з поверхнею на певну задану величину, що, в свою чергу, теоретично також змусить пружні елементи по черзі описувати в процесі обертання неправильну сферу певних змінних радіусів  $R1 - r2$ .



Умовні позначки:

$F$  – сила реакції опору;

$R1 - r2$  – max та min радіуси обертання точок опору пружних елементів;

1 – маточина;

2 – дугоподібний пружний елемент напівресора;

3 – елементи кріплення.

**Рисунок 1.22 – Схема колеса з пружними елементами типу «напівресора»**

Таким розташуванням пружних елементів ми забезпечимо простоту, міцність та надійність конструкції вузла, підвищені показники прохідності та плавності ходу, а також невисоку собівартість кінцевого виробу.

### **1.5 Патентно-інформаційний пошук та дослідження аналогів**

Патентно-інформаційний пошук – це невід’ємна частина дослідницької роботи.

Основні цілі проведення такого пошуку є:

- перевірка новизни, тобто визначення наявності вже схожих запатентованих рішень, що необхідно для оцінки патентоспроможності нашого проєктованого виробу;
- з’ясування, чи не порушується при проєктуванні нового виробу інтелектуальна власність іншої особи, тобто чинні патенти інших компаній та фізичних осіб, це потрібно для уникнення порушення прав на інтелектуальну власність;
- отримання технічної інформації, тобто вивчення рівня техніки в певній галузі, це допомагає під час розробки нових або вдосконалення існуючих виробів;
- оцінка ринкового середовища, тобто аналіз активності конкурентів та тенденцій розвитку технологій;
- підготовка патентної заявки, а саме правильне формулювання патентних вимог та опису проєктованого виробу, з урахуванням існуючих рішень.

Пошук у нашому випадку проводився за ключовими словами та індексом міжнародної патентної класифікації (МПК).

Ключові слова, які використовувались: wheel drive, elastic elements, metal-elastic wheels.

Відповідні індекси МПК: B60B9/26, B60B1/02, B60B9/28.

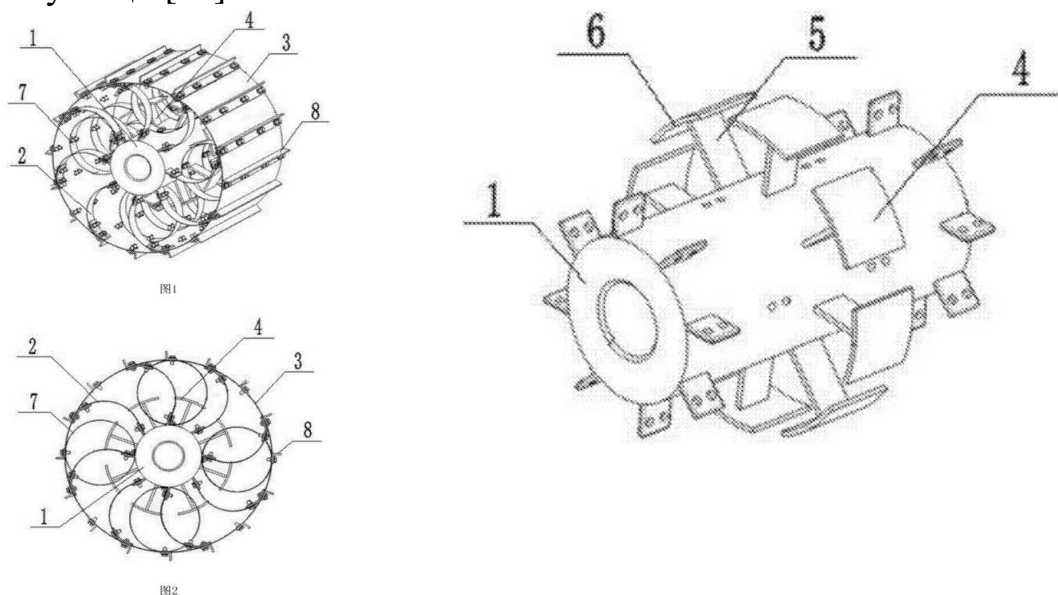
Пошукова діяльність проводилась у таких інтернет ресурсах: Укрпатент та Espacenet.

При проведенні патентно-інформаційного пошуку на платформі Укрпатент аналогів знайдено не було.

При проведенні патентно-інформаційного пошуку на платформі Espacenet знайдені нижчевказані патенти на аналоги.

Еластичне колесо марсоходу, номер патенту CN108116154A.

Це колесо призначене для встановлення на марсохід. Воно містить маточину (1), що має форму циліндра, та поверхню протектора (3), які з'єднані між собою за допомогою дугоподібних еластичних спиць (2). У свою чергу спиці (2) закріплені рівномірно на колі маточини (1), а інша частина спиць (2) прикріплені до поверхні протектора (3). Механізм захисту від деформації (4) складається з опорного стрижня (5) та верхньої пластини (6). Через специфіку проєктованого виробу колесо адаптоване до низької гравітації та специфічних умов експлуатації [44].



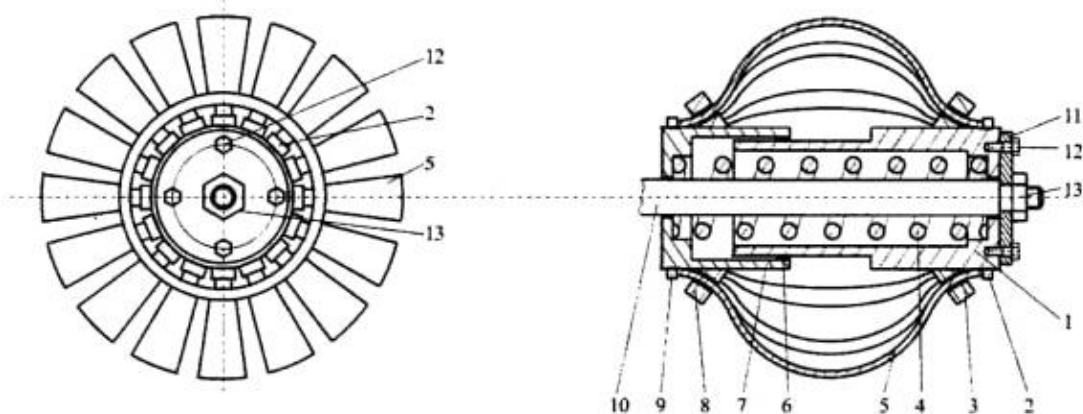
*Умовні позначки:*

- |                                      |                               |
|--------------------------------------|-------------------------------|
| 1 – маточина;                        | 5 – стрижень;                 |
| 2 – дугоподібна еластична спиця;     | 6 – верхня пластина;          |
| 3 – поверхня протектора;             | 7 – кільцева еластична спиця; |
| 4 – механізм захисту від деформацій; | 8 – поперечна балка колеса.   |

**Рисунок 1.23** – Патент еластичного колеса марсохода [44]

Колесо підвищеної прохідності, номер патентної публікації RU2757098C1.

Колесо призначене для підвищення прохідності транспортних засобів на пересіченій місцевості. Основним компонентом колеса є маточина (1), торцева зовнішня сторона якої містить отвори під кріплення фланця (11) що в свою чергу з'єднує її з ведучою віссю (10). Маточина колеса відрізняється тим що зроблена з двох частин (рухомої та нерухомої), на яких є відповідні конусні приливи (3) і (8) із наскрізними прямокутними вирізами через які вставлені пластинчаті пружини параболічної форми (5), що жорстко закріпленні на зовнішніх поверхнях маточини (2) і (9). Рухомий циліндр (7) з упорною циліндричною пружиною (4) і манжетою (6) забезпечує зворотно-поступальний рух обох частин маточини та виконує функцію амортизації під час дії знакозмінних навантажень на пружні елементи [45].



*Умовні позначки:*

1 – маточина;

2, 9 – зовнішні поверхні рухомого циліндра;

3, 8 – конусні приливи;

4 – упорна циліндрична пружина;

5 – пластинчаті пружини;

6 – манжета;

7 – рухомий циліндр;

10 – вісь колеса;

11 – фланець вісі;

12 – болти;

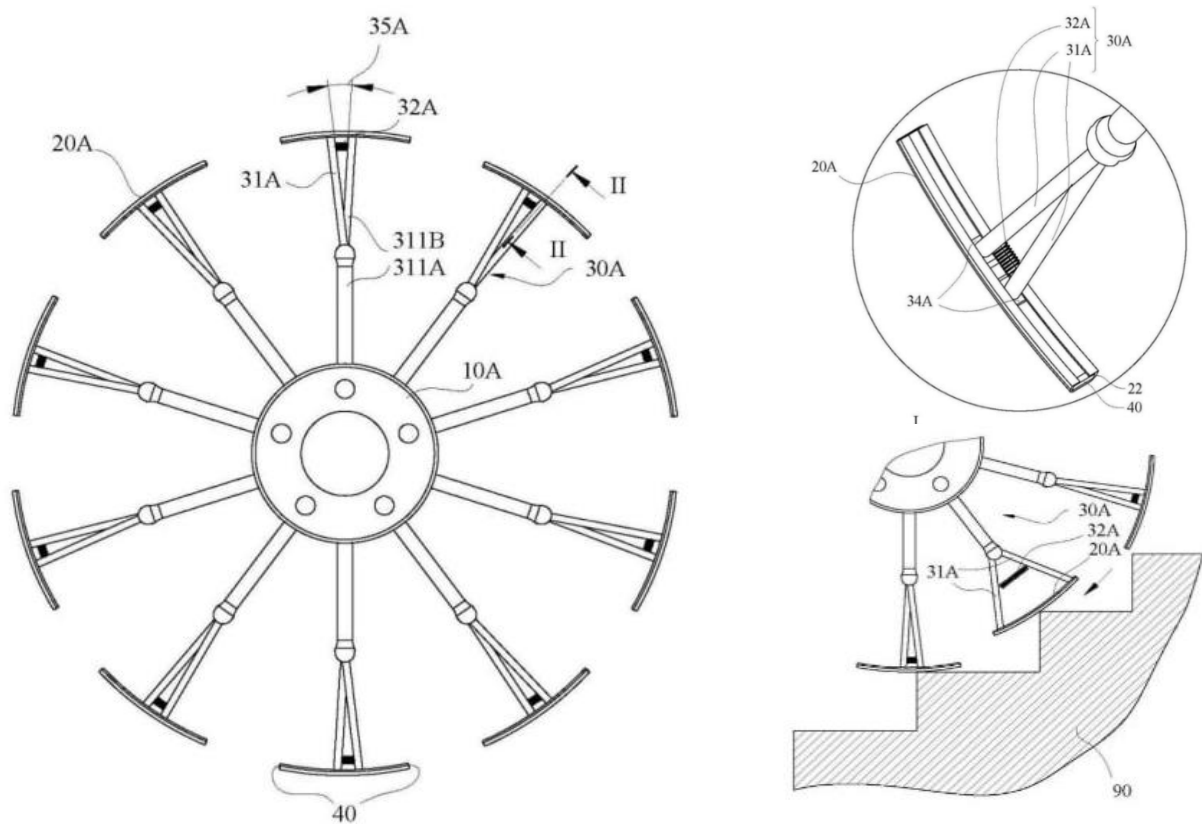
13 – гайки.

**Рисунок 1.24** – Колесо підвищеної прохідності [45]

Згідно коментарів до патенту така конструкція колеса забезпечує краще проходження нерівностей рельєфу, а також пришвидшує процес монтажу коліс та значно спрощує конструкцію, що на наш погляд є сумнівним.

Телескопічне колесо, номер патенту CN114987103A.

Це колесо зроблено з певної кількості складових пружних спиць (30А) розміщених на маточині (10А). Пружна спиця складається з двох частин, а саме цільного корпусу першого стрижня (311А) та складного корпусу другого стрижня (311В), у якого на обох кінцях стрижнів (31А) кріпиться повзун (34А), що ковзає по направляючим рейки (22) колісної рами (20А). Між двох стрижнів знаходиться кутник (35А) та пружина (32А), яка за рахунок своєї жорсткості виступає регулятором довжини спиці. Хід повзуна по направляючим рейки обмежений стопорами (40) [46].



*Умовні позначки:*

10А – маточина;

20А – колісна рама;

30А – спиці в зборі;

31А – стрижні;

32А – пружна частина;

311А – корпус першого стрижня;

311В – корпус другого стрижня;

34А – повзун;

35А – кутник;

22 – направляючі;

40 – стопори;

90 – опорна поверхня.

**Рисунок 1.25** – Телескопічне колесо та схема його роботи [46]

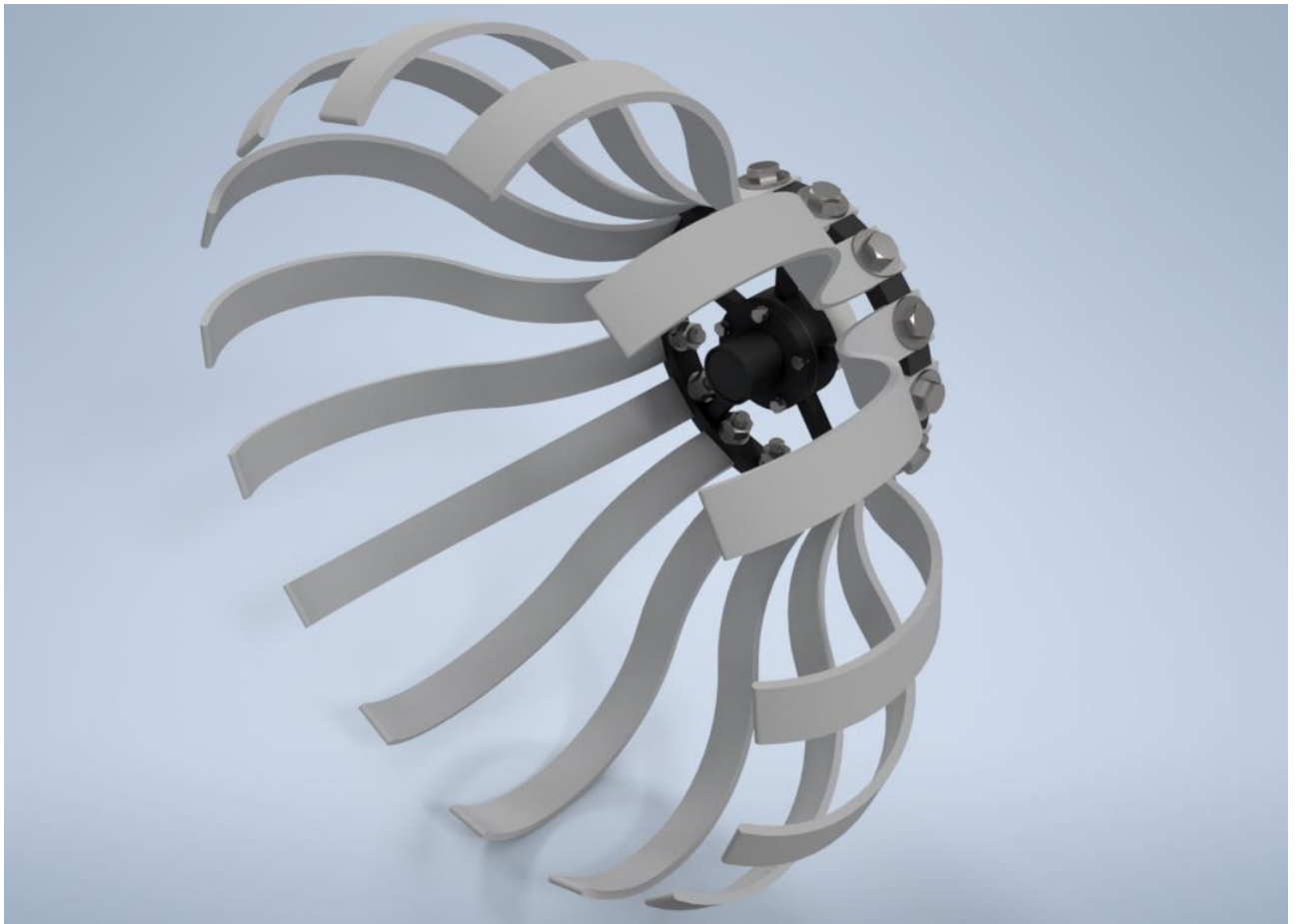
## 2 ФІЗИЧНЕ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

### 2.1 Фізичне моделювання

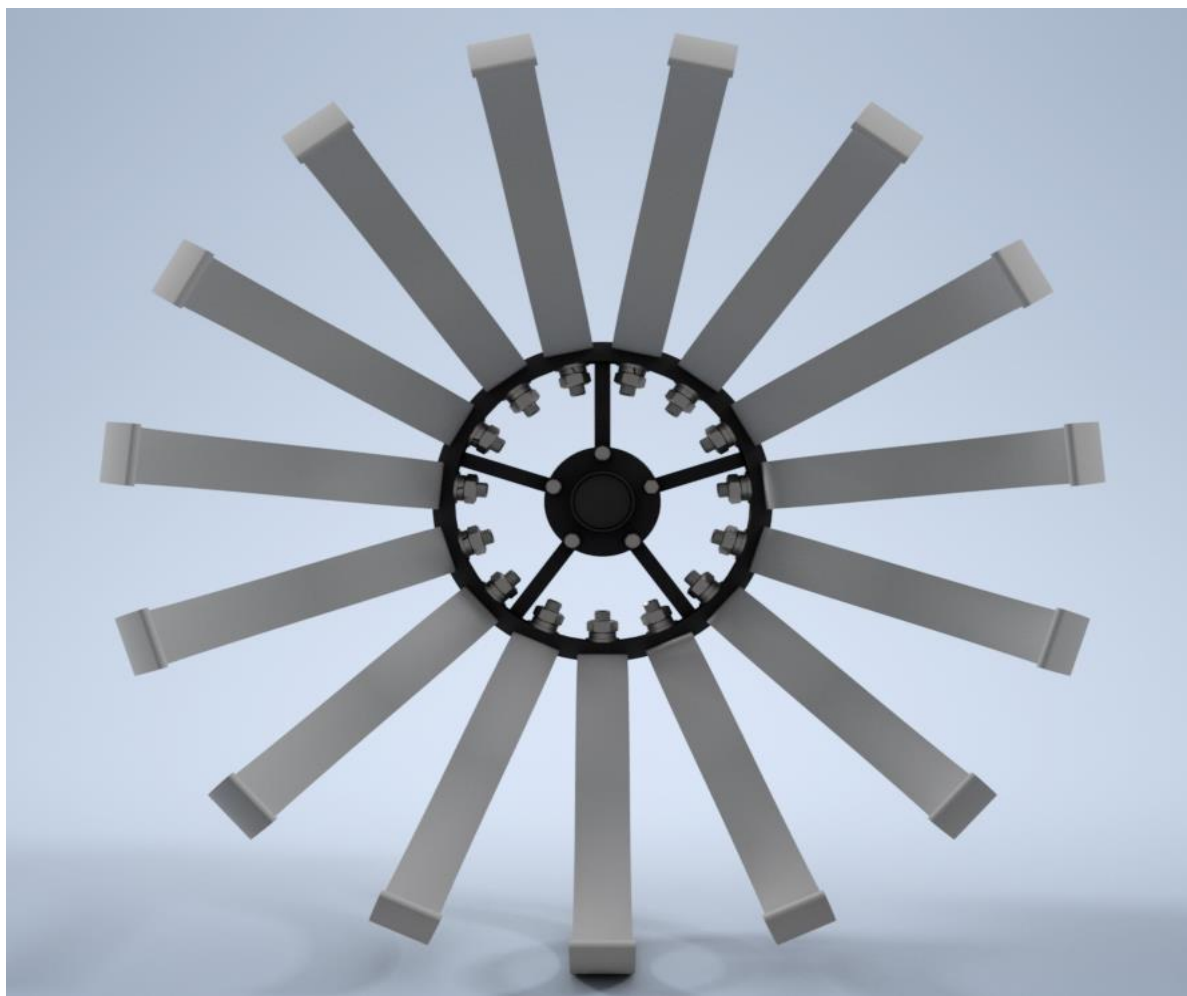
#### 2.1.1 Розробка 3D моделей обох варіантів прототипів рушіїв за допомогою САД-системи Autodesk Inventor Professional 2025 (загальний вигляд)

На основі пошуку та оброблення інформації щодо типів колісних рушіїв, в тому числі знайдених при патентному пошуку аналогів, опрацюванні їх конструктивних і технічних рішень були спроєктовані дві 3D моделі прототипів рушіїв з різними типами пружних елементів за допомогою САД-системи Autodesk Inventor Professional 2025.

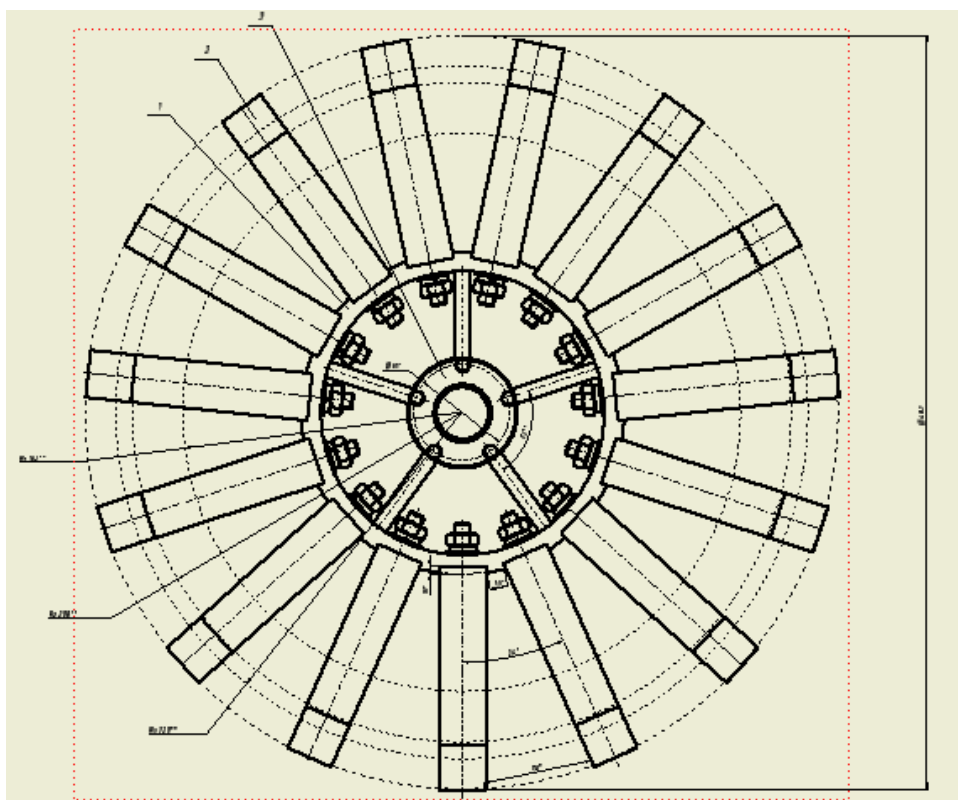
Прототип колісного рушія з пружними елементами типу напівресори (рис 2.1, 2.2 та 2.3):



**Рисунок 2.1** - Аксонометричний вид першого прототипу колісного рушія



**Рисунок 2.2** – Вид спереду першого прототипу колісного рушія



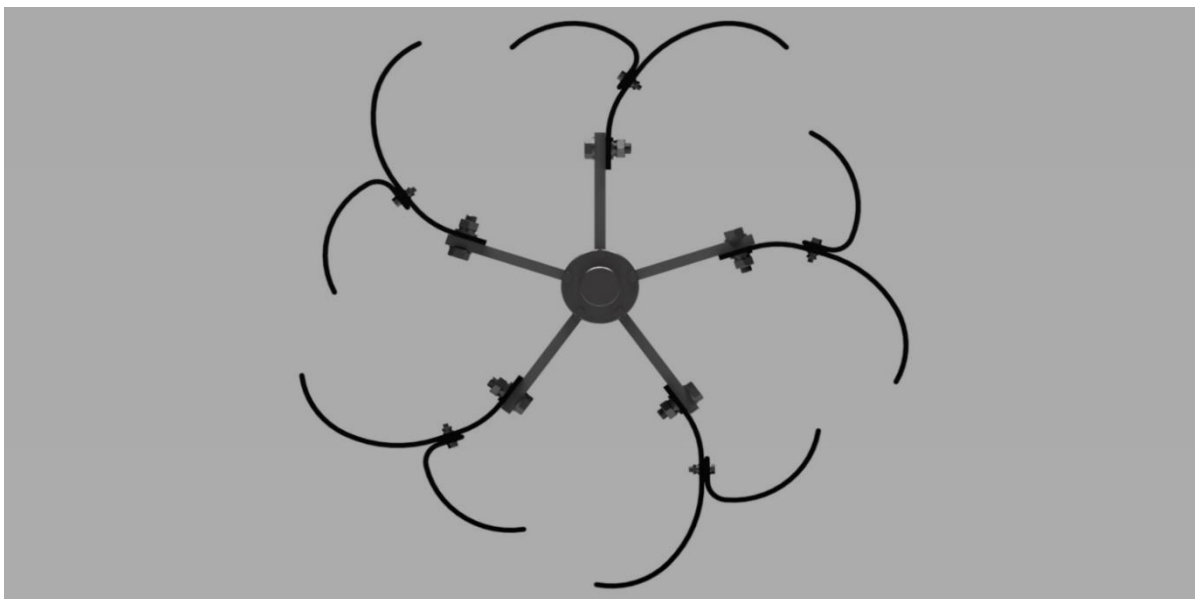
**Рисунок 2.3** – Загальний вигляд спереду першого прототипу колісного рушія

Прототип створений під впливом дослідження конструкцій рушіїв планетоходів. При проектуванні в якості пружних елементів було обрано напівресору, кількість пружних елементів становить п'ятнадцять штук. Колесо має сферичну форму, при навантаженні пружні елементи повинні прогинатися, що буде забезпечувати плавність руху даного виду рушія. Габаритні розміри першого прототипу колісного рушія: зовнішній діаметр 482 мм, ширина 300 мм, мінімальний розмір між пружними елементами 13 мм, а максимальний 70 мм.

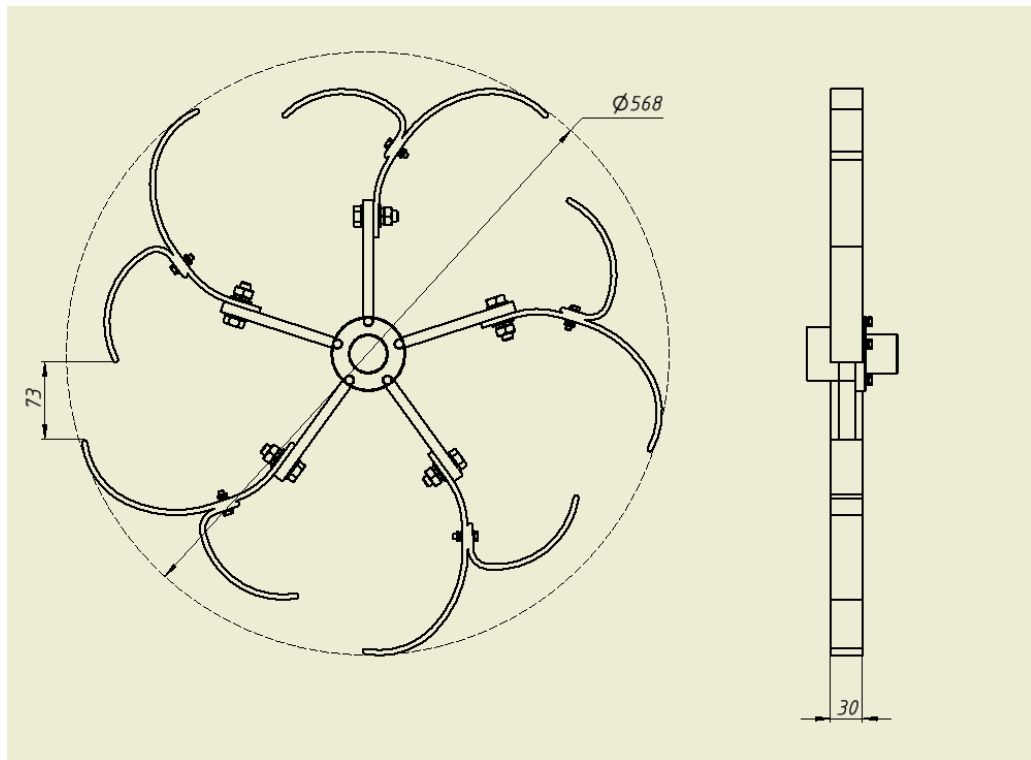
Прототип рушія з пружними елементами типу п'ятка-стопа (рис. 2.4, 2.5 та 2.6):



**Рисунок 2.4** - Аксонометричний вид другого прототипу



**Рисунок 2.5** - Вид спереду другого прототипу



**Рисунок 2.6** - Загальний вигляд спереду другого прототипу колісного рушія

Другий прототип створений під впливом набирання популярності таких видів транспортних засобів, як крокохід. Пружні елементи нагадають протези кінцівок. Габаритні розміри другого прототипу колісного рушія: зовнішній радіус 568 мм, ширина 30 мм, розмір між пружними елементами 73 мм.

Ці два типи рушіїв відрізняються площею контакту з поверхнею (пляма контакту впливає на розподіл тиску на ґрунт і відповідно на прохідність транспортного засобу), конструкцією пружних елементів та сприйманням навантаження (плавність руху, можливість проковзування тощо) та розміщенням їх відносно вузла маточини (дорожній просвіт впливає на кліренс, радіуси поздовжньої та поперечної прохідності).

Після проведення експериментів, результати яких будуть розглянуті та проаналізовані у наступному розділі, буде обраний один з двох прототипів, який більш доцільний для використання в тих умовах експлуатації для яких він і проектується.

### 2.1.2 Масштабне моделювання за допомогою 3D принтера обох варіантів рушіїв

Для дослідження особливостей конструкцій обох варіантів колісних рушіїв та подальшого проведення аналізу їх механічних властивостей щодо руху по різних типах поверхонь, за допомогою 3D принтера у масштабі п'ять до одного було виготовлено дві пари обох видів рушіїв. При печатанні використовувався спеціальний термопластичний полімер марки PETG (Polyethylene Terephthalate Glycol-modified) з пружними характеристиками.

З використанням типових деталей металевого конструктора також було виготовлено два макетних зразки елементарних транспортних засобів, а саме два тягових візки зі спеціальними майданчиками для розміщення еталонних гирь.

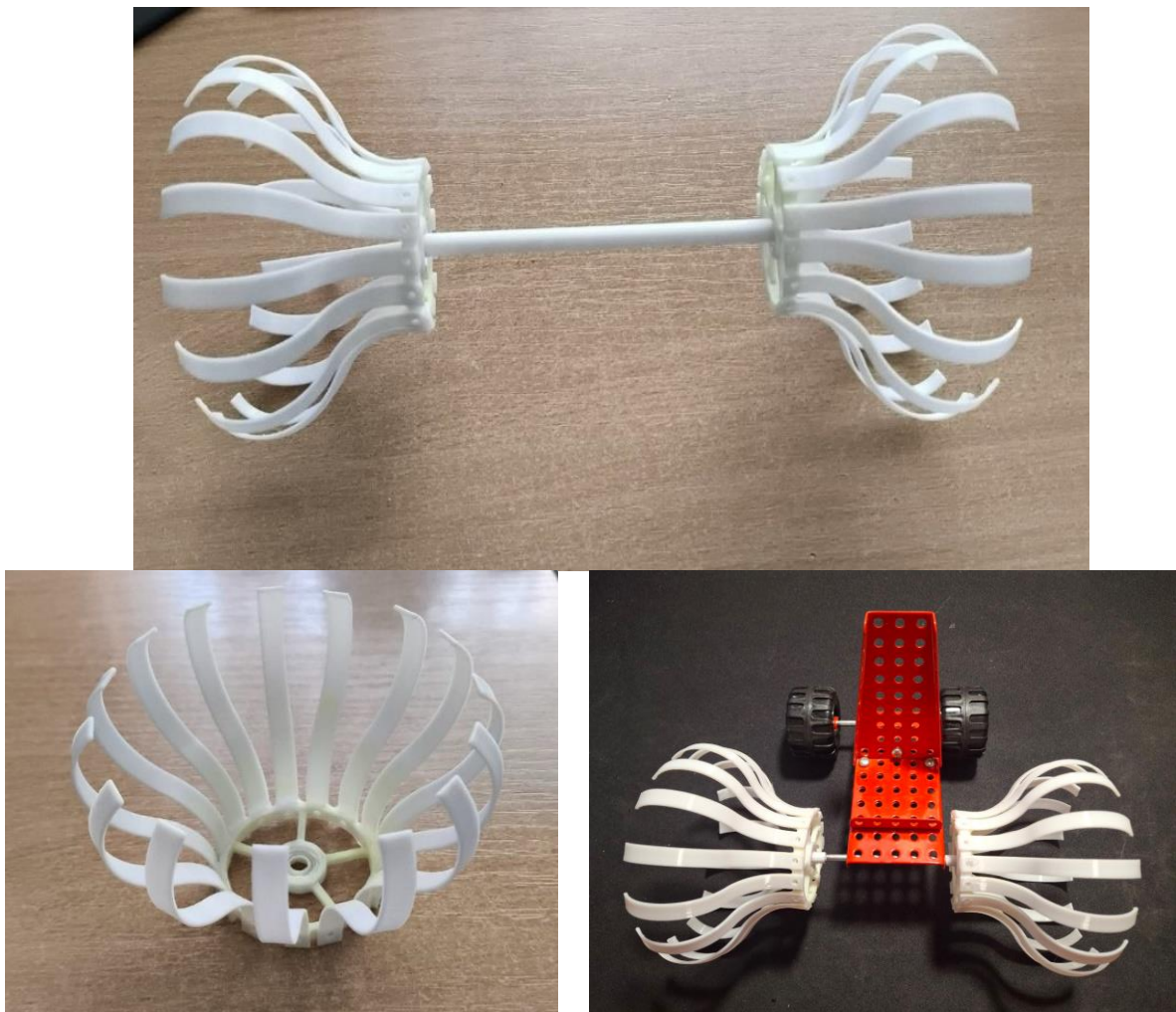
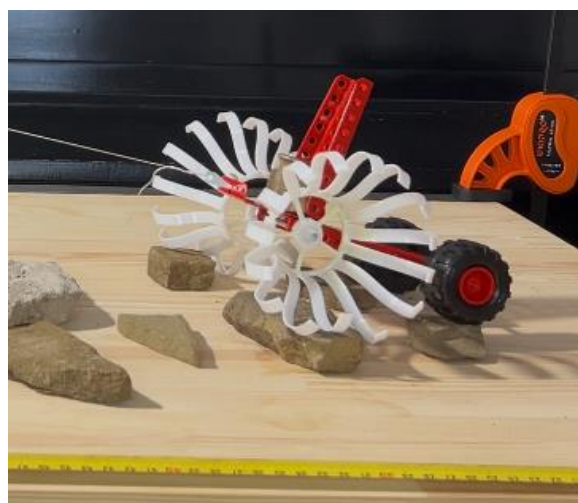
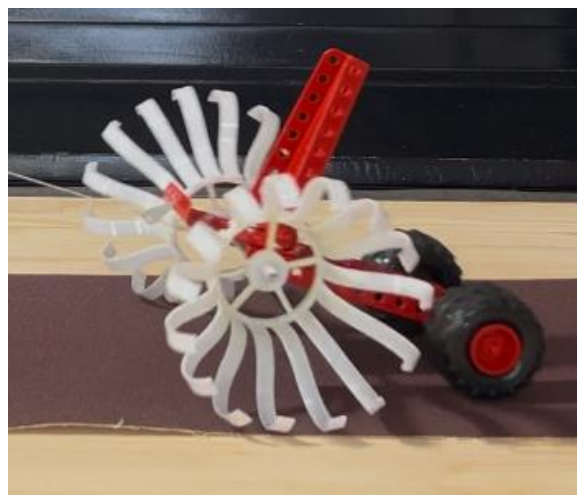
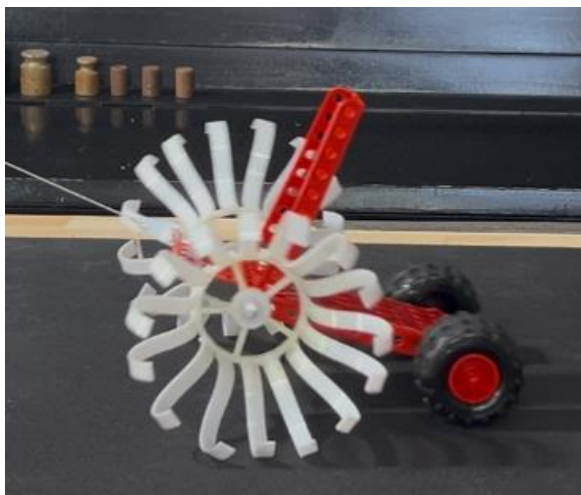
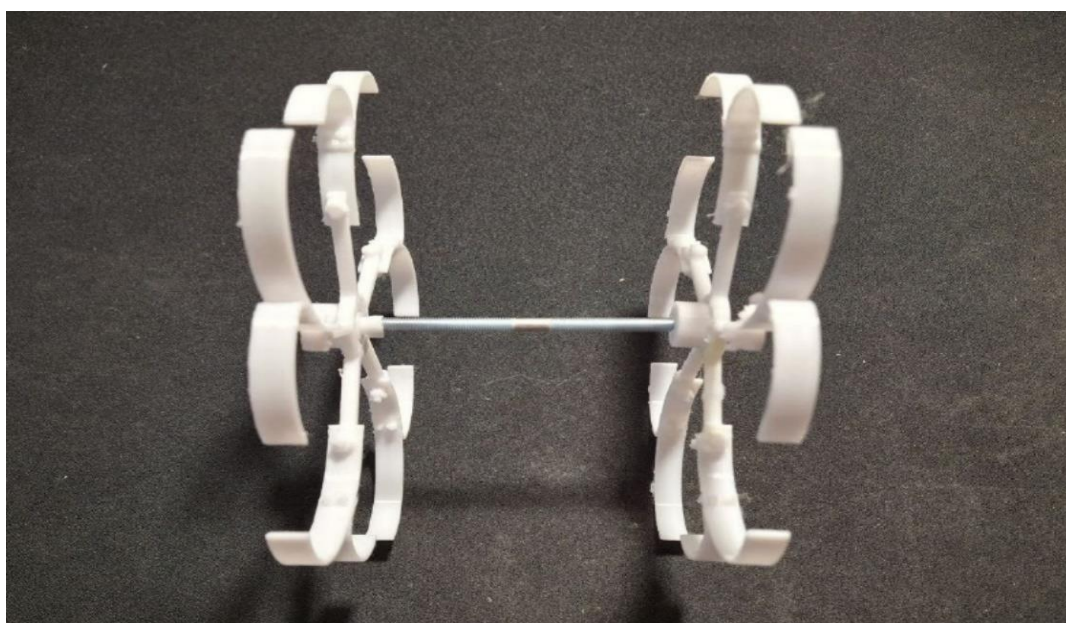


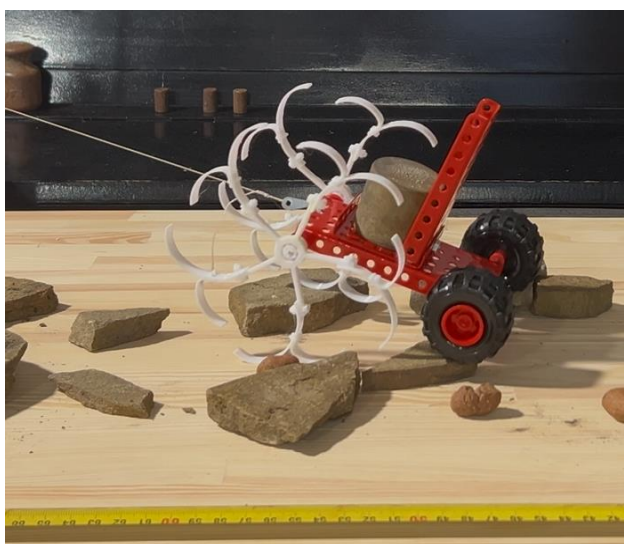
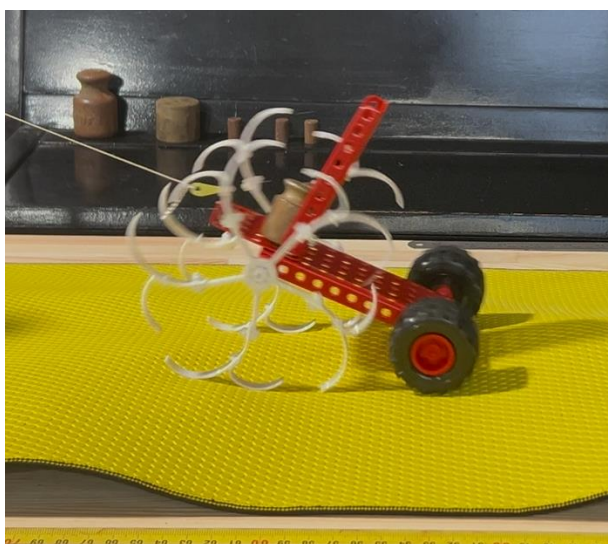
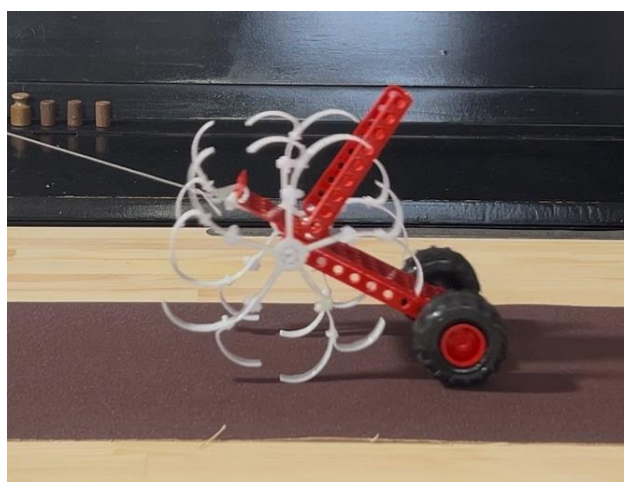
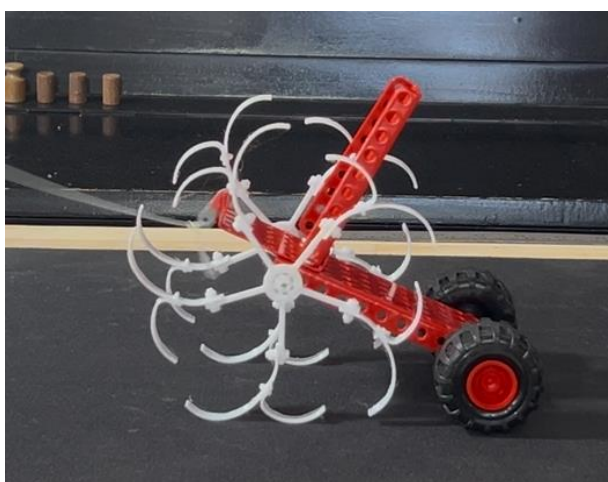
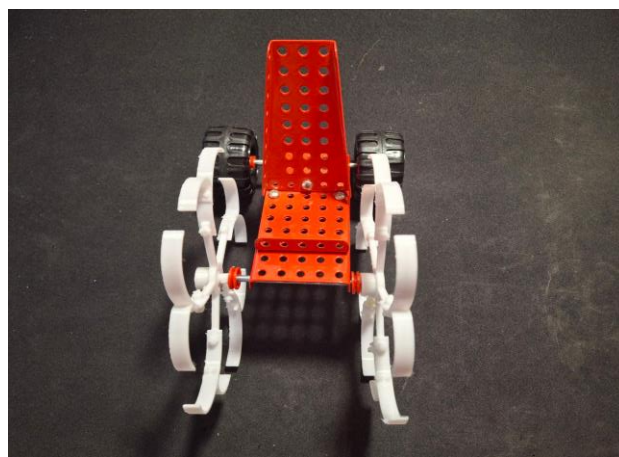
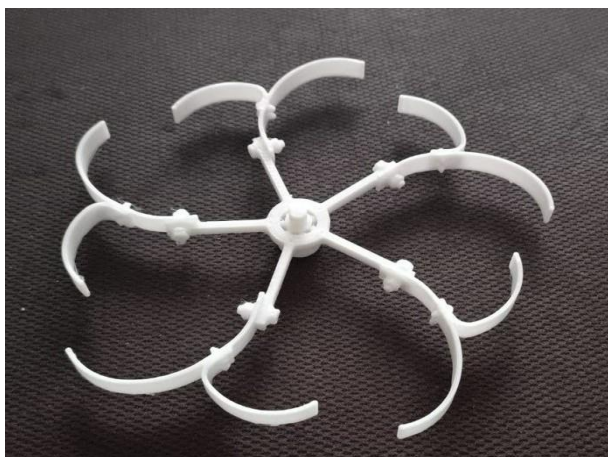
Рисунок 2.7 аркуш 1 - Варіант макетного зразка колісного рушія з пружними елементами типу напівресора на різних поверхнях



**Рисунок 2.7 аркуш 2** - Варіант макетного зразка колісного рушія з пружними елементами типу напівресора на різних поверхнях



**Рисунок 2.8 аркуш 1** - Варіант макетного зразка колісного рушія з пружними елементами типу п'ятка - стопа на різних поверхнях



**Рисунок 2.8** аркуш 2 - Варіант макетного зразка колісного рушія з пружними елементами типу п'ятка - стопа на різних поверхнях

Виготовлені макетні зразки були надалі використані при проведенні дослідницького експерименту, а саме моделюванні руху першого та другого візка.

### 2.1.3 Опис експерименту та порівняння отриманих результатів

При проведенні дослідницького експерименту був змодельований рівномірний прямолінійний рух транспортного засобу по умовно ідеальній твердій поверхні з різними показниками тертя та навантаженням, а також рух по поверхні з різними типами нерівностей.

На першому етапі проводилось порівняння прямолінійного руху обох зразків у так званій спорядженій масі, а саме без додаткового навантаження на умовно абсолютно твердій поверхні з використанням різного покриття, тобто при різних коефіцієнтах щеплення пружних елементів з поверхнею, в тому числі по поверхні:

- еластичного килимка для комп'ютерної миші;
- дерев'яній поверхні стола;
- прорезиненій оборотній стороні комп'ютерного килимка;
- а також по абразивній поверхні наждачного паперу середньої Р100 та крупної Р60 зернистості.

Метою дослідження було порівняння плавності руху кочення обох варіантів рушіїв (або ступені проковзування, якщо воно мало місце).

На другому етапі проводилось дослідження впливу навантаження на зчеплення пружних елементів дослідних візків з вищезгаданими типами поверхонь, а саме розглядалося питання за яких умов, тобто при якому мінімальному навантаженні починає зникати ковзання та виникає кочення. При експерименті були використані еталонні гирі вагою від 100 грам до 500 грам.

На третьому та четвертому етапах експерименту для дослідження та порівняння прохідності обох варіантів рушіїв був змодельований рух транспортних засобів по нерівній та кам'янистій поверхні за умов спорядженої маси візків та їх корисного навантаження. Спостереження допомогли визначити

як будуть впливати кліренси та розташування центрів мас візків у першому та другому варіантах рушіїв.

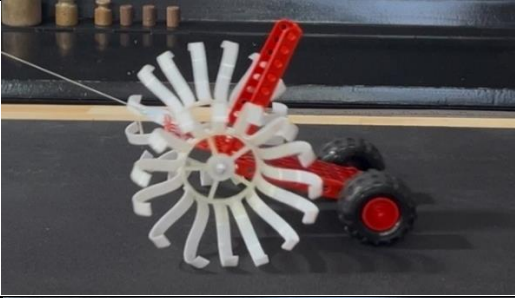
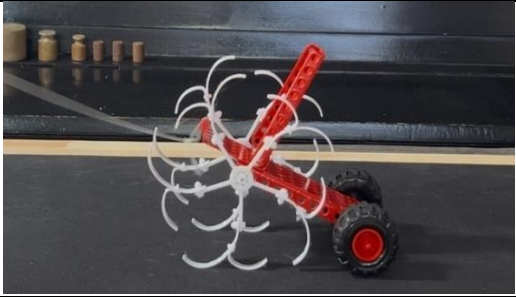
Для аналізу та порівняння отриманих результатів був застосований експертний метод з бальною оцінкою, а саме при оцінці якості експлуатаційних властивостей транспортного засобу, як то плавність руху, зчеплення з поверхнею та умовна прохідність використовувалась чотирибальна система: 4 («відмінно»), 3 («добре»), 2-1 («задовільно») та 0 («погано»).

Бали проставлялись на кожному етапі експерименту для кожного варіанта рушія, надалі отримані бали підсумовувались та проставлялась оцінка у вигляді середньо арифметичного балу для кожного етапу та рушія. По закінченні етапу порівнювався рівень якості тих чи інших властивостей рушіїв відносно один до одного.

По закінченні експерименту виводилась середня оцінка для кожного варіанту рушія та порівнювався їх результуючий рівень відносно один до одного.

Результати експерименту з макетними зразками наведені в таблиці 2.1.

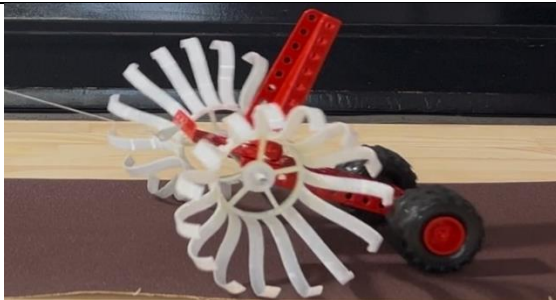
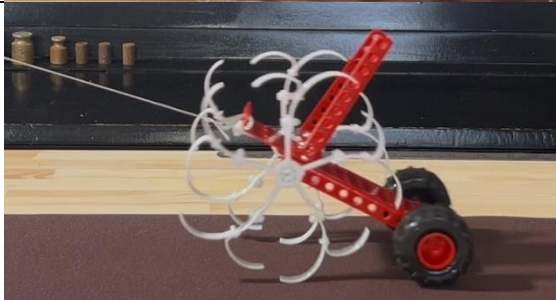

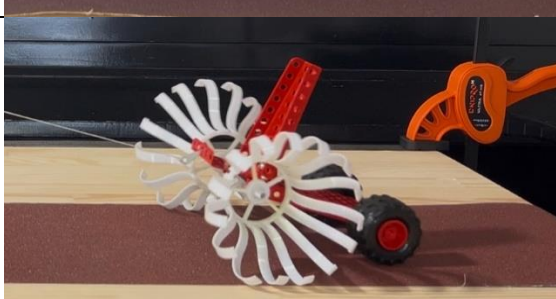

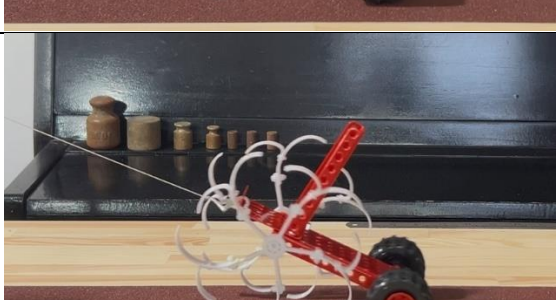
**Таблиця 2.1** – Експерименти з макетними зразками рушіїв (Варіанти А - з пружним елементом типу напівресора, Варіанти Б - типу п'ятка-стопа)

Група	№ п/п	Назва експерименту та його зміст	Зображення експерименту	Результат	Примітки
1. Споряджена маса на різних поверхнях	1.1.а	Дослідження плавності руху рушія типу напівресора на гладкій та слизькій поверхні без додаткового навантаження		+ + + + (4)	Відмінно (плавний хід, проковзування та коливання нема)
	1.1.б	Дослідження плавності руху рушія типу п'ятка-стопа на гладкій та слизькій поверхні без додаткового навантаження		- - - - (0)	Погано (тільки ковзання)

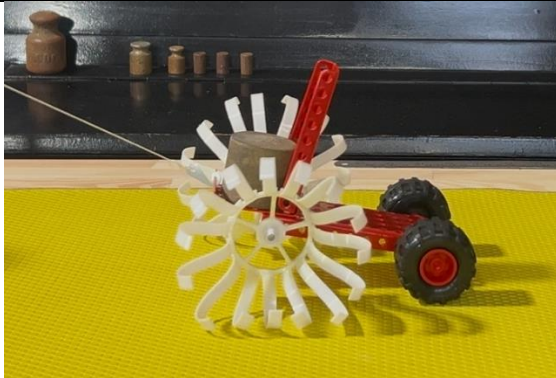
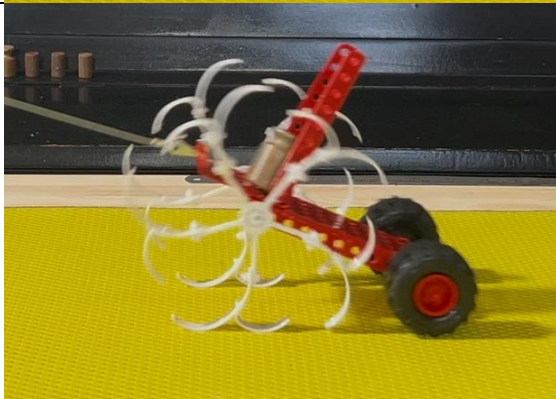
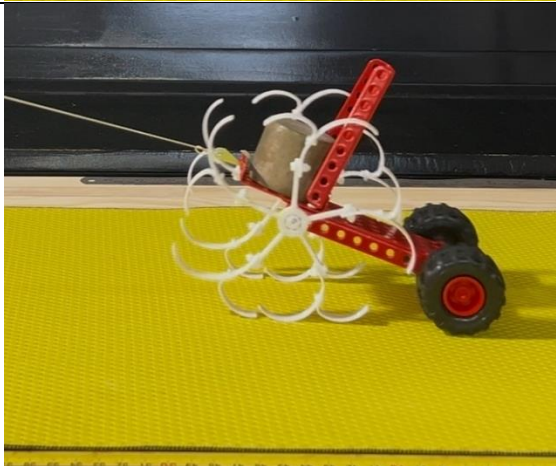
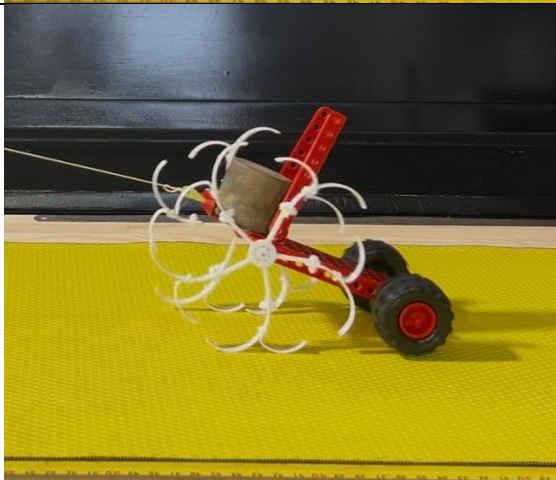
Продовження таблиці 2.1

1. Вплив рівня зчеплення з опорною поверхнею на рух візка за умов його спорядженої маси	1.2.a	Дослідження плавності руху рушія типу напівресора на гладкій дерев'яній поверхні без навантаження		+ + + + (4)	Відмінно (плавний хід, проковзування та коливання нема)
	1.2.б1	Дослідження плавності руху рушія типу п'ятка-стопа на гладкій дерев'яній поверхні без навантаження		- - - - (0)	Погано (значне проковзування, низька плавність, підстрибування через різницю розмірів динамічних радіусів)
	1.2.б2	Дослідження плавності руху рушія типу п'ятка-стопа на гладкій дерев'яній поверхні без навантаження зі зміщенням колес		- - + + (2)	Задовільно (проковзування незначне, але велике коливання через зміщення на пів кута секторів правого та лівого колеса, значна «хромота»)
	1.3.a	Дослідження плавності руху рушія типу напівресора на гладкій гумовій поверхні без навантаження		+ + + + (4)	Відмінно (плавний хід, проковзування та коливання нема)
	1.3.б1	Дослідження плавності руху рушія типу п'ятка-стопа на гладкій гумовій поверхні без навантаження		- + + + (3)	Добре (проковзування нема, є невелике підстрибування через різницю розмірів динамічних радіусів «п'ятки-стопи»)
	1.3.б2	Дослідження плавності руху рушія типу п'ятка-стопа на гладкій гумовій поверхні без навантаження зі зміщенням колес		- - + + (2)	Задовільно (проковзування нема, але є підстрибування та коливання через різницю розмірів радіусів та зміщення кута «п'ятки-стопи»)

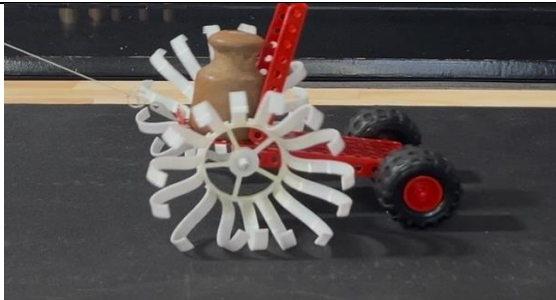
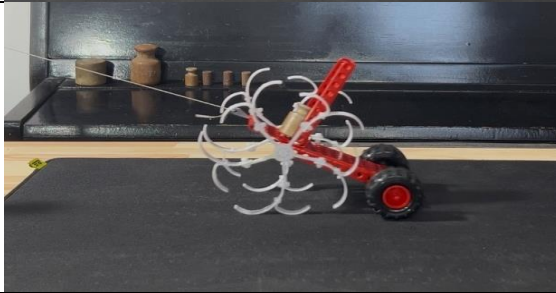
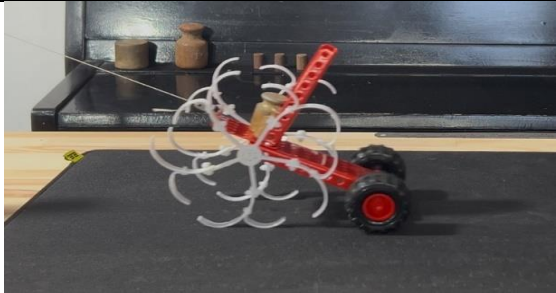
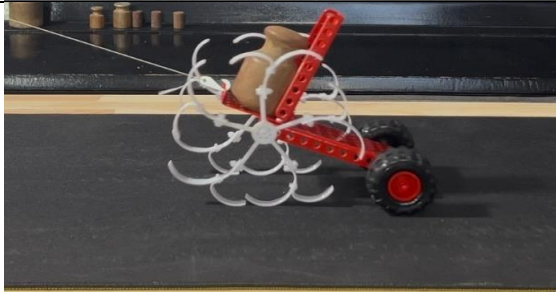

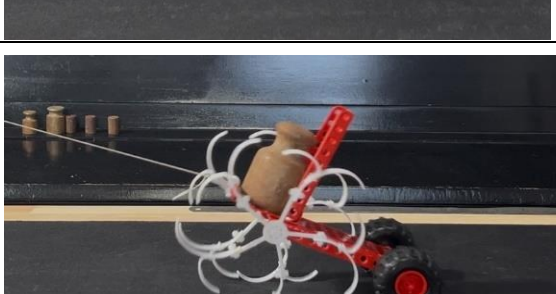
Продовження таблиці 2.1

1. Вплив рівня зчеплення з опорною поверхнею на рух візка за умов його спорядженої маси	1.4.a	Дослідження плавності руху рушія типу напівресора на шорсткій поверхні серед зернистості P100 без навантаження		+ + + + (4)	Відмінно (плавний хід, проковзування та коливання нема)
	1.4.б1	Дослідження плавності руху рушія типу п'ятка-стопа на шорсткій поверхні серед зернистості P100 без навантаження		- - + + (2)	Задовільно (проковзування нема, є значне підстрибування через різницю розмірів динамічних радіусів «п'ятки-стопи»)
	1.4.б2	Дослідження руху рушія типу п'ятка-стопа на шорсткій поверхні P100 без навантаження зі зміщенням кута сектора колес		- - + + (2)	Задовільно (проковзування нема, але є значне коливання через різницю розмірів радіусів та зміщення кута «п'ятки-стопи»)
	1.5.a	Дослідження плавності руху рушія типу напівресора на шорсткій поверхні великої зернистості P60 без навантаження		+ + + + (4)	Відмінно (плавний хід, проковзування та коливання нема)
	1.5.б1	Дослідження плавності руху рушія типу п'ятка-стопа на шорсткій поверхні великої зернистості P60 без навантаження		- - + + (2)	Задовільно (проковзування нема, але є підстрибування через різницю розмірів динамічних радіусів «п'ятки-стопи»)
	1.5.б2	Дослідження плавності руху рушія типу п'ятка-стопа на шорсткій поверхні P100 без навантаження зі зміщенням кута сектора колес		- - + + (2)	Задовільно (проковзування нема, але є значне коливання через різницю розмірів радіусів та зміщення кута «п'ятки-стопи»)

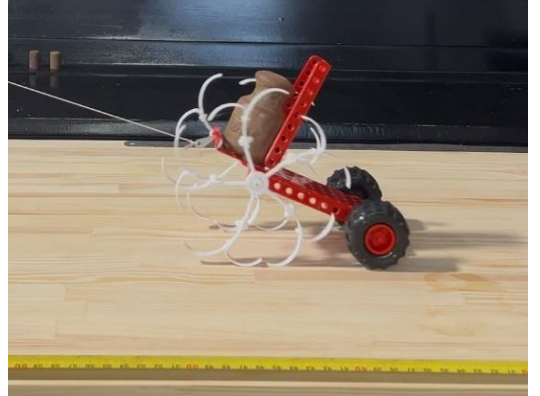
## Продовження таблиці 2.1

2. Вплив мінімальних та максимальних навантажень на рівень зчеплення рушіїв з опорною поверхнею	2.1.a	Дослідження плавності руху рушії типу напівресора на прорезиненій поверхні при навантаженні 450 грам		+ + + + (4)	Відмінно (плавний хід, проковзування та коливання нема). При 100 грамах прогин напівресор незначний, при 500 грамах недопустимий.
	2.1.б1	Дослідження плавності руху рушії типу п'ятка-стопа на прорезиненій поверхні при навантаженні 100 грам		- - + + (2)	Задовільно (проковзування нема, але є невелике підстрибування, різниця розмірів динамічних радіусів «п'ятки-стопа» незначна)
	2.1.б2	Дослідження плавності руху рушії типу п'ятка-стопа на прорезиненій поверхні при навантаженні 450 грам		- + + + (3)	Добре (проковзування нема, є майже незначне підстрибування, різниця розмірів динамічних радіусів «п'ятки-стопа» значно менша)
	2.1.б3	Дослідження плавності руху рушії типу п'ятка-стопа на прорезиненій поверхні при навантаженні 450 грам зі зміщенням колес на половину кута сектора		- - + + (2)	Задовільно (проковзування нема, але є незначні підстрибування та коливання через невелику різницю розмірів динамічних радіусів та зміщення кута «п'ятки-стопа»)

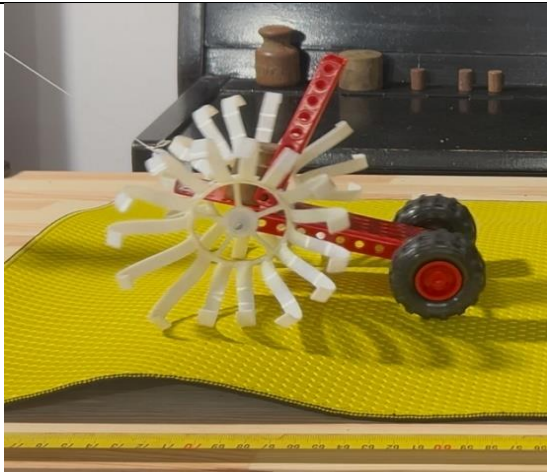
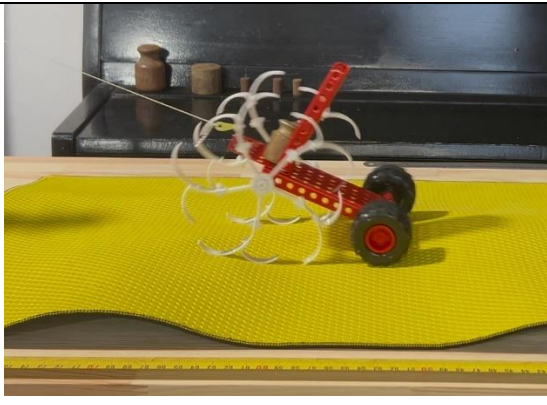
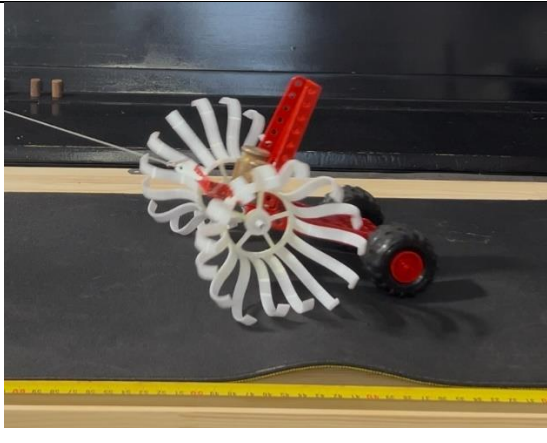
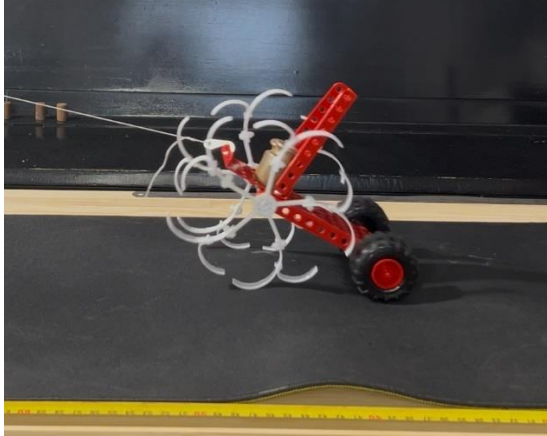
## Продовження таблиці 2.1

2. Вплив мінімальних та максимальних навантажень на рівень зчеплення рушіїв з опорною поверхнею	2.2.a	Дослідження плавності руху рушії типу напівресора на гладкій та слизькій поверхні з додатковим навантаженням 500г		- + + + (3)	Добре (плавний хід, але значний прогин напівресора, одночасно в зчепленні з поверхнею 4-5 елементів)
	2.2.b1	Дослідження плавності руху рушії типу п'ятка-стопа на гладкій та слизькій поверхні з додатковим навантаженням 100г		- - - - (0)	Погано (значне проковзування, низька плавність і підстрибування через різниці динамічних радіусів «п'ятки-стопа»)
	2.2.b2	Дослідження плавності руху рушії типу п'ятка-стопа на гладкій і слизькій поверхні з додатковим навантаженням 150г		- - - - (0)	Погано (значне проковзування, низька плавність і підстрибування через різниці динамічних радіусів «п'ятки-стопа»)
	2.2.b3	Дослідження плавності руху рушії типу п'ятка-стопа на гладкій і слизькій поверхні, навантаження 500г		- + + + (3)	Добре (проковзування нема, незначне підстрибування через різницю розмірів динамічних радіусів «п'ятки-стопа»)
	2.2.b22	Дослідження плавності руху рушії типу п'ятка-стопа на гладкій і слизькій поверхні, навантаження 150г зі зміщенням кута сектору колес		- + + + (3)	Добре (проковзування нема, незначне підстрибування та коливання через різницю розмірів лівого і правого динамічних радіусів «п'ятки-стопа»)
	2.2.b32	Дослідження плавності руху рушії типу п'ятка-стопа на гладкій і слизькій поверхні, навантаження 500г зі зміщенням кута сектору колес		- - + + (2)	Задовільно (проковзування немає, дуже низька плавність руху, значне коливання через різницю лівого та правого динамічних радіусів колес «п'ятки-стопа»)

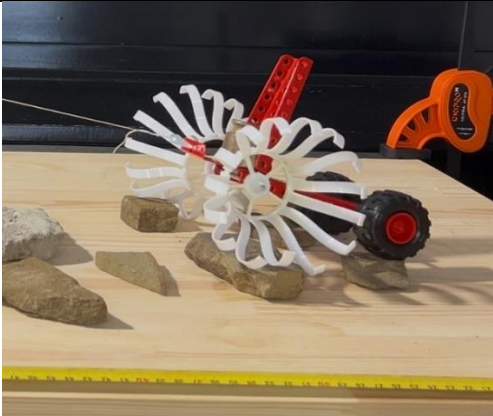

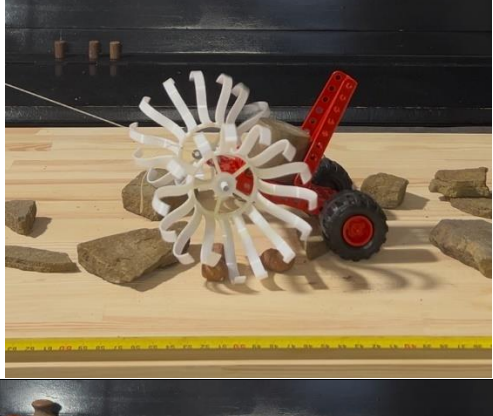
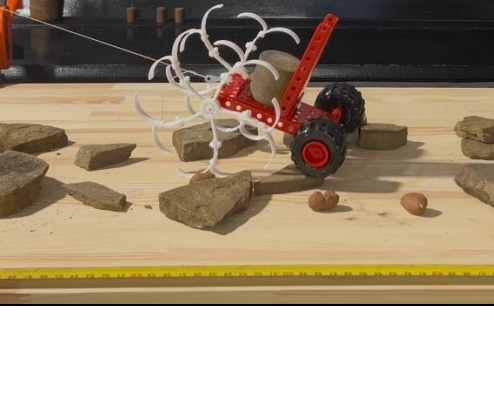
Продовження таблиці 2.1

2. Вплив мінімальних та максимальних навантажень на рівень зчеплення рушіїв з опорною поверхнею	2.3.а	Дослідження плавності руху рушії типу напівресора на гладкій дерев'яній поверхні з додатковим навантаженням 500г		- + + + (3)	Добре (плавний хід, проковзування нема, але значний прогин напівресор, одночасно в зчепленні з поверхнею 4-5 пружних елементів)
	2.3.б1	Дослідження плавності руху рушії типу п'ятка-стопа на гладкій дерев'яній поверхні при навантаженні 100 грам		- - - + (1)	Задовільно (значне проковзування, низька плавність руху, значне підстрибування через різницю розмірів динамічних радіусів «п'ятки-стопа»)
	2.3.б2	Дослідження плавності руху рушії типу п'ятка-стопа на гладкій дерев'яній поверхні при навантаженні 150 г (різниці нема)		- - + + (2)	Задовільно (проковзування трохи менше, низька плавність руху, значне підстрибування через різницю розмірів динамічних радіусів «п'ятки-стопа»)
	2.3.б3	Дослідження плавності руху рушії типу п'ятка-стопа на гладкій дерев'яній поверхні при навантаженні 500 грам		- + + + (3)	Добре (проковзування нема, але є незначне підстрибування через різницю розмірів динамічних радіусів «п'ятки-стопа»)
	2.3.б32	Дослідження плавності руху рушії типу п'ятка-стопа на гладкій дерев'яній поверхні при навантаженні 500 грам зі зміщенням кута сектору колес		- - - + (1)	Задовільно (проковзування немає, але дуже низька плавність руху, значне підстрибування та коливання через різницю лівого та правого динамічних радіусів колес «п'ятки-стопа»)

## Продовження таблиці 2.1

3. Вплив нерівностей поверхонь з різними показниками зчеплення на плавність руху навантаженого візка	3.1.a	Дослідження плавності руху рушія типу напівресора на нерівній та горбистій прорезиненій поверхні з додатковим навантаженням 150г		+ + + + (4)	Відмінно (проковзування нема, в зчепленні з поверхнею постійно знаходяться 3-5 напівресори плавність руху напряму залежить від нерівностей дороги).
	3.1.б	Дослідження плавності руху рушія типу п'ятка-стопа на нерівній та горбистій прорезиненій поверхні з додатковим навантаженням 150г		- + + + (3)	Добре (проковзування нема, незначні коливання, плавність руху залежить від нерівностей дороги. Недолік вищий центр мас та менша курсова стійкість).
	3.2.a	Дослідження плавності руху рушія типу напівресора на нерівній та горбистій слизькій поверхні з додатковим навантаженням 150г		+ + + + (4)	Відмінно (проковзування нема, в зчепленні з поверхнею постійно знаходяться 3-5 напівресори, плавність руху напряму залежить від нерівностей дороги).
	3.2.б	Дослідження плавності руху рушія типу п'ятка-стопа на нерівній та горбистій слизькій поверхні з додатковим навантаженням 150г		- + + + (3)	Добре (проковзування нема, незначні коливання, плавність руху в більшій мірі залежить від нерівностей дороги. Недолік вищий центр мас та менша курсова стійкість).

## Кінець таблиці 2.1

4.. Вплив рівня навантаження на прохідність при русі на нерівній кам'янистій поверхні	4.1.a	Дослідження плавності руху рушія типу напівресора на нерівній кам'янистій поверхні з додатковим навантаженням 150г		+ + + + (4)	Відмінно (проковзування нема, плавність руху та прохідність залежить від нерівностей дороги та кліренсу візка).
	4.1.б	Дослідження плавності руху рушія типу п'ятка-стопа на нерівній кам'янистій поверхні з додатковим навантаженням 150г		- + + + (3)	Добре (проковзування нема, незначні коливання, плавність руху та прохідність в більшій мірі залежить від нерівностей дороги, а не від кліренсу візка).
	4.2.a	Дослідження плавності руху рушія типу напівресора на нерівній кам'янистій поверхні з додатковим навантаженням 450г		- + + + (3)	Добре (проковзування нема, плавність руху та прохідність дуже залежить від нерівностей дороги та заниженого кліренсу візка).
	4.2.б	Дослідження плавності руху рушія типу п'ятка-стопа на нерівній кам'янистій поверхні з додатковим навантаженням 450г		+ + + + (4)	Відмінно (проковзування нема, плавність руху в більшій мірі напряму залежить від нерівностей дороги, а не від кліренсу візка).

Результати експерименту та бальні оцінки рушіїв на різних етапах.

1. На першому етапі випробувань (вплив рівня зчеплення з опорною поверхнею на рух візка за умов його спорядженої маси) перший варіант – бальна оцінка 20 з 20, середній бал  $\frac{20}{5} = 4$  (відмінно), другий варіант – бальна оцінка 15 з 36, середній бал  $\frac{15}{9} = 1,7$  (задовільно).

Відносний коефіцієнт якості на цьому етапі  $K = \frac{4}{1,7} = 2,35$ , тобто експлуатаційні властивості першого варіанту в частині зчеплення пружних елементів з опорною поверхнею більш ніж вдвоє перевищують другий.

2. На другому етапі випробувань (вплив мінімальних та максимальних навантажень на рівень зчеплення рушіїв з опорною поверхнею) перший варіант - бальна оцінка 10 з 12, середній бал  $\frac{10}{3} = 3,33$  (добре), другий варіант – бальна оцінка 15 з 36, загальний середній бал  $\frac{15}{9} = 1,7$  (задовільно). Загальний середній бал 1,7 прорахований для обох випадків розташування лівого та правого колеса, при цьому треба відзначити що вплив зміщення розташування опорних елементів п'ятка-стопа один відносно одного на половину сектора та зміна навантаження 150 і 500 грам компенсують переваги та недоліки обох варіантів  $B_1$  і  $B_2$  за різних умов зчеплення.

Відносний коефіцієнт якості на цьому етапі  $K = \frac{3,33}{1,7} = 1,96$ , тобто експлуатаційні властивості першого варіанту в частині зміни якості руху візка за різних умов навантаження та зчеплення майже вдвоє перевищують другий.

3. На третьому етапі випробувань (вплив нерівностей поверхонь з різними показниками зчеплення на плавність руху навантаженого візка) перший

варіант – бальна оцінка 8 з 8, середній бал  $\frac{8}{2} = 4$  (відмінно), другий варіант – бальна оцінка 6 з 8, середній бал  $\frac{6}{2} = 3$  (добре).

Відносний коефіцієнт якості на цьому етапі  $K = \frac{4}{3} = 1,33$  тобто експлуатаційні властивості першого варіанту в частині плавності руху по нерівній горбистій поверхні за умов оптимального навантаження транспортного засобу понад на тридцять відсотків перевищують експлуатаційні властивості другого.

4. На четвертому етапі випробувань (вплив рівня навантаження на прохідність при русі на нерівній кам'янистій поверхні) перший варіант – бальна оцінка 7 з 8, середній бал  $\frac{7}{2} = 3,5$  (добре), другий варіант – бальна оцінка 7 з 8, середній бал  $\frac{7}{2} = 3,5$  (добре).

Відносний коефіцієнт якості на цьому етапі  $K = \frac{3,5}{3,5} = 1$ , тобто експлуатаційні властивості першого варіанту в частині прохідності по нерівним кам'янистим ґрунтам не відрізняються від тих же властивостей другого, що пов'язано з конструктивними особливостями вузла маточини з пружними елементами типу напівресора. При критичному навантаженні у першого варіанта виникає суттєво занижений кліренс (дорожній просвіт візка), тобто менший ніж у варіанта типу п'ятка-стопа майже на п'ятдесят відсотків, що може негативно сприяти на показники прохідності транспортного засобу в цілому. Але при менших некритичних навантаженнях перший варіант значно краще долає кам'янисті перешкоди та має кращу плавність руху і стійкість від бічного перекидання, при цьому величина його кліренсу відповідає експлуатаційним вимогам.

### 2.1.4 Висновки щодо вибору варіанта

За результатами всіх чотирьох етапів випробувань узагальнені коефіцієнти якості досліджених експлуатаційних властивостей першого і другого варіантів дорівнюють відповідно:

$$K_1 = \frac{n_{1.1} + n_{1.2} + n_{1.3} + n_{1.4}}{4}, \quad (2.1)$$

де  $K_1$  – узагальнений коефіцієнт якості дослідження експлуатаційних властивостей першого варіанту.

$n_{1.N}$  – результат експериментів для першого варіанту  
Підставляючи у формулу (2.1) значення отримуємо:

$$K_1 = 3,71$$

$$K_2 = \frac{n_{2.1} + n_{2.2} + n_{2.3} + n_{2.4}}{4}, \quad (2.2)$$

де  $K_2$  – узагальнений коефіцієнт якості дослідження експлуатаційних властивостей другого варіанту.

$n_{2.N}$  – результат експериментів для другого варіанту  
Отримуємо:

$$K_2 = 2,48.$$

Відносний узагальнений коефіцієнт в цьому разі дорівнює:

$$K_y = \frac{K_1}{K_2}, \quad (2.3)$$

де  $K_y$  – узагальнений коефіцієнт якості дослідження експлуатаційних властивостей.

$K_1$  – узагальнений коефіцієнт якості дослідження експлуатаційних властивостей першого варіанту.

$K_2$  – узагальнений коефіцієнт якості дослідження експлуатаційних властивостей другого варіанту.

$$K_y = 1,49.$$

Це вказує на значно кращі експлуатаційні властивості (зчеплення пружних елементів з опорною поверхнею, плавність руху, стійкість від бічного перекидання та прохідність) у першого варіанту колісного рушія з пружним елементом типу напівресора ніж у свого конкурента рушія з пружними елементами типу п'ятка – стопа. Перевищення комплексного показника якості експлуатаційних характеристик в частині прохідності та плавності руху майже на п'ятдесят відсотків робить безумовний пріоритетний вибір на користь першого варіанту рушія з пружними елементами типу напівресора.

На протязі всього експерименту у першого варіанту рушія спостерігались такі позитивні властивості, як:

- стабільний та плавний рух на високому рівні;
- майже відсутність проковзування;
- відсутність значного хитання та поперечного коливання.

Треба також зазначити що за умов малих швидкостей вібрації та розгойдування відсутні в обох випадках.

Поліпшенню експлуатаційних характеристик обраного першого варіанту рушія на пружних елементах типу напівресора сприяла більша кількість пружних елементів, їх розміри та особливість розташування (ширина та довжина), розміри та особливості змінних динамічних радіусів за різних умов навантаження, розміщення координати центру мас у транспортному засобі. Окрім того відстань розташування плям контакту з опорної поверхнею у обраного варіанту більша, а саме вони краще рознесені між собою вздовж поперечної вісі транспортного засобу. Площа плями контакту у першому варіанті також більша ніж у другому, тобто сам рушій і транспортний засіб з ним мають нижче питоме навантаження на ґрунт. Ці вказані конструктивні особливості покращують стійкість дрону від бічного перекидання, покращують його зчеплення з поверхнею та позитивно впливають на його прохідність в цілому.

Що стосується кліренсу транспортного засобу з використанням першого варіанту рушія на пружних елементах типу напівресора то він трохи нижче ніж з використанням другого типу «п'ятка – стопа» через особливості його розмірів та конструкції вузла маточини. Вказаний факт може мати негативний вплив на рівень показника прохідності у разі застосування його у складі логістичного дрону, та після отримання і опрацювання результатів експлуатаційних випробувань можливо потребує доопрацювання конструкції. Щоб уникнути погіршення показників прохідності також можливе у подальшому застосування рами типу «rocker-bogie» та використання збільшених радіусів поперечної та поздовжньої прохідності.

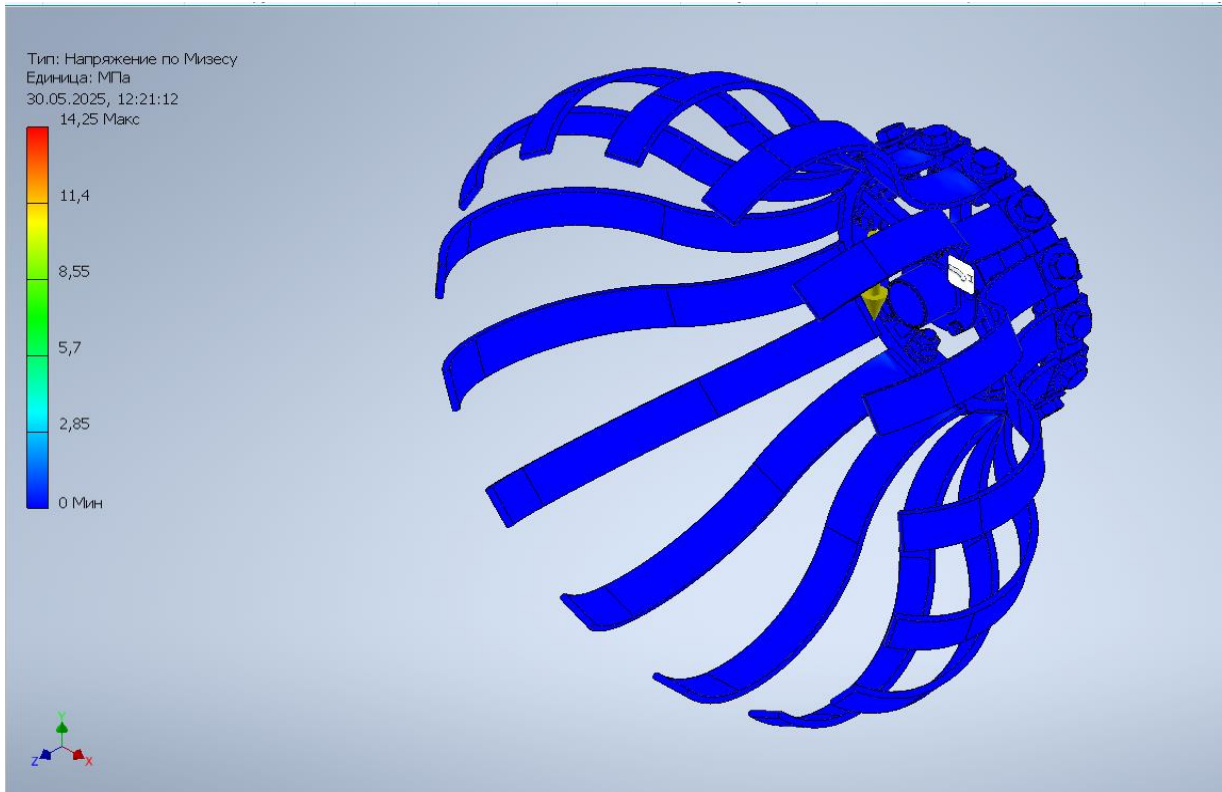
## **2.2 Математичне моделювання**

### **2.2.1 Розрахунок пружних елементів на міцність з урахуванням діючих умов навантажень**

Математичне моделювання проводилось за допомогою вбудованого модулю аналізу напружень у Autodesk Inventor. Ціль розрахунку оцінити навантаження пружного елемента з ресорно-пружинної сталі 65Г з заданими механічними характеристиками, що сприймають напівресори рушія, а саме: їх зміщення, коефіцієнти запасу міцності та еквівалентну деформацію при дії максимального навантаження за різних умов експлуатації.

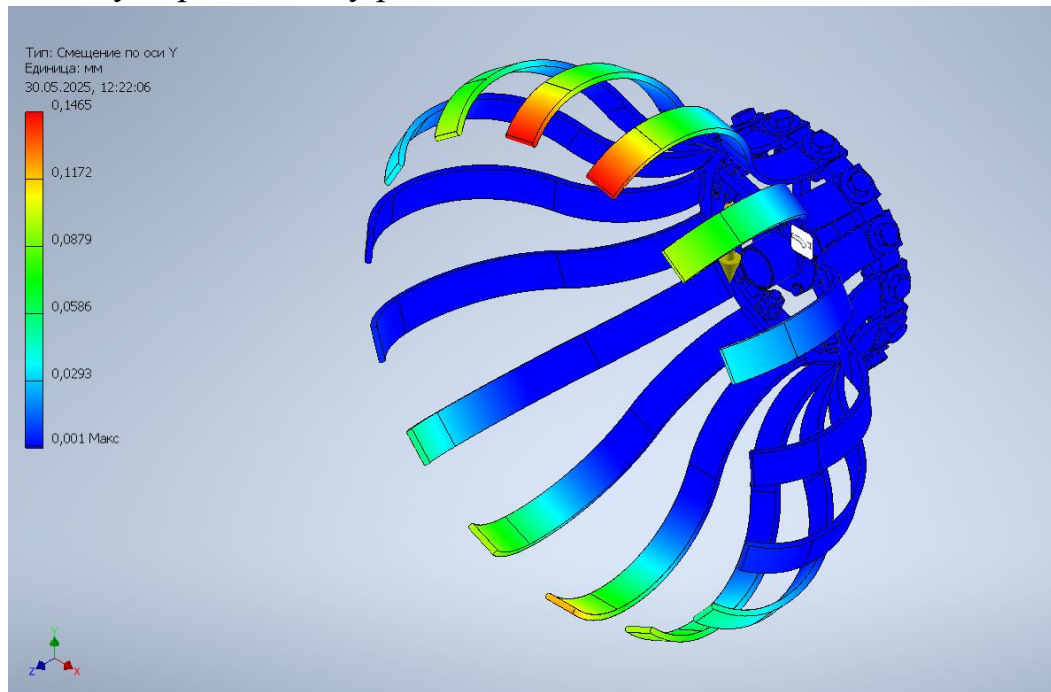
Початкові умови: максимальне навантаження прикладене до плями контакту дорівнює 150 кілограм або 1500 Н. Перевірені різні випадки, а саме: навантаження діє на одну напівресору, на дві та на три. За припущення було прийнято те, що навантаження розподіляється рівномірно та перпендикулярно до поверхні на яку діє сила, сила діє поступово.

### Розрахунок пружних елементів при дії власної ваги:



**Рисунок 2.9** – Напруження по Мізесу рушія при дії власної ваги

Можна побачити (рис. 2.9), що власна вага не впливає на міцність рушія. Зрозуміло, що такі навантаженні не призведуть до руйнування і рушій працюватиме у сприятливому режимі.



**Рисунок 2.10** – Зміщення рушія по осі Y при дії власної ваги

Використовуючи отриманий результат з (рис 2.10) можна порахувати статичний радіус колеса за допомогою формули:

$$R_{\text{ст}} = 0,5 \cdot D - \Delta l, \quad (2.4)$$

де  $R_{\text{ст}}$  – статичний радіус колісного рушія, мм;

$D$  – зовнішній діаметр колеса, мм;

$\Delta l$  – зміщення під власною вагою, мм.

Підставляючи у формулу (2.4) значення з (рис. 2.10), отримуємо:

$$R_{\text{ст}} = 240,854 \text{ мм.}$$

Приймаємо значення  $R_{\text{ст}} = 240$  мм.

При подальших вимірах потрібно буде використовувати формулу динамічного радіусу, який в нашому випадку є різним через зміну кількості пружних елементів, які входять у зчеплення з землею.

Динамічний радіус колеса буде розраховуватись так:

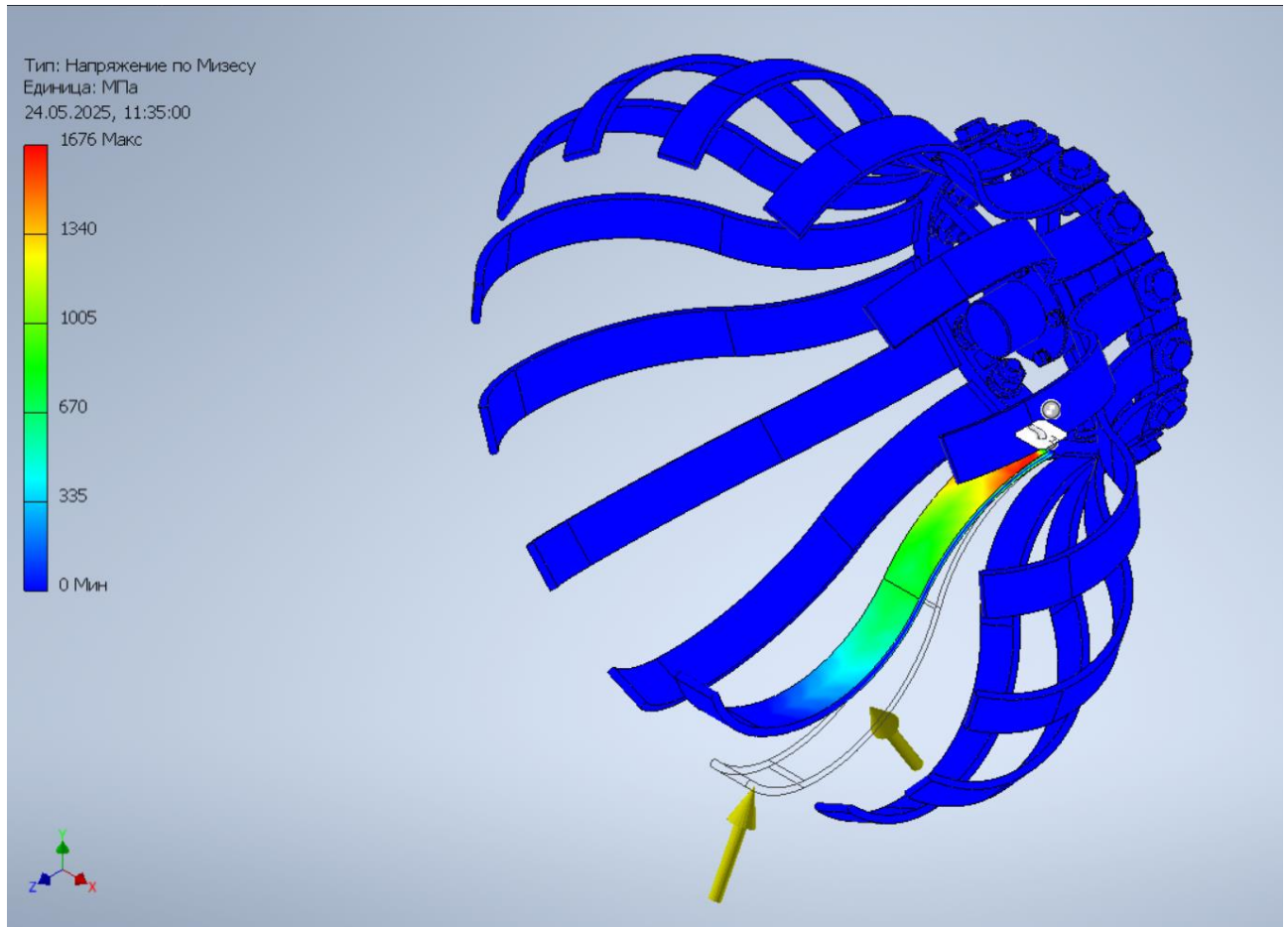
$$R_{\text{дн}} = R_{\text{ст}} - \Delta L_n, \quad (2.5)$$

де  $R_{\text{дн}}$  – динамічний радіус колісного рушія, мм;

$R_{\text{ст}}$  – статичний радіус колісного рушія, мм;

$\Delta L_n$  – зміщення під заданим навантаженням, мм.

Розрахунок дії навантаження в 1500 Н на один пружний елемент:

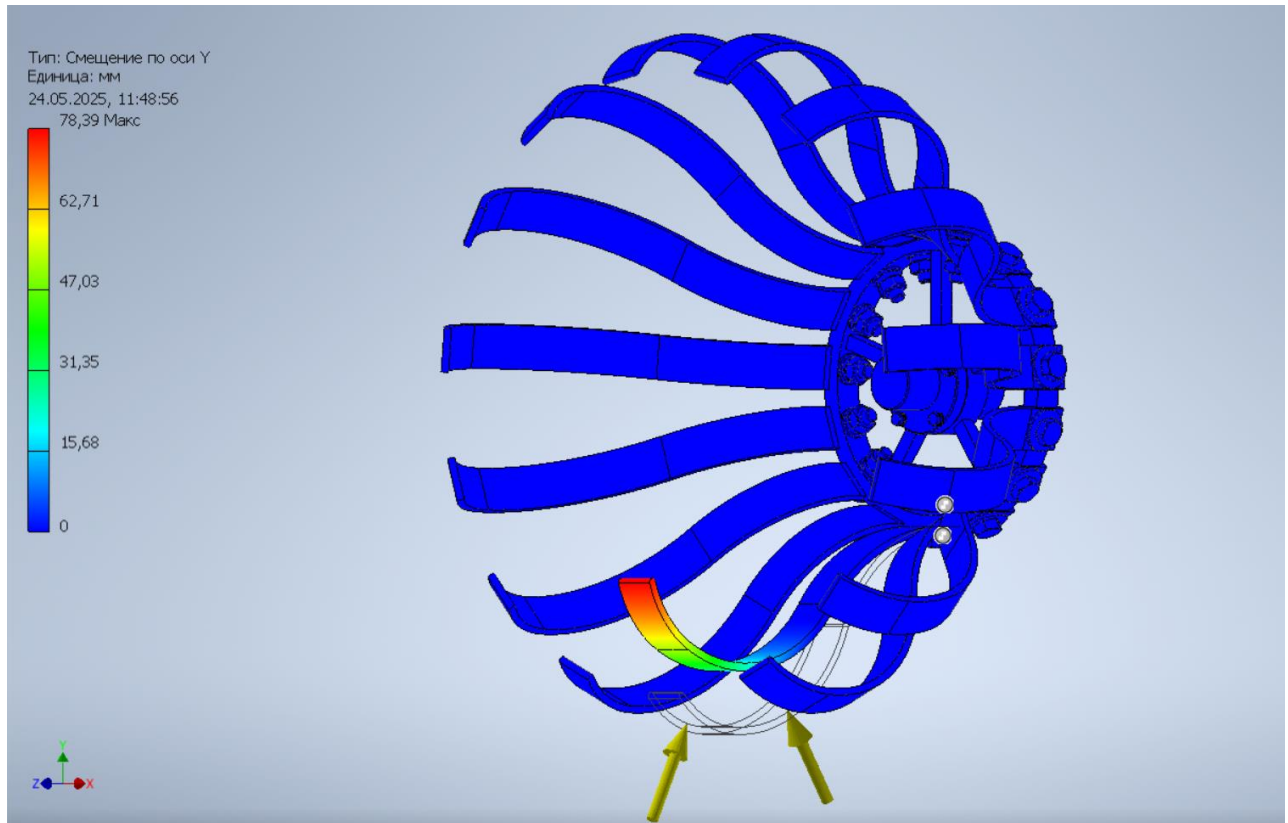


**Рисунок 2.11** – Напруження по Мізесу при прикладеному навантаженні у 1500 Н на одну напівресору

З наведеного розрахунку (рис. 2.11) видно, що максимальне напруження припадає на місце згину напівресори, а концентраторами напруги є отвори для кріплення напівресори до маточини, при цьому дія вказаних напружень в межах границі текучості використаного матеріалу.

Ця ситуація змодельована з ціллю показати максимальну дію навантаження тільки на одну напівресору, але у реальному житті, такий збіг обставин маловірогідний, бо у зчепленні з поверхнею землі завжди знаходяться принаймні дві напівресори. Це можна було спостерігати при проведенні

експериментів з моделями, які зазначені у розділі 2.1.3.



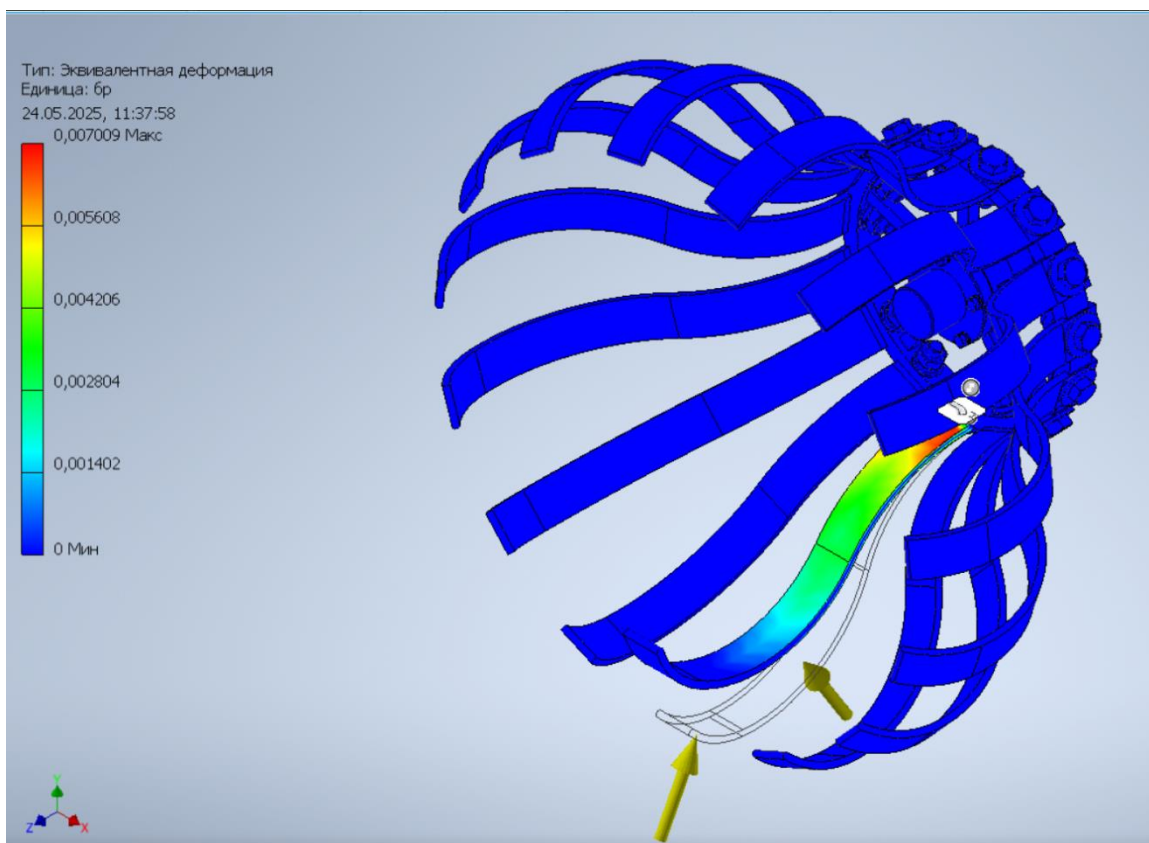
**Рисунок 2.12** – Зміщення під дією максимального навантаження на один пружний елемент

Підставляємо у формулу (2.5) дані з (рис. 2.12) і отримуємо:

$$R_{d1} = 161,61 \text{ мм.}$$

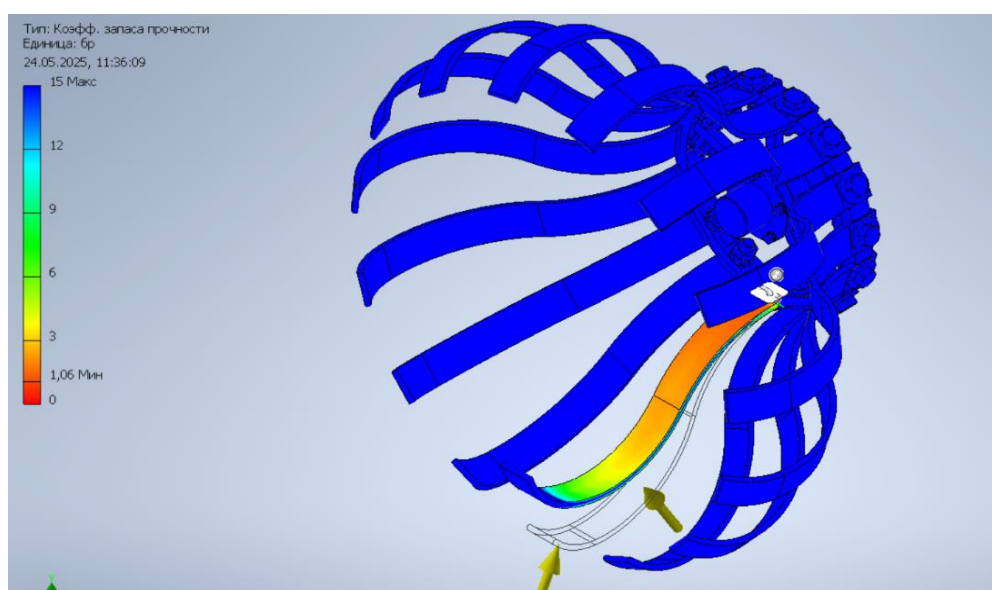
Для подальших розрахунків приймемо значення  $R_{d1} = 162 \text{ мм.}$

Треба зазначити, що це найменший динамічний радіус колісного рушія, який можливий тільки за виключних умов.



**Рисунок 2.13** – Еквівалентна деформація під дією максимального навантаження на один пружний елемент

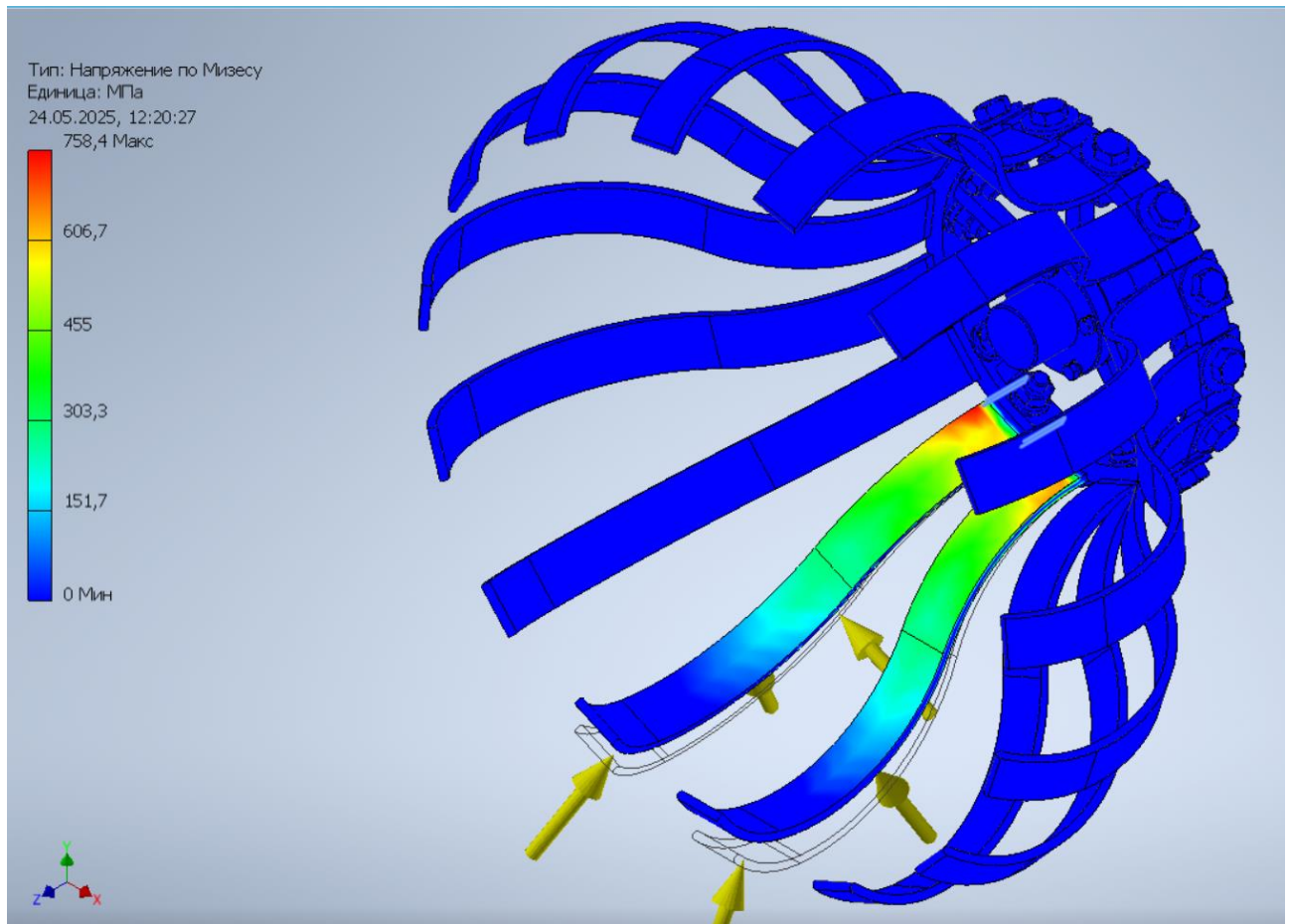
Еквівалентна деформація (рис 2.13) мала і ніяк не впливає на його властивості.



**Рисунок 2.14** – Коефіцієнт запаса міцності під дією максимального навантаження на один пружний елемент

Мінімальний коефіцієнт запасу міцності 1,06. Матеріал починає руйнуватися, якщо коефіцієнт запасу міцності становить менше одиниці. Робимо висновок, що матеріал витримує задані навантаження.

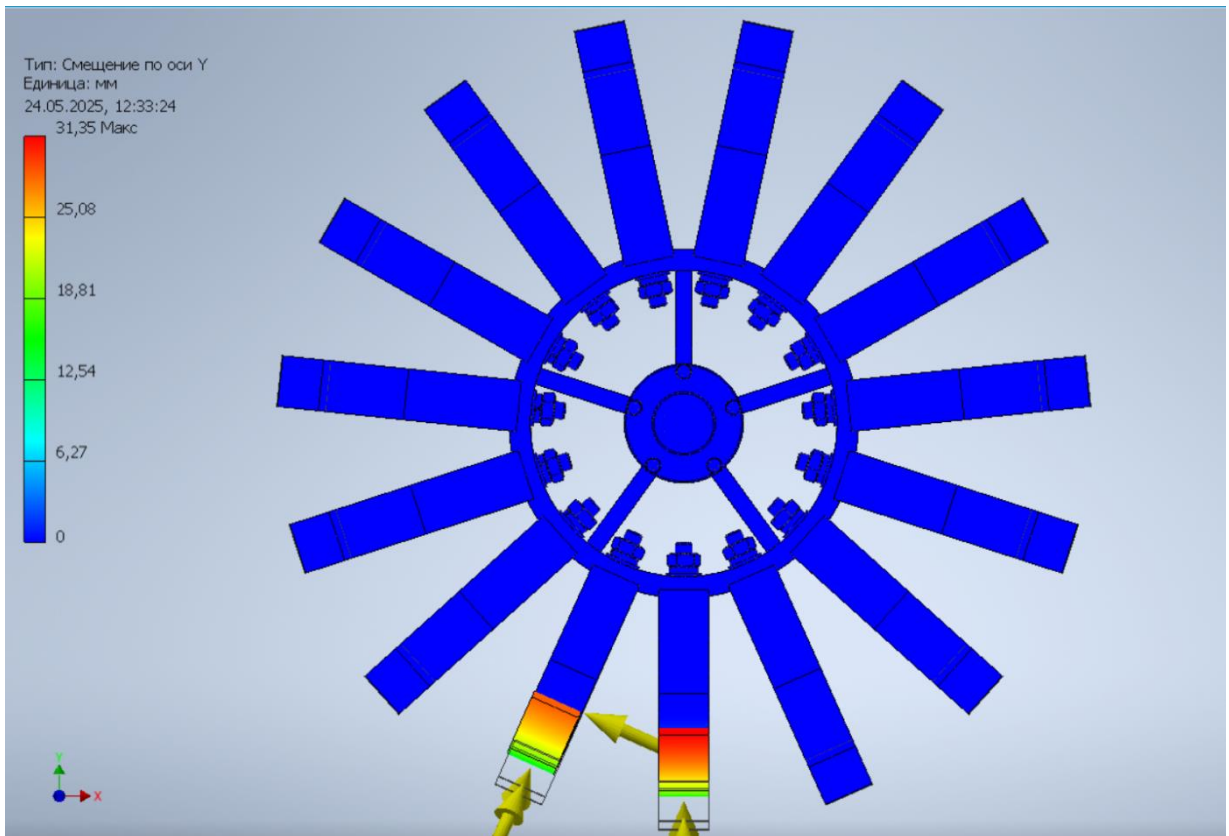
Розрахунок двох пружних елементів при дії навантаження в 1500 Н:



**Рисунок 2.15** – Напруження по Мізесу при прикладеному навантаженні у 1500 Н на дві напівресори

Дивлячись на (рис 2.15) можна зробити такі висновки, що напруження зменшилось більше ніж у два рази.

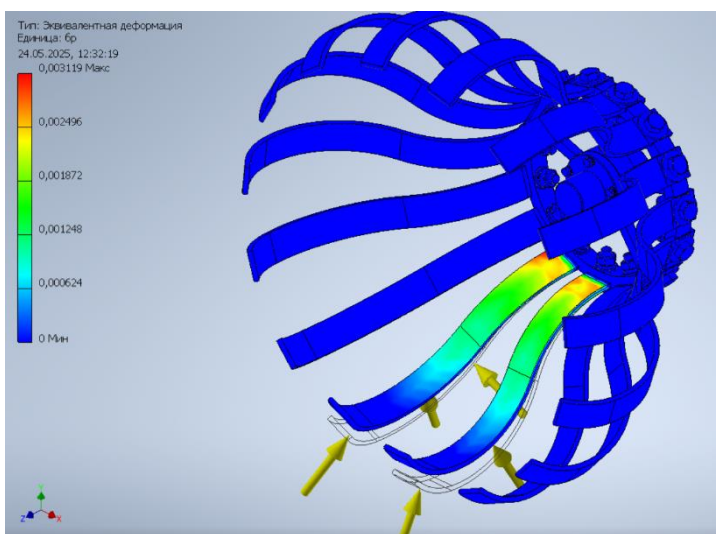
Такий вид навантаження найбільш вірогідний, в тому при поступальному русі по твердій поверхні та коли колісний рушій рухається при невеликому підйомі або при проходженні ям, ярів або інших нерівностей пересіченої місцевості. Враховуючи галузь використання даного типу рушія це найбільш вірогідний його стан.



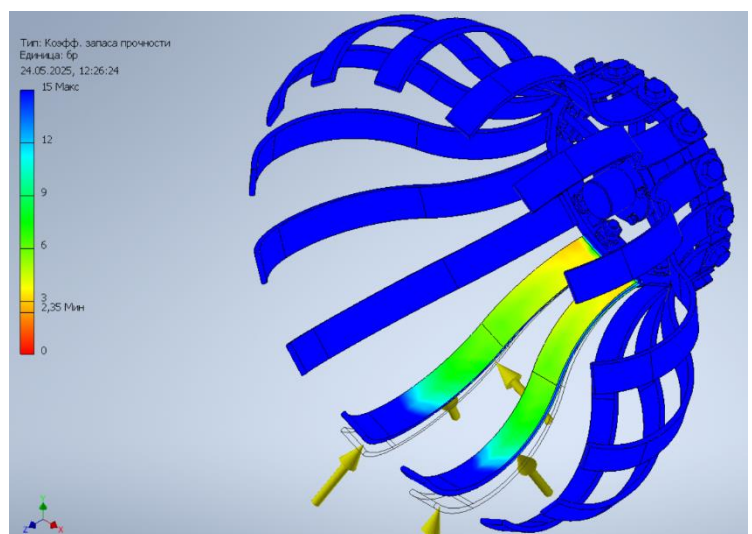
**Рисунок 2.16** – Зміщення двох пружних елементів під дією максимального навантаження

Знаходимо динамічний радіус з (рис. 2.16) при розподіленні навантаження на дві напівресори за допомогою формули (2.5):

$$R_{д2} = 208 \text{ мм.}$$



А)



Б)

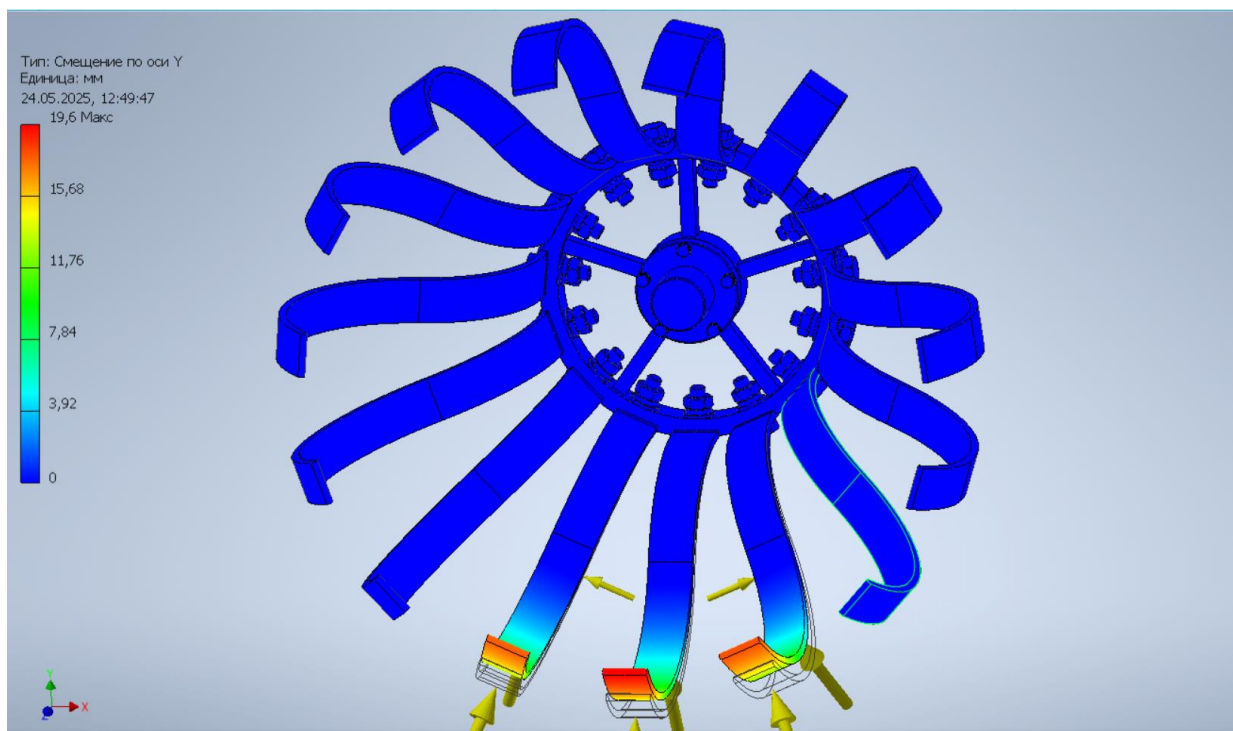
**Рисунок 2.17** – Еквівалентна деформація та коефіцієнт запасу міцності під дією максимального навантаження на два пружних елемента

З наведених розрахунків еквівалентної деформації (рис. 2.17 А) видно що пружні елементи діють в межах пружної деформації і остаточної пластичної деформації напівресор не відбувається.

Згідно подальших розрахунків (рис 2.17 Б) коефіцієнт запасу міцності складає 2,35, тобто у два рази більше попереднього, відповідно до чого можна зробити висновок: обидві напівресори зберігають міцність та не деформуються.

Можна спрогнозувати, що розділивши навантаження на три пружні елементи воно зменшиться ще більше, а коефіцієнт запасу міцності збільшиться.

Нижче наведено розрахунок зміщення при навантаженні трьох пружних елементів:



**Рисунок 2.18** – Зміщення при дії навантаженні на три пружних елемента

Навантаження розподілене між трьома напівресорами. Експериментальні дані для визначення динамічного радіусу колісного рушія беремо з (рис. 2.18) і визначаємо його при навантаженні трьох пружних елементів за формулою (2.5) що дорівнює:

$$R_{д3} = 220,4 \text{ мм.}$$

Для подальших розрахунків приймаємо  $R_{дз} = 220$  мм

### 2.2.2 Розрахунок опору кочення

В стандартній ситуації під час руху транспортного засобу на нього діють різні сили, розглянемо спрощений варіант, а саме ті сили, що діють на автомобіль під час прямолінійного руху на підйомі. Сили розділяються на три основні групи:

а) Сили опору руху, в тому числі  $P_f$ - сила опору коченню,  $P_{\pi}$  - сила опору повітря,  $P_i$ - сила опору підйому,  $P_j$  - сила опору розгону.

б) Рушійні сили, а саме  $P_k$  - колова сила на ведучих колесах.

в) Сили нормальні до опорної поверхні, в тому числі  $R_{z1}$  та  $R_{z2}$  - нормальні реакції опорної поверхні відповідного колеса,  $G_a$  - складова ваги транспортного засобу, нормальна до опорної поверхні [1].

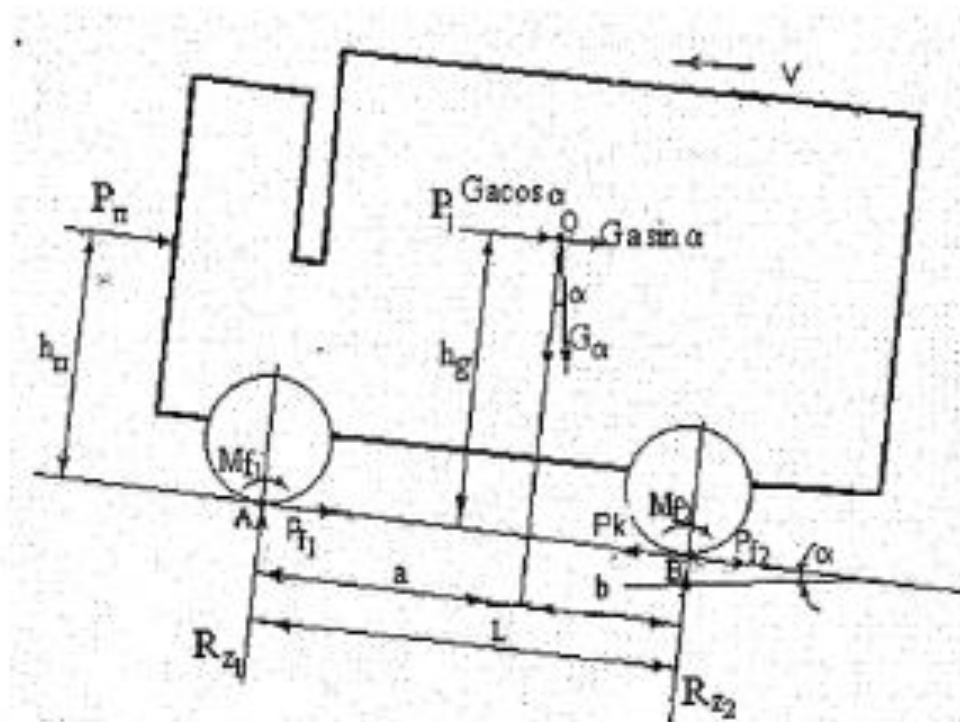


Рисунок 2.19 – Типова розрахункова схема руху транспортного засобу [1]

Точка O – центр мас транспортного засобу, у якій прикладено вагу  $G_a$ ;

$h_g$  - відстань від центра мас до опорної поверхні;

$h_{\pi}$  - відстань від центра парусності (точка прикладання рівнодіючої сил опору повітря) до опорної поверхні;

$a, b$  – відстані відповідно від передньої та задньої вісі до центра мас транспортного засобу;

$L$  - колісна база транспортного засобу;

$P_{f1}, P_{f2}$  - сили опору коченню коліс відповідно передньої та задньої вісей;

$R_{z1}, R_{z2}$  - рівнодіючі нормальних реакцій опорної поверхні;

$M_{z1}, M_{z2}$  - моменти опору коченню коліс відповідних осей;

$P_k$  - колова сила на ведучих колесах.

Для спрощення розрахунків у разі прямолінійного поступального руху можна зробити наступні припущення:

- дорожні умови під колесами однойменних мостів однакові;
- рівнодіючі нормальних реакцій опорної поверхні прикладені у центрі контактної відбитки, а їх зсув ураховано моментами опору кочення передніх и задніх коліс;
- за умови малих швидкостей сила опору повітря незначна та дорівнює нулю;
- сила опору підйому, що є складовою ваги автомобіля, паралельної до опорній поверхні ( $P_1 = G_a \cdot \sin\theta$ ), відсутня, тобто дорівнює нулю;
- сила опору розгону поступальної маси транспортного засобу також прийнята за нуль [1];
- коефіцієнти опору коченню ведучих та ведених коліс транспортного засобу практично можна вважати рівними.

Враховуючи вищезазначене, тобто з певними вищевказаними припущеннями, сила опору кочення разом з заданою корисною вагою буде

головною силою що діє на рушій, таким чином для оцінки якості руху розроблюваного рушія насамперед потрібно прорахувати саме силу опору кочення.

Ця сила викликана гістерезисними втратами в колесі, в нашому разі в пружних елементах рушія (внутрішнім тертям у напівресорі та в місці контакту напівресори з поверхнею дороги) при їх радіальній, тангенціальній і бічній деформаціях а також при їх ковзанні у зоні контакту.

Щодо стандартних гумових пневматичних шин, то опір коченню залежить від типу і стану опорної поверхні, типу шини та її конструкції, швидкості руху, тиску повітря в шині, крутного моменту, що діє на шину, температури шини, ступеня зносу протектора тощо [1].

Для колісного рушія з пружними елементами типу напівресора опір коченню буде залежати від наступних основних чинників: типу і стану опорної поверхні, самої конструкції пружних елементів та крутного моменту, що діє на рушій, при цьому швидкість руху (для дрону вона складає не більше 25 км/год), ступінь зносу напівресори (гладкої її частини та ґрунтозачепів у вигляді додатково закріплених болтів), температура та внутрішній тиск в напівресорі практично не будуть мати значення.

Оскільки для цілого транспортного засобу неможливо врахувати умови роботи кожного колеса окремо, то використовується усереднене значення коефіцієнтів опору коченню кожного колеса транспортного засобу, а загальний опір коченню визначається як множення його на проекцію сили ваги [1].

Щодо величини коефіцієнту опору коченню то в реальних умовах він в значній мірі залежить від типу і стану опорної поверхні, розмірів і характеру нерівностей тощо, про що надалі буде викладено детальніше [1].

Також значний вплив на коефіцієнт опору кочення мають статичний та динамічний радіуси колеса, а також плече розміщення рівнодіючої сили опору кочення, що характеризує розсіювання енергії при його коченні [1].

У загальному випадку колесо автомобіля складається з жорсткого обода, еластичних боковин і контактної відбитка. Контактний відбиток шини являє собою елементи шини, що контактують з опорною поверхнею у даний момент часу. Його форма і розміри залежать від типу шини, навантаження на шину, тиску повітря, деформаційних властивостей опорної поверхні та її профілю [1].

Залежно від співвідношення деформацій колеса та опорної поверхні можливі наступні види руху:

- еластичного колеса по поверхні, що не деформується (рух колеса по дорозі з твердим покриттям);
- жорсткого колеса по поверхні, що деформується (рух колеса по пухкому снігу);
- еластичного колеса по поверхні, що деформується (рух колеса по ґрунту, що деформується, пухкому снігу зі зниженим тиском повітря в шині) [1].

Залежно від траєкторії можливі прямолінійний і криволінійний рухи. Зауважимо, що опір криволінійному руху перевищує опір прямолінійному. Це особливо стосується тривісних транспортних засобів з балансирним заднім візком. Так при русі тривісного автомобіля по траєкторії з мінімальним радіусом на дорозі з високим коефіцієнтом зчеплення залишаються сліди від шин, з вихлопної труби йде чорний дим, різко збільшуються витрати палива. Усе це є наслідком підвищеного опору криволінійному руху в декілька разів порівняно з прямолінійним [1].

Нижче нами розглянуті радіуси еластичного колеса для окремого випадку, коли еластичне колесо рухається прямолінійно на опорній поверхні, що не деформується.

Існують чотири радіуси колеса: 1) вільний; 2) статичний; 3) динамічний; 4) радіус кочення колеса.

Вільний радіус колеса  $r_v$  — характеризує розмір колеса в ненавантаженому стані (для пневматичної шини при номінальному тиску повітря в ній). Цей радіус дорівнює половині зовнішнього діаметра колеса, та визначається експериментально за відсутності контакту колеса з дорогою. На практиці цей радіус використовується конструктором для визначення габаритних розмірів транспортного засобу, зазорів між колесами та кузовом автомобіля при його кінематиці [1].

Статичний радіус колеса  $r_c$  - це відстань від опорної поверхні до вісі обертання колеса на місці. Визначається експериментально або розраховується за формулою що враховує статичний радіус, та дію коефіцієнту вертикальної деформації шини на висоту профіля шини. Зазначимо, що у довідковій спеціальній літературі для шини вказується значення цього радіуса [1].

Динамічний радіус колеса  $r_d$  – це відстань від опорної поверхні до осі обертання колеса під час руху. При русі колеса його значення у кожний момент часу змінюється, оскільки є змінними нормальні реакції опорної поверхні, що діють на пляму контакту колеса. Для практичних розрахунків беремо середнє значення цього радіуса, яке наближається до значення статичного радіуса [1].

Радіус кочення колеса  $r_k$  - це шлях, що проходить центр колеса, при його обертанні на один радіан [1].

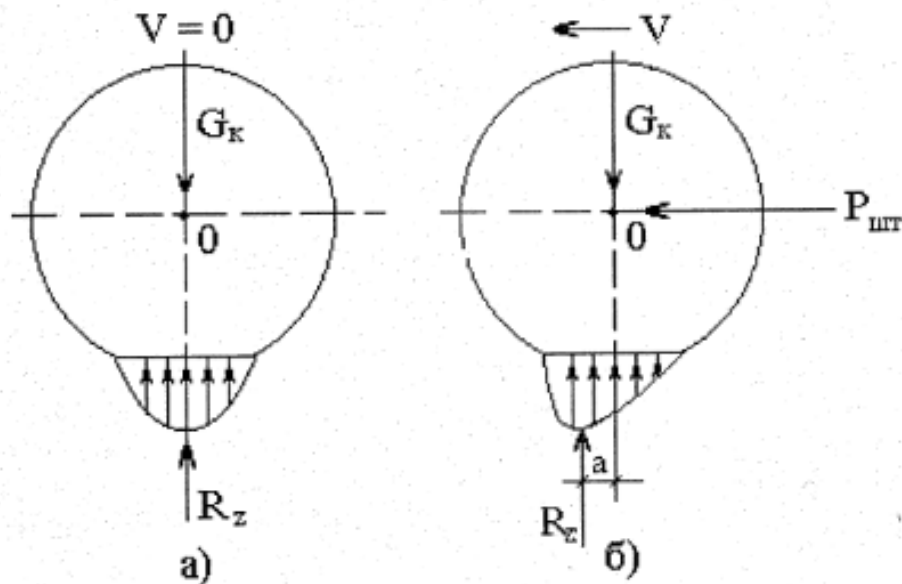
При коченні колеса на нього можуть діяти додатково крутний  $M_{кр}$  або гальмівний  $M_T$  моменти. При цьому, через особливості такого складного механізму, яким є еластичне колесо, крутний момент зменшує радіус кочення, а гальмівний збільшує.

Під час руху колеса юзом, коли є шлях і відсутнє обертання колеса, радіус кочення прямує до нескінченності. Того самого часу, якщо відбувається буксування на місці, колесо не проходить ніякий шлях, а тому радіус кочення дорівнює нулю. Отже, залежно від умов, у яких може знаходитись еластичне колесо, радіус його кочення може змінюватися від нуля до нескінченності [1].

Взагалі якщо визначають параметри кінематики автомобіля (шлях, швидкість, прискорення), то під радіусом колеса розуміють радіус кочення колеса; якщо визначають параметри динаміки (сила, момент), то під цим радіусом розуміють динамічний радіус колеса [1].

Як зазначалось раніше під час прямолінійного руху колеса по твердій дорозі, що не деформується, підведена до нього енергія витрачається на подолання тертя у оболонці і в контактні колеса з опорною поверхнею. Ці тертя викликають гістерезисні явища, тобто втрати в колесі [1].

Для кращого розуміння процесу кочення пропонується розглянути це питання на прикладі кочення пневматичного гумового колеса.



**Рисунок 2.20** – Схема сил і реакції що діють на пневматичне колесо [1]

Якщо колесо нерухоме, тоді нормальні реакції опорної поверхні симетричні відносно вертикальної вісі, що проходить через центр колеса, а отже, їх рівнодіюча  $R_z$ , проходить через центр колеса точку  $O$  (рис. 2.20 а) [1].

Якщо прикласти до колеса штовхальну силу  $P_{шт}$ , то під час його руху, через гістерезисні втрати, нормальні реакції опорної поверхні будуть несиметричні відносно вертикальної вісі, що викличе зсув рівнодіючої нормальної реакції  $R_z$ , за напрямком руху на величину «а» (рис. 2.20 б) [1].

Зсув рівнодіючої нормальних реакцій  $R_z$  відносно центра колеса, точки О, викличе момент, який визначається за формулою [1]:

$$M = R_z \cdot a, \quad (2.6)$$

де  $M$  – прикладений до колеса момент, Н · м;

$R_z$  – Зсув рівнодіючої нормальних реакцій  $R_2$  відносно центра колеса, точки О, Н;

$a$  – плече опори коченню, характеризує розсіювання енергії при коченні колеса, м.

Безрозмірна величина  $\frac{a}{r_k} = f$  - коефіцієнт опору коченню.

Відношення моменту  $M$  до радіусу колеса  $r_k$ . називається силою опори коченню і позначається як  $P_f$ , у цьому випадку маємо [1]:

$$P_f = \frac{M}{r_k}, \quad (2.7)$$

де  $P_f$  – сила опору кочення, Н;

$r_k$  – радіус колеса, м;

$M$  – момент відносно центра колеса, точки О, Н · м.

Остаточну силу опору кочення [1]:

$$P_f = f * R_z, \quad (2.8)$$

де  $P_f$  – сила опору кочення, Н;

$f$  – коефіцієнт опору кочення;

$R_z$  – Зсув рівнодіючої нормальних реакцій  $R_2$  відносно центра колеса, точки О, Н.

На горизонтальній дорозі [1]:

$$R_z = G, \quad (2.9)$$

де  $G$  – навантаження на колесо, Н.

Якщо опорна поверхня має кут нахилу, тоді рівнодіюча нормальних реакцій дорівнює [1]:

$$R_z = G \cdot \cos \alpha , \quad (2.10)$$

де  $G$  – навантаження на колесо, Н;

$\cos \alpha$  – кут нахилу опорної поверхні, градуси.

а сила опору коченню  $P_f$ , дорівнює [1]:

$$P_f = f \cdot G \cdot \cos \alpha = f \cdot G, \quad (2.11)$$

де  $P_f$  – сила опору кочення, Н;

$f$  – коефіцієнт опору кочення;

$G$  – навантаження на колесо, Н;

$\cos \alpha$  – кут нахилу опорної поверхні, градуси.

Момент опору коченню на дорозі, що має нахил, дорівнює [1]:

$$M_f = f \cdot G \cdot r_k \cdot \cos \alpha , \quad (2.12)$$

де  $M_f$  – момент опору кочення, Н · м;

$f$  – коефіцієнт опору кочення;

$G$  – навантаження на колесо, Н;

$r_k$  – радіус кочення, м;

$\cos \alpha$  – кут нахилу опорної поверхні, градуси.

В отриманій залежності особливу зацікавленість викликає коефіцієнт опору коченню  $f$ , який залежить від цілого ряду чинників. При цьому основними з них є:

- тип і стан опорної поверхні (наприклад мінімальне значення коефіцієнт  $f$  має на асфальтобетонній сухій дорозі, його значення для стандартних пневматичних шин знаходиться у межах 0,01...0,02) [1];

- тип і конструктивні параметри шини (наприклад на сухій асфальтобетонній дорозі мінімальне значення коефіцієнт  $f$  має для шин з металокордом  $f = 0,01$  і максимальне  $f = 0,02$  для шин з регульованим тиском) [1];

- швидкість руху (наприклад зі збільшенням швидкості руху через додаткову деформацію тіла шини при ударах і коливальних процесах відбувається збільшення витрат енергії на подолання опору коченню шини [1]. Збільшення коефіцієнта, зумовлене швидкістю руху, може бути враховано емпіричною залежністю [1]:

$$f = f_0 \left( 1 + \frac{V^2}{1500} \right), \quad (2.13)$$

де  $f$  – коефіцієнт опору кочення;

$f_0$  – коефіцієнт опору кочення, при швидкості, яка дорівнює нулю;

$V$  – швидкість руху колеса, м/с;

Окрім цих чинників, на величину коефіцієнта  $f$  впливають також ступінь зносу протектора, температура шини, кількість і матеріал шарів корда, якість вживаної гуми, геометричні параметри шини, тиск повітря тощо [1].

Враховуючи вищевказане, сила опору кочення для колісного руху на пружних елементах з певними припущеннями, разом з заданою корисною вагою буде головною силою що діє на рушій. Для змодельованої ситуації прямолінійного руху при куті нахилу опорної поверхні  $\alpha = 0^\circ$ , буде розраховуватись за формулою [1]:

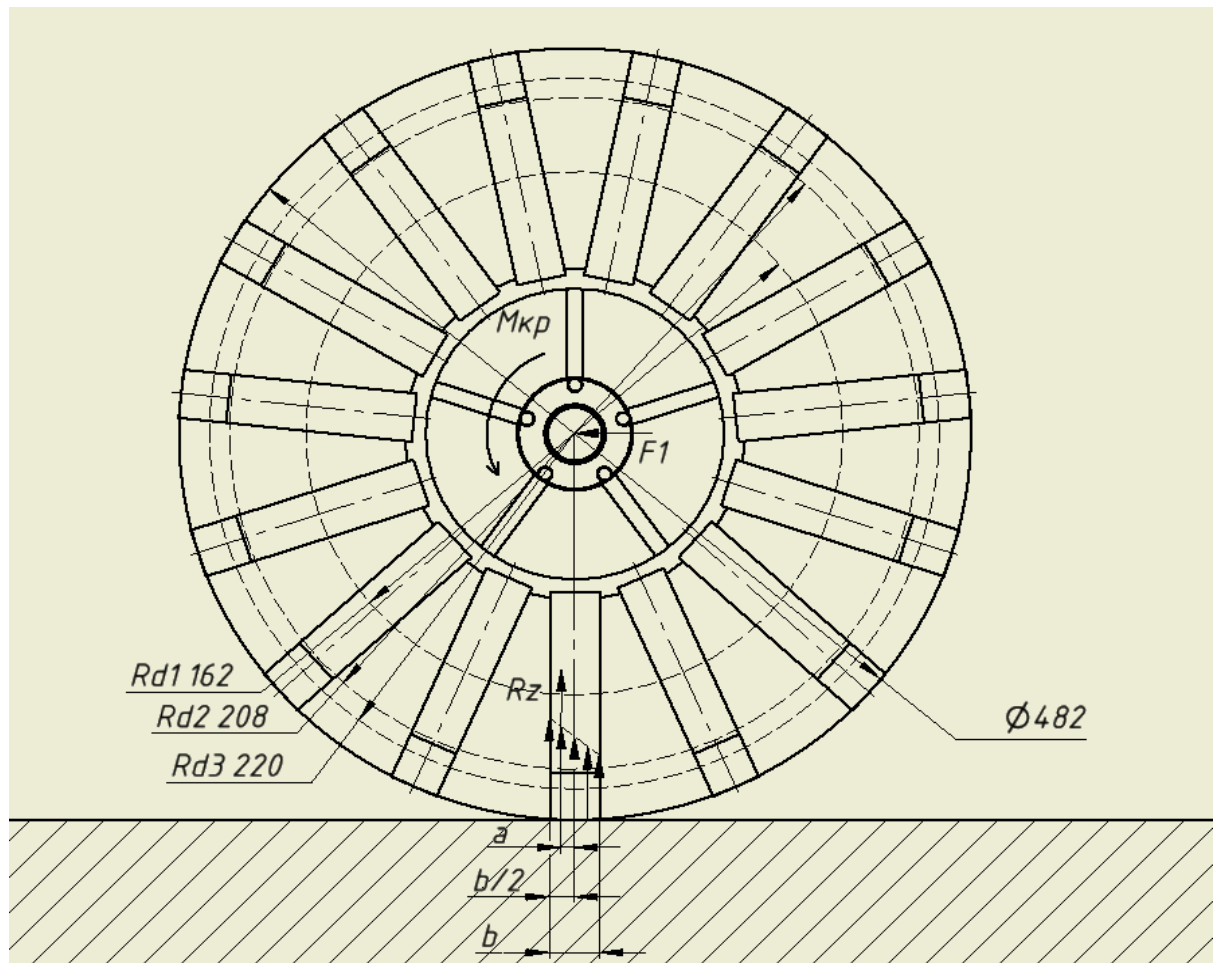
$$P_f = f \cdot G \cdot \cos \alpha = f \cdot G, \quad (2.14)$$

де  $P_f$  – сила опору кочення, Н;

$f$  – коефіцієнт опору кочення;

$G$  – корисна вага, що припадає на рушій, Н ;

$\cos \alpha$  – кут нахилу опорної поверхні, градуси.



**Рисунок 2.21** - Схема сил і реакції що діють на рушій

Розрахунок сил опору кочення для колісного рушія з пружними елементами типу напівресора:

1. Ширина плями зчеплення, що безпосередньо діє в контакт з поверхнею, враховуючи явище гістерезису, тобто запізнення, ділиться навпіл віссю рушія та дорівнює:

$$\frac{b}{2} = 0,015 \text{ м.}$$

2. Рівнодіюча сила прикладена в тій точці напівресори, що безпосередньо знаходиться посередині плями контакту, яка взаємодіє з поверхнею в певний момент часу, а саме знаходиться на відстані, що дорівнює  $\frac{1}{4}$  ширини ресори, тобто плече опору кочення, яке характеризує розподіл енергії дорівнює:

$$a = \frac{b}{2 \cdot 2}, \quad (2.15)$$

З формули (2.15) отримуємо:

$$a = 0,0075 \text{ м.}$$

3. Коефіцієнт опору кочення [1]:

$$\frac{a}{r_k} = f, \quad (2.16)$$

3.1 З формули (2.16) рахуємо коефіцієнт опору кочення для динамічного радіусу при навантаженні на три пружні елементи:

$$f = 0,034.$$

3.2 З формули (2.16) рахуємо коефіцієнт опору кочення для динамічного радіусу при навантаженні на два пружні елементи:

$$f = 0,036.$$

3.3 З формули (2.16) рахуємо коефіцієнт опору кочення для динамічного радіусу при навантаженні на один пружний елемент (виключна ситуація):

$$f = 0,046.$$

Для порівняння отриманих результатів коефіцієнтів опору кочення з аналогічними показниками стандартних рушіїв, що використовуються у діючих колісних транспортних засобах на рисунку 2.22 наведені наступні приклади:

Дорожні умови	Коефіцієнт $f_0$
Асфальтова дорога	0,01...0,02
Гравійна дорога	0,02...0,025
Бруківка	0,025...0,05
Грунтова суха	0,025...0,035
Грунтова після дощу	0,05...0,15
Піщана: • суха	0,1...0,3
• волога	0,06...0,15

**Таблиця 2.2** – коефіцієнт опору кочення для еластичної гумової пневматичної шини [1]

4.1 За допомогою формули (2.8) розрахуємо силу опору кочення при навантаженні на три пружні елементи:

$$P_{f3} = 49,98 \text{ Н.}$$

4.2 За допомогою формули (2.8) розрахуємо силу опору кочення при навантаженні на два пружні елементи:

$$P_{f2} = 52,92 \text{ Н.}$$

4.3 За допомогою формули (2.8) розрахуємо силу опору кочення при навантаженні на один пружний елемент:

$$P_{f1} = 67,62 \text{ Н.}$$

5. Щоб дізнатися мінімальну потужність двигуна на колесо (щоб подолати силу опору кочення) рахується за допомогою формули [1]:

$$N_f = f_1 \cdot G_k \cdot V, \quad (2.17)$$

де  $N_f$  – потужність, що потрібна для подолання опору кочення, Вт;

$f_1$  – коефіцієнт опору кочення у випадку навантаження на один пружний елемент;

$G_k$  – корисна вага, що припадає на рушій, Н;

$V$  – швидкість колеса, м/с.

Підставляючи дані у формулу (2.17) отримуємо:

$$N_f = 469,28 \text{ Вт.}$$

Слід зазначити, що плавність руху обраного рушія напряму залежить також і від його маси, а саме інерційних властивостей, які додатково виконують роль маховика. При дискретному русі рушія від опорної поверхні однієї напівресори до другої власні інерційні сили що діють в системі додатково сприяють подоланню сил опору кочення. Для забезпечення додаткової плавності руху після виготовлення дослідного зразка та проведення експериментальних

випробувань можливе доопрацювання конструкції маточини в складі з кришкою піввісі за рахунок збільшення маси або встановлення спеціального маховика.

Як вже зазначалось раніше, коефіцієнт опору коченню  $f$  залежить від типу і стану опорної поверхні (наприклад він мінімальний на дорозі з асфальтобетонним покриттям), від конструктивних параметрів колеса (наприклад для пневматичної шини від числа шарів корду, розташування ниток корду, товщини протектора, а нашому разі від кількості та конструкції пружних елементів), підвищення температури і тиску, збільшення зносу протектора зменшують величину коефіцієнта  $f$ . Щодо впливу швидкості руху на величину коефіцієнта опору коченню, то він враховується наведеною раніше емпіричною залежністю.

На дорогах з твердим покриттям коефіцієнт залежить від розмірів і характеру нерівностей.

На дорогах, що деформуються, на відміну від доріг з твердим покриттям, затрачується додаткова робота на деформацію ґрунту, видавлювання бруду і вологи з контакту колеса з дорогою, а тому значення коефіцієнту опору кочення стає вище.

Враховуючи велику кількість факторів від яких залежить визначення коефіцієнта  $f$ , на практиці, як правило, для окремих видів транспортних засобів з різними типами рушіїв він вимірюється опитним шляхом (автомобіль, або інша машина тягнеться трактором, та приложене зусилля вимірюється за допомогою динамометром, а потім обчислюється формулами та результати заносяться в спеціальні таблиці).

Приклад фізико-механічних параметрів основних типів поверхонь, в тому числі показниками коефіцієнту опору кочення та іншими показниками що характеризують несучу властивість ґрантів, та напряду впливають на експлуатаційні властивості транспортних засобів, а особливо на прохідність та плавність руху наведено в табл.2.2:

**Таблиця 2.3 – Фізико-механічні параметри основних типів поверхонь руху**

Параметр	Опорна основа				
	піщане	супіщане	суглинкове	важкий суглинок, глина	сніг
Вірогідність залягання ґрунтів	0,15	0,08	0,2	0,18	0,38
Коефіцієнт зчеплення $c_0$ , МПа	0,0001	0,01	0,03	0,06	від 0,00002 до 0,002
Кут внутрішнього тертя $\varphi_0$ , градуси	29	27	25	23	15-33
Кут зовнішнього тертя $\varphi_{тр}$ , градуси	18	25	21	22	12-27
Об'ємна маса, т/м <sup>3</sup> в щільному шарі	1,8	2	2,1	2,1	від 0,07 до 0,66
Об'ємна маса, т/м <sup>3</sup> в розсипному стані	1,7	1,8	1,8	1,8	0,33
Коефіцієнт опору переміщенню рушія $f$ :					
гусеничного	0,12	0,08-0,006	0,08-0,006	0,08	0,15-0,3
колісного	0,18-0,09	0,18-0,09	0,12-0,08	0,12-0,08	0,18-0,35
роторно-гвинтовий	0,3-0,4	0,4-0,5	0,4-0,45	0,4-0,45	0,1-0,15
ходовий			0,05-0,2		
Коефіцієнт зчеплення рушія з ґрунтом $\varphi$ :					
гусеничного	0,2-0,5	0,4-0,55	0,4-0,55	0,65-0,85	0,25-0,5
колісного	0,2-0,5	0,4-0,55	0,4-0,55	0,65-0,85	0,15-0,4
роторно-гвинтовий	1-0,85	1-0,9	1-0,9	1-0,8	0,7-0,8
ходовий			0,4-0,8		

### **2.3. Вибір матеріалів та комплектуючих, конструкторських, технологічних та експлуатаційних рішень для обраного виду рушія**

Для забезпечення якості виробу, в тому числі високих експлуатаційних показників (напрацювання на відмову, ресурс, ремонтпридатність), належних показників виробничо-технічної групи (трудомісткість, матеріаломісткість, енергоємність, ступінь блоковості та уніфікації), а також відповідних

економічних показників (витрати на технічне та гарантійне обслуговування, вартість матеріалів та комплектуючих, заробітна плата персоналу, енерговитрати, амортизаційні відрахування, тощо) в конструкції та технології виготовлення рушія передбачаються нижчеказані технічні особливості.

- 1) Запас міцності усіх елементів повинен відповідати певним встановленим нормам, що досягається використанням відповідних загальнодоступних сталей: конструкційна високовуглецева марганцева 65Г для пружних елементів і шайб Гровера та якісна легована 40Х для всіх інших деталей, та також їх подальша термічна обробка для досягнення підвищених показників граничних напруг.

При виготовленні пружних елементів, для забезпечення підвищених показників границі міцності  $\sigma_B = 1\,830$  МПа та границі текучості  $\sigma_T = 1\,760$  МПа матеріалу, передбачається гартування напівресор в маслі з подальшим низьким відпуском.

- 2) При застосуванні елементів кріплення, а саме в різьбових з'єднаннях М10 та М5 повинна використовуватись стандартна метизна продукція підвищених класів міцності як то: болти 10.9 і 8.8 та гайки 8.8 і 5.5 відповідно, а також плоскі шайби збільшеного виконання та пружинні шайби 10 ОТ особливо важкої серії.

- 3) У разі перевищення допустимих навантажень, як то повна вага або крутний момент, з ладу повинен виходити найдешевший та найдоступніший елемент, у нашому разі це шпонкове з'єднання. Шпонка повинна замінятися з мінімальним зусиллям, що забезпечується посадкою на валу з гарантованим зазором.

Також, на випадок виходу з ладу двигуна привода ведучого колеса, повинна передбачатись можливість швидкого переобладнання привідного з'єднання, а саме легке зняття кришки піввісі та прибрання шпонки з шпонкового пазу. В такому разі, обертаючись навколо вісі з підшипником колісний рушій буде використовуватись як просте неведуче колесо.

- 4) В вузлі маточини повинен застосовуватись стандартний радіально-упорний підшипник 36205 по ГОСТ 831-75 (при необхідності, після отримання результатів експериментальних випробувань дослідного зразка та повторних розрахунків, можливо додаткове встановлення упорного підшипника відповідних розмірів).

Натяг у підшипнику повинен контролюватись простим обертанням колеса «від руки» та встановлюватись підбором регулювальних прокладок товщиною 0,1 мм, які виготовляються з загальнодоступної сталльної стрічки 08 КП-10-ВЕ-2-Б-0,1 ГОСТ 503-81.

Легкість заміни підшипника повинна забезпечуватись відповідними посадками, а саме зовнішня обойма  $\varnothing 52H7/l0$  з гарантованим зазором та внутрішня  $\varnothing 25L0/k6$  перехідна (з середнім невеликим зазором що полегшує складання та ремонт).

Для змащування підшипників повинне використовуватись легкодоступне та дешеве мастило типу Літол-24.

- 5) Конструкція рушія повинна передбачати використання в обслуговуванні та ремонті лише універсальних слюсарних інструментів (без спеціальних приладів, пристроїв і зйомників) та забезпечувати легкий доступ до різьбових з'єднань.

- 6) Для виготовлення заготовок оригінальних деталей маточини та кришки піввісі повинен використовуватись спрощений метод лиття в піщані форми.

Для отримання криволінійних поверхонь пружного елемента напівресори повинен використовуватись простий метод холодного пластичного деформування, а саме вальцювання.

Для приєднання заглушки до кришки піввісі повинен використовуватись дешевий метод ручного дугового зварювання.

Для отримання, закладених в конструкцію оригінальних деталей, точності форм та розмірів, а також шорсткості поверхонь повинні застосовуватись розповсюджені методи механічної обробки матеріалів різанням, за

допомогою універсального обладнання та з використанням стандартного верстатного пристосування, в тому числі:

- токарна обробка (циліндричні і торцеві поверхні маточини, піввісі та її кришки, а також нарізання в маточині внутрішньої різьби М5 за допомогою мітчика);
  - свердлення (отвори в напівресорі, кришці піввісі та маточині, включно з отворами під нарізання різьби для деталей кріплення);
  - фрезерування з використанням ділильної головки (шпонковий паз на піввісі та направляючі пази на маточині);
  - протягування (шпонковий паз у кришці);
  - круглошліфування (шийка піввісі під внутрішнє кільце підшипника діаметром  $\varnothing 25k6$  і отвір в маточині під зовнішнє кільце підшипника  $\varnothing 52H7$ ) та плоске шліфування (торцеві поверхні маточини та кришки піввісі під ущільнювальну прокладку).
- 7) Для покращення механічних властивостей та показників міцності деталей повинні використовуватись розповсюджені методи термообробки, а саме: для деталей зі сталі 40Х (маточина, піввісь та її кришка) гартування у маслі до температури  $850^{\circ}\text{C}$  з подальшим відпуском до температури  $520^{\circ}\text{C}$ , для сталі 65Г (пружній елемент напівресора) гартування в маслі до температури  $t = 830^{\circ}\text{C}$  та низькій відпуск до температури  $t = 400^{\circ}\text{C}$ .

## **3 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИЙ АНАЛІЗ ВИРОБУ, ЩО ПРОЄКТУЄТЬСЯ**

### **3.1 Методологія визначення показників якості продукції**

Для оцінки якості машин застосовують як одиничні, так і комплексні показники. Метод визначення одиничних показників якості машини залежить від її конструктивних та технологічних особливостей. У машинобудуванні застосовують наведені нижче методи визначення одиничних показників [47].

Вимірювальний метод виконується на основі технічних вимірювальних засобів, та базується на інформації, що отримується ними. За допомогою вимірювального методу визначають значення таких показників якості, як маса виробу, сила струму, швидкість автомобіля, частота обертання двигуна та інших показників, які можна виміряти вимірювальними приладами [47].

Реєстраційний метод базується на основі спостереження та підрахунку числа певних подій, предметів або витрат, наприклад, підрахунку відмов виробу при випробуваннях, числа дефектних виробів у партії та інших [47].

Розрахунковий метод здійснюється на основі використання емпіричних, теоретичних або однієї з цих залежностей показників якості машини від її параметрів. Застосовується здебільшого під час проектування продукції. Дозволяє встановити залежності між окремими показниками якості. Використовують для визначення маси виробу, показників його продуктивності і інших показників проєктуемого виробу [47].

Органолептичний метод ґрунтується на основі аналізу сприйняття органів почуттів, наприклад, візуальний огляд деталей на наявність тріщин, подряпин, оцінка якості зварних швів, дотик для виявлення дефектів. При органолептичному методі використовують таке технічне обладнання як: лупа, мікроскоп, тощо, вони підвищують сприйнятливість і здатність органів чуття і збільшують шанс виявити дефект[47].

Експертний метод здійснюється на основі рішення, прийнятого експертами, наприклад, в оцінці естетичної характеристики машини чи приладу. Експертний метод оцінки якості продукції здійснюється експертною групою, що складається з висококваліфікованих фахівців приблизно однакового ступеня компетентності. Експертів має бути певна кількість (чим менша чисельність експертів, тим більша ймовірність прийняття випадкових рішень). Бажано проводити кілька турів. Показник якості продукції визначають як середнє арифметичне значення оцінок, проставлених експертами [47].

Соціологічний метод здійснюється на основі збору та аналізу думок фактичних чи можливих споживачів продукції, наприклад, при оцінці якості випущеної серії електродвигунів, телевізорів, тощо [47].

При оцінці показників якості за бальною системою можна використовувати, наприклад, чотири бали: 5 («відмінно»), 4 («добре»), 3 («задовільно») та 0 («погано»). Можливі інші бальні системи. Бали надають виробу, якість якого потрібно оцінити, та аналогу. Відносним одиничним показником якості буде відношення балів виробу, що оцінюється, до балів аналога. Бальний метод оцінки показників якості часто застосовують у поєднанні з експертним методом [47].

При оцінюванні якості виробу зазвичай застосовують у поєднанні кілька розглянутих методів. Часто вони служать не тільки для оцінки рівня якості продукції, але також і для технічного контролю у її виробництві.

Комплексні показники характеризують якість машини за сукупністю її кількох простих властивостей або однієї складної властивості, що складається з кількох простих. Комплексні показники часто визначають методом середнього виваженого (арифметичного, геометричного тощо).

### **3.2 Аналіз та вибір пріоритетних показників якості виробу**

Згідно з ДСТУ 3021-95 “Випробування та контроль якості продукції. Терміни та визначення” показник якості машини трактується як кількісна характеристика однієї або кількох її властивостей, що розглядається стосовно певних умов створення та експлуатації машини [48].

Найбільше застосування у машинобудуванні отримали одиничні показники, які поділяються на дві основні групи: експлуатаційні та виробничо-технічні.

До групи експлуатаційних показників відносяться показники призначення, надійності, ергономіки, естетики, вони в основному характеризують ступінь відповідності машини її цільовому призначенню [48].

Показники виробничо-технічної групи характеризують витрати суспільної праці на виробництво одиниці продукції та свідчать про ступінь відповідності конструкції машини виробничо-технологічним умовам її виготовлення при заданому масштабі випуску виробів. До конструктивних та технологічних показників відносяться трудомісткість, матеріаломісткість, енергоємність, ступінь блоковості, показники конструктивної стандартизації та уніфікації [48].

Окрім того окремою групою треба виділити економічні показники, які поділяються на експлуатаційні витрати (технічне та гарантійне обслуговування, витрати на паливо, тощо) та витрати зв’язані з виробництвом деталі або вузла (вартість матеріалів та комплектуючих, заробітна плата персоналу, енерговитрати, амортизаційні відрахування, тощо) [48].

При конструюванні нашого вузла, тобто колісного рушія на пружних елементах, з самого початку важливо визначитись з його пріоритетними експлуатаційними показниками, окрім того в конструкцію також важливо

зкласти пріоритетні показники з технологічної та економічної групи, адже всі вони надалі будуть відігравати найважливіше значення при експлуатації кінцевого виробу.

### 3.2.1 Експлуатаційні показники

Загальні експлуатаційні властивості якості транспортних засобів, які пов'язані з рухом машини наступні:

**Таблиця 3.1** – Таблиця експлуатаційних властивостей ТЗ [1]

Експлуатаційні властивості автомобільних транспортних засобів	Що забезпечують	Чим характеризуються
1. Тягово-швидкісні властивості	Вантажопідйомність (пасажиромісткість), швидкість руху, прискорення	Масою вантажа, що перевозиться, кількістю пасажирів, максимальною швидкістю руху і шляхом до розгону
2. Паливна економічність	Економію палива	Шляховими витратами палива літр/100 кілометрів
3. Гальмівні властивості	Максимальне уповільнення та утримання автомобіля на уклоні	Гальмівним шляхом та величиною уклону
4. Керованість	Властивість змінювати траєкторію руху при дії водія на кермове колесо	Зусилля на кермовому колесі при повороті керованих коліс на місця та при русі, стабілізацією керованих коліс
5. Стійкість	Властивість зберігати заданий напрямок руху при знятому зусиллі з кермового колеса	Стійкістю керованих коліс проти коливань
6. Маневреність	Можливість робити на обмежених майданчиках	Мінімальний радіусом повороту
7. Прохідність	Можливість рухатися у важких дорожніх умовах і долати перешкоди	Критеріями опорної та профільної прохідності автомобіля
8. Плавність руху	Комфортабельність руху для водія і пасажирів, збереження вантажів	Частотою власних коливань підвіски, середньоквадратичними значеннями швидкостей і прискорень, відсутністю проби підвіски, стабільністю контакту коліс з опорною поверхнею

Так як колісний рушій на пружних елементах надалі планується використовувати в наземних логістичних дронах, здебільшого призначених для доставки боєприпасів, амуніції та провіанта на лінію бойового зіткнення, а також евакуації поранених звідти, його специфічне цільове призначення накладає свої вимоги щодо характеристик окремих вузлів та агрегатів які входять до його складу, це безумовно стосується і експлуатаційних властивостей (показників якості) самого колісного рушія.

Пріоритетними показниками стосовно рушія, які впливатимуть на роботу нашого дрону, в першу чергу є прохідність та плавність руху.

Прохідність транспортного засобу - це експлуатаційна властивість, що забезпечує рух машини у важких дорожніх умовах і подолання перешкод. Рух можливий, якщо [1]:

$$P_k \geq \sum F_\varphi , \quad (3.1)$$

де  $\sum F_\varphi$  – сума сил опору, Н;

$P_k$  – сумарна колова сила на ведучих колесах транспортного засобу, Н.

Втрата прохідності може бути повною (буксування на місці, застрявання) або частковою (зниження швидкості руху, збільшення витрати палива, електрики, тощо). У загальному випадку прохідність транспортного засобу обмежується недостатньою міцністю і деформованістю опорної поверхні, наявністю нерівностей і перешкод [1].

В другому розділі були детально описані розрахунки складової сили опору, що складається з сили опору кочення та сили реакції поверхні від дії повної маси транспортного засобу, тобто на показник прохідності значною мірою впливають властивості поверхні (зминання та провалювання ґрунтів) та пляма її контакту з пружними елементами колеса. Треба також відзначити що за рахунок того що

наш транспортний засіб рухається з малою швидкістю ( $V_{max} - 25$  км/год) силою опору повітря та іншими складовими в нашому випадку можна знехтувати.

Плавність руху – це експлуатаційна властивість транспортного засобу, що забезпечує зручність транспортування пасажирів та збереження вантажів [1].

Плавність руху людина оцінює суб'єктивно через відчуття стомленості, що пов'язана з повторюванням коливань транспортного засобу та їх прискореннями, але в нашому разі плавність руху буде залежати тільки від параметра стабільності контакту пружних елементів з опорною поверхнею (дорогою або ґрунтом). Як вже зазначалось раніше, швидкість руху дрона незначна, що усуває вплив таких параметрів як частота власних коливань та середньоквадратичні значення швидкостей і прискорень, крім того також відсутній пробій підвіски, встановлення якої в нашому випадку на дроні не передбачається [1].

Таким чином плавність ходу наземного дрона буде досягатися відсутністю значних вібраційних та ударних навантажень, а забезпечення згладжуючих властивостей колес і характеристик підвіски будуть компенсуватися властивостями пружних елементів колісного рушія.

Колесо, з точки зору плавності, характеризується нормальною жорсткістю  $C_k$  і коефіцієнтом демпфування  $K_k$ .

Нормальну жорсткість колеса визначають за допомогою розрахункового методу так [1]:

$$C_k = \frac{\partial F_z}{\partial h_k}, \quad (3.2)$$

де  $\partial F_z$  – нормальне навантаження на колесо, Н;

$\partial h_k$  – деформація пружних елементів, мм.

При вертикальних коливаннях через сили тертя в середині пружного елемента виникає внутрішня сила, яка дорівнює [1]:

$$F_k = K_k * h_k^0, \quad (3.3)$$

де  $K_k$  – коефіцієнт демпфування пружного елемента колеса, який залежить від його конструкції, товщини, матеріалу, внутрішнього напруження, тощо;

$h_k^0$  – швидкість деформації пружного елемента (напівресори).

Дію кроку нерівностей профіля дороги, що поділяється на три основні види (макропрофіль, мікропрофіль, та шорсткість ) було викладено в попередньому розділі.

Щодо експлуатаційних показників рушія які напряду не пов'язані з рухом транспортного засобу то в першу чергу це показники надійності, тобто напрацювання на відмову, ресурс, а також його ремонтпридатність [47].

Надійність – це властивість об'єкта зберігати протягом певного проміжку часу у межах значення всіх параметрів, що характеризують здатність виконувати необхідні функції за заданих умов застосування, технічного обслуговування, зберігання та транспортування. До параметрів, що характеризує здатність виконувати необхідні функції, відносять кінематичні та динамічні параметри, параметри міцності, точності функціонування, продуктивності, швидкості тощо. Будучи комплексною властивістю, надійність в залежності від призначення об'єкта включає безвідмовність, довговічність, ремонтпридатність і збереження, або певні поєднання цих властивостей [47].

Безвідмовність – це властивість об'єкта безперервно зберігати працездатний стан протягом деякого часу або напрацювання. Показниками безвідмовності є можливість безвідмовної роботи, середнє напрацювання на відмову, інтенсивність відмов, тощо [47].

Довговічність - це властивість виробу зберігати працездатний стан до його граничного стану при прийнятій системі технічного обслуговування і ремонту. Показниками довговічності є середній термін служби, термін служби до списання [47].

Ремонтопридатність – це властивість об'єкта, що полягає в його здатності підтримувати та відновлювати працездатний стан шляхом технічного обслуговування та ремонту. До показників ремонтпридатності відносять ймовірність та середній час відновлення, питому та середню трудомісткість технічного обслуговування та ремонту, тощо [47].

Звертаючи до уваги вищесказане, а саме що для забезпечення надійності конструкція рушії повинна бути міцною та ремонтпридатною (простою), на стадії проектування в конструкцію було закладено наступні конструктивні та технологічні особливості:

- 8) запаси міцності усіх елементів відповідають встановленим нормам, що досягнуто за допомогою використання відповідних конструкційних легованих сталей та їх термообробкою, для різьбових з'єднань використана метизна продукція підвищених класів міцності;
- 9) у разі перевищення допустимих навантажень конструкцією рушії передбачається вихід з ладу найдешевшого та найдоступнішого елемента, а саме шпонкового з'єднання, яке замінюється з мінімальним зусиллям, також, на випадок виходу з ладу двигуна привода ведучого колеса, передбачається можливість простого переобладнання привідного з'єднання в неведуче колесо, а саме зручне зняття кришки піввісі та легке прибирання шпонки з шпонкового пазу;
- 10) натяг у підшипнику контролюється простим обертанням колеса «від руки» та встановлюється підбором регулювальних прокладок товщиною 0,1 мм, легкість заміни підшипника забезпечується відповідними посадками, для змащування підшипників використовується легкодоступне та дешеве мастило типу Літол-24;

- 11) конструкція рушія в технічному обслуговуванні та ремонті передбачає використання лише універсальних слюсарних інструментів та забезпечує легкий доступ до кожної деталі.

Враховуючи вищезазначене, експертно оцінюючи конструкцію колісного рушія і застосовуючи бальний метод, показник надійності можна оцінити як «чотири з чотирьох», тобто на «відмінно».

Що стосується показників ергономіки та естетики, то враховуючи специфіку призначення нашого кінцевого виробу ці показники не мають вирішального значення.

### **3.2.2 Конструктивні показники**

З показників якості, які закладаються на етапі проектування, найважливішим для нашого виробу має бути матеріаломісткість, тобто показник, за допомогою якого визначають кількість конструкційних матеріалів необхідних для складання та застосування виробу згідно з його конструктивних особливостей, що виявляються у сфері виробництва, експлуатації та ремонту.

Матеріаломісткість має різновидності: загальну, структурну, питому та відносну. Загальна матеріаломісткість характеризує сумарні витрати матеріалів на виріб, її знаходять двома способами: за загальною масою машини та за масою матеріалів витрачених на виробництво, експлуатацію та ремонт, включаючи всі види відходів та витрат. Структурна матеріаломісткість характеризує витрати окремих видів матеріалів, питома - витрати матеріалів на один із показників призначення машини, відносна - розраховується по відношенню до аналогічного показника прийнятого для порівняння.

Враховуючи вищезазначене, проводячи попередню оцінку матеріаломісткості за допомогою експертного метода та порівнюючи вагу нашого колісного рушія на пружних елементах типу напівресора (вага 9,7 кг) з

аналогічними колісними рушіями з пневматичними шинами можна зазначити що колеса, які сьогодні масово застосовуються на наземних транспортних засобах складніші та важчі, тобто показник їх матеріалоемності гірший ніж у нашого проектуємого виробу, при цьому відносний показник матеріаломісткості нашого виробу позитивний, тобто менше одиниці.

### 3.2.3 Технологічні показники

Рівень уніфікації та стандартизації.

Показники стандартизації та уніфікації дозволяють визначити ступінь конструктивної одноманітності спроектованої або виготовленої машини. Вони свідчать про зусилля або досягнення конструктора у застосуванні мінімально необхідної кількості типорозмірів складених частин виробу як то деталей, вузлів, комплексів, комплектів тощо, з метою підвищення ефективності його виробництва [49].

До найважливіших показників стандартизації та уніфікації відносяться коефіцієнти застосовуваності, повторюваності, насиченості виробу, а також уніфікації групи виробів.

Коефіцієнт застосовуваності, який характеризує рівень конструктивної спадкоємності складових частин у виробі, визначають за допомогою розрахункового метода у відсотках за формулою [49]:

$$K_3 = \frac{n - n_0}{n} \cdot 100\%, \quad (3.4)$$

де  $n$  — загальна кількість типорозмірів складових частин;

$n_0$  — кількість типорозмірів оригінальних складових частин.

$$K_3 = 62,5\%.$$

Коефіцієнт повторюваності, який характеризує рівень внутрішньо-проектної уніфікації виробу, а також взаємозамінність складових частин всередині виробу розраховують за формулою [49]:

$$K_{\Pi} = \frac{N}{n}, \quad (3.5)$$

де  $N$  – загальна кількість складових частин у виробі.

$$K_{\Pi} = 6,06.$$

Коефіцієнт насиченості виробу складовими частинами, що повторюються, розраховують за формулою [49]:

$$K_{\text{H}} = \frac{N - n}{n}, \quad (3.6)$$

$$K_{\text{H}} = 5,06.$$

Коефіцієнт міжпроектної (взаємної) уніфікації  $K_{\text{му}}$ , який характеризує рівень взаємної уніфікації групи виробів, та ступінь скорочення номенклатури складових частин у виробах групи, розраховують у відсотках за формулою [49]:

$$K_{\text{му}} = \frac{\sum_{i=1}^H n_i - Q}{\sum_{i=1}^H n_i - n_{\text{max}}} \cdot 100\%, \quad (3.7)$$

- де  $H$  – загальна кількість проектів (виробів), що розглядають;
- $n_i$  – кількість типорозмірів складових частин у  $i$ -м проекті (виробі);
- $Q$  – загальна кількість типорозмірів складових частин, що не повторюють та застосовують у групі з  $H$  проектів (виробів);
- $n_{\text{max}}$  – максимальна кількість типорозмірів складових частин одного проекту (виробу).

Числове значення  $Q$  обчислюють за формулою [49]:

$$Q = \sum_{j=1}^m q_j, \quad (3.8)$$

де  $m$  – загальна кількість найменувань складових частин проєктів (виробів), що розглядають;  
 $q_j$  – кількість типорозмірів складової частини  $j$ -го найменування, що не повторюють.

За відсутністю тої чи іншої інформації на етапі проєктування формула коефіцієнта уніфікації може мати спрощений вид, а саме [49]:

$$K_{\text{му}} = \frac{\sum_{i=1}^N K_{zi}}{N} \cdot 100\%, \quad (3.9)$$

де  $K_{zi}$  – загальна кількість найменувань складових частин проєктів (виробів), що розглядають;  
 $N$  – кількість типорозмірів складової частини  $j$ -го найменування, що не повторюють.

У нашому випадку, коли кількість проєктів дорівнює одиниці, тобто при  $N=1$  значення коефіцієнта уніфікації дорівнює:

$$K_{\text{му}} = 64,4\%.$$

Що вказує на достатньо високий рівень застосування стандартних деталей і вузлів та має позитивний вплив на загальну якість виробу.

Трудомісткість виконання складальних операцій.

Збірність (блочність) виробу – це показник який характеризує легкість монтажу виробу та його трудомісткість.

Коефіцієнт збірності (блочності) визначають за допомогою розрахункового метода за формулою [49]:

$$K_{зб} = \frac{N_{зб.ст}}{N_{зб.заг}}, \quad (3.10)$$

де  $N_{зб.ст}$  – кількість уніфікованих (стандартних) деталей та вузлів у виробі;  
 $N_{зб.заг}$  – загальна кількість деталей та вузлів у виробі.

$$K_{зб} = 0,82.$$

Отриманий показник вказує на достатньо високий рівень застосування стандартних деталей і вузлів та має позитивний вплив на спрощення складальних операцій зокрема і на трудомісткість взагалі, завдяки достатньо високому рівню ергономіки використовуваних уніфікованих деталей у виробі.

Для зменшення трудомісткості виготовлення оригінальних деталей в нашому виробі також застосовуються загальнодоступні матеріали, спрощені та розповсюджені методи отримання заготовки, вальцювання, механічної і термічної обробки та зварювання, про що детальніше було викладено раніше у другому розділі.

### 3.2.4 Економічні показники

Що стосується економічних показників якості, як то: вартість матеріалів та комплектуючих, витрати на заробітну плату, витрати на експлуатацію та ремонт, то провівши за допомогою експертного методу бальне оцінювання можна впевнено зазначити їх високий позитивний рівень, а саме поставити оцінку «три з чотирьох», тобто «добре».

При експертній оцінці враховувалось:

- 12) високий показник застосування стандартних деталей (елементи кріплення та підшипниковий вузол);

- 13) факт використання при виготовленні оригінальних деталей загальнодоступних конструкційних сталей, а також інших доступних матеріалів, як то картон чи мастило;
- 14) використання спрощеного методу лиття для виготовлення заготовок оригінальних деталей;
- 15) використання простого методу вальцювання для отримання криволінійних поверхонь напівресори;
- 16) використання розповсюджених методів механічної обробки матеріалів різанням, як то: токарна обробка, свердлення, фрезерування, протягування, шліфування на універсальному обладнанні з використанням стандартного верстатного пристосування;
- 17) використання розповсюджених і дешевих методів зварювання та термообробки.

### **3.3 Аналіз планової собівартості виробу. Висновки за результатами техніко-економічного аналізу та оптимізація виробу**

В кінці другого розділу було детально та аргументовано викладено підбір матеріалів і комплектуючих, вибір технологічних методів отримання заготовок (лиття та холодна пластична деформація), зварювання, а також вибір методів механічної та термічної обробки, що дозволяє нам експертно оцінити планову собівартість виготовлення проєктуємого виробу.

**Таблиця 3.2 – Планова собівартість колісного рушія з пружними елементами типу «напівресора»**

Найменування позиції (деталі/матеріалу)	Позначення	Роздрібна ціна одинці виміру, грн (штука/кг)	Кількість у вузлі/вага	Загальна вартість у вузлі, грн.	Примітки
Стандартні вироби , шт.					
Шпонка	2-8x7x28 ГОСТ 23360-78	7 (від 2 до 30)	1	7	
Підшипник	36205 ГОСТ 831-75	150 (від 53 до 294)	1	150	
Болт	M5-6gx25 8.8.40X ГОСТ 7805-70	2 (від 0,84 до 4,08)	5	10	
Шайба пружинна	5 Н 65Г 11 ГОСТ 6402-70	0,25 (від 0,17 до 0,33)	5	1,25	
Шайба зменшена	A5 40X 11 ГОСТ 10450-78	0,5 (від 0,3 до 0,7)	5	2,5	
Болт	M10-6gx35 10.9 40X ГОСТ 7805-70	10 (від 4,7 до 18)	15	150	
Шайба збільшена	A10 40X 11 ГОСТ 6958-78	3 (від 1,9 до 4,54)	15	45	
Шайба	10 40X 11 ГОСТ 11371-78	1 (від 0,41 до 1,48)	15	15	
Шайба пружинна	10 ОТ 65Г 11 ГОСТ 6402-70	0,7 (від 0,5 до 0,8)	15	10,5	
Гайка	M10-6Н 8.8 40X 11 ГОСТ 5915-70	4 (від 1,23 до 4,4)	15	60	
Загальна вартість стандартних виробів				451,25	

## Кінець таблиці 3.2

Найменування позиції (деталі/ матеріалу)	Позначення	Роздрібна ціна одинці виміру, грн (штука/кг)	Кількість у вузлі/вага	Загальна вартість у вузлі, грн.	Примітки
Матеріали, кг., з урахуванням припуску на обробку (Кв, коефіцієнт витрат матеріалу > 1)					
Маточина	Сталь 40ХЛ ГОСТ 977-88	45 (від 40 до 87)	1/1,2*1,5 =1,8	81	Для лиття в піщані форми Кв=1,4-2
Напівресора	Сталь 65Г ГОСТ 14959-79	39 (від 38 до 79)	15/0,4*1 =6	234	Лист товщиною 5 мм по ГОСТ 1577-70
Кришка піввісі СК	Сталь 40ХЛ ГОСТ 977-88	45 (від 40 до 87)	1/0,35*1,5 =0,53	24	Для лиття в піщані форми Кв=1,4-2
Піввісь	Сталь 40Х ГОСТ 4543-71	65 (від 60 до 75)	1/0,8*2 =1,6	104	Круг діаметр 65 мм з каліброваної сталі по ГОСТ 7417-75
Прокладка регулювальна	Сталь 08кп	66 (від 52 до 70)	1/0,01*3 =0,03	2	Стальна стрічка 08 КП-10-ВН-2-Б-0,1 ГОСТ 503-81 Кв=3
Прокладка ущільнювальна	Картон А	80 (від 78 до 96)	1/0,04*3 =0,12	10	Картон А товщина 0,5 ГОСТ 9347-74 Кв=3
Масило	Літол-24	200 (від 190 до 250)	0,05	10	ГОСТ 21150-87
Загальна вартість матеріалів				465	
Вартість виготовлення відповідно до трудомісткості (експертно 2-3 ціни матеріалу)					
Маточина	Сталь 40ХЛ ГОСТ 977-88	81	1	243	
Напівресора	Сталь 65Г ГОСТ 14959-79	234	1	702	Стан поставки лист товщиною 5 мм по ГОСТ 1577-70
Кришка піввісі СК	Сталь 40ХЛ ГОСТ 977-88	24	1	72	
Піввісь	Сталь 40Х ГОСТ 4543-71	104	1	312	Круг діаметр 65 мм з каліброваної сталі по ГОСТ 7417-73
Прокладка регулювальна	Сталь 08кп ГОСТ 1050-74	2	1	4	Стальна стрічка 08 КП-10-ВН-2-Б-0,1 ГОСТ 503-81
Прокладка ущільнювальна	Картон А	10	1	20	Картон А товщина 0,5 ГОСТ 9347-74
Загальна трудомісткість				1 353	
Загальна вартість виробу				2 269,25	

Вартість уніфікованих і стандартизованих деталей, та вартість матеріалів взяті з об'яв щодо роздрібних та дрібнооптових продажів. Вартість використаних матеріалів взята з урахуванням складності методів отримання заготовок, а саме з урахуванням відповідного коефіцієнта витрат матеріалу. Вартість обробки взята експертно, з припущенням вартості витрат дві – три ціни застосованого матеріалу, в залежності від складності того чи іншого відповідного технологічного процесу.

Загальна планова собівартість виробу з урахуванням ринкової роздрібною ціни на стандартні комплектуючі в грн з ПДВ склала близько 450 гривень, вартість використовуваних матеріалів з урахуванням роздрібною ринковою ціни склала близько 470 грн ПДВ, вартість механічної та термічної обробки, тобто трудомісткість виготовлення виробу за експертною оцінкою склала близько 1 350 гривень. Враховуючи вищезазначене, колісний рушій на пружних елементах типу напівресора орієнтовно може коштувати від 2 000 до 3 000 гривень з ПДВ.

За результатами прорахованих показників та їх кількісних характеристик можна зробити певні висновки, а саме те, що спроектований виріб, тобто колісний рушій на пружних елементах типу напівресора, відповідає усім вимогам щодо його експлуатації в складі логістичного наземного дрону. Він має невелику собівартість та достатньо високі експлуатаційні характеристики, в тому числі надійність, напрацювання на відмову та ремонтпридатність.

Що стосується експлуатаційних показників, пов'язаних з рухом транспортного засобу, то вони будуть прораховані і перевірені після виготовлення та опитних випробувань експериментального зразка.

## 4 РОЗРАХУНОК НА МІЦНІСТЬ ДЕТАЛЕЙ ВУЗЛА РУШІЯ

У цьому розділі проведені розрахунки на міцність усіх деталей вузла рушія, а саме: маточини, піввісі, підшипника, шпонки та болтового з'єднання, окрім пружного елемента, який був детально досліджений у другому розділі.

Розрахунок проводився для того, щоб перевірити доцільність використання застосованих матеріалів, міцність деталей рушія та зрозуміти, як може поводитися певна деталь під час максимального навантаження. Розрахунок здійснювався за допомогою модуля аналізу напружень у Autodesk Inventor.

### 4.1 Розрахунок маточини на міцність

Розрахунок маточини проводився у три етапи: навантаження на одну ділянку маточини, на дві та на три ділянки. Навантаження прикладене до маточини дорівнювало 1500 Н.

Розрахунок маточини при навантаженні на одну ділянку:

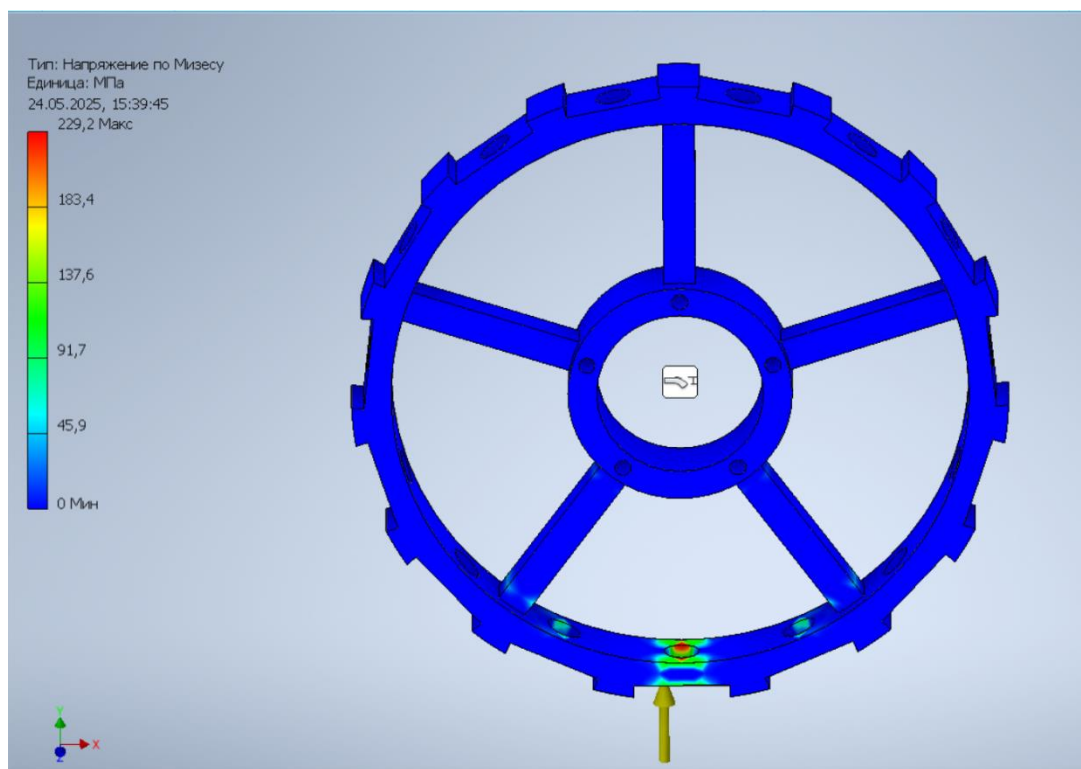
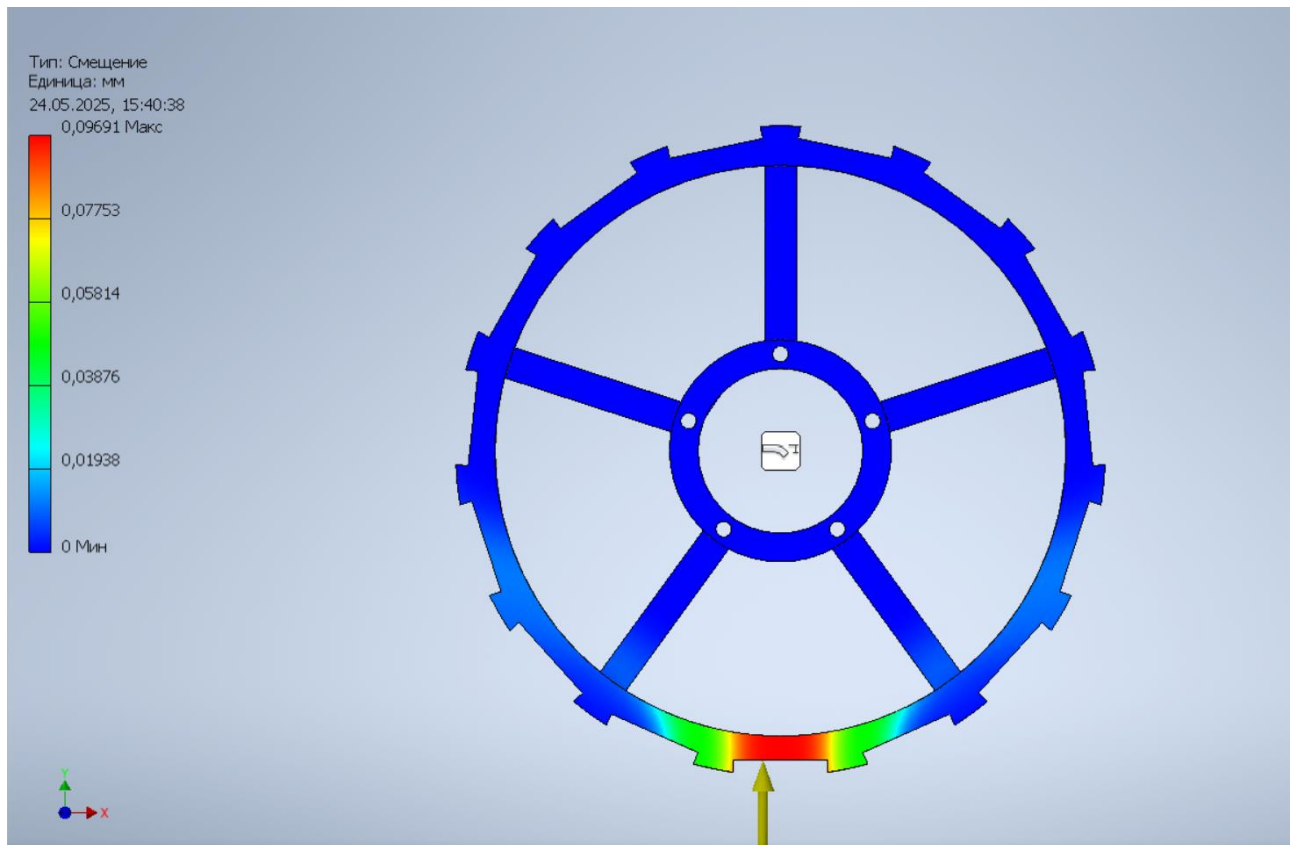


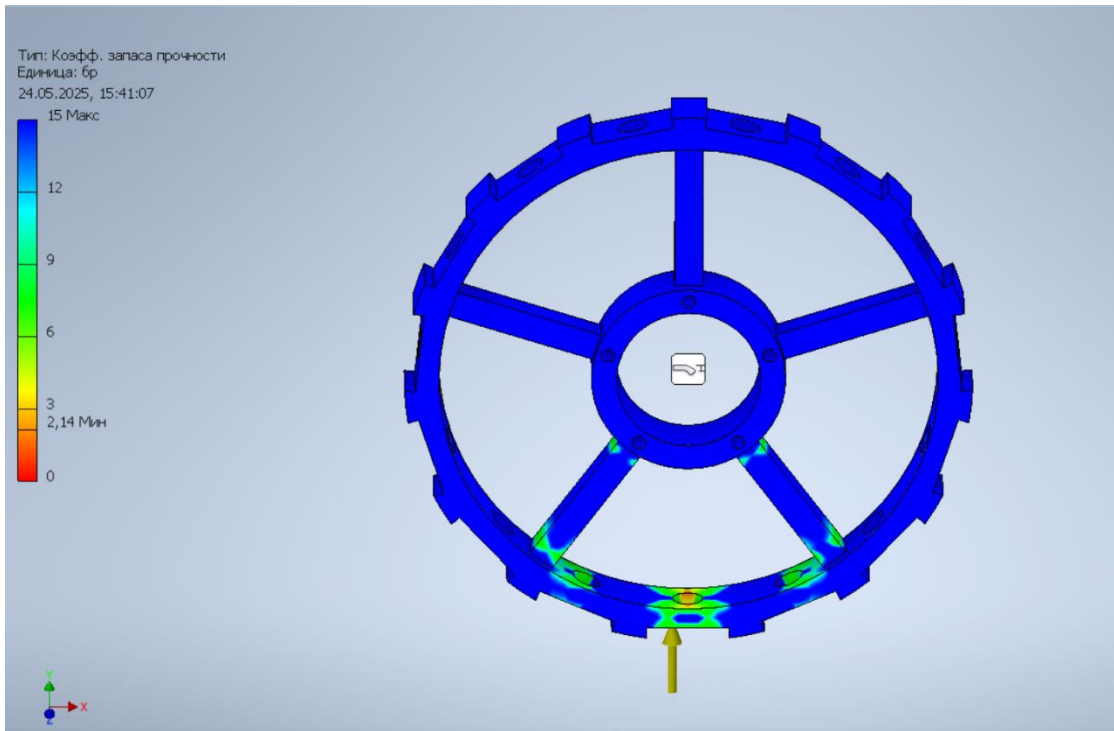
Рисунок 4.1 – Напруження по Мізесу при навантаженні однієї ділянки

Дивлячись на (рис. 4.1) маємо наступний висновок: концентраторами напружень є отвори, які зроблені для кріплення пружних елементів до маточини, але навантаження що сприймає маточина не значні. Напруження, що виникають у маточини при навантаженні далекі від границі текучості що говорить про те що навіть при максимальному навантаженні, у нашому випадку коли сила 1500 Н діє тільки на одну ділянку маточини, не буде відбуватися пластична деформація деталі і такі навантаження надалі не вплинуть на її експлуатаційні властивості.



**Рисунок 4.2** – Зміщення маточини при навантаженні

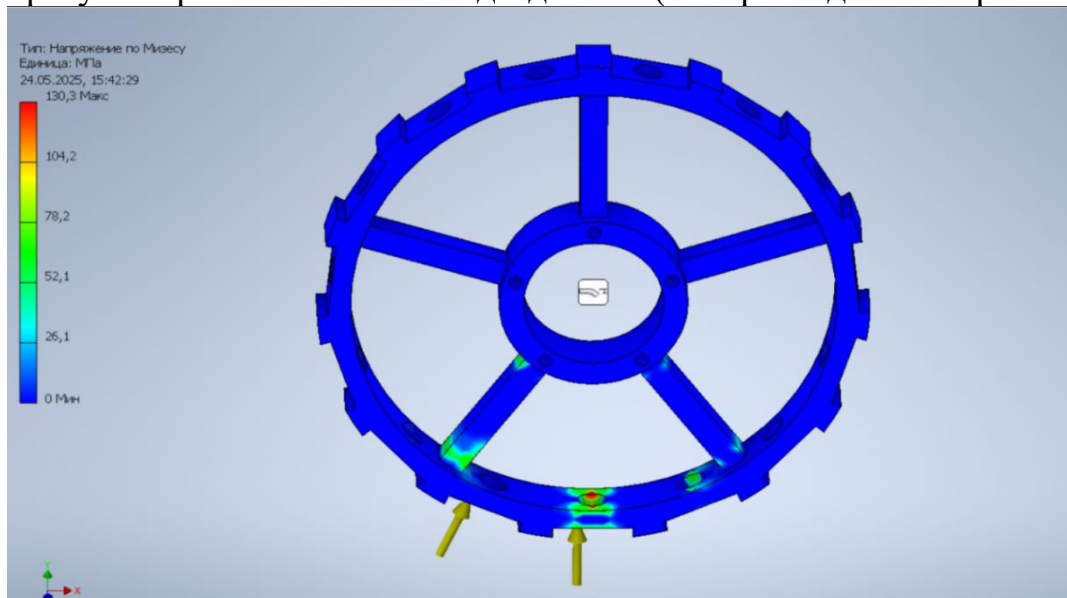
При опрацюванні отриманої інформації (рис 4.2) було виявлено, що зміщення навіть при максимальному навантаженні на одну ділянки будуть малі і ніяк не вплинуть на роботу колісного рушія, в тому числі стосовно зміни його геометричних розмірів, форм та фізичних і механічних показників.



**Рисунок 4.3** – Коefіцієнт запасу міцності при навантаженні однієї ділянки

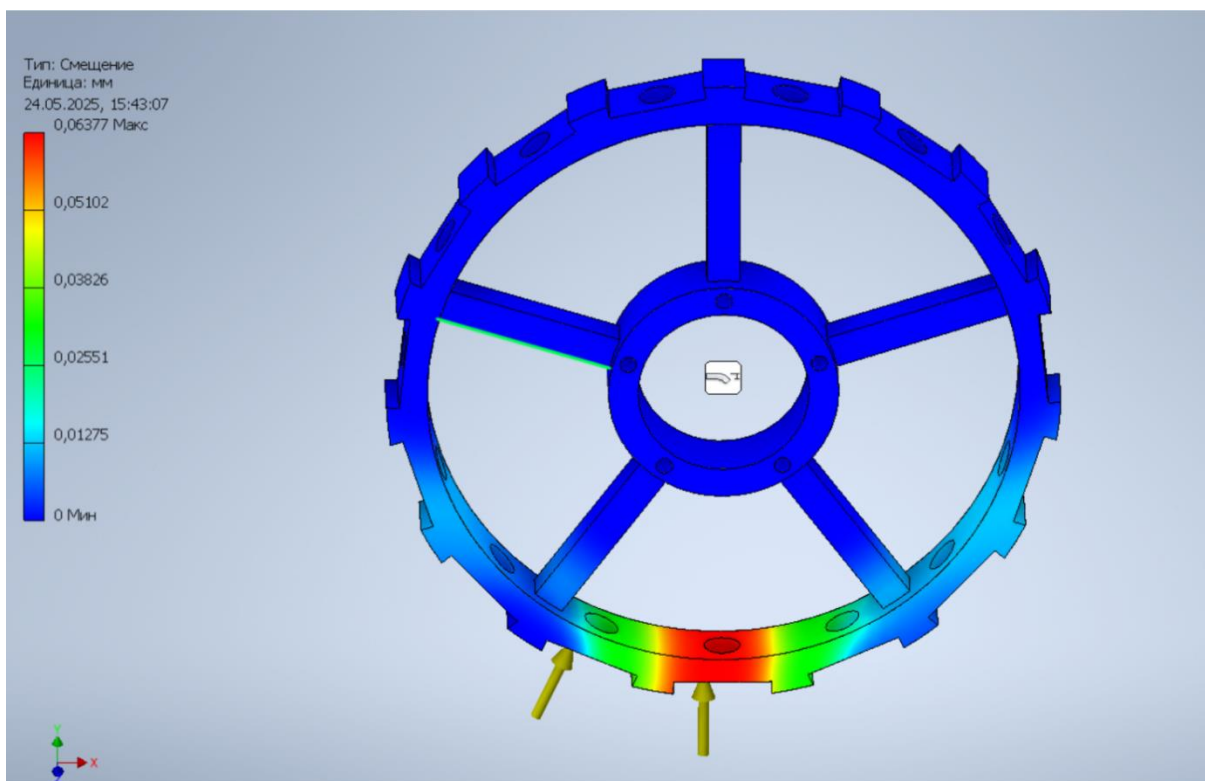
При прикладеному навантаженні силою 1500 Н (рис 4.3) коефіцієнт запасу міцності задовільний, мінімальне значення коефіцієнта у отворах та дорівнює 2,14, це дозволяє зробити висновок що навіть при максимальному навантаженні маточина не руйнується, матеріал діє у межах пружної деформації. Надійність та міцність забезпечена.

Розрахунок при навантаженні на дві ділянки (сила розподіляється рівномірно):



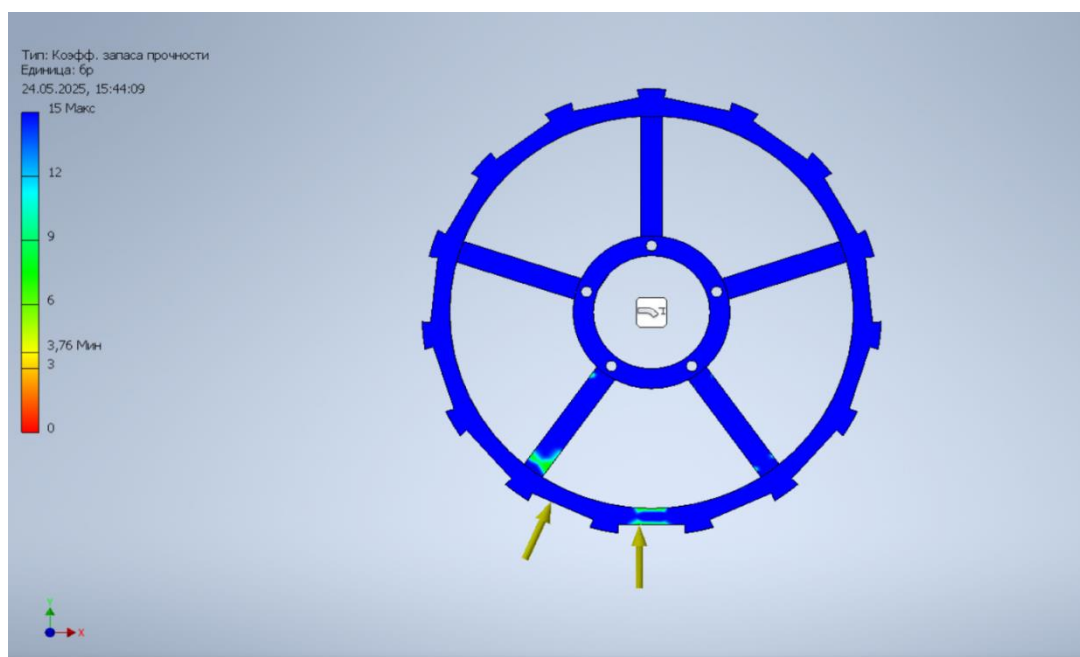
**Рисунок 4.4** – Напруження по Мізесу при навантаженні двох ділянок

Аналізуючи отримане напруження (рис 4.4) можна зробити висновок, що при розподілі навантаження на дві ділянки напруження зменшаться майже вдвічі.



**Рисунок 4.5** – Зміщення при навантаженні двох ділянок

При навантаженні на дві ділянки зміщення значно зменшилось (рис 4.5).



**Рисунок 4.6** – Коефіцієнт запасу міцності при навантаженні двох ділянок

Коефіцієнт запасу міцності збільшився майже вдвічі (рис 4.6).

Спостерігаючи за тенденцією розподілення навантажень між собою при збільшенні кількості ділянок можна зробити підсумок: при збільшенні кількості пружних елементів, які контактують з поверхнею та сприймають вагу, навантаження та деформації зменшуються через те, що вони розподіляються між ділянками кріплення напівресор до маточини.

## 4.2 Розрахунок піввісі на міцність

Проведемо розрахунок на міцність піввісі рушія:

Генератор компонентів вала

Материал

- Сталь 40X
- Модуль упругости: E 210000 МПа
- Модуль жесткости: G 80000 МПа
- Плотность: ρ 7850 кг/м<sup>3</sup>

Свойства расчета

- Использовать плотность
- Использовать коэффициент смещения при сдвиге: 1,188 бр
- Количество участков вала: 1000 бр
- Режим приведенного напряжения: НМН

2D просмотр

Нагрузки и опоры

- Нагрузка: Осевая сила
- Радialная сила

Результаты

L	79,9 мм
Масса	0,8 кг
σ <sub>B</sub>	13,0 МПа
τ <sub>S</sub>	1,1 МПа
τ	0,0 МПа
σ <sub>T</sub>	2,2 МПа
σ <sub>red</sub>	15,3 МПа
f <sub>max</sub>	2,6 мкм
φ	0,00 град
<b>1. Нагрузка</b>	
F <sub>Y</sub>	-2,6 мкН
f <sub>X</sub>	0,0 мкм
<b>2. Нагрузка</b>	
F <sub>Y</sub>	-2,6 мкН
f <sub>X</sub>	0,0 мкм
<b>1. Опора</b>	
F <sub>Z</sub>	1100,0 Н
F <sub>Y</sub>	490,0 Н
F <sub>X</sub>	0,0 Н
Y <sub>Y</sub>	0,0 мкм/Н
f <sub>Y</sub>	-0,0 мкм
f <sub>X</sub>	0,0 мкм
<b>2. Опора</b>	
F <sub>Z</sub>	0,0 Н
F <sub>Y</sub>	526,9 Н
F <sub>X</sub>	0,0 Н
Y <sub>Y</sub>	0,0 мкм/Н
f <sub>Y</sub>	0,0 мкм
f <sub>X</sub>	0,0 мкм

20:51:56 Расчет: Расчет выполнен.

Рисунок 4.7 – Розрахунок піввісі

Силу в 1500 Н, що діє у результаті опору ґрунту на пружні елементи через маточину на піввісь, прикладено у місці встановлення підшипника. Прикладена сила поділяється на радіальну та осьову. Враховуючи співвідношення квадратів катетів осьова сила дорівнює 1100 Н, а радіальна 1008 Н. Максимальні та допустимі навантаження у межах норми. Максимальне допустиме відхилення дорівнює 2,6 мікрометри, таке відхилення у межах норми.

Провівши розрахунок можна зробити висновок, що піввісь витримує задані навантаження, деформація не відбувається, деталь працює належним чином, її міцність та надійність забезпечена.

### 4.3 Розрахунок підшипника маточини

Проведемо розрахунок підшипника маточини:

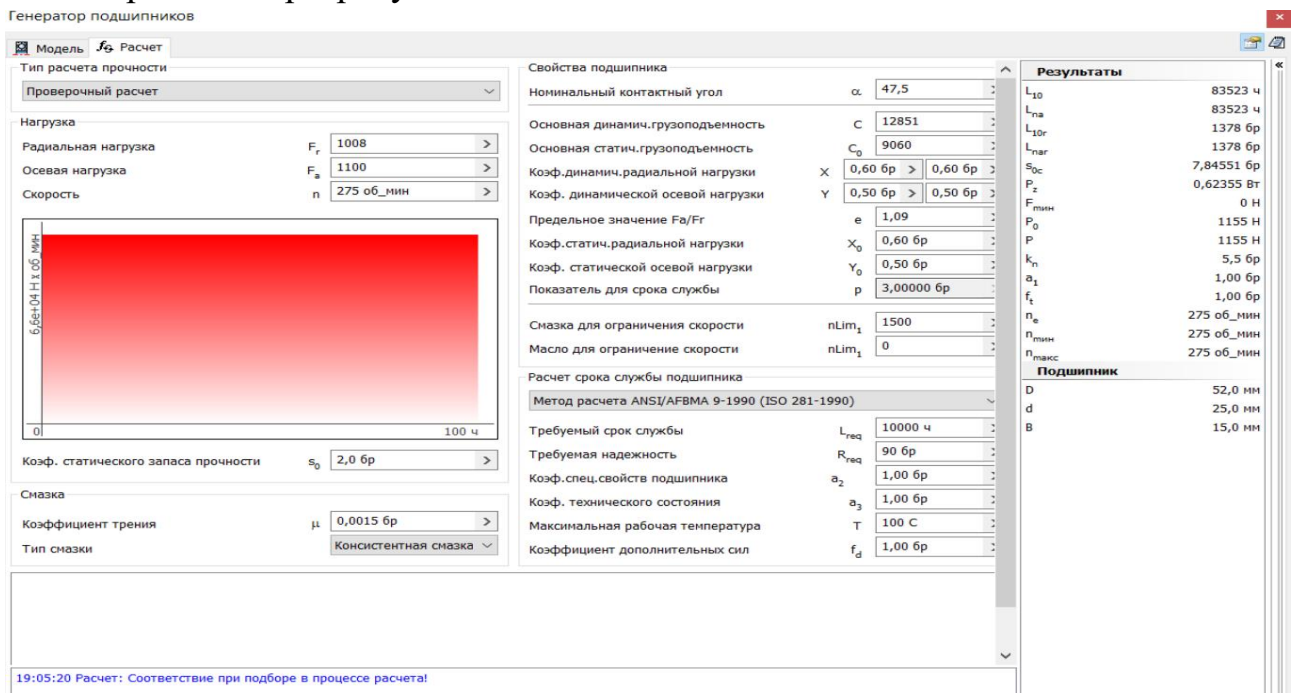


Рисунок 4.8 – Розрахунок підшипника

Розрахунок підшипника показав, що орієнтований час безвідмовної праці становить вісімдесят три тисячі годин, це більш ніж достатньо для специфічних умов експлуатації, в яких повинен працювати проєктований вузол. Підшипник сприймає задані йому навантаження, не руйнується, коефіцієнт запасу міцності становить 5,5, що доказує його надійність.

### 4.4 Розрахунок шпонкового з'єднання

Проведемо розрахунок шпонкового з'єднання на міцність:

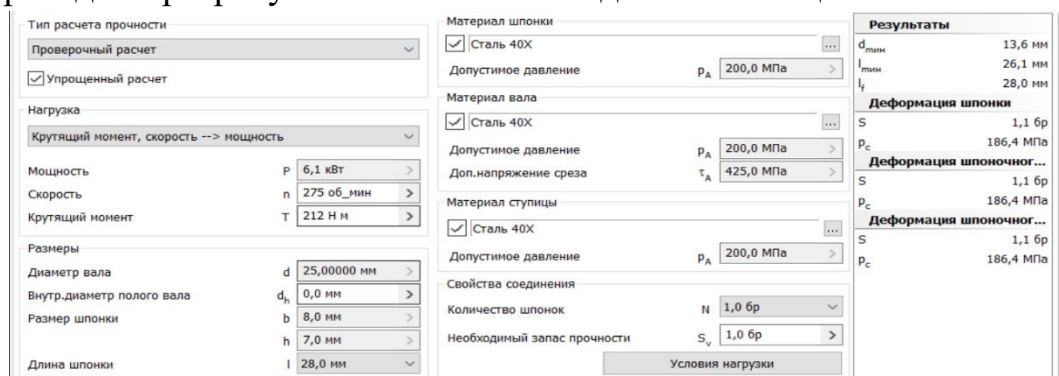


Рисунок 4.9 – Розрахунок шпонки

З отриманих результатів розрахунку на міцність шпонки (рис 4.9) можна зробити такий висновок: шпонка обрана потрібних розмірів, в тому числі її площа поперечного перерізу та довжина, навантаження та деформації у межах норми, коефіцієнт запасу міцності задовільний.

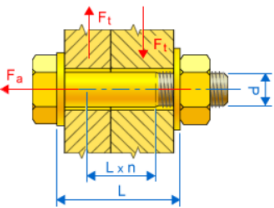
## 4.5 Розрахунок різьбового з'єднання

Проведення розрахунку болтового з'єднання на міцність:

Генератор компонентів болтового соединения

Тип расчета прочности: Проверочный расчет

Нагрузка



Максимальная осевая сила  $F_a$  1100 >

Макс. тангенциальная сила  $F_t$  0 Н >

Коэффициент плотности  $k$  1,50 бр >

Коэффициент входящей силы  $n$  0,50 бр >

Козф. трения соединения  $f$  0,40 бр >

Козф. запаса прочности  $k_s$  3,00 бр >

Материал пластин

Сталь 65Г

Модуль упругости  $E_2$  215000 МПа >

Свойства соединения

Функциональная ширина  $L$  30,2 мм >

Болт

Количество болтов  $z$  1 бр >

Диаметр резьбы  $d$  10,0 мм >

Шаг  $p$  1,5 мм >

Средний диаметр болта  $d_s$  9,0 мм >

Мин. диаметр болта  $d_{мин}$  8,2 мм >

Материал болта

Сталь 40X ГОСТ 4543-71

Предел текучести  $S_y$  785 МПа >

Модуль упругости  $E_1$  214000 МПа >

Доп. давление в резьбе  $p_a$  40 МПа >

Коэффициент трения резьбы  $f_1$  0,20 бр >

Коэффициент трения головки  $f_2$  0,25 бр >

Результаты

$F_v$	1525,7 Н
$F_{макс}$	1650,0 Н
$M_u$	4,7 Н м
$\sigma_t$	29,2 МПа
$\tau_k$	18,8 МПа
$\sigma_{ред}$	43,8 МПа
$\sigma_{макс}$	31,6 МПа
$\rho_c$	13,2 МПа
$k_{ас}$	17,93848 бр

11:11:57 Расчет: Соответствие при подборе в процессе расчета!

Рисунок 4.10 – Розрахунок болтового з'єднання

У нашому випадку на з'єднання діє лише осьова сила на відрив. Так як пружний елемент, згідно з конструкцією маточини, вставлений у направляючий паз, що запобігає його провертанню, то на болтове з'єднання зрізаюча тангенціальна сила не діє.

Розрахунок показав, що сила, яка діє на болтове з'єднання не перевищує допустиму. Коефіцієнт запасу міцності дорівнює 17,9 що більш ніж задовільно. Максимальний тиск у з'єднанні не перевищує допустимий. Висновок такий, що болтове з'єднання надійне та витримує задані навантаження.

## **5 ВИСНОВКИ ПРО ДОЦІЛЬНІСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ РОЗРОБЛЕНОГО ВИРОБУ ТА СФЕРИ ЙОГО ВИКОРИСТАННЯ**

Враховуючи результати експертної бальної оцінки що отримані при проведенні експериментів макетних зразків рушіїв, результати силових розрахунків та аналіз експлуатаційних показників якості спроектованого виробу, можна зробити висновок щодо доцільності його вироблення та подальшого використання у складі спеціальних транспортних засобів, в тому числі у складі наземного логістичного дрону.

При прийнятті рішення щодо застосування спроектованого рушія доцільно зазначити його високі технічні та економічні показники, включаючи металоемність, коефіцієнти запасу міцності, високий рівень уніфікації, невисоку собівартість і доступність матеріалів та стандартних комплектуючих, невелику трудомісткість виготовлення і затрати на подальшу експлуатацію. Неабияку позитивну роль також відіграють і його високі експлуатаційні показники, а саме надійність, тобто напрацювання на відмову, ресурс, та ремонтпридатність.

Так як колісний рушій на пружних елементах надалі планується використовувати в наземних логістичних дронах, здебільшого призначених для доставки боєприпасів, амуніції та провіанта на лінію бойового зіткнення, а також евакуації поранених звідти, окремо слід відзначити його позитивні експлуатаційні показники, які пов'язані з рухом транспортного засобу, а саме його прохідність та плавність руху.

Поліпшенню вказаних експлуатаційних характеристик сприяє велика кількість пружних елементів, їх розміри та особливість розташування (ширина та довжина), розміри та особливості змінних динамічних радіусів за різних умов навантаження, а також розміщення координати центру мас у транспортному засобі. Окрім того позитивну роль відіграє відстань розташування плям контакту

з опорної поверхнею (вони достатньо широко рознесені між собою вздовж поперечної вісі дрону) та сама достатньо велика сумарна площа плями контакту. Ці вказані конструктивні особливості покращують стійкість дрону від бічного перекидання, покращують його зчеплення з поверхнею та позитивно впливають на його прохідність в цілому.

За умов застосування дрону на ґрунтах з невеликою несучою здатністю конструкцією рушія передбачено підвищення прохідності за рахунок застосування металевої сітки, натягнутої поверх пружних елементів та закріпленої укручуванням дротом.

За умов застосування дрону на слизькій поверхні, для запобігання проковзування та поліпшення зчеплення з контактуючою поверхнею, конструкцією пружного елемента передбачено нанесення насічок на зовнішню сторону напівресори (макронерівностей) та застосування в його опорній поверхні у спеціальних, заздалегідь просвердлених, отворах болтових з'єднань М10, які будуть відігравати роль додаткових ґрунтозачепів.

Що стосується кліренсу спроектованого рушія у складі логістичного дрону то через особливості його розмірів та конструкцію вузла маточини, при критичному навантаженні він може приймати занижені розміри, що за екстремальних умов експлуатації може викликати негативні наслідки.

Щоб уникнути погіршення показників прохідності, після отримання і опрацювання результатів експлуатаційних випробувань рушія у складі дрону, можливе доопрацювання конструкції маточини, а також застосування у подальшому рами типу «rocker-bogie» та використання збільшених радіусів поперечної та поздовжньої прохідності.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Солтус А. П. Теорія експлуатаційних властивостей автомобіля : навч. посіб. 3-тє вид. Київ : Арістей, 2006. 176 с.
2. Учасники проєктів Вікімедіа. Рушій – Вікіпедія. Вікіпедія. 2008. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Рушій> (дата звернення: 16.04.2025).
3. Contributors to Wikimedia projects. Propulsion - Wikipedia. Wikipedia, the free encyclopedia. 2001. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Propulsion> (date of access: 16.04.2025).
4. Учасники проєктів Вікімедіа. Гребний гвинт – Вікіпедія. Вікіпедія. 2012. URL: [https://uk.wikipedia.org/wiki/Гребний\\_гвинт](https://uk.wikipedia.org/wiki/Гребний_гвинт) (дата звернення: 16.04.2025).
5. Contributors to Wikimedia projects. Paddle wheel - Wikipedia. Wikipedia, the free encyclopedia. 2009. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Paddle\\_wheel#:~:text=Physics,into%20rotation%20of%](https://en.wikipedia.org/wiki/Paddle_wheel#:~:text=Physics,into%20rotation%20of%) (date of access: 16.04.2025).
6. Учасники проєктів Вікімедіа. Судновий крильчатий рушій – Вікіпедія. Вікіпедія. 2018. URL: [https://uk.wikipedia.org/wiki/Судновий\\_крильчатий\\_рушій](https://uk.wikipedia.org/wiki/Судновий_крильчатий_рушій) (дата звернення: 16.04.2025).
7. Учасники проєктів Вікімедіа. Водометний рушій – Вікіпедія. Вікіпедія. 2021. URL: [https://uk.wikipedia.org/wiki/Водометний\\_рушій](https://uk.wikipedia.org/wiki/Водометний_рушій) (дата звернення: 16.04.2025).
8. Учасники проєктів Вікімедіа. Весло – Вікіпедія. Вікіпедія. 2010. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Весло> (дата звернення: 16.04.2025).
9. Учасники проєктів Вікімедіа. Вітрило – Вікіпедія. Вікіпедія. 2006. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Вітрило> (дата звернення: 16.04.2025).
10. Учасники проєктів Вікімедіа. Повітряний гвинт – Вікіпедія. Вікіпедія. 2013. URL: [https://uk.wikipedia.org/wiki/Повітряний\\_гвинт](https://uk.wikipedia.org/wiki/Повітряний_гвинт) (дата звернення: 16.04.2025).
11. Учасники проєктів Вікімедіа. Рушійне сопло – Вікіпедія. Вікіпедія. 2023. URL: [https://uk.wikipedia.org/wiki/Рушійне\\_сопло](https://uk.wikipedia.org/wiki/Рушійне_сопло) (дата звернення: 16.04.2025).
12. Учасники проєктів Вікімедіа. Орнітоптер – Вікіпедія. Вікіпедія. 2014. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Орнітоптер> (дата звернення: 17.04.2025).
13. Contributors to Wikimedia projects. Hovercraft - Wikipedia. Wikipedia, the free encyclopedia. 2002. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Hovercraft> (date of access: 17.04.2025).
14. Contributors to Wikimedia projects. Solar sail - Wikipedia. Wikipedia, the free encyclopedia. 2002. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Solar\\_sail](https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_sail) (date of access: 17.04.2025).
15. Учасники проєктів Вікімедіа. Фотонний двигун – Вікіпедія. Вікіпедія. 2011. URL: [https://uk.wikipedia.org/wiki/Фотонний\\_двигун](https://uk.wikipedia.org/wiki/Фотонний_двигун) (дата звернення: 17.04.2025).

16. Учасники проєктів Вікімедіа. Колесо – Вікіпедія. Вікіпедія. 2007. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Колесо> (дата звернення: 17.04.2025).
17. Учасники проєктів Вікімедіа. Пневмоко́ток – Вікіпедія. Вікіпедія. 2015. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Пневмоко́ток> (дата звернення: 17.04.2025).
18. Учасники проєктів Вікімедіа. Гусеничний рушій – Вікіпедія. Вікіпедія. 2012. URL: [https://uk.wikipedia.org/wiki/Гусеничний\\_рушій](https://uk.wikipedia.org/wiki/Гусеничний_рушій) (дата звернення: 17.04.2025).
19. Учасники проєктів Вікімедіа. Напівгусеничний рушій – Вікіпедія. Вікіпедія. 2020. URL: [https://uk.wikipedia.org/wiki/Напівгусеничний\\_рушій](https://uk.wikipedia.org/wiki/Напівгусеничний_рушій) (дата звернення: 17.04.2025).
20. Contributors to Wikimedia projects. Screw-propelled vehicle - Wikipedia. Wikipedia, the free encyclopedia. 2006. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Screw-propelled\\_vehicle](https://en.wikipedia.org/wiki/Screw-propelled_vehicle) (date of access: 17.04.2025).
21. Учасники проєктів Вікімедіа. Крокохід – Вікіпедія. Вікіпедія. 2022. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Крокохід> (дата звернення: 17.04.2025).
22. Учасники проєктів Вікімедіа. Маглев – Вікіпедія. Вікіпедія. 2009. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Маглев> (дата звернення: 17.04.2025).
23. ГАЗ – 69 з роторно-фрезерним рушієм. Wikimedia Commons. URL: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/ru/8/84/GAZ-69\\_cutter.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/ru/8/84/GAZ-69_cutter.jpg) (дата звернення: 17.04.2025).
24. Авто Citroën P17 з напівплазуновим рушієм. Wikimedia Commons. URL: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/0/0b/1931\\_Citroën\\_Autochenille\\_P17\\_Croisière\\_Jaune\\_photo\\_2.jpg/1280px-1931\\_Citroën\\_Autochenille\\_P17\\_Croisière\\_Jaune\\_photo\\_2.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/0/0b/1931_Citroën_Autochenille_P17_Croisière_Jaune_photo_2.jpg/1280px-1931_Citroën_Autochenille_P17_Croisière_Jaune_photo_2.jpg) (дата звернення: 17.04.2025).
25. Шнекохід Residue Solutions MudMaster. Home - International Mining. URL: <https://im-mining.com/site/wp-content/uploads/2021/11/FDLbuVYVQAI4kwy-1024x682.jpg> (дата звернення: 17.04.2025).
26. Крокохідний робот Big Dog. URL: <https://s.libertaddigital.com/fotos/noticias/bigdog.jpg> (дата звернення: 17.04.2025).
27. Шанхайський маглев. Wikimedia Commons. URL: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/d/d1/A\\_maglev\\_train\\_coming\\_out,\\_Pudong\\_International\\_Airport,\\_Shanghai.jpg/500px-A\\_maglev\\_train\\_coming\\_out,\\_Pudong\\_International\\_Airport,\\_Shanghai.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/d/d1/A_maglev_train_coming_out,_Pudong_International_Airport,_Shanghai.jpg/500px-A_maglev_train_coming_out,_Pudong_International_Airport,_Shanghai.jpg) (дата звернення: 17.04.2025).
28. Колесо. URL: [https://customersolutions-media.mercedes-benz.com/medienbank\\_im/configurator\\_740x423/71363.png](https://customersolutions-media.mercedes-benz.com/medienbank_im/configurator_740x423/71363.png) (дата звернення: 17.04.2025).
29. Винахід колеса та його етапи. StudFiles. URL: <https://studfile.net/preview/8554467/> (дата звернення: 18.04.2025).
30. Червоний О. Хто винайшов колесо. Coolinfo. URL: <https://coolinfo.in.ua/hto-vynajshov-koleso/> (дата звернення: 18.04.2025).\

31. Історія створення шини. Vianor – Шини та автомобільний сервіс - Vianor. URL: <https://vianor.ua/nformats-ia-pro-shinu/dan-pro-shinu/stor-ia-stvorennia-shini-2/> (дата звернення: 18.04.2025).
32. Перша пневматична шина. imgix - Image Processing On-Demand, Served By CDN. URL: [https://images.prismic.io/six-things/05258a05-8d64-48b0-90bd-3403f43629e2\\_Aerial-Wheel.jpg?auto=compress,format&rect=0,26,900,900&w=700&h=700](https://images.prismic.io/six-things/05258a05-8d64-48b0-90bd-3403f43629e2_Aerial-Wheel.jpg?auto=compress,format&rect=0,26,900,900&w=700&h=700) (дата звернення: 18.04.2025).
33. Патент Томсона. Wikimedia Commons. URL: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/f/f3/1847\\_US\\_Patent\\_5104\\_Thomson\\_Carriage\\_Wheel\\_with\\_air\\_cushion.jpg/640px-1847\\_US\\_Patent\\_5104\\_Thomson\\_Carriage\\_Wheel\\_with\\_air\\_cushion.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/f/f3/1847_US_Patent_5104_Thomson_Carriage_Wheel_with_air_cushion.jpg/640px-1847_US_Patent_5104_Thomson_Carriage_Wheel_with_air_cushion.jpg) (дата звернення: 19.04.2025).
34. Велосипедна шина Данлопа. Wikimedia Commons. URL: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/f8/Dunlop\\_first\\_pneumatic\\_bicycle\\_tyre.JPG](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/f8/Dunlop_first_pneumatic_bicycle_tyre.JPG) (дата звернення: 19.04.2025).
35. Безповітряні шини спільного виробництва General Motors і Michelin. Переваги і недоліки. AutoMoto.ua. URL: <https://automoto.ua/uk/auto-news/general-motors-i-michelin-sozdali-neubivaemye-bezvozdusnye-siny-1807.html> (дата звернення: 19.04.2025).
36. Німецький автомобіль з пружинними колесами 1917 рік. Attention Required! | Cloudflare. URL: <https://cdn2.picryl.com/photo/1918/12/31/bij-gebreek-aan-gummi-autobanden-bestanddeelnr-158-2898-31c834-1024.jpg> (дата звернення: 19.04.2025).
37. Перший планетохід “Лунохід-1”. FOP Shvachko V. V. – IT, Engineering, Scientific researches and developments, Consulting about Economic activity and Management. URL: [https://shvachko.net/wp-content/uploads/2012/04/Lunokhod\\_1.jpg](https://shvachko.net/wp-content/uploads/2012/04/Lunokhod_1.jpg) (дата звернення: 19.04.2025).
38. Asnani V., Delap D., Creager C. The Development of Wheels for the Lunar Roving Vehicle. Cleveland, Ohio : Glenn Research Center, 2009. 32 с.
39. Колесо Lunar Roving Vehicle. URL: [https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcT\\_qYiuEO4R5jCIuXRkwBhI2s-3xCqNz4mCiw&amp;s](https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcT_qYiuEO4R5jCIuXRkwBhI2s-3xCqNz4mCiw&amp;s) (дата звернення: 19.04.2025).
40. Contributors to Wikimedia projects. Sojourner (rover). Wikipedia, the free encyclopedia. 2012. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Sojourner\\_\(rover\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Sojourner_(rover)) (date of access: 20.04.2025).
41. Contributors to Wikimedia projects. Opportunity (rover). Wikipedia, the free encyclopedia. 2004. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Opportunity\\_\(rover\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Opportunity_(rover)) (date of access: 20.04.2025).
42. Колесо “Opportunity”. Wikimedia Commons. URL: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/ff/NASA\\_MER\\_FLEXURE\\_WHEEL.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/ff/NASA_MER_FLEXURE_WHEEL.jpg) (дата звернення: 20.04.2025).
43. Колеса “Curiosity” та “Perseverance”. URL: <https://assets.science.nasa.gov/dynamicimage/assets/science/psd/mars/resources/detai>

[1\\_files/2/4/24910\\_Rover-Wheel-Comparison-800w.jpg](#) (дата звернення: 20.04.2025).

44. Еластичне колесо марсохода : пат. CN108116154A Китай: В60С 5/14. № CN108116154А; заявл. 2016 ; опубл. 01.06.2018. Espacenet. URL: <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/062234349/publication/CN108116154A?q=CN108116154A> (дата звернення:21.04.2025).

45. Пристрій для підвищення прохідності колісних транспортних засобів : пат. RU2757098С1 Росія : В60В 15/20. № RU2757098С1 ; заявл. 2021 ; опубл. 30.06.2021.Espacenet.URL: <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/078286277/publication/RU2757098C1?q=RU2757098C1> (дата звернення: 21.04.2025).

46. Телескопічне колесо : пат. CN114987103А Китай : В60В 9/00. № CN114987103А ; заявл. 2022 ; опубл. 26.08.2022. Espacenet. URL: <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/083017990/publication/CN114987103A?q=CN114987103A> (дата звернення: 21.04.2025).

47. Савуляк В. В. Управління якістю продукції : навч. посіб. Вінниця : ВНТУ, 2012. 91 с. URL: [https://duikt.edu.ua/uploads/1\\_912\\_66022803.pdf](https://duikt.edu.ua/uploads/1_912_66022803.pdf) (дата звернення: 03.05.2025).

48. ДСТУ 3021-95. Випробування та контроль якості продукції. [Чинний від 1996-01-01]. Вид. офіц. Київ : Держстандарт України, 1995. 69 с. URL: [https://www.ksv.biz.ua/GOST/DSTY\\_ALL/DSTU5/dstu\\_3021-95.pdf](https://www.ksv.biz.ua/GOST/DSTY_ALL/DSTU5/dstu_3021-95.pdf) (дата звернення: 03.05.2025).

49. Чередніков О., Чуприна В., Жирний В., Найко А., Приходько С. Дослідження міцності та зносостійкості гусеничних стрічок із закритим шарніром для багатоцільових легких броньованих тягачів // Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки. – 2024. – Вип. 2(20). – С. 140–150. – DOI: 10.37701/dndivsovt.20.2024.19. – URL: <https://dndivsovt.com/index.php/journal/article/view/91/88> (дата звернення: 03.05.2025).





Кресленики кришки піввісі та заглушки кришки піввісі:

ДПБ.НН ММІ.МВ-1216.01.07 √ Ra 6,3

1. Твердість 241...286 НВ.  
2. Невказані граничні відхилення згідно з ISO 2768.

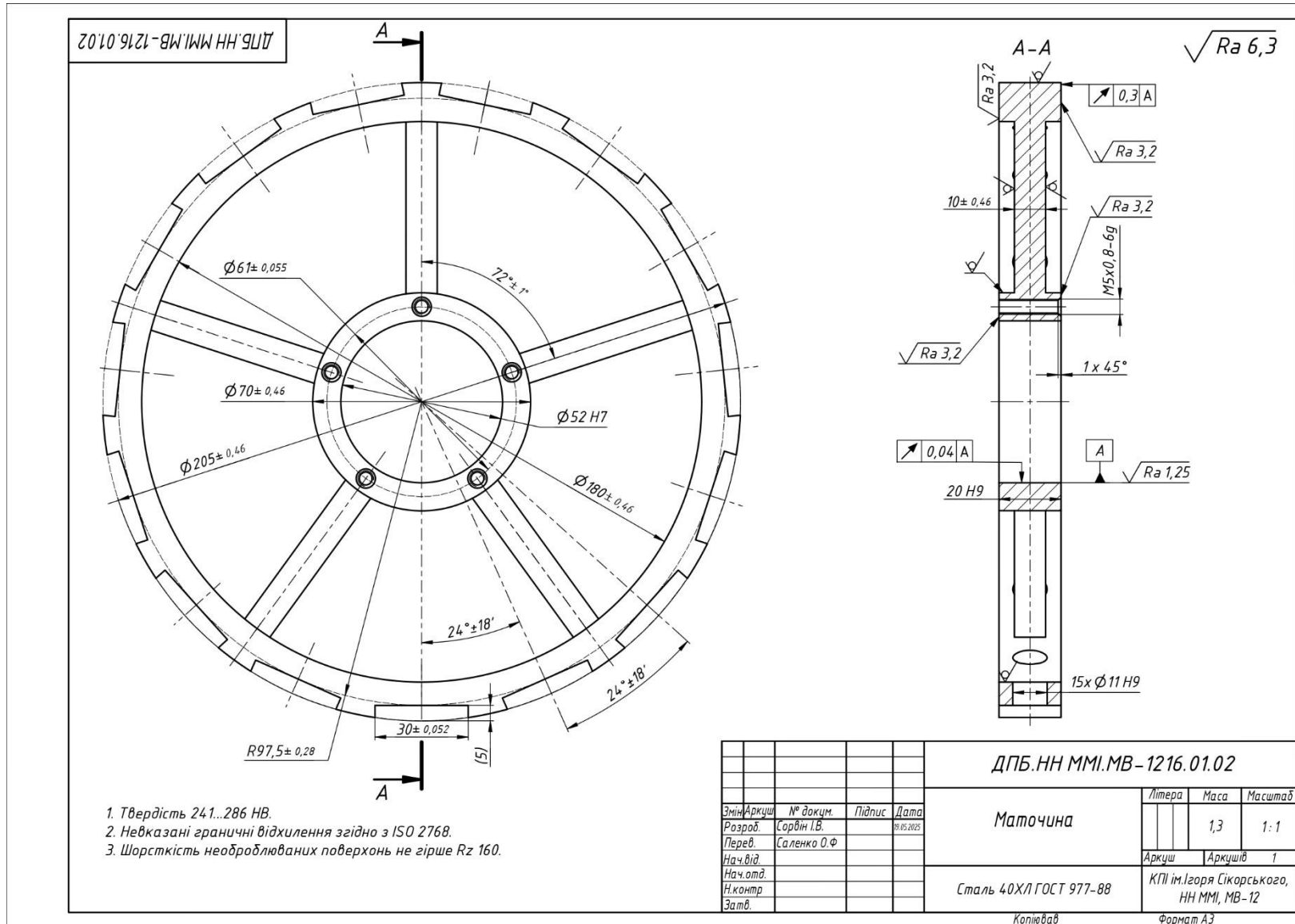
				ДПБ.НН ММІ.МВ-1216.01.07		
				Кришка піввісі		
Змін.	Архив.	№ докум.	Підпис	Дата	Литера	Маса
Розроб.	Сорвін І.В.			22.05.2025		0,4
Перев.	Саленко О.Ф.					2:1
Нач.від.					Аркуш	Аркушів
Нач.отд.						1
Н.контр.					Сталь 40ХЛ ГОСТ 977-88	
Затв.					КПІ ім. Ігоря Сікорського, НН ММІ, МВ-12	
				Київ	Формат А3	

ДПБ.НН ММІ.МВ-1216.01.08 √ Ra 6,3

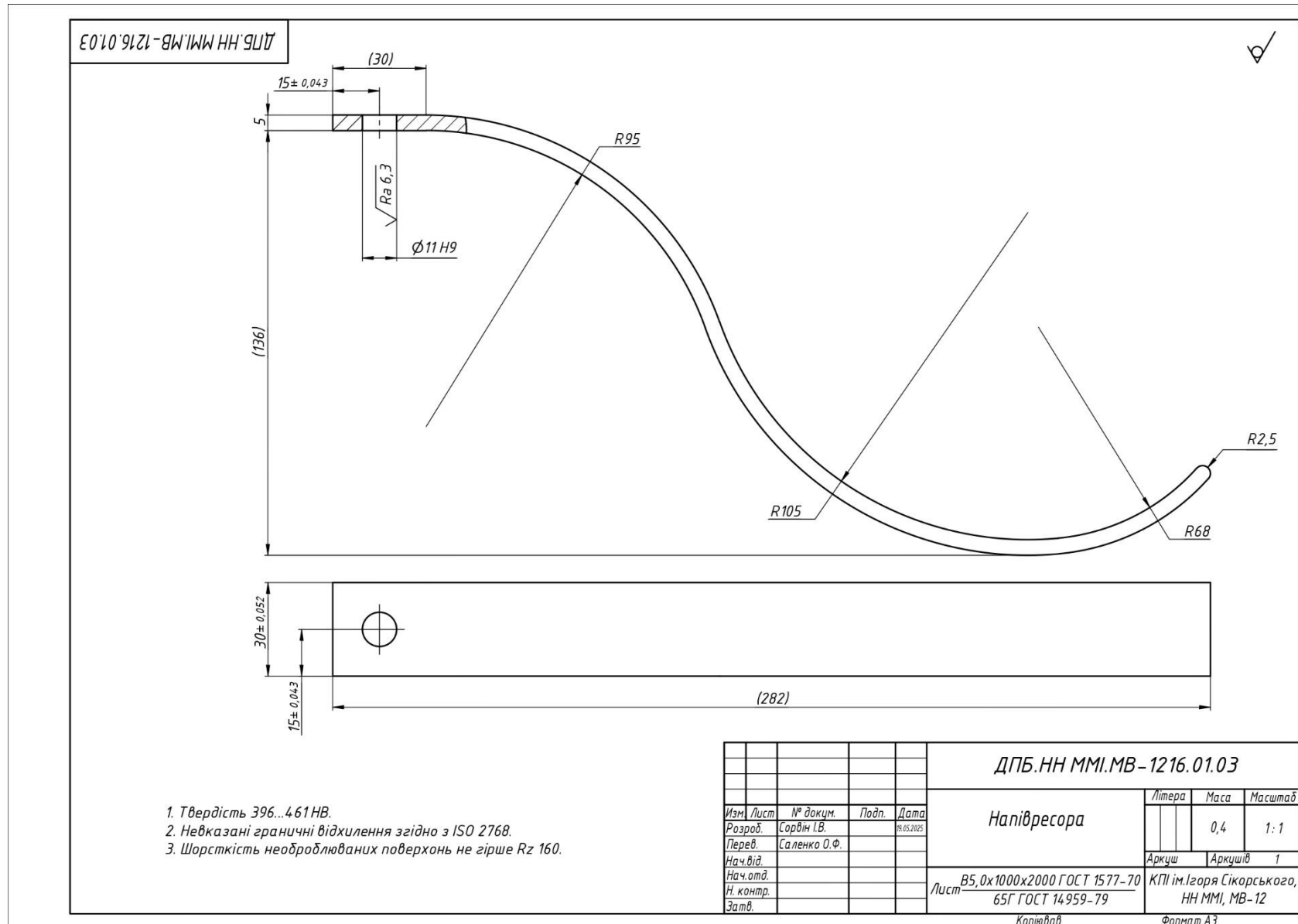
1. Твердість матеріалу в стані поставки у відпалі 217 НВ.  
2. Невказані граничні відхилення згідно з ISO 2768.  
3. Шорсткість необроблених поверхонь не гірше Ra 25.

				ДПБ.НН ММІ.МВ-1216.01.08		
				Заглушка кришки піввісі		
Змін.	Архив.	№ докум.	Підпис	Дата	Литера	Маса
Розроб.	Сорвін І.В.			22.05.2025		0,013
Перев.	Саленко О.Ф.					2:1
Нач.від.					Аркуш	Аркушів
Нач.отд.						1
Н.контр.					В2,0x1000x2000 ГОСТ 1577-70	
Затв.					Лист 40Х ГОСТ 4543-71	
				Київ	Формат А4	

Кресленик маточини:



Кресленик пружного елемента типу напівресора:







Специфікація до складального кресленика колісного рушія з елементами типу напівресора:

Формат	Зона	Поз.	Позначення	Найменування	Кіл	Приймітки		
				<u>Документація</u>				
			ДПБ.НН ММІ.МВ-1216.01.00 СК	Складальний кресленник	1			
				<u>Складальна одиниця</u>				
		1	ДПБ.НН ММІ.МВ-1216.01.01 СК	Кришка піввісі	1			
				<u>Деталі</u>				
		2	ДПБ.НН ММІ.МВ-1216.01.02	Маточина	1			
		3	ДПБ.НН ММІ.МВ-1216.01.03	Напівресора	15			
		4	ДПБ.НН ММІ.МВ-1216.01.04	Піввісь	1			
		5	ДПБ.НН ММІ.МВ-1216.01.05	Регульвальна прокладка	1			
		6	ДПБ.НН ММІ.МВ-1216.01.06	Ущільнювальна прокладка	1			
				<u>Стандартні вироби</u>				
		7		Шпонка 2-8x7x28 ГОСТ 23360-78	1			
		8		Підшипник 36205 ГОСТ 831-75	1			
		9		Болт М5-6gx25 8.8 40Х ГОСТ 7805-70	5			
		10		Шайба пружинна 5 Н 65Г11 ГОСТ 6402-70	5			
		11		Шайба А5 40Х 11 ГОСТ 10450-78	5			
		12		Болт М10-6gx35 10.9 40Х ГОСТ 7805-70	15			
		13		Шайба А10 40Х 11 ГОСТ 6958-78	15			
		14		Шайба 10 40Х 11 ГОСТ 11371-78	15			
		15		Шайба пружинна 100Т 65Г11 ГОСТ 6402-70	15			
		16		Гайка М10-6Н 8.8 40Х 11 ГОСТ 5915-70	15			
			<b>ДПБ.НН ММІ.МВ-1216.01.00 С</b>					
			Змін.	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата	
			Розробив	Сорвін І.В.			18.05.	
			Перев.	Саленко О.Ф.				
			Нач.від.					
			Н.контр					
			Затв.					
			<b>Колесо з пружними елементами типу напівресора</b>			Літера	Аркуш	Аркушів
							1	1
			<b>КПІ ім.Ігоря Сікорського, НН ММІ МВ12</b>					

Копіявав

Формат А4

## Презентація



ВСТУП

ГОЛОВНЕ

ЗМІСТ

ІНШЕ

# Колісний рушій на пружних елементах для наземного дрона

Дипломний проєкт  
виконав:

СТУДЕНТ ГРУПИ  
МВ-12 СОРВІН І.В.  
КЕРІВНИК ПРОЄКТУ  
САЛЕНКО О.Ф.



Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»



ВСТУП

ГОЛОВНЕ

ЗМІСТ

ІНШЕ



# ЗМІСТ ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ

01



Вступ

02



Фізичне та  
математичне  
моделювання

03



Техніко-  
економічний аналіз  
виробу, що  
проєктується

04



Розрахунок на  
міцність деталей  
вузла рушія

05



Висновки про  
доцільність  
застосування  
розробленого  
виробу та сфера  
використання





ВСТУП

ГОЛОВНЕ

ЗМІСТ

ІНШЕ



01



Вступ

1. **ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ  
МЕТАЛОПРУЖНОГО ПРУЖИННОГО  
КОЛЕСА**

1.1 **ПЛОСКЕ КОЛЕСО З ПРУЖНИМИ  
ЕЛЕМЕНТАМИ ТИПУ «СПИЦЯ»,  
КОНСТРУКТИВНИЙ АНАЛОГ «П'ЯТА-  
СТОПА»**

1.2 **СФЕРИЧНЕ КОЛЕСО З ПРУЖНИМИ  
ЕЛЕМЕНТАМИ ТИПУ «НАПІВРЕСОРА»,  
КОНСТРУКТИВНИЙ АНАЛОГ «КОЛЕСО  
МАРСОХОДА»**

2. **ПАТЕНТНО-ІНФОРМАЦІЙНИЙ  
ПОШУК ТА ДОСЛІДЖЕННЯ  
АНАЛОГІВ**





ВСТУП

ГОЛОВНЕ

ЗМІСТ

ІНШЕ



Металопружні пружинні колеса набувають популярності через освоєння такої галузі, як робототехніка та дронотехніка.

### ПЕРЕВАГИ

**Переваги:** надійність, витривалість, потребують меншого обслуговування, не бояться проколів, температур та можуть працювати у більш агресивних умовах ніж звичайні колеса з пневматичними шинами.

### НЕДОЛІКИ

**Недоліки:** маса колеса, вищий рівень вібрацій, дорожче виробництво, менше корисне навантаження

www.reallygreatsite.com





ВСТУП

ГОЛОВНЕ

ЗМІСТ

ІНШЕ

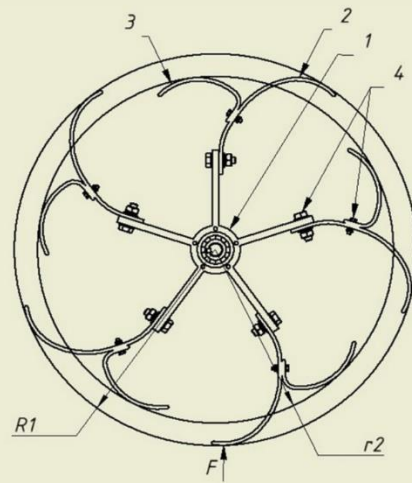


Схема колеса з  
пружними елементами  
типу «п'ятка-стопа»

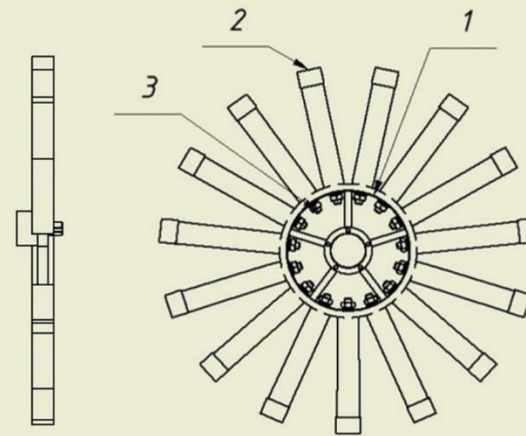
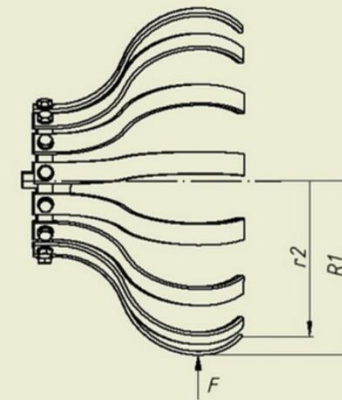


Схема колеса з  
пружними елементами  
типу «напівресора»





ВСТУП

ГОЛОВНЕ

ЗМІСТ

ІНШЕ



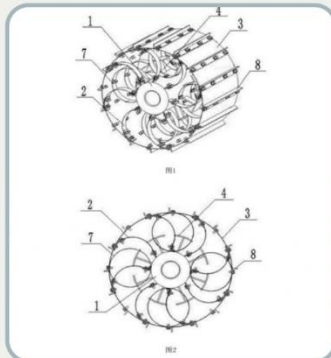
При патентному пошуку було знайдено три конструкційні аналоги:

- Еластичне колесо марсохода;
- Прилад для підвищення прохідності;
- Телескопічне колесо.

Ключові слова, які використовувались при патентному пошуку: wheel drive, elastic elements, metal-elastic wheels.  
Індекси МПК: В60В9/26, В60В1/02, В60В9/28.



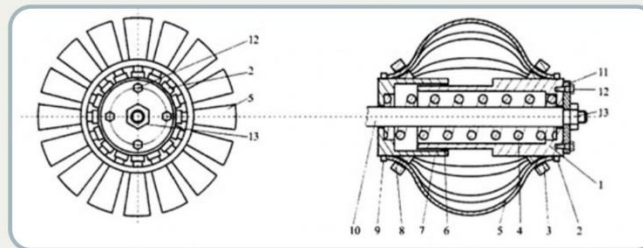
Еластичне колесо марсохода  
номер патенту CN108116154A



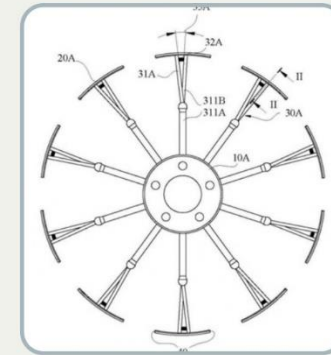
### ПАТЕНТНО-ІНФОРМАЦІЙНИЙ ПОШУК >



Прилад для підвищення прохідності  
номер патенту RU2757098C1



Телескопічне колесо  
номер патенту CN114987103A





ВСТУП

ГОЛОВНЕ

ЗМІСТ

ІНШЕ



02



**Фізичне та  
математичне  
моделювання**

2.1.

*РОЗРОБКА 3D МОДЕЛЕЙ ОБОХ  
ВАРІАНТІВ ПРОТОТИПІВ РУШІВ ЗА  
ДОПОМОГОЮ CAD-СИСТЕМИ AUTODESK  
INVENTOR PROFESSIONAL 2025  
(ЗАГАЛЬНИЙ ВИГЛЯД)*

2.2.

*МАСШТАБНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЗА  
ДОПОМОГОЮ 3D ПРИНТЕРА ОБОХ  
ВАРІАНТІВ РУШІВ*

2.3.

*Математичне моделювання*

2.3.1

*Розрахунок пружних елементів  
на міцність з урахуванням  
діючих умов навантажень*

2.3.2

*Розрахунок опору кочення*



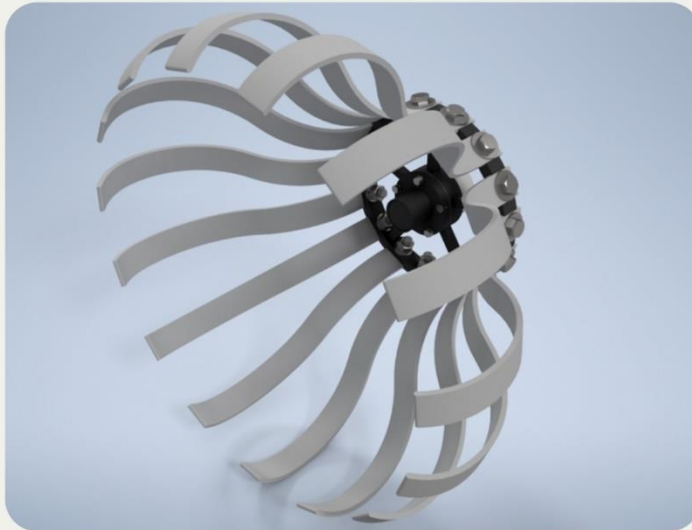


ВСТУП

ГОЛОВНЕ

ЗМІСТ

ІНШЕ



**Перший прототипу колісного  
рушія з пружними  
елементами типу напівресора**



**Другий прототип колісного  
рушія з пружними  
елементами типу  
п'ятка-стопа**



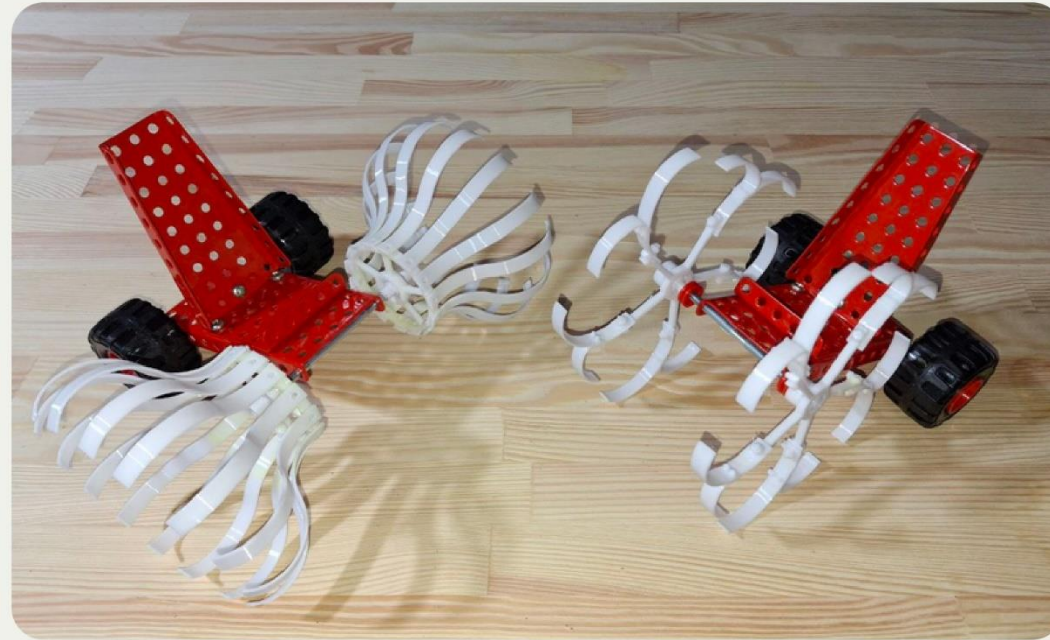


ВСТУП

ГОЛОВНЕ

ЗМІСТ

ІНШЕ



**Два макетних зразки елементарних транспортних засобів, а саме два тягових візки зі спеціальними майданчиками для розміщення еталонних гирь**





ВСТУП

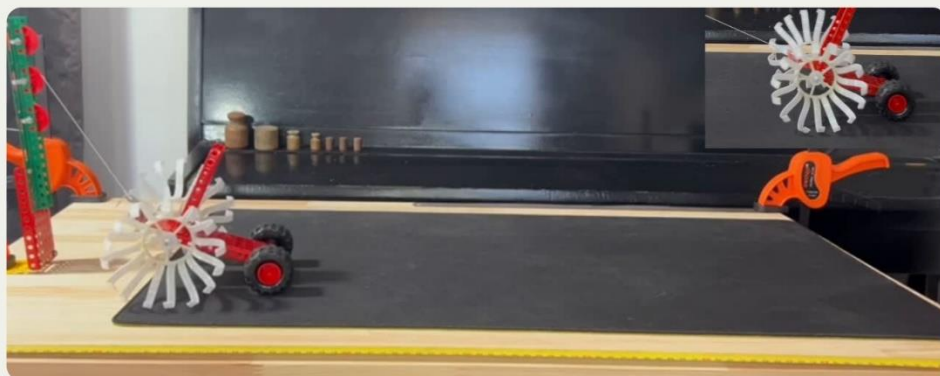
ГОЛОВНЕ

ЗМІСТ

ІНШЕ



## ЕКСПЕРИМЕНТИ З МАКЕТНИМИ ЗРАЗКАМИ РУШІВ



01

Колісний рушій з пружними елементами типу п'ятка-стопа рівна поверхня



02

Колісний рушій з пружними елементами типу напівресора рівна поверхня



Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»



ВСТУП

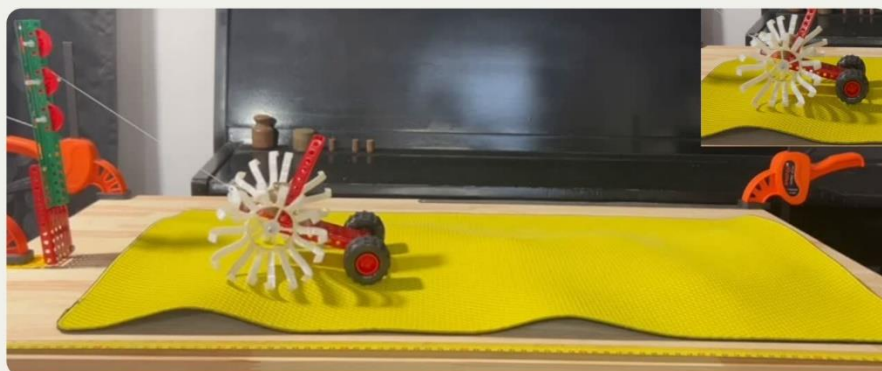
ГОЛОВНЕ

ЗМІСТ

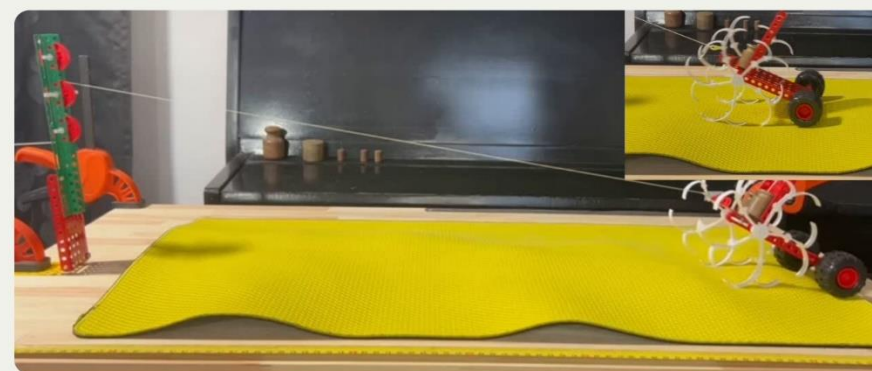
ІНШЕ



## ЕКСПЕРИМЕНТИ З МАКЕТНИМИ ЗРАЗКАМИ РУШІВ



**01** Колісний рушій з пружними елементами типу напівресора по нерівній поверхні



**02** Колісний рушій з пружними елементами типу п'ятка-стопа нерівна поверхня



Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

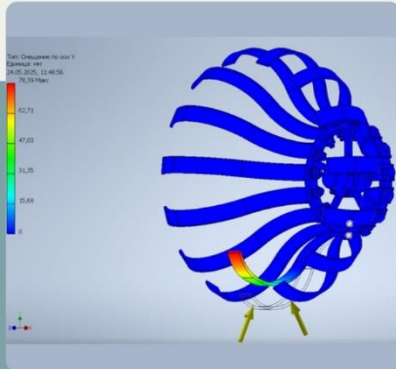


ВСТУП

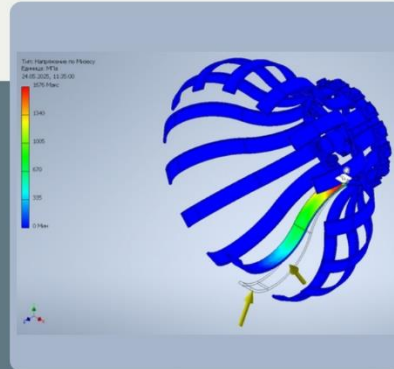
ГОЛОВНЕ

ЗМІСТ

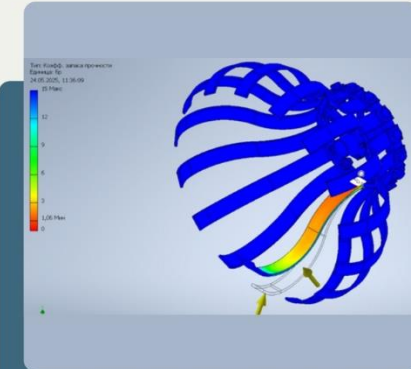
ІНШЕ



Зміщення під дією  
максимального  
навантаження на один  
пружний елемент



Напруження по Мізесу при  
прикладеному навантаженні  
у 1500 Н на одну напівресору



Коефіцієнт запасу міцності  
під дією максимального  
навантаження на один  
пружний елемент



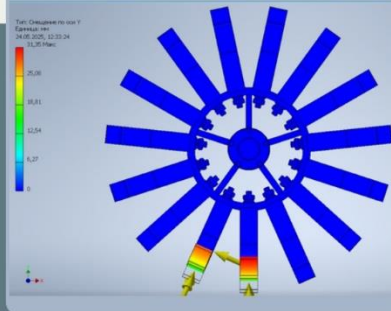


ВСТУП

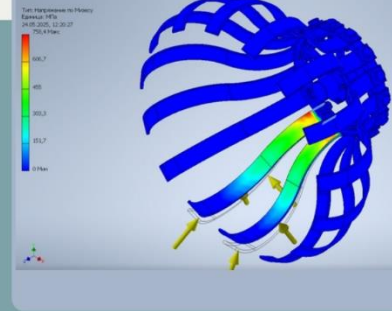
ГОЛОВНЕ

**ЗМІСТ**

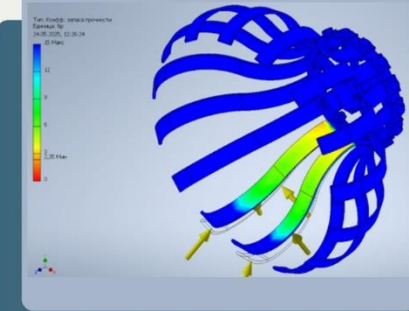
ІНШЕ



**Зміщення двох пружних елементів під дією максимального навантаження**



**Напруження по Мізесу при прикладеному навантаженні у 1500 Н на дві напівресори**



**Коефіцієнт запасу міцності під дією максимального навантаження на два пружних елемента**



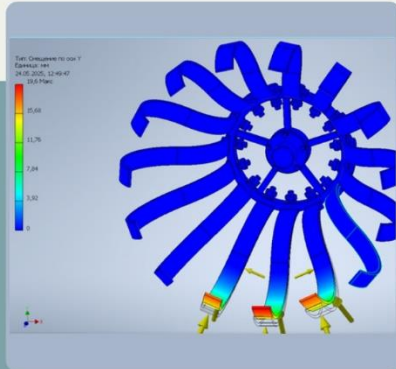


ВСТУП

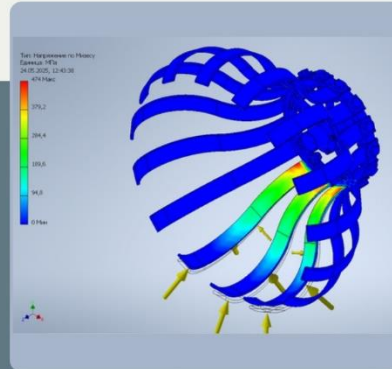
ГОЛОВНЕ

ЗМІСТ

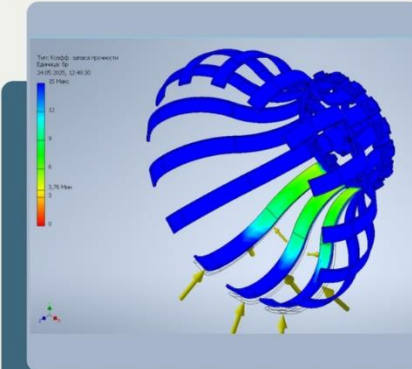
ІНШЕ



Зміщення при дії  
навантаженні на три  
пружних елемента



Напруження по Мізесу на  
три напівресори 1500 Н



Коефіцієнт запасу  
міцності 1500 Н на три  
напівресори





## РОЗРАХУНОК ОПОРУ КОЧЕННЯ

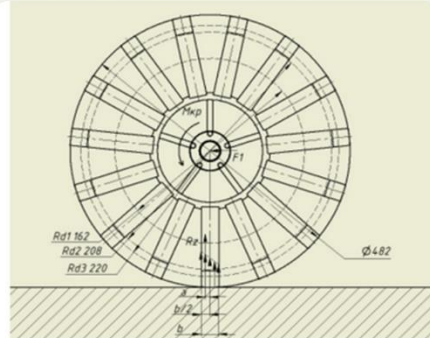


Рисунок 2.21 - Схема сил і реакції що діють на **рушій**

Розрахунок сил опору кочення для колісного рушія з пружними елементами типу навісресора:

1. Ширина площі зчеплення, що безпосередньо діє в контакт з поверхнею, враховуючи явище гістерезису, тобто запізнення, ділиться навпіл віссю рушія та дорівнює:

$$\frac{b}{2} = 0,015 \text{ м.}$$

2. Рівнодіюча сила прикладена в тій точці навісресора, що безпосередньо знаходиться посередині площі контакту, яка взаємодіє з поверхнею в певний момент часу, а саме знаходиться на відстані, що дорівнює  $\frac{1}{4}$  ширини ресора, тобто плече опору кочення, яке характеризує розподіл енергії дорівнює:

$$a = \frac{b}{2 \cdot 2}, \quad (2.15)$$

З формули (2.15) отримуємо:

$$a = 0,0075 \text{ м.}$$

3. Коефіцієнт опору кочення:

$$\frac{a}{r_e} = f, \quad (2.16)$$

3.1 З формули (2.16) рахуємо коефіцієнт опору кочення для динамічного радіусу при навантаженні на три пружні елементи:

$$f = 0,034.$$

3.2 З формули (2.16) рахуємо коефіцієнт опору кочення для динамічного радіусу при навантаженні на два пружні елементи:

$$f = 0,036.$$

3.3 З формули (2.16) рахуємо коефіцієнт опору кочення для динамічного радіусу при навантаженні на один пружний елемент (виключа ситуація):

$$f = 0,046.$$

Для порівняння отриманих результатів коефіцієнтів опору кочення з аналогічними показниками стандартних рушіїв, що використовуються у діючих колісних транспортних засобах на рисунку 2.22 наведені наступні приклади

Дорожні умови	Коефіцієнт $f_e$
Асфальтова дорога	0,01...0,02
Гравійна дорога	0,02...0,025
Бруківка	0,025...0,05
Грунтова суха	0,025...0,035
Грунтова після дощу	0,05...0,15
Піщана: • суха	0,1...0,3
• волога	0,06...0,15

Рисунок 2.22 – коефіцієнт опору кочення для еластичної гумово пневматичної шини [1]

77

4.1 За допомогою формули (2.8) розрахуємо силу опору кочення при навантаженні на три пружні елементи:

$$P_{f3} = 49,98 \text{ Н.}$$

4.2 За допомогою формули (2.8) розрахуємо силу опору кочення при навантаженні на два пружні елементи:

$$P_{f2} = 52,92 \text{ Н.}$$

4.3 За допомогою формули (2.8) розрахуємо силу опору кочення при навантаженні на один пружний елемент:

$$P_{f1} = 67,62 \text{ Н.}$$

5. Щоб дізнатися мінімальну потужність двигуна на колесо (щоб подолати силу опору кочення) рахується за допомогою формули [1]:

$$N_f = f_i \cdot G_k \cdot V, \quad (2.17)$$

де  $N_f$  – потужність, що потрібна для подолання опору кочення, Вт;

$f_i$  – коефіцієнт опору кочення у випадку навантаження на один пружний елемент;

$G_k$  – корисна вага, що припадає на рушій, Н;

$V$  – швидкість колеса, м/с.

Підставляючи дані у формулу (2.17) отримуємо:

$$N_f = 469,28 \text{ Вт.}$$





ВСТУП

ГОЛОВНЕ

ЗМІСТ

ІНШЕ



03



Техніко-  
економічний аналіз  
виробу, що  
проєктується

3.1

АНАЛІЗ ТА ВИБІР ПРІОРИТЕТНИХ  
ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ВИРОБУ

3.2

АНАЛІЗ ПЛАНОВОЇ СОБІВАРТОСТІ  
ВИРОБУ

3.3

ВИСНОВКИ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ  
ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНОГО АНАЛІЗУ  
ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ВИРОБУ





ВСТУП

ГОЛОВНЕ

ЗМІСТ

ІНШЕ



## ПРОВЕДЕННЯ ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНОГО АНАЛІЗУ ВИРОБУ

Головними  
Експлуатаційними  
властивостями рушія є  
прохідність, плавність  
руху та ремонтоздатність



Головним  
конструктивним  
показником є  
матеріаломісткість

Найголовнішим  
Технологічним  
показником є рівень  
стандартизації та  
уніфікації



Найважливіший  
економічний показник  
Вартість матеріалів та  
комплектуючих, а також  
витрати на експлуатацію  
та ремонт





ВСТУП

ГОЛОВНЕ

ЗМІСТ

ІНШЕ



## ПЛАНОВА СОБІВАРТІСТЬ КОЛІСНОГО РУШІЯ З ПРУЖНИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ ТИПУ “НАПІВРЕСОРА”

Найменування позиції (деталі/матеріалу)	Позначення	Роздільна ціна одиниці виміру, грн (штука/кг)	Кількість у вузлі/вага	Загальна вартість у вузлі, грн.	Примітки
Стандартні вироби, шт.					
Шпонка	2-8x7x28 ГОСТ 23360-78	7 (від 2 до 30)	1	7	
Підшипник	36205 ГОСТ 831-75	150 (від 53 до 294)	1	150	
Болт	M5-6gx25 8.8 40X ГОСТ 7805-70	2 (від 0,84 до 4,08)	5	10	
Шайба пружинна	5 Н 65Г 11 ГОСТ 6402-70	0,25 (від 0,17 до 0,33)	5	1,25	
Шайба зменшена	A5 40X 11 ГОСТ 10450-78	0,5 (від 0,3 до 0,7)	5	2,5	
Болт	M10-6gx35 10.9 40X ГОСТ 7805-70	10 (від 4,7 до 18)	15	150	
Шайба збільшена	A10 40X 11 ГОСТ 6958-78	3 (від 1,9 до 4,54)	15	45	
Шайба	10 40X 11 ГОСТ 11371-78	1 (від 0,41 до 1,48)	15	15	
Шайба пружинна	10 ОТ 65Г 11 ГОСТ 6402-70	0,7 (від 0,5 до 0,8)	15	10,5	
Гайка	M10-6Н 8.8 40X 11 ГОСТ 5915-70	4 (від 1,23 до 4,4)	15	60	
Загальна вартість стандартних виробів				451,25	

Найменування позиції (деталі/матеріалу)	Позначення	Роздільна ціна одиниці виміру, грн (штука/кг)	Кількість у вузлі/вага	Загальна вартість у вузлі, грн.	Примітки
Матеріали, кг, з урахуванням пропуску на обробку (Кв, коефіцієнт витрат матеріалу > 1)					
Маточина	Сталь 40ХЛ ГОСТ 977-88	45 (від 40 до 87)	1/1,2*1,5 = 1,8	81	Для лиття в літній формі Кв=1,4-2
Напівресора	Сталь 65Г ГОСТ 14959-79	39 (від 38 до 79)	15/0,4*1 = 6	234	Лист товщиною 5 мм по ГОСТ 1577-70
Кришка піввісі СК	Сталь 40ХЛ ГОСТ 977-88	45 (від 40 до 87)	1/0,35*1,5 = 0,53	24	Для лиття в літній формі Кв=1,4-2
Піввісь	Сталь 40Х ГОСТ 4543-71	65 (від 60 до 75)	1/0,8*2 = 1,6	104	Круг діаметр 65 мм з каліброваної сталі по ГОСТ 7417-75
Прокладка регулювальна	Сталь 08кп	66 (від 52 до 70)	1/0,01*3 = 0,03	2	Стальна стрічка 08 КЛ-10-ВН-2-Б-0,1 ГОСТ 503-81 Кв=3
Прокладка ущільнювальна	Картон А	80 (від 78 до 96)	1/0,04*3 = 0,12	10	Картон А товщина 0,5 ГОСТ 9347-74 Кв=3
Масло	Літол-24	200 (від 190 до 250)	0,05	10	ГОСТ 21150-87
Загальна вартість матеріалів				465	
Вартість виготовлення відповідно до трудомісткості (експертно 2-3 ціни матеріалу)					
Маточина	Сталь 40ХЛ ГОСТ 977-88	81	1	243	
Напівресора	Сталь 65Г ГОСТ 14959-79	234	1	702	Стан поставки лист товщиною 5 мм по ГОСТ 1577-70
Кришка піввісі СК	Сталь 40ХЛ ГОСТ 977-88	24	1	72	
Піввісь	Сталь 40Х ГОСТ 4543-71	104	1	312	Круг діаметр 65 мм з каліброваної сталі по ГОСТ 7417-75
Прокладка регулювальна	Сталь 08кп ГОСТ 1050-74	2	1	4	Стальна стрічка 08 КЛ-10-ВН-2-Б-0,1 ГОСТ 503-81
Прокладка ущільнювальна	Картон А	10	1	20	Картон А товщина 0,5 ГОСТ 9347-74
Загальна трудомісткість				1 353	
Загальна вартість виробу				2 269,25	





ВСТУП

ГОЛОВНЕ

ЗМІСТ

ІНШЕ



04



Розрахунок на  
міцність деталей  
вузла рушія

4.1. *РОЗРАХУНОК МАТОЧИНИ НА  
МІЦНІСТЬ*

4.2. *РОЗРАХУНОК ПІВВІСІ НА  
МІЦНІСТЬ*

4.3. *Розрахунок підшипника  
маточини*

4.4. *Розрахунок шпонкового  
з'єднання*

4.5. *Розрахунок різьбового  
з'єднання*





ВСТУП

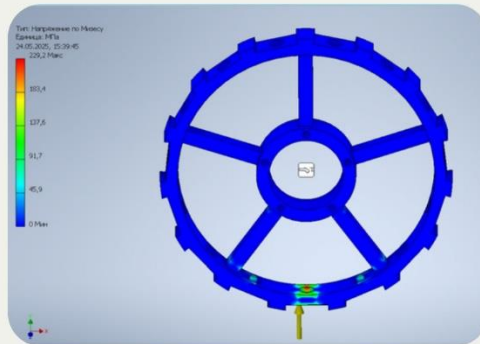
ГОЛОВНЕ

**ЗМІСТ**

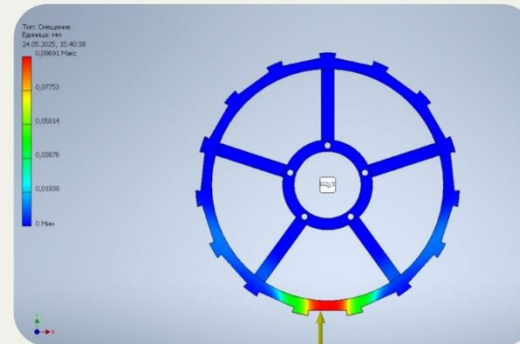
ІНШЕ



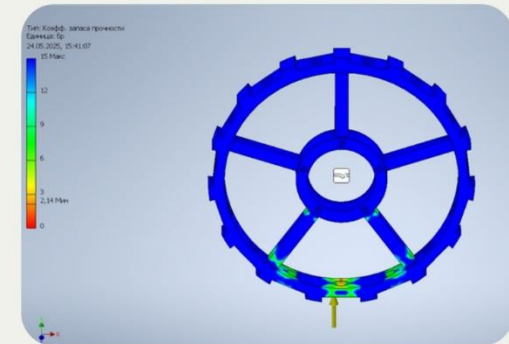
## РОЗРАХУНОК МАТОЧИНИ НА МІЦНІСТЬ



НАПРУЖЕННЯ ПО  
МІЗЕСУ ПРИ  
НАВАНТАЖЕННІ  
ОДНІЄЇ ДІЛЯНКИ



ЗМІЩЕННЯ  
МАТОЧИНИ ПРИ  
НАВАНТАЖЕННІ  
НА ОДНУ ДІЛЯНКУ



КОЕФІЦІЄНТ  
ЗАПАСУ МІЦНОСТІ  
ПРИ  
НАВАНТАЖЕННІ  
ОДНІЄЇ ДІЛЯНКИ



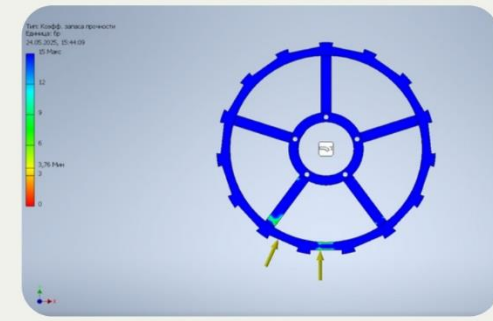
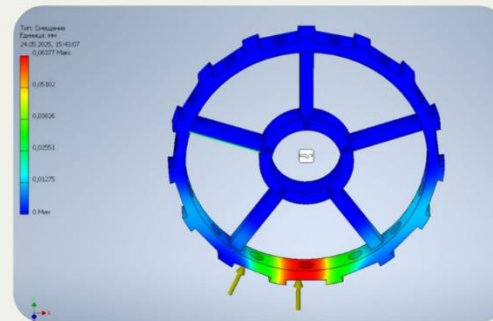
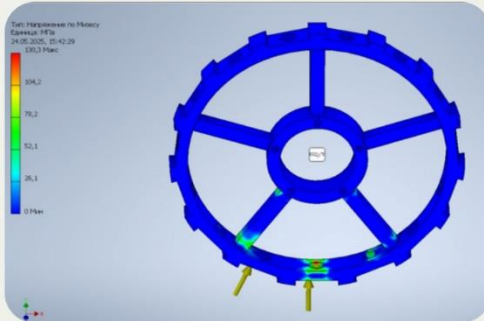


ВСТУП

ГОЛОВНЕ

**ЗМІСТ**

ІНШЕ



НАПРУЖЕННЯ ПО  
МІЗЕСУ ПРИ  
НАВАНТАЖЕННІ  
ДВОХ ДІЛЯНОК



ЗМІЩЕННЯ ПРИ  
НАВАНТАЖЕННІ  
ДВОХ ДІЛЯНОК



КОЕФІЦІЄНТ  
ЗАПАСУ МІЦНОСТІ  
ПРИ  
НАВАНТАЖЕННІ  
ДВОХ ДІЛЯНОК





ВСТУП

ГОЛОВНЕ

ЗМІСТ

ІНШЕ



Генератор компонентів вала

Матеріал

- Сталь 40С
- Модуль упругості: 210000 МПа
- Модуль жорсткості: 80000 МПа
- Щільність: 7850 кг/м<sup>3</sup>

Своєрства розрахунок

- Використовувати щільність
- Використовувати коефіцієнт оцінки при зсуві: 1,188 бр
- Кількість часток вала: 1000 бр
- Режим приведеного напруження: НВВ1

20 процент

Навантаження і опори

- Основа вала
- Радіальна сила

Результати

Маса	79,9 мм
$F_R$	0,8 кг
$F_{\text{в}}$	13,0 МПа
$F_{\text{г}}$	1,1 МПа
$F_{\text{д}}$	0,0 МПа
$F_{\text{п}}$	2,3 МПа
$F_{\text{т}}$	15,3 МПа
$F_{\text{н}}$	2,0 мм
$F_{\text{м}}$	0,0 град

1. Нагрузка

$F_{\text{в}}$	-2,0 мм
$F_{\text{г}}$	0,0 мм
$F_{\text{д}}$	0,0 мм
$F_{\text{п}}$	0,0 мм
$F_{\text{т}}$	0,0 мм
$F_{\text{н}}$	0,0 мм
$F_{\text{м}}$	0,0 град

2. Опора

$F_{\text{в}}$	1100,0 Н
$F_{\text{г}}$	490,0 Н
$F_{\text{д}}$	0,0 Н
$F_{\text{п}}$	0,0 мкс/ч
$F_{\text{т}}$	-0,0 мм
$F_{\text{н}}$	0,0 мм
$F_{\text{м}}$	0,0 град

2. Опора

$F_{\text{в}}$	0,0 Н
$F_{\text{г}}$	526,9 Н
$F_{\text{д}}$	0,0 Н
$F_{\text{п}}$	0,0 мкс/ч
$F_{\text{т}}$	0,0 мм
$F_{\text{н}}$	0,0 мм
$F_{\text{м}}$	0,0 град

20:51:56 Расчет: Расчет выполнен.

Розрахунок піввісі

Генератор подшипников

Тип расчета прочности: Проверочный расчет

Свойства подшипника

- Номинальный контактный угол:  $\alpha = 47,5$
- Основная динамическая грузоподъемность:  $C = 12851$
- Основная статическая грузоподъемность:  $C_0 = 9060$
- Коеф. динамич. радиальной нагрузки:  $X = 0,60 \text{ бр} > 0,60 \text{ бр}$
- Коеф. динамич. осевой нагрузки:  $Y = 0,50 \text{ бр} > 0,50 \text{ бр}$
- Предельное значение Га/Гг:  $\mu = 1,09$
- Коеф. статич. радиальной нагрузки:  $X_0 = 0,60 \text{ бр}$
- Коеф. статич. осевой нагрузки:  $Y_0 = 0,50 \text{ бр}$
- Показатель для срока службы:  $\beta = 3,000000 \text{ бр}$
- Смазка для ограничения скорости: н/лм, 1500
- Масло для ограничения скорости: н/лм, 0

Расчет срока службы подшипника

Метод расчета AMS/AFMA 9-1990 (ISO 281-1990)

Трибуемый срок службы:  $t_{\text{тр}}$  10000 ч

Требуемая надежность:  $R_{\text{н}}$  90 бр

Коеф. технического состояния:  $\beta_0$  1,00 бр

Коеф. технического состояния:  $\beta_0$  1,00 бр

Максимальная рабочая температура:  $T$  100 С

Коеф. коэффициент дополнительных сил:  $f_0$  1,00 бр

нагрузка

- Радиальная нагрузка:  $F_R = 1000$
- Осевая нагрузка:  $F_A = 1100$
- Скорость:  $n = 275 \text{ об./мин}$

Коеф. статического запаса прочности:  $n_0 = 2,0 \text{ бр}$

Смазка: н/лм

Коеф. коэффициент трения:  $\mu = 0,0013 \text{ бр}$

Тип смазки: Константная смазка

19:05:20 Расчет: Соответствие при подборе в процессе расчета!

Результаты

$t_{\text{тр}}$	83523 ч
$t_{\text{ст}}$	83523 ч
$t_{\text{ст}}$	1378 бр
$t_{\text{ст}}$	1378 бр
$n_0$	7,84551 бр
$F_{\text{в}}$	6,62355 бр
$F_{\text{г}}$	0 Н
$F_{\text{д}}$	1155 Н
$F_{\text{п}}$	1155 Н
$F_{\text{т}}$	3,9 бр
$F_{\text{н}}$	1,00 бр
$F_{\text{м}}$	1,00 бр
$F_{\text{н}}$	275 об./мин
$F_{\text{м}}$	275 об./мин

Подшипник

$d$	52,0 мм
$d_f$	25,0 мм
$B$	15,0 мм

Розрахунок підшипника





ВСТУП

ГОЛОВНЕ

ЗМІСТ

ІНШЕ



Генератор компонентов болтового соединения

Модель: **А6** Расчет: **Расчет усталости**

Тип расчета прочности: **Проверочный расчет**

Нагрузка:

Максимальная осевая сила  $F_A$  1100  
 Макс. тангенциальная сила  $F_T$  0 Н  
 Коэффициент пластичности  $k$  1,50 бр  
 Коэффициент впадения силы  $n$  0,50 бр  
 Коэф. трения соединения  $f$  0,40 бр  
 Коэф. запаса прочности  $k_s$  3,00 бр

Материал пластины:  Сталь 65Г  
 Модуль упругости  $E_2$  215000 МПа  
 Свойства соединения: Функциональная ширина  $L$  30,2 мм  
 Болт: Количество болтов  $z$  1 бр  
 Диаметр резьбы  $d$  10,0 мм  
 Шаг  $p$  1,5 мм  
 Средний диаметр болта  $d_s$  9,0 мм  
 Мин. диаметр болта  $d_{\text{мин}}$  8,2 мм  
 Материал болта:  Сталь 40Х ГОСТ 4543-71  
 Предел текучести  $S_y$  785 МПа  
 Модуль упругости  $E_1$  214000 МПа  
 Доп. давление в резьбе  $P_R$  40 МПа  
 Коэффициент трения резьбы  $f_1$  0,20 бр  
 Коэффициент трения головки  $f_2$  0,25 бр

Результаты:

$F_{\text{max}}$	1523,7 Н
$M_{\text{max}}$	1650,0 Н
$F_{\text{ср}}$	4,7 Н
$\sigma_{\text{ср}}$	29,2 МПа
$\sigma_{\text{max}}$	18,8 МПа
$\sigma_{\text{min}}$	43,8 МПа
$\sigma_{\text{ср, резьба}}$	31,4 МПа
$\sigma_{\text{ср, головка}}$	13,2 МПа
$N_{\text{ср}}$	17,93948 бр

11:11:57 Расчет: Соответствие при подборе в процессе расчета!



Розрахунок болтового з'єднання

Тип расчета прочности: **Проверочный расчет**

Упрощенный расчет:

Нагрузка: Крутящий момент, скорость --> мощность

Мощность  $P$  6,1 кВт  
 Скорость  $n$  275 об./мин  
 Крутящий момент  $T$  212 Н м

Размеры: Диаметр вала  $d$  25,00000 мм  
 Внутр. диаметр полого вала  $d_i$  0,0 мм  
 Размер шпонки  $b$  8,0 мм  
 Длина шпонки  $l$  28,0 мм

Материал шпонки:  Сталь 40Х  
 Допустимое давление  $P_A$  200,0 МПа

Материал вала:  Сталь 40Х  
 Допустимое давление  $P_A$  200,0 МПа  
 Доп. напряжение среза  $\tau_A$  425,0 МПа

Материал ступицы:  Сталь 40Х  
 Допустимое давление  $P_A$  200,0 МПа

Свойства соединения: Количество шпонок  $N$  1,0 бр  
 Необходимый запас прочности  $S_y$  1,0 бр

Условия нагрузки

Результаты:

$d_{\text{мин}}$	13,6 мм
$l_{\text{мин}}$	26,1 мм
$l$	28,0 мм
<b>Деформация шпонки</b>	
$S$	1,1 бр
$P_C$	186,4 МПа
<b>Деформация шпоночного...</b>	
$S$	1,1 бр
$P_C$	186,4 МПа
<b>Деформация шпоночного...</b>	
$S$	1,1 бр
$P_C$	186,4 МПа



Розрахунок шпонкового з'єднання на міцність





ВСТУП

ГОЛОВНЕ

ЗМІСТ

ІНШЕ



05



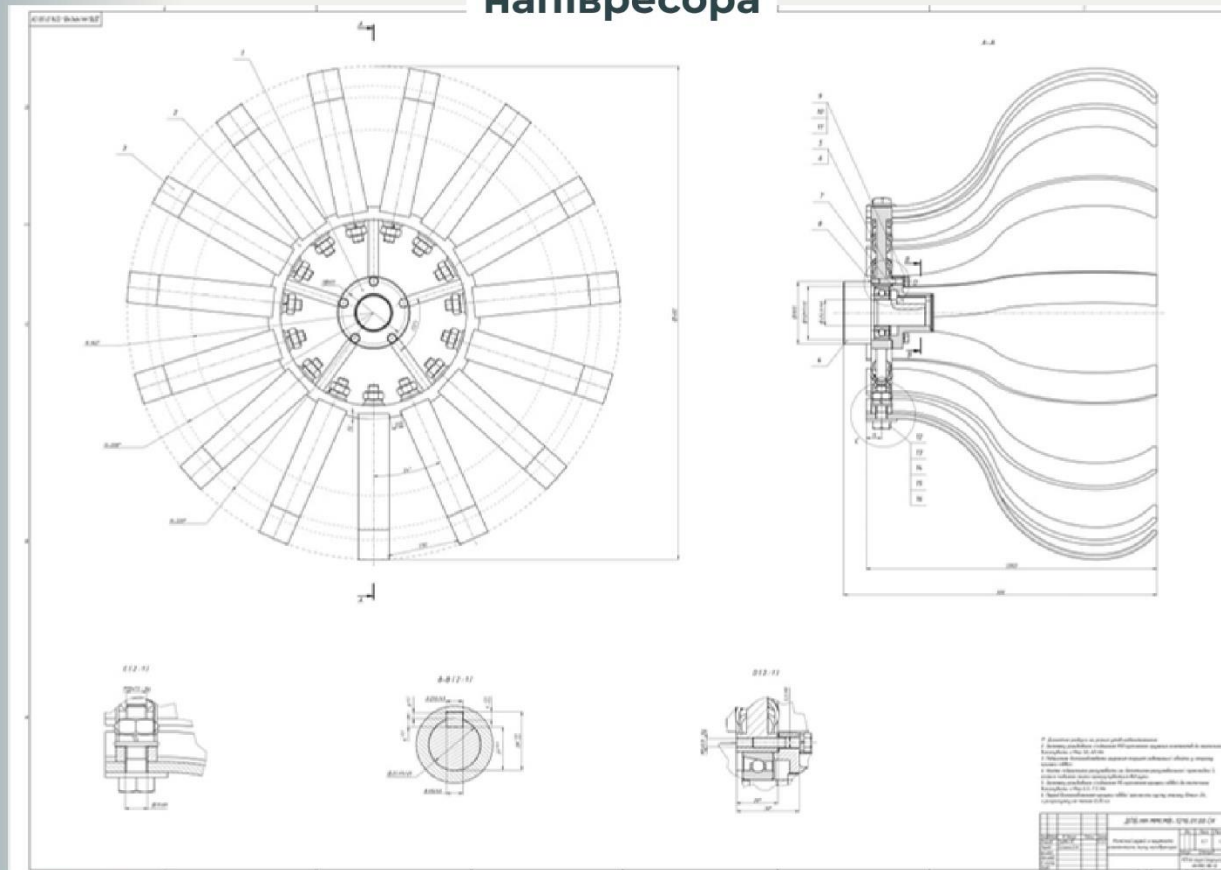
Висновки про  
доцільність  
застосування  
розробленого  
виробу та сфера  
використання



При прийнятті рішення щодо застосування спроектованого рушія доцільно зазначити його високі технічні та економічні показники, включаючи металоємність, коефіцієнти запасу міцності, високий рівень уніфікації, невисоку собівартість і доступність матеріалів та стандартних комплектуючих, невелику трудомісткість виготовлення і затрати на подальшу експлуатацію. Неабияку позитивну роль також відіграють і його високі експлуатаційні показники, а саме надійність, тобто напрацювання на відмову, ресурс, та ремонтпридатність.

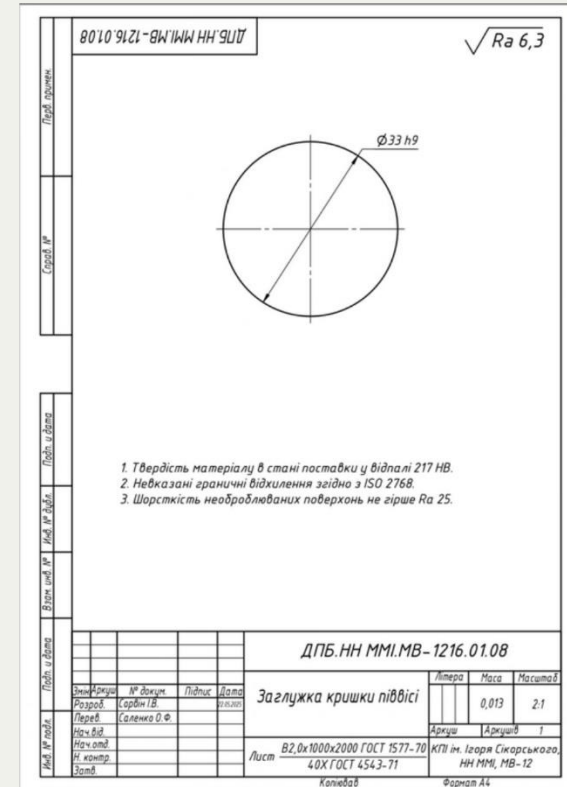
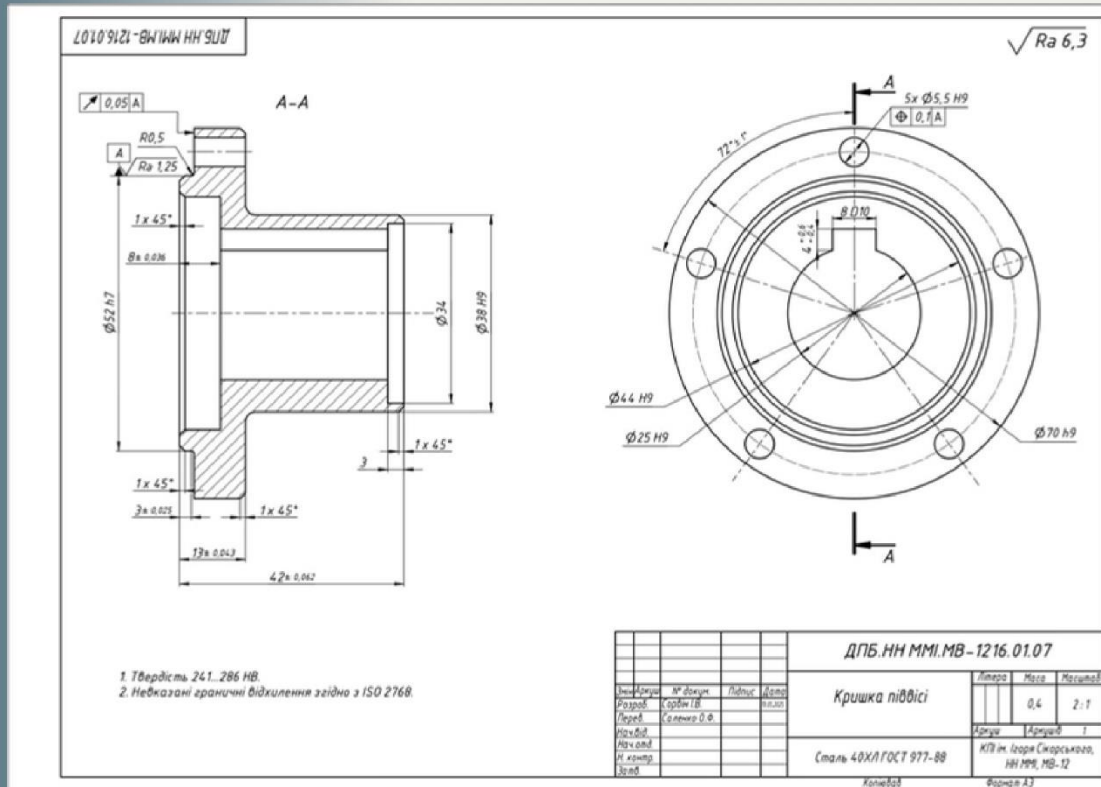


## Складальний кресленик колісного рушія на пружних елементах типу напівресора

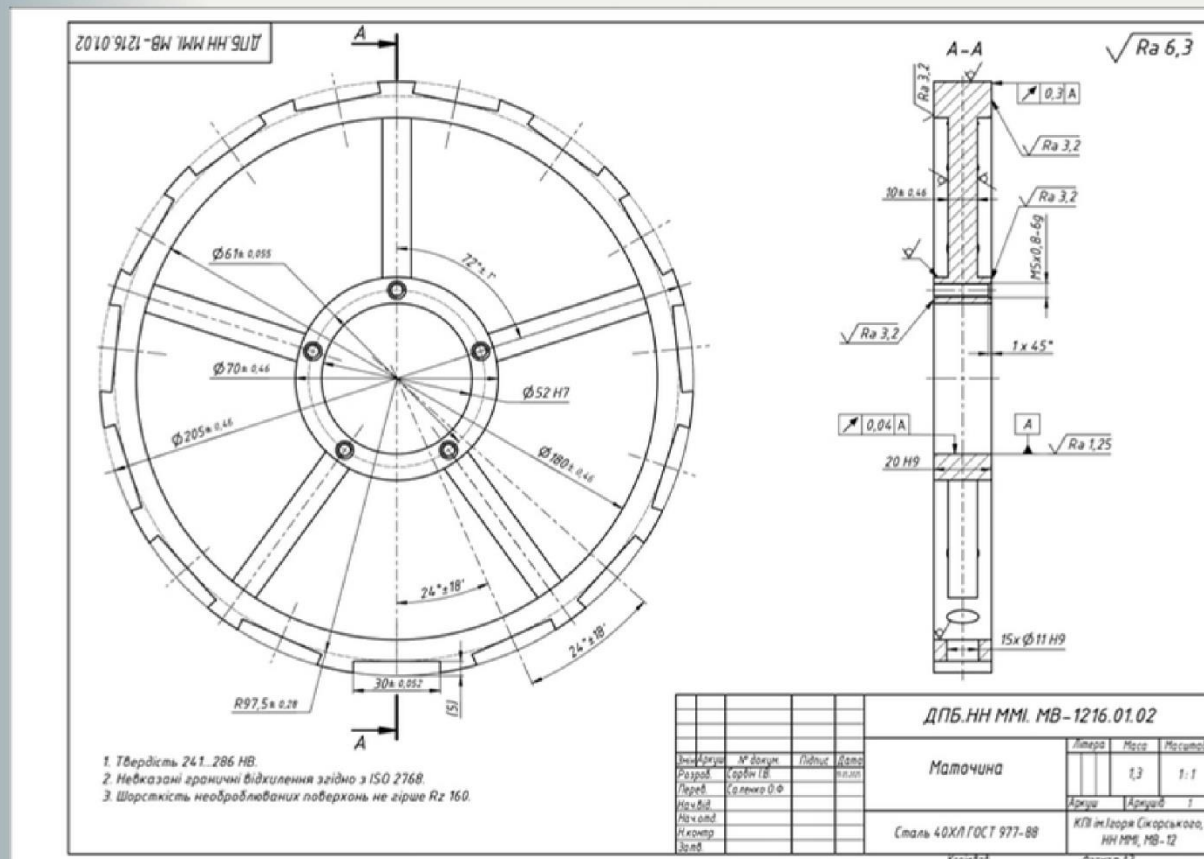




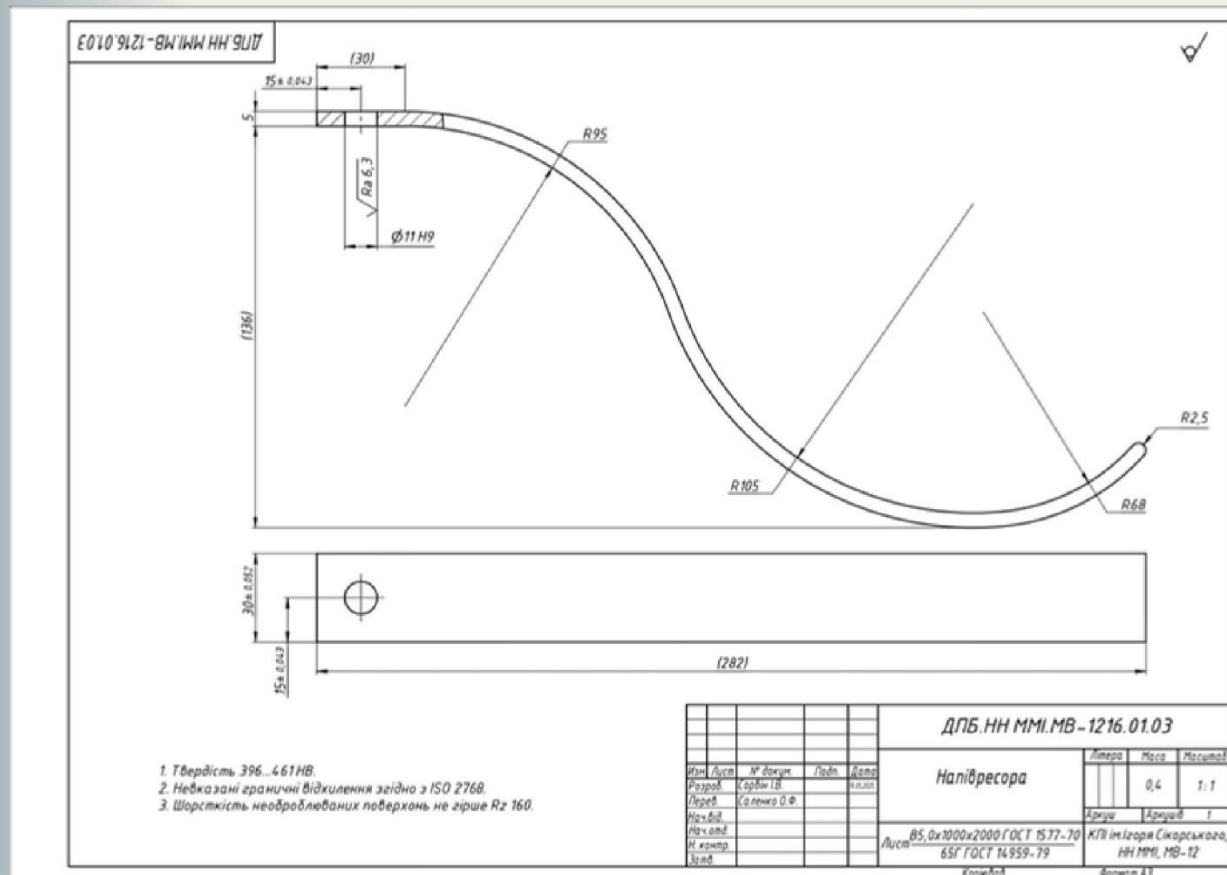
# Кресленик кришки піввісі та заглушки кришки піввісі



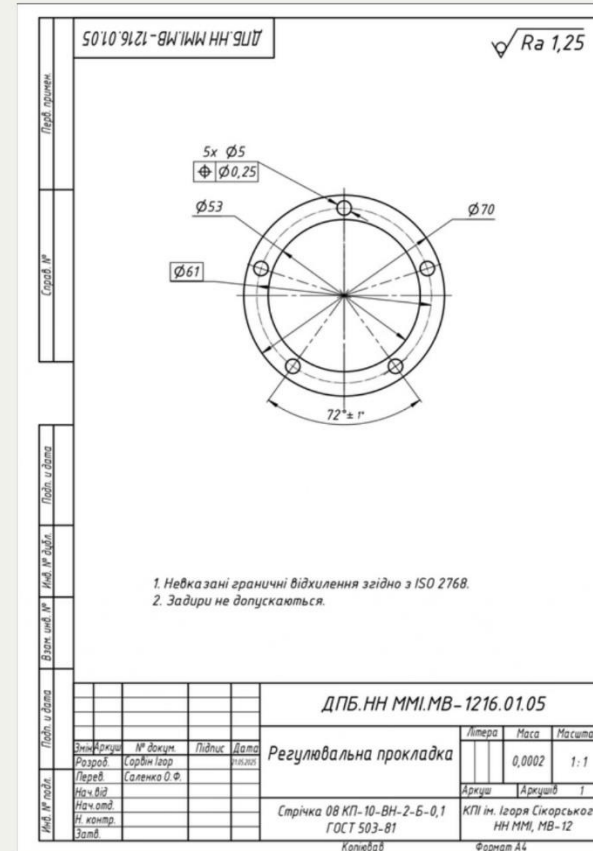
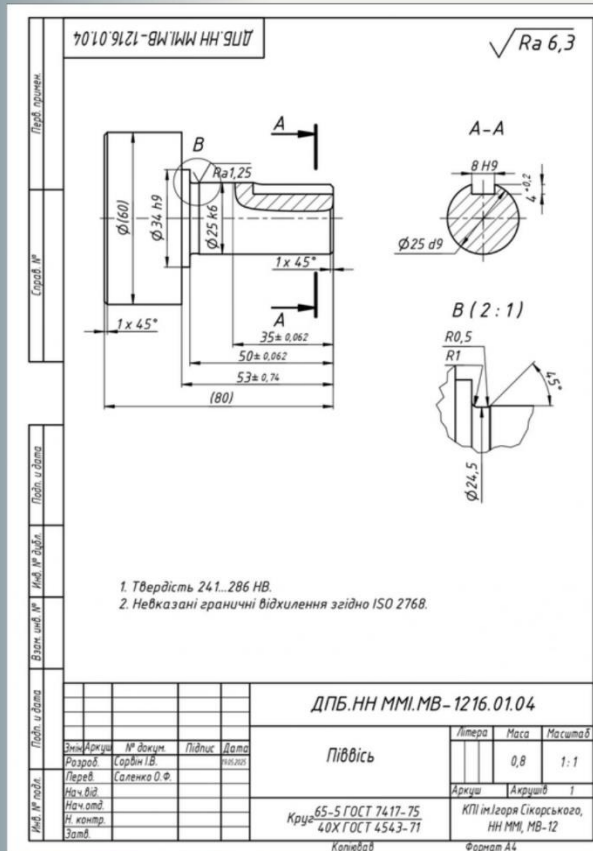
## Кресленик маточини



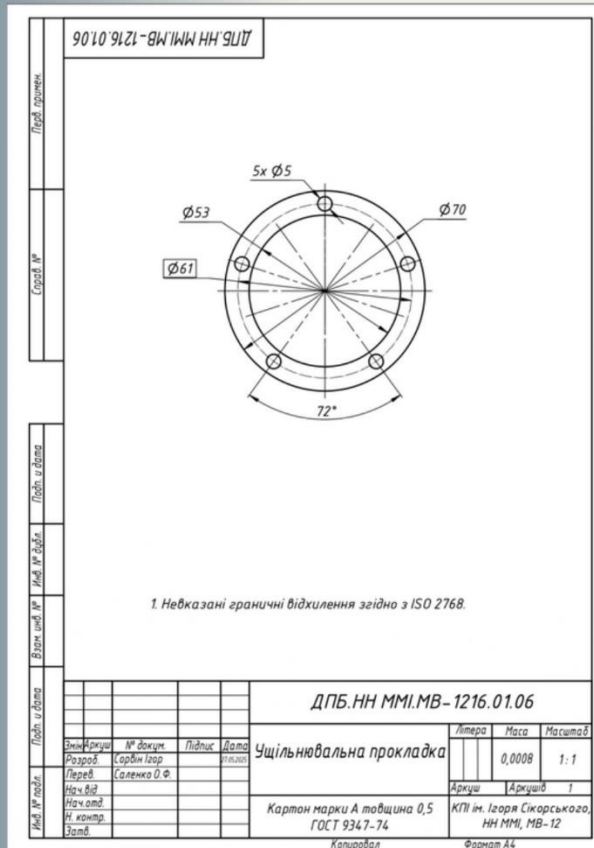
## Кресленик напівресори



## Кресленик піввісі та кресленик регулювальної прокладки



## Кресленик ущільнювальної прокладки та специфікація до складального кресленника колісного рушія на пружних елементах типу напівресора



Формат	Зона	Поз.	Позначення	Найменування	Кіл.	При- мітки
				Документація		
				Складальні кресленки		
				Складальні одиниці		
		1	ДПБ.НН.ММІ.МВ-1216.01.01 СК	Кришка піввісі	1	
				Деталі		
		2	ДПБ.НН.ММІ.МВ-1216.01.02	Маточина	1	
		3	ДПБ.НН.ММІ.МВ-1216.01.03	Напівресора	15	
		4	ДПБ.НН.ММІ.МВ-1216.01.04	Підвісь	1	
		5	ДПБ.НН.ММІ.МВ-1216.01.05	Регулювальна прокладка	1	
		6	ДПБ.НН.ММІ.МВ-1216.01.06	Ущільнювальна прокладка	1	
				Стандартні вироби		
		7		Шпалка 3 8x7x28 ГОСТ 23360-78	1	
		8		Підшипник 36205 ГОСТ 831-75	1	
		9		Болт М5-6x25 8.8 40X ГОСТ 7805-70	5	
		10		Шайба пружинна 5 Н 65Г 11 ГОСТ 6402-70	5	
		11		Шайба А5 40X 11 ГОСТ 10450-78	5	
		12		Болт М10-6x35 10.9 40X ГОСТ 7805-70	15	
		13		Шайба А10 40X 11 ГОСТ 6958-78	15	
		14		Шайба 10 40X 11 ГОСТ 11371-78	15	
		15		Шайба пружинна 100Т 65Г 11 ГОСТ 16402-70	15	
		16		Гайка М10-6Н 8.8 40X 11 ГОСТ 5915-70	15	
			<b>ДПБ.НН.ММІ.МВ-1216.01.00 С</b>			
Вид	Кресл.	№ докум.	Листів	Лист		
Розроб	Сардин Ігор	128	18.05			
Перев.	Саленко О.Ф.					
Нач. від.						
Нач. отд.						
Н. констр.						
Зам.						
				Литера		Листів
						1
Колесо з пружними елементами типу напівресора				КПІ ім. Ігоря Сікорського, НН ММІ МВ 12		
Копія				Формат А4		



[ВСТУП](#)[ГОЛОВНЕ](#)[ЗМІСТ](#)[ІНШЕ](#)

# Дякую за увагу



Дипломний проект  
виконав:

СТУДЕНТ ГРУПИ  
МВ-12 СОРВІН І.В  
КЕРІВНИК ПРОЄКТУ  
САЛЕНКО О.Ф

