

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Факультет _____ АКТ _____
Кафедра _____ КІТАМ _____
Рівень вищої освіти _____ другий (магістерський) _____
Спеціальність _____ 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології _____
Тип програми _____ Освітньо-професійна _____
Освітня програма _____ Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва _____
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри КІТАМ _____
(підпис)

« 01 » вересня 2022 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові _____ Костровій Ганні Юріївні _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи _____ Моделювання удосконаленої конструкції маніпулятора робота з використанням алгоритмів генеративного дизайну _____

Затверджена наказом по університету від 07.11.2022 р. № 1464Ст Ст _____

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії _____ 16.12.2022 р. _____

3. Вихідні дані до роботи 3.1 Конструкція включає в себе: 7 основних та 6 допоміжних ланок, 2 лінійних актуатора, 3 крокових двигуна Nema 17, 2 мотор-редуктора, кріпильних елементів _____

3.2 Конструкція є плоским механізмом, який обертається навколо вертикальної осі за допомогою двигуна, розміщеного в основі маніпулятора _____

3.3 Маніпулятор повинен витримувати очікувані навантаження та відповідати заданим вимогам щодо рухомості та розмірів у складеному, закріпленому на платформі маніпулятора _____

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі 4.1 Вступ. Визначення мети, об'єкту і предмету дослідження; 4.2 Аналіз існуючих технологій та методик моделювання удосконаленої конструкції виробу з використанням алгоритмів генеративного дизайну; 4.3 Аналіз існуючих САД-систем для генеративного проектування; 4.3 Аналіз технічного завдання та розробка початкової геометрії для удосконалення; 4.4 Оптимізація форми елементів конструкції; 4.5 Питання забезпечення безпечних умов роботи проектувальника під час роботи; 4.6 Висновки _____

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій

Графічний матеріал у вигляді презентації – 12 арк. ф. А 4

6. Консультанти розділів роботи

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ. Визначення мети, об'єкту і предмету дослідження	01.09-15.09.2022	викон.
2	Аналіз існуючих технологій та методик моделювання удосконаленої конструкції виробу з використанням алгоритмів генеративного дизайну	15.09-30.09.2022	викон.
3	Аналіз існуючих САД-систем для генеративного проектування	01.10-15.10.2022	викон.
4	Аналіз технічного завдання та розробка початкової геометрії для удосконалення	15.10-31.10.2022	викон.
5	Оптимізація форми елементів конструкції	01.11-13.12.2022	викон.
6	Подання роботи на перевірку Інтернет-сервісом Unichesk	14.12.2022	викон.
7	Оформлення пояснювальної записки	15.12.2022	викон.
8	Подання роботи на рецензію	17.12.2022	викон.
9	Подання роботи на підпис зав. кафедри	19.12.2022	викон.
11	Подання кваліфікаційної роботи в ЕК	22.12.2022	викон.

Дата видачі завдання 01.09.2022 р.

Студент _____
(підпис)

Кострова Г. Ю.

Керівник роботи _____
(підпис)

доц. Демська Н. П.
(посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 63 с., 4 табл., 35 рис., 1 дод., 30 джерел.

ТОПОЛОГІЧНА ОПТИМІЗАЦІЯ, ГЕНЕРАТИВНИЙ ДИЗАЙН, САД-СИСТЕМИ, МОДЕЛЮВАННЯ, САПР, СИЛОВЕ НАВАНТАЖЕННЯ, ГЕНЕРАТИВНЕ ПРОЄКТУВАННЯ.

Об'єкт дослідження – маніпулятор МР.

Предмет дослідження – геометрично-масові характеристики маніпулятора МР.

Мета роботи – пошук оптимальної конструкції маніпулятора МР з використанням методу генеративного моделювання.

Проаналізовано існуючі технології удосконалення спроектованої конструкції, а саме технології топологічної оптимізації та генеративного дизайну, розглянуто алгоритм та основні етапи генеративного дизайну. Далі було обрано САПР для генеративного проектування. Було проведено аналіз технічного завдання та наведено початкову інформацію для дизайну. Проведено аналіз силового навантаження та проведено оптимізацію форми основи, форми ланок та розроблено фінальну конструкцію маніпулятора.

ABSTRACT

Explanatory note: 63 pp., 4 tables, 35 figures, 1 appendix, 30 sources.

TOPOLOGICAL OPTIMIZATION, GENERATIVE DESIGN, CAD-SYSTEMS, MODELING, CAD, POWER LOADING, GENERATIVE DESIGN.

The object of the research is the MR manipulator.

The subject of the study is the geometric mass characteristics of the MR manipulator.

The purpose of the work is to find the optimal design of the MR manipulator using the generative modeling method.

The existing technologies for improving the designed structure are analyzed, namely the technologies of topological optimization and generative design, the algorithm and main stages of generative design are considered. Next, CAD was chosen for generative design. An analysis of the specification was carried out and initial design information was provided. The analysis of the force load was carried out and the optimization of the shape of the base, the shape of the links was carried out, and the final design of the manipulator was developed.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	7
ВСТУП.....	8
1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ТЕХНОЛОГІЙ УДОСКОНАЛЕННЯ СПРОЄКТОВАНОЇ КОНСТРУКЦІЇ.....	10
1.1 Аналіз технології топологічної оптимізації.....	10
1.2 Аналіз технології генеративного дизайну.....	11
1.3 Алгоритм та основні етапи генеративного дизайну.....	14
1.4 Висновки до розділу.....	15
2 МЕТОДИКА МОДЕЛЮВАННЯ. ВИБІР САПР ДЛЯ ГЕНЕРАТИВНОГО ПРОЄКТУВАННЯ.....	17
2.1 Методика моделювання удосконаленої конструкції виробу з використанням алгоритмів генеративного дизайну.....	17
2.2 Генеративний цикл проектування.....	18
2.2.1 Групування пошукових систем.....	18
2.2.2 Пошук форми.....	20
2.2.3 Оцінка та відбір.....	21
2.3 Методи виготовлення.....	21
2.4 Аналіз існуючих САД-систем для генеративного проектування.....	24
2.5 Висновки до другого розділу.....	26
3 АНАЛІЗ ТЕХНІЧНОГО ЗАВДАННЯ ТА РОЗРОБКА ПОЧАТКОВОЇ ГЕОМЕТРІЇ ДЛЯ УДОСКОНАЛЕННЯ.....	28
3.1 Аналіз технічного завдання.....	28
3.2 Початкова інформація для дизайну.....	30
3.3 Аналіз силового навантаження.....	41
3.4 Висновки по розділу.....	46
4 ОПТИМІЗАЦІЯ ФОРМИ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЇ.....	47
4.1 Методика моделювання удосконаленої геометричної моделі деталі за допомогою генеративного дизайну.....	48

	6
4.2 Оптимізація форми основи	48
4.3 Оптимізація форми ланок	54
4.4 Фінальна конструкція маніпулятора	54
4.5 Питання забезпечення безпечних умов роботи інженера-дослідника при проведенні дослідницької діяльності за допомогою ПК	54
ВИСНОВКИ	58
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	60
ДОДАТОК А Демонстраційний матеріал.....	64

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ГД – генеративний дизайн;

ЗП – захватний пристрій;

КЛ – кінематичний ланцюг;

ПР – промисловий робот;

РТС – робототехнічні системи;

САПР – системи автоматизованого проектування;

ТО – топологічна оптимізація.

ВСТУП

Проектування модулів робототехнічних систем (РТС) різного призначення на даний час базується на ряді технологій, що еволюціонують, зокрема, на об'єднанні інформаційних технологій з операційними процесами, впровадженні кібер-фізичних виробничих систем, систем штучного інтелекту, використання IoT і прагнення до повної автоматизації всіх технологічних процесів [1-2].

Ряд можливостей, які вони відкривають, в плані оптимізації властивостей проєктованих конструкцій, не були реалізовані до недавнього часу. В першу чергу це пов'язано з тим, що далеко не всі оптимізовані конструкції можна було виготовити методами традиційних (субтрактивних) технологій. По-друге, після того, як проєкт доходив до технологів, виявлялося, що за наявного парку обладнання оптимального виду конструкцію виготовити просто неможливо [1].

Традиційна конструкторська школа проєктувала деталі і вузли з досвіду і знання технологічних можливостей обладнання для субтрактивних методів обробки, що і накладало обмеження на форму кінцевої конструкції. В принципі, для топологічної оптимізації можлива зміна традиційної геометрії на геометрію, спеціально адаптовану під певну технологію, включаючи адитивний процес [3].

Ефективне використання адитивних технологій та технологій комп'ютерного інжинірингу, включаючи оптимізацію, дозволяє створювати оптимальні за різними експлуатаційними характеристиками (вага, жорсткість, міцність, вібраційні характеристики, довговічність та ін.) і якістю виробу, машини та конструкції нового покоління, причому – проєктувати, виробляти і виводити продукцію на ринок в гранично короткий термін.

Тому основна мета проєктування модулів РТС, нині, полягає не в тому, щоб наявну традиційну деталь виготовити за допомогою адитивних

технологій, а в тому, аби перепроєктувати конструкцію під адитивні технології. Тут вже виникає питання про зміну парадигми, про перехід на нові принципи конструювання.

Тому на даний момент вирішення проблем забезпечення жорсткості конструкції мобільного робота (МР), при максимально допустимих навантаженнях та забезпечення оптимального або максимально ефективного використання, передбачає проведення ґрунтовних і складних розрахунків або використання спеціальних можливостей прикладних САПР, що значно скоротить інтелектуальне й часове навантаження на інженера [1].

Виходячи з вищеприведеного, метою роботи є пошук оптимальної конструкції маніпулятора МР з використанням методу генеративного моделювання. Цей метод передбачає отримання однієї або декількох конструкцій маніпулятора з різних матеріалів для забезпечення максимально необхідної жорсткості при меншій масі.

Об'єкт дослідження – маніпулятор МР.

Предмет дослідження – геометрично-масові характеристики маніпулятора МР.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати наступні завдання:

– провести аналіз існуючих технологій з оптимізації проєктування конструкцій маніпуляторів МР;

– провести аналіз та обрати САПР для проведення топологічної оптимізації та застосування технологій генеративного проєктування;

– провести аналіз технічного завдання;

– провести розробку початкової геометрії для удосконалення;

– проаналізувати методику навантаження;

– провести оптимізацію форми елементів конструкції.

Робота виконана згідно [4-5] та опублікована у [6].

1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ТЕХНОЛОГІЙ УДОСКОНАЛЕННЯ СПРОЄКТОВАНОЇ КОНСТРУКЦІЇ

1.1 Аналіз технології топологічної оптимізації

Топологічна оптимізація (ТО) – це математичний інструмент для оптимального розподілу матеріалів у моделях, що проектуються. Застосування методу дає змогу проектувати більш складніші за формою моделі, отримувати кращий діапазон показників граничних навантажень деталей, що проектуються. Існують різні підходи до оптимізації топології, розроблені протягом останніх трьох десятиліть. Наприклад, метод до встановленого рівня, метод гомогенізації, метод SIMP та метод задання різної щільності, які є одними з основних видів топологічної оптимізації.

Основною і важливою метою при проектуванні МР, яку потрібно врахувати на самому початку – досягти загальної жорсткості конструкції та приводної системи. Жорсткі конструкції забезпечують дві переваги. По-перше, типові роботи-маніпулятори не оснащуються датчиками, які вимірювали б положення системи відліку інструменту. По-друге, гнучкість структури або системи приводів створюють резонанси, що погано впливають на експлуатаційні показники роботів-маніпуляторів [1].

Алгоритм топологічної оптимізації базується на розрахунку напружено-деформованого стану деталі від прикладених навантажень. У результаті користувач отримує Mesh-модель (сітку на 3D-моделі деталі), яка показує ту частину деталі, яка сприймає навантаження. Відповідно, частину деталі без сітки можна видалити, чим і зменшити її масу.

Зазвичай оцінка ефективності проектування з використанням топологічної оптимізації здійснюється методом кінцевих елементів. Тобто, конструкція оптимізується з використанням методів математичного програмування на основі градієнта, таких як алгоритми критеріїв

оптимальності і методи переміщення асимптот або використання алгоритмів на основі неградієнта, таких як генетичні алгоритми [2].

Функціональна схема проектування моделей виробів із застосуванням методу топологічної оптимізації представлено на рис. 1.1.

Спочатку проектується початкова 3D-модель з первинним дизайном, потім дана модель структурно аналізується з урахуванням умовних навантажень, щоб побачити розподіл напружень та переміщень. На основі отриманих результатів корегується кількість матеріалу, при необхідності видаляється зайвий, або додається необхідний об'єм матеріалу у відповідних ділянках моделі. Після цього знову виконується перевірка навантажень, якщо деталь відповідає всім вимогам дизайну та навантажень отримуємо фінальну модель [2].

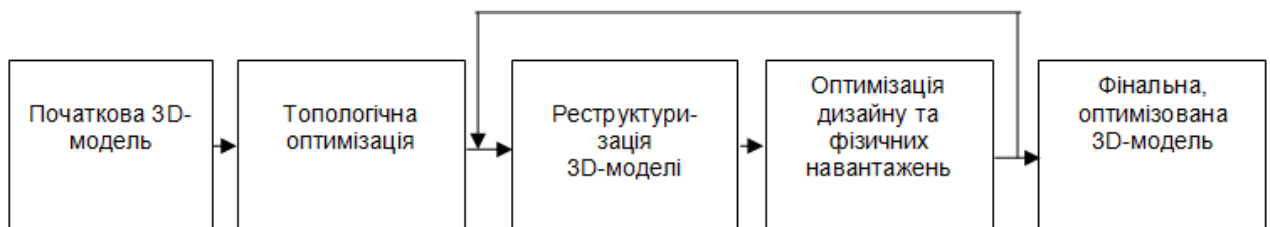


Рисунок 1.1 – Топологічно-оптимізований процес проектування

1.2 Аналіз технології генеративного дизайну

На відміну від алгоритмів ТО алгоритм генеративного дизайну (ГД) сам створює декілька варіантів деталей, виходячи із заданих умов. Передбачити їх конструкцію неможливо. Перед проектуванням фахівцю необхідно визначити елементи, які не будуть змінюватись і елементи, які треба об'єднати, всі навантаження, спосіб отримання, тощо. Чим більше змінних буде задано, тим більшу множину деталей буде отримано. Система сама обчислить можливі варіанти. Наприклад, користувач задає 2 види матеріалу і 3 типи навантажень, в результаті отримає 6 варіантів. Залишиться обрати той, що найкраще буде задовольняти умовам.

Термін «генеративний дизайн» відноситься до серії інструментів, що

реалізують методи та алгоритми штучного інтелекту, які застосовуються для вирішення завдань проектування. З практичної точки зору інструменти ГД шукають рішення проблеми, вираженої математичним формулюванням, вирішення якої будується на ітераційному процесі оптимізації, який намагається мінімізувати цільову функцію.

Використовуючи можливості штучного інтелекту, ГД надає можливість досліджувати багато різних концепцій дизайну на основі різних виробничих процедур, матеріалів і початкових форм, щоб забезпечити найбільш прийнятне рішення на ранній стадії проектування, на відміну від інших методів оптимізації топології [7]. Вони працюють на основі цільової функції (мінімізація маси, максимізація жорсткості) і розрахунків лінійного напруження, завдяки чому досягаються бажані результати.

Технології ГД дозволяють створювати проекти з урахуванням тих фізичних властивостей і явищ, які пов'язані з функціональністю продукту. Цей процес пошуку форм часто повторює рішення, що створені природою, при цьому з'являються органічні обриси, які навряд чи були можливими без використання автоматизованих алгоритмів, що допомагають в роботі з проектом. Ці форми з'являються в результаті численних ітерацій, на виході яких створюється дизайн, оптимізований для виконання поставлених завдань.

Ця нова тенденція проектування деталей використовує переваги чисельних інструментів, алгоритмів еволюції та інших стратегій оптимізації. З точки зору користувача, робочий процес проектування виконується за простою методологією, яка складається з 3 основних кроків: визначення цілей оптимізації (мета, геометрія, навантаження, умови виготовлення та експлуатації), перевірка введення та обчислення (результати, дослідження), та визначення результату оптимізації (вибір, експорт, модифікація, перевірка).

Фреймворк, запропонований Autodesk Generative Design [8-9], значною мірою покладається на хмарні обчислення: хоча більшість етапів

виконуються користувачем на його особистій робочій станції, уся оптимізація та аналіз виконуються на зовнішніх серверах. Фази, що складають структуру ГД, подібні до тих, які можна знайти в аналізі ТО. Основна відмінність полягає в створенні на першому рівні серії форм, які необхідно «дослідити», щоб визначити найбільш ефективне рішення.

Генеративні технології, які складають важливий розділ інтегрованих технологій, в останнє десятиліття отримали значний розвиток і охопили такі галузі промислового виробництва як авіація, автомобілебудування, приладобудування, медицина, археологія тощо [10].

Генеративний дизайн – це процес конструювання структури деталі та її параметрів при заданому критерії оптимальності зі збереженням або поліпшенням її функціональних можливостей.

На відміну від традиційних технологій проектування, генеративний дизайн дозволяє змінити стандартну геометрію на геометрію, спеціально адаптовану під певну технологію виготовлення. І це може бути, як традиційна технологія (наприклад, лиття), так і адитивний процес [11].

Програмне забезпечення для генеративного дизайну (топологічної оптимізації) перебудовує початкову геометричну модель об'єкта. При цьому завантажується геометрична модель виробу, яка раніше створена іншим методом. Завантажуючи модель в програмне забезпечення з можливостями генеративного дизайну, ми маємо змогу відзначити місця, які не будуть підлягати змінам, наприклад, це можуть бути місця для кріплення.

Все інше, що не потрапило в ці зони, але також належать деталі, називаються *design space*, тобто це ті зони деталі, де програма генерує нову геометрію [12].

Процес побудови нової моделі досить витратний за часом і вимагає великих обчислювальних ресурсів. Далі для верифікації отриманої моделі виконується аналіз напруження в кожному перетині деталі, з метою визначення допустимості отриманої геометрії. При цьому використовується метод скінченних елементів. Для кожного елемента виробу програма генерує

та вирішує інтегральні рівняння, враховуючи при цьому взаємозв'язок між усіма перетинами.

У випадку негативного висновку виконується перебудова геометрії деталі. Потім геометрія затверджується і може бути передана на наступний етап підготовки виробництва.

1.3 Алгоритм та основні етапи генеративного дизайну

Поняття «генеративний дизайн» є напрямком проектної діяльності на основі методу синтезу, який реалізується у промисловому дизайні. Напрямок генеративного дизайну, в основному, має на увазі способи «кодування» процесів. Найчастіше, це програми, алгоритми, процедури та ін. Оцінка цих процесів проводиться комп'ютером. Конструктор встановлює параметри, алгоритми, які можна використовувати, щоб варіювати процесом і те, як він обчислюється. При модифікації цих параметрів можна створювати нові елементи і форми дизайну, які створюються під час процесу. Перевіряючи результати і зміни в процесі, виконуючи знову і знову «перекодування», генеративний дизайнер удосконалює процес і, можливо, остаточний результат.

Алгоритм генеративного дизайну представлений на рис. 1.2.

Основними етапами в генеративному дизайні виділяють:

- установка параметрів;
- побудова алгоритмів і правил;
- програмування процесів;
- варіювання результатами моделювання;
- візуалізація процесів.

Замість того щоб замислюватися про результат, дизайнери, конструктори зосереджені на процесі, від якого залежить підсумковий вид проекту. Під час цього процесу у конструктора може з'явитися безмежна кількість результатів, які можуть миттєво змінюватися при зміні параметрів,

фактори випадковості і варіативності можуть призвести до абсолютно несподіваних результатів.



Рисунок 1.2 – Алгоритм генеративного дизайну [11]

Одним з інструментів в роботі в області генеративного дизайну виступає мова програмування Processing – середовище для розробки алгоритмів з інтуїтивно зрозумілим інтерфейсом, що дозволяє конструкторам без спеціальної підготовки в області програмування реалізовувати свої ідеї і проекти [13].

1.4 Висновки до розділу

Як показано на рис. 1.3, обидва вищезгадані підходи починаються з однакової концепції та попередніх параметрів проекту. Під час попереднього етапу стандартний підхід вимагає циклу між аналітичним і кінцево-

елементним аналізом для того, щоб спроектувати, удосконалити та перевірити модель. Генеративний підхід є більш простим, ніж стандартний, оскільки він створює органічні, оптимізовані рішення, хоча обидва підходи мають однакову базову концепцію.

Крім того, ТО вимагає наявності готової 3D-моделі. Щоб оптимізувати прототип, проєктувальник вводить в програму необхідні умови, і вона прораховує варіанти оптимізації виробу всередині цих обмежень. Потім інженер повертається до проєкту, вносить зміни, які рекомендувала програма, і перевіряє, щоб в результаті цих змін фізичні властивості об'єкта не відхилилися від потрібних значень. При ТО змінюється тільки зовнішній вигляд конструкції, а матеріали й «ідея» залишаються такими ж.



Рисунок 1.3 – Блок-схема процедур оптимізації (ТО та ГД)

ГД не вимагає готової 3D-моделі. Програма створює прототип з нуля по обмеженнях, заданих проєктувальником. ГД дозволяє замінити вузол з декількох деталей, на вузол з однієї деталі, котрий буде працювати як мінімум не гірше, а то і краще. Топологічна оптимізація пропонує єдиний варіант оптимізації однієї моделі, а генеративний дизайн пропонує до десяти варіантів виробу – на вибір.

2 МЕТОДИКА МОДЕЛЮВАННЯ. ВИБІР САПР ДЛЯ ГЕНЕРАТИВНОГО ПРОЄКТУВАННЯ

2.1 Методика моделювання удосконаленої конструкції виробу з використанням алгоритмів генеративного дизайну

У [7] розглядається виробничий процес, у якому вхідними параметрами є плоскі шматки листового металу та параметри дизайну, а алгоритм генеративного проектування наближає та коригує поверхню дизайну на основі наявного матеріалу.

Процес обчислення складається з трьох основних частин; вхідні дані, генеративний алгоритм проектування та генерація даних виготовлення (рис. 2.1).

Вхідними даними для алгоритму генеративного проектування є наявний матеріал, цілі проектування та правила.

Алгоритм генеративного проектування складається з класифікації матеріалів і циклу проектування, який повторює наступні етапи: алгоритм пошуку – де вибираються частини матеріалу, які будуть використані, пошук форми – де генерується 3D-поверхня та оцінювання та відбір – коли рішення аналізується та оцінюється.

Останній крок запускає наступну ітерацію циклу проектування. Результатом роботи алгоритму є набір можливих рішень, які допомагають розробнику досліджувати можливості в межах обмежень об'єкта. Нарешті, для вибраного рішення генеруються дані для виробництва.

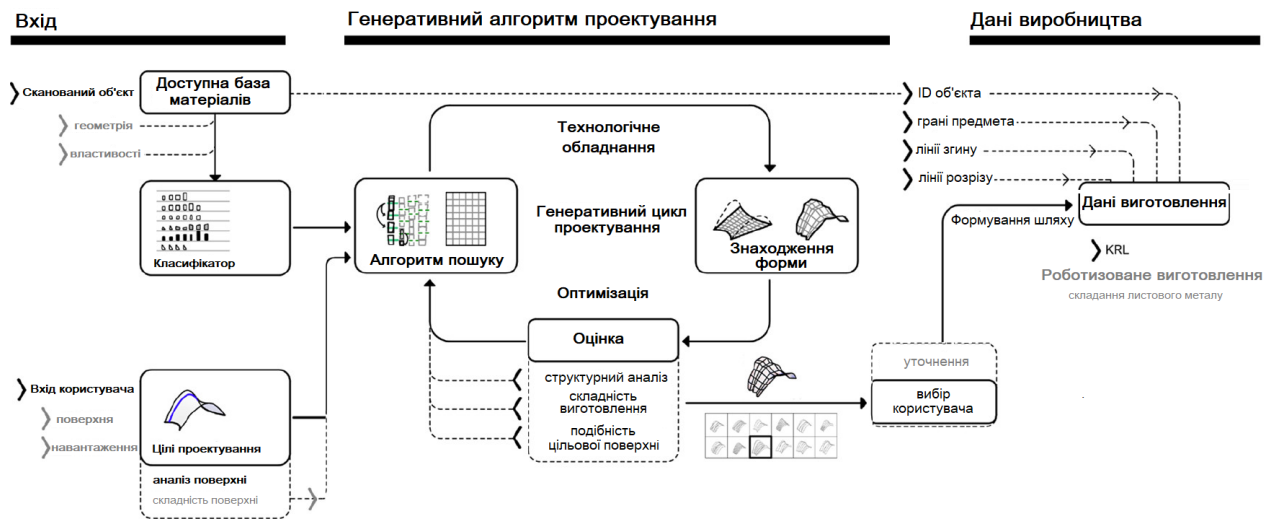


Рисунок 2.1 – ГД в умовах роботизованого виробництва [7]

2.2 Генеративний цикл проектування

Механізм проектування складається з алгоритму пошуку для групування об'єктів і пошуку форми. Алгоритм групування шукає відповідну геометрію та властивості об'єктів на основі тектонічної логіки. Він виводить сітчастий графік, який є основою для пошуку форми та апроксимації тривимірної поверхні.

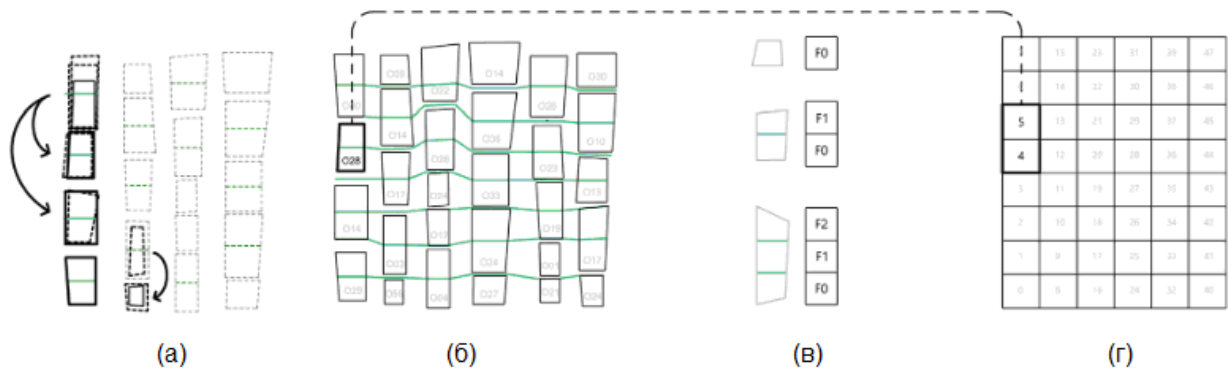
2.2.1 Групування пошукових систем

Пошукова система визначає розміщення об'єктів і групує об'єкти, розміщуючи їх у віртуальній сітці / матриці. Виходячи з тектоніки, кожен шматок обмежений своїм сусідом, оскільки їх ширина та довжина повинні відповідати встановленому діапазону допуску. Алгоритм виконує наступні кроки: (1) локальний пошук для скорочення домену та (2) зворотне відстеження.

Локальний пошук спочатку групує об'єкти на основі їх ширини. Це обмежує кількість фігур, які слід розглядати під час вибору потенційного збігу. Зворотне відстеження використовується, коли алгоритм не може знайти відповідність.

Кожного разу, коли відбувається повернення назад, попередньо вибрані

частини виключаються зі списку потенційних кандидатів на збіги. Алгоритм дотримується ієрархічного списку тектонічних правил для визначення подальших варіантів відповідності, коли рішення немає (рис. 2.2).



(а) алгоритм пошуку, (б) розміщення отриманого об'єкта, (в) призначення граней сітки та (г) сітчастий графік [7]

Рисунок 2.2 – Пошукова система

Алгоритм пошуку визначає довжину та кількість з'єднань для кожного фрагмента, в якому метою було знайти відповідну довжину між сусідніми смугами від середини кожного об'єкта до іншого. В алгоритмі пошуку матриця представлена у вигляді списку.

Об'єкти розміщуються ітеративно, узгоджуючи ширину та довжину в межах встановленого допуску та додаючи шматки, доки додані розміри розставлених частин не відповідатимуть меті, яка потрібна поверхні.

Базуючись на тектонічній логіці, алгоритм розташовує об'єкти в шаховому порядку; коли починається новий підсписок, він має відповідати довжині між серединами сусідніх сторін (рис. 2.2,а). Таким чином визначається підрозділ розміщеного об'єкта або його лінія згину (рис. 2.2,б).

Вихід пошукової системи є цифровою матрицею зі структурою даних вкладеного списку. Пізніше ця матриця використовується для переведення об'єктів у тривимірну поверхневу апроксимацію, оскільки вона визначає основу поділу сітки та топології (рис. 2.2,г).

2.2.2 Пошук форми

Для створення можливої геометрії сітки було розроблено цифровий інструмент пошуку форми. Матричний результат попереднього етапу групування використовується для створення сітчастого графа та подальшої топології. Сітчастий графік – це представлення зв'язку між частинами, оскільки кожен об'єкт або, зокрема, кожен сегмент об'єкта, безпосередньо відповідає конкретному індексу грані сітки (рис. 2.2,г).

Алгоритм пошуку вже визначає лінії згину, що в цьому перекладі означає, що жодна лінія згину не представляє одну грань сітки, одна лінія згину – дві грані сітки, і так далі ретроспективно (рис. 2.2,в). Після створення сітчастого графіка було визначено набір двовимірних і тривимірних обмежень і цілей для пошуку форми.

Параметри 2D пов'язані з фактичними об'єктами, тоді як параметри 3D пов'язані з вхідними даними проекту, цільовою поверхнею та наближеною структурною складкою (рис. 2.3).

2D-обмеженнями є: (1) межа фактичних об'єктів, (2) значення зсуву для з'єднань, що перекриваються, (3) співвідношення довжини лінії та (4) відповідність довжини ліній між сусідніми частинами, оскільки це безпосередньо перетворюється на краї сітки .

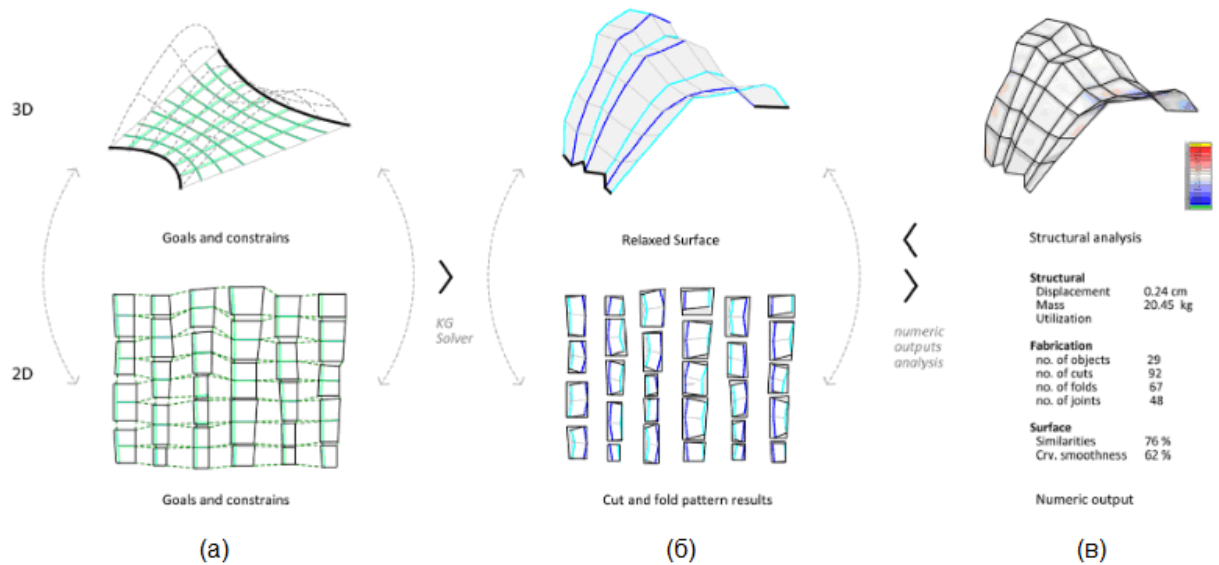
Мета 2D – максимізація використання об'єктів, що призводить до мінімізації відходів (рис. 2.3,а).

3D-обмеженнями є: (1) встановлення опорних точок, (2) планаризація об'єкта та (3) визначення поведінки складчастості в горах і долинах.

Мета 3D: (1) витягнути на поверхню, (2) досягти гладкого гофрування через кут 180 між кожним сегментом ламаної, (3) лінія згину та кутові цілі для гофрування. Цей зв'язок між двовимірними та тривимірними цілями та обмеженнями дозволив краще зрозуміти зв'язок між геометрією та компромісом використання об'єктів (рис. 2.3,б).

Результатом процесу пошуку форми є розслаблена 3D-сітка та відповідні 2D-об'єкти з визначеними лініями розрізу та згину в межах

початкового об'єкта.



(а) вхідні дані, (б) результат і (в) оцінка
Рисунок 2.3 – Пошук та оцінка форми [7]

2.2.3 Оцінка та відбір

Структурний аналіз (рис. 2.3,в) включає імітацію моделі під дією власної ваги та зовнішніх навантажень, а також кореляцію граней сітки з властивостями матеріалу об'єкта; значення товщини та типу металу. Основними факторами оцінки несучої здатності та ефективності конструкцій були величина прогину та власна вага (кг) конструкції.

2.3 Методи виготовлення

Методи роботизованого виготовлення складаються зі стратегій роботи з невідомим матеріалом, емпіричного тестування для визначення поведінки матеріалу (у цьому випадку відкидання), сканування та зондування для розпізнавання об'єктів, а також розробки апаратного забезпечення установки згортання та роботизованого кінцевого ефектора для відтворення промислового процесу складання.

Робочий процес виглядає наступним чином: усі деталі попередньо

скануються та позначаються для використання в обчислювальному робочому процесі перед процесом виготовлення, з подальшим розпізнаванням деталі, роботизованим виготовленням і, нарешті, складанням.

Оскільки промислові гідроабразивні процеси ускладнюють врахування різних властивостей матеріалу для кожної частини листового металу, робочий процес виготовлення складається як з роботизованого виготовлення, так і з ручного процесу. Завдання, що вимагали точності та міцності, такі як локалізація матеріалу, маркування та складання, виконувалися промисловим роботом, тоді як свердління та різання об'єктів, а також складання виконувалися вручну з врахованим допуском (рис. 2.4).

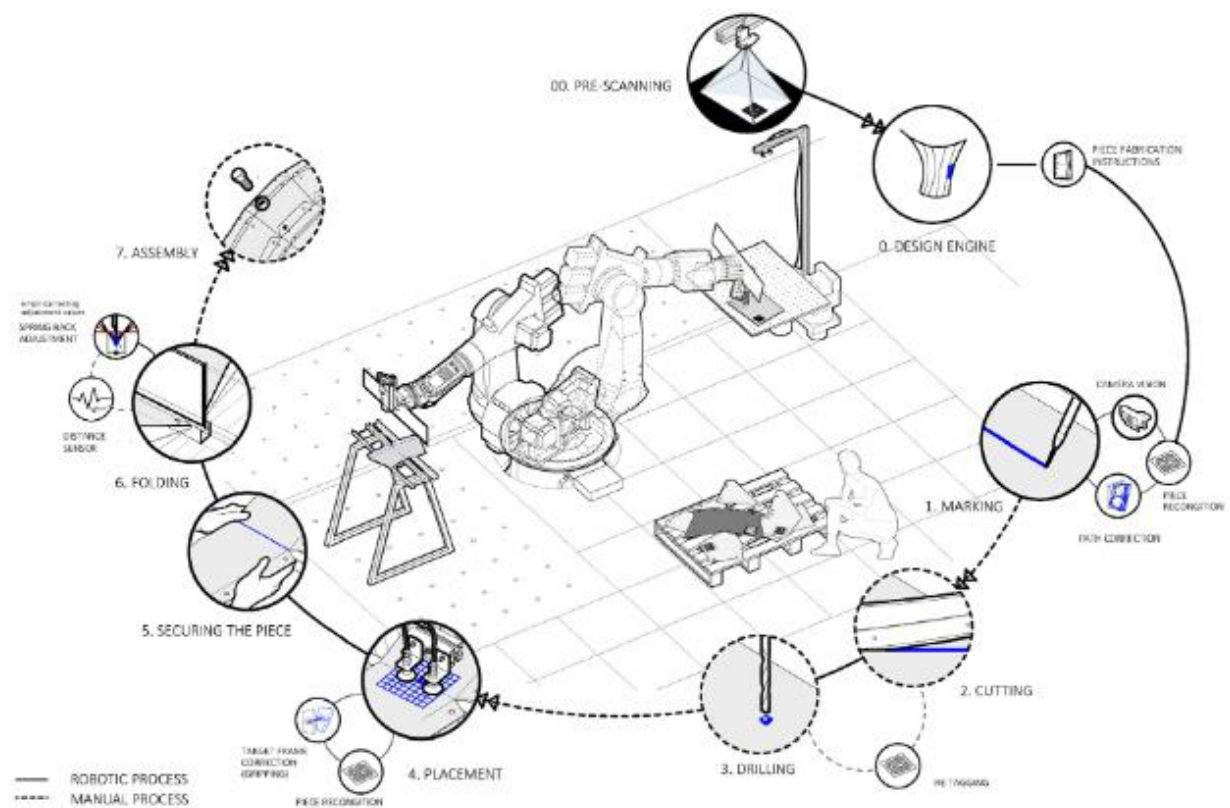


Рисунок 2.4 – Методи виготовлення [7]

Таким чином в [7] розроблено нову методологію, яка об'єднує генеративний дизайн, роботизоване виготовлення та невідомий матеріал.

Обчислювальний робочий процес для проектування з нестандартизованим матеріалом продемонстрував, що будь-який плоский

лист матеріалу можна використовувати як вхідні дані для апроксимації цільової поверхні.

Результати показують різноманітність невизначених топологій, що базується на наявному запасі матеріалів. Робочий процес роботизованого виготовлення включає датчики як важливий аспект роботи з нестандартизованими матеріалами. Тим не менш, деякі аспекти дослідження вимагають подальшого технічного розвитку.

Обчислювальний робочий процес демонструє потенціал, поєднуючи рекурсивний алгоритм пошуку для розміщення об'єктів, пошуку форми та оцінки в циклі. Однак не всі частини були повністю автоматизовані. Більш складні тектонічні правила, такі як розгалуження для розміщення об'єктів, були виконані вручну в алгоритмі пошуку для перевірки методології. Іншим обмеженням алгоритму пошуку була його нездатність віддзеркалювати об'єкти, що могло б краще визначити розміщення об'єктів і потенційно сприяти кращому використанню об'єктів. Результати показали, що, незважаючи на можливість створення різних топологій сітки, подальше вдосконалення все одно було необхідне для досягнення більшого рівня естетики та задоволення користувачів.

Тому необхідно додати перевагу користувача в цикл оптимізації, який міг би вплинути на значення різних сильних сторін цілі в пошуку форми та на можливість більшою мірою змінити задум дизайну.

Одне й те саме групування може генерувати різні поверхні, але це означатиме, що також буде більше відходів. Розробки роботизованого виробництва успішно інтегрували розгляд властивостей матеріалу в робочий процес, враховуючи різні відкиди. Однак ключем до можливості використання нестандартизованого матеріалу в цьому сценарії було б реалізувати зондування також на етапах розпізнавання та згортання.

Нові технології 3D-сканування та лазерного різання можуть надати доступ до цього великого джерела матеріалу для повторного використання. Обчислювальний робочий процес приймає обмеження доступного матеріалу

та цілі проектування як вхідні дані, він генерує рішення, які задовольняють як цілі проектування, так і обмеження доступності. Результатом є створення різних топологій оболонки, що демонструє прямий зв'язок між доступністю на основі геометрії та властивостей матеріалу регенованого матеріалу та можливостями дизайну. Ці методи можуть бути застосовані в різних масштабах (архітектура, дизайн, продукти тощо) залежно від розміру залишкового матеріалу та налаштувань виготовлення, а також інших систем матеріалів у межах плоского листового матеріалу та конструкцій оболонки.

2.4 Аналіз існуючих CAD-систем для генеративного проектування

Для вибору систем автоматизованого проектування (САПР), які будуть використовуватися, визначено сім, які пропонують функціональні можливості ГД (табл. 2.1). З точки зору підключення можна розрізнити системи САПР з інтегрованими модулями ТО та ГД та програмні рішення, які пропонують лише ГД, як окреме рішення. Окремі продукти пропонують обмін даними з різними САПР.

Таблиця 2.1 – Види CAD-систем для генеративного проектування

Програмне забезпечення	Виробник	Країна	Підключення	Зберігання
Fusion 360	Autodesk	USA	Integrated	Cloud
CogniCAD	ParaMatters	USA	Stand-alone	Local
Solid Edge	Siemens	Germany	Integrated	Local
Creo 7.0	PTC	USA	Integrated	Local
MSC Apex	MSC Software	USA	Stand-alone	Local
CATIA V6	Dassault Systèmes	France	Integrated	Local
NX	Siemens	Germany	Integrated	Local

Найважливішими критеріями для використання в Design Education є наявність студентської версії та надання ГД у студентській версії, що забезпечує швидкий доступ до систем САПР.

У цьому випадку лише Fusion 360 і системи САПР Solid Edge

пропонують студентську версію, включаючи ГД, тоді як Solid Edge включає базову версію ГД. Інші системи САПР не пропонують студентську версію або не містять ГД.

Крім того, наявність безкоштовної пробної версії включено в оцінку, оскільки вона забезпечує легкий доступ для оцінки системи САПР. Тут усі системи пропонують можливість використовувати тестову версію перед придбанням ліцензії. Це обмежено 30 днями для всіх систем САД, крім САТІА, де тестова версія доступна за запитом.

Для правильного вивчення систем САПР необхідні розширені навчальні посібники, щоб ознайомитися з усіма функціями та їхніми функціями додаток. Вони відіграють таку ж важливу роль в оцінюванні, як і доступність версії для студентів. Є лише кілька навчальних посібників для ГД на MSC Apex і NX, а також з САТІА V6 обсяг дуже обмежений. Для інших чотирьох систем САПР доступна низка детальних посібників.

Крім того, слід враховувати мінімальні вимоги до апаратного та програмного забезпечення, щоб усі функції можна було використовувати без обмежень або збоїв. Особливо з Fusion 360 приймається багато різних операційних систем, і поточна необхідна основна пам'ять, а також пам'ять на жорсткому диску невеликі – 4 ГБ і 3 ГБ.

З MSC Apex вимоги набагато обмеженіші, оскільки він обмежений кількома відеокартами. Для всіх інших систем САПР вимоги є між вимогами двох описаних систем САПР і відрізняються головним чином вимогами до пам'яті жорсткого диска. Останній врахований критерій – вартість.

У Solid Edge ГД входить до складу ліцензій для пакетів «Classic» і «Premium», за які стягується щомісячна плата. Для користування системою Fusion 360 САД є можливість оплачувати ліцензію щомісяця, щороку або кожні три роки. Крім того, для генерації моделей потрібні 25 так званих «хмарних точок», які також можна придбати в комерційній версії. У студентській версії «хмарні точки» доступні без обмежень.

Для оцінки в табл. 2.2 використовується зважена оцінка балів. З цією

метою властивостям відповідної системи САПР присвоюється значення від 1 (дуже погано) до 10 (дуже добре), яке потім зважується g_i критерієм.

Сума цих зважених балів використовується для визначення трьох систем САПР, які будуть використані. Оцінка показує, що три системи САПР Fusion 360, Solid Edge і CogniCAD досягають більше половини з десяти можливих балів. Оскільки адекватне використання широких функцій NX вимагає тривалого навчання, воно не включено, незважаючи на хорошу оцінку понад п'ять балів.

Таблиця 2.2 – Оцінка попереднього вибору систем САПР

Програмне забезпечення Factor g_i	Студентський варіант 0,2	ГД включено 0,25	Пробна версія 0,1	Підручники 0,2	Вимоги 0,1	Витрати 0,15	Σ 1,00
Fusion 360	10	10	10	10	8	7	9,4
CogniCAD	1	1	10	10	7	9	5,5
Solid Edge	10	8	10	10	6	8	8,8
Creo 7.0	1	1	10	10	6	5	4,8
MSC Apex	6	1	10	3	4	5	4,2
CATIA V6	1	1	10	5	6	5	3,8

2.5 Висновки до другого розділу

У даному розділі проведено аналіз існуючої методології обчислення та виготовлення, яка дозволяє проектувати та виготовляти в умовах роботизованого виробництва вироби з нестандартизованого листового металу. Ці методи можуть бути застосовані в різних масштабах (архітектура, дизайн, продукти тощо) залежно від розміру залишкового матеріалу та налаштувань виготовлення, а також інших систем матеріалів у межах плоского листового матеріалу та оболонкових структур. Доведено потенціал поєднання нових технологій генеративних алгоритмів і роботизованого зондування в дизайні з нестандартизованим матеріалом. Аналіз дає підставу ставити під сумнів типову лінійність процесів проектування та наперед

визначеність проектних рішень.

Таким чином, між трьома перевіреними системами САПР було виявлено багато відмінностей. Незважаючи на цю різницю, усі прикладні системи САПР логічно структуровані, тому ними легко та інтуїтивно зрозуміло користуватися. Існують також відмінності в потребі в дизайні та обмеженнях, тому що в Solid Edge достатньо визначити робочий простір як геометрію, у CogniCAD також потрібно зберегти геометрії, а у Fusion 360 також потрібно створити межі та перешкоди.

Доступність попередньо визначених матеріалів найбільш широка у Fusion 360, хоча Solid Edge також пропонує велику кількість матеріалів у різних категоріях.

Fusion 360 пропонує найбільшу свободу у визначенні виробничого процесу, дозволяючи користувачеві вибирати з чотирьох різних процесів і встановлювати окремі параметри для кожного з них. У Solid Edge будуть встановлені лише параметри, такі як запобігання нависанням для різних напрямків осі.

Час розрахунку залежить від багатьох факторів, таких як кількість випадків навантаження та якість розрахунку. Крім того, Fusion 360 може генерувати кілька результатів одночасно. Solid Edge і CogniCAD генерують лише один результат. У Solid Edge неможливо продовжувати роботу з САПР під час розрахунку, оскільки відображається хід розрахунку. За допомогою Fusion 360 модель результату може бути негайно піддана симуляції навантаження, щоб можна було визначити напруги для різних випадків навантаження.

Тому дослідження в даній роботі будемо проводити із застосуванням функцій топологічної оптимізації та генеративного дизайну у двох САПР – Fusion 360 та Solid Edge.

3 АНАЛІЗ ТЕХНІЧНОГО ЗАВДАННЯ ТА РОЗРОБКА ПОЧАТКОВОЇ ГЕОМЕТРІЇ ДЛЯ УДОСКОНАЛЕННЯ

3.1 Аналіз технічного завдання

В результаті аналізу було обрано конструкцію маніпулятора з 5-ма степенями рухомості, яка забезпечить необхідну маневреність, точність позиціонування та простоту керування. Основні характеристики маніпулятора, що розробляється наведено у табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Основні характеристики

№	Характеристики	Величина
1	Вантажопідйомність	1,5 кг
2	Радіус дії (не менше)	300 мм
3	Кількість керованих осей (не менше)	5
4	Монтажне положення	Рухлива платформа

Створений кінематичний ланцюг (КЛ) майбутнього маніпулятора (рис. 3.1) складається з 4 ланок та робочого органу (РО).

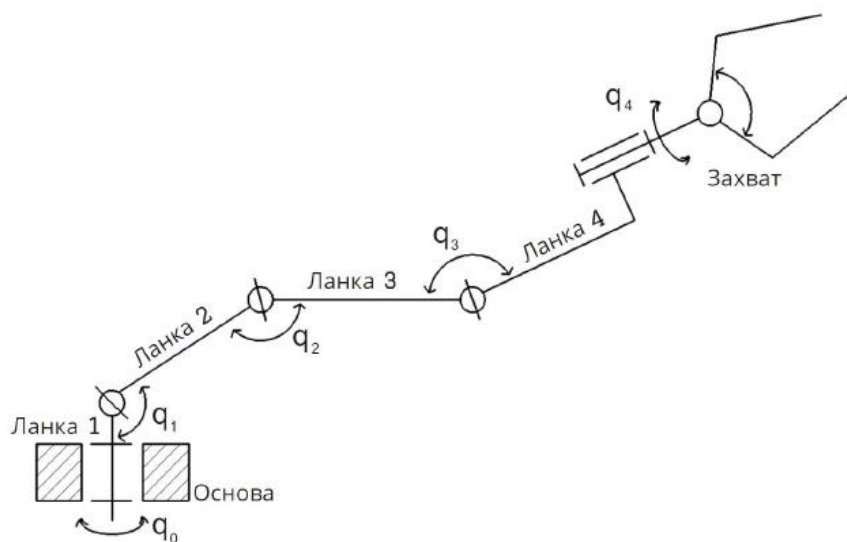


Рисунок 3.1 – Кінематична схема та механізми переміщення 5-вісного проектного маніпулятора

Така конструкція при порівнянні з маніпуляторами, що мають два або три ступені рухомості, дозволяє мати кращу рухливість, маневреність та достатньо високу жорсткість, при відносно нескладному керуванні.

Вимоги до конструкції:

– конструкція електроавтоавтоматики маніпулятора повинна складатися з наступних частин: шафа електроавтоматики; кабельне розведення до елементів управління;

– управління всіма механізмами повинно здійснюватися від первинного комп'ютера з налаштованим програмним об'ємом;

– конструкція маніпулятора повинна забезпечити його монтаж і ремонт вузловим методом.

Характеристики поворотних вісей робота-маніпулятора описані в таблиці 3.2.

Вісь q_0 – кроковий двигун без зворотного зв'язку з крутним моментом не менше $1 \text{ Н}\cdot\text{м}$.

Вісь q_1 – кроковий двигун без зворотного зв'язку з крутним моментом не менше $2 \text{ Н}\cdot\text{м}$.

Вісь q_2 – кроковий двигун без зворотного зв'язку з крутним моментом не менше $1 \text{ Н}\cdot\text{м}$.

Вісь q_3 – кроковий двигун без зворотного зв'язку з крутним моментом не менше $0,3 \text{ Н}\cdot\text{м}$.

Вісь q_4 – кроковий двигун без зворотного зв'язку з крутним моментом не менше $0,2 \text{ Н}\cdot\text{м}$.

Необхідно виконувати підключення поворотних вісей у відповідності зі схемою, зображеної на рис. 3.2.

Таблиця 3.2 – Характеристики поворотних вісей робота-маніпулятора

Поворотна вісь	Обмеження (град) - відносно базової позиції		Кроковий двигун (типорозмір, крутний момент (Н·м))	Крутний момент на виході (Н·м)
	Мін.	Макс.		
Вісь q_0	-360	360	Nema 24, 3 Н·м	20,25 Н·м
Вісь q_1	-110	110	Nema 24, 3 Н·м	45 Н·м
Вісь q_2	-140	140	Nema 23, 1,26 Н·м	12 Н·м
Вісь q_3	-360	360	Nema 17, 0,5 Н·м	3,75 Н·м
Вісь q_4	-360	360	Nema 17, 0,5 Н·м	3 Н·м

3.2 Початкова інформація для дизайну

Для оптимізації обирають деталі в механізмах приладів та машин, які припускають та потребують зменшення маси при збереженні їх експлуатаційних властивостей.

Отже перша ланка має кріпитися на основі та виконувати обертальні рухи навколо вертикалі. Вона сприйматиме навантаження всієї конструкції, тому її виконання буде зроблено з товстішого листа металу ніж інші ланки. Розміри основи для кріплення вказані на рис. 3.2.

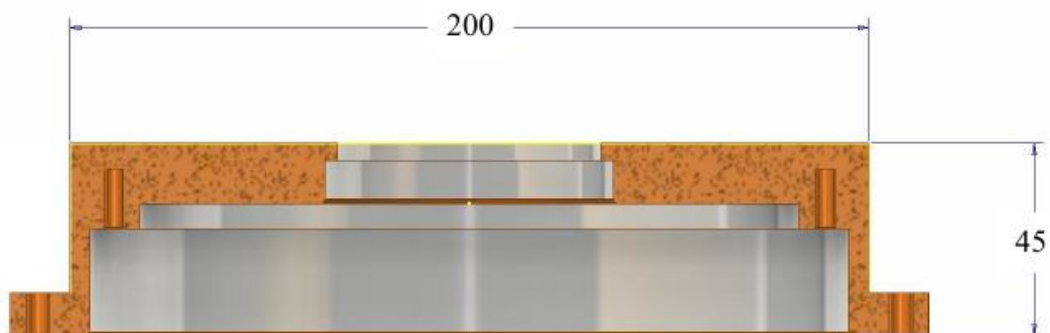


Рисунок 3.2 – Розміри основи для кріплення першої ланки

Формуючи початкову ланку не потрібно забувати і про естетичну складову, вона не повинна мати більший діаметр ніж сама основа, але і не

надто малий, щоб була можливість без складнощів закріпити на ній наступну ланку та актуатор. Тому було обрано діаметр 185 мм (рис. 3.3). Для зменшення маси було обрізано два сегменти кола, та для естетики додані скруглення.

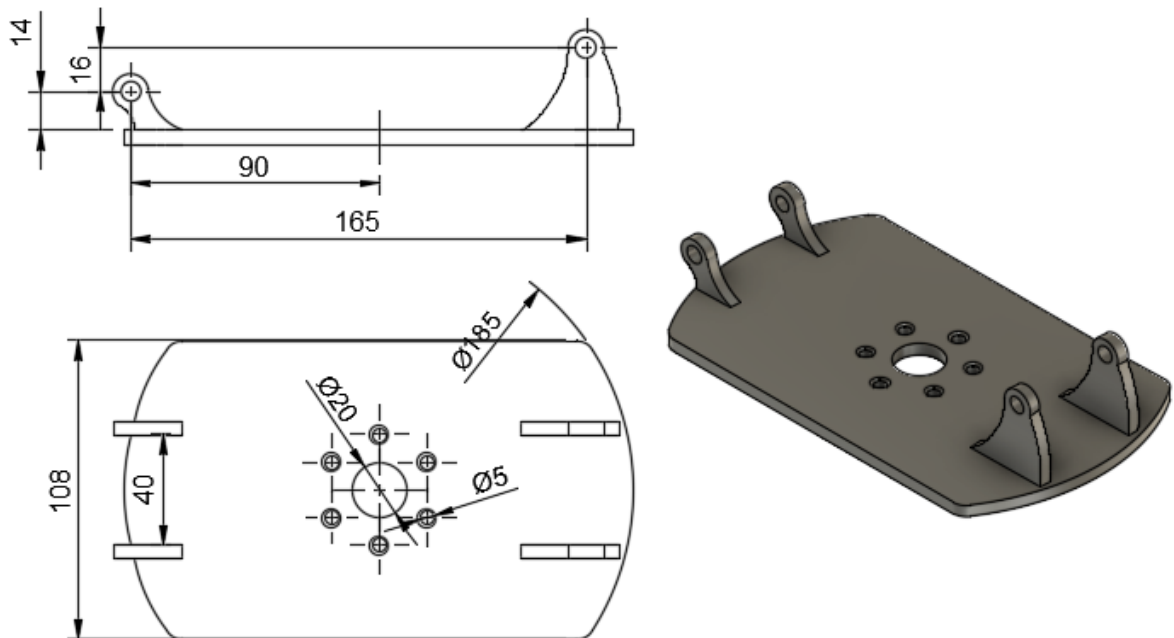
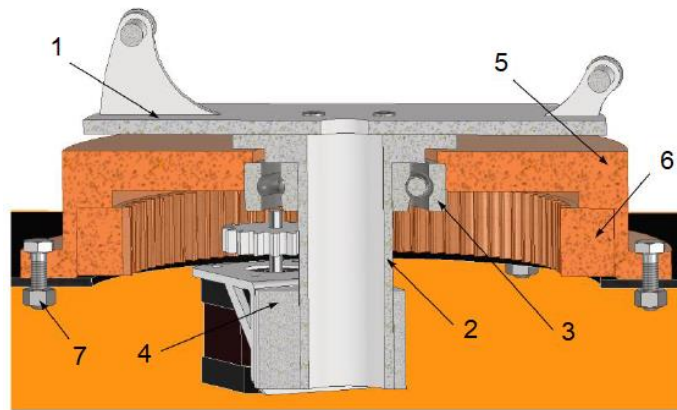


Рисунок 3.3 – Розміри початкової ланки

Форма упорів підібрана таким чином, щоб ефективно сприймати навантаження від стиску-розтиску актуатора та з'єднувальної ланки відповідно.

Товщина листового металу 5мм. Початкова ланка кріпиться на вал за допомогою болтового з'єднання. Вал в свою чергу фіксується та центрується завдяки підшипникам, зверху радіальному та внизу радіально-упорному.

На принциповій схемі (рис. 3.4) можна спостерігати розміщення об'єктів маніпуляторів та кріплення їх на мобільній платформі.



1 – початкова ланка; 2 – вал обертання; 3 – підшипник; 4 – двигун з кріпленням; 5 – корпус основи; 6 – зубчаста вставка; 7 – кріплення основи
Рисунок 3.4 – Принципова схема з'єднання основи та початкової ланки

Основні елементи було спроектовано, такі як кріплення для крокуючого двигуна, попередньо, двигун NEMA 17 та елемент кріплення його на валу. Не вказано на принциповій схемі наявність стопорного кільця на валу, для додаткової фіксації підшипника.

Як можна спостерігати, обертальний рух першої ланки здійснюється за рухунок колових рухів шестірні в зацепленні зі зубчастою вставкою, шестірня закріплена на валу та обертатиме навколо вертикальної осі вала всю майбутню конструкцію маніпулятора.

Проектуючи другу ланку потрібно з уважністю віднестися до її розмірів, оскільки вона має бути довгою, але її довжина не повинна перевищувати розмір платформи, щоб не ускладнювати керування роботом під час руху. Отже маємо, що частина платформи має довжину 575 мм, та 398 мм від осі обертання вала до з'єднання з наступною частиною, тому керуватися будемо саме цим розміром. Спроектвана ланка представлена на рис. 3.5, її довжина по кріпильним точкам становить 420 мм, що цілком задовольняє вимогам.

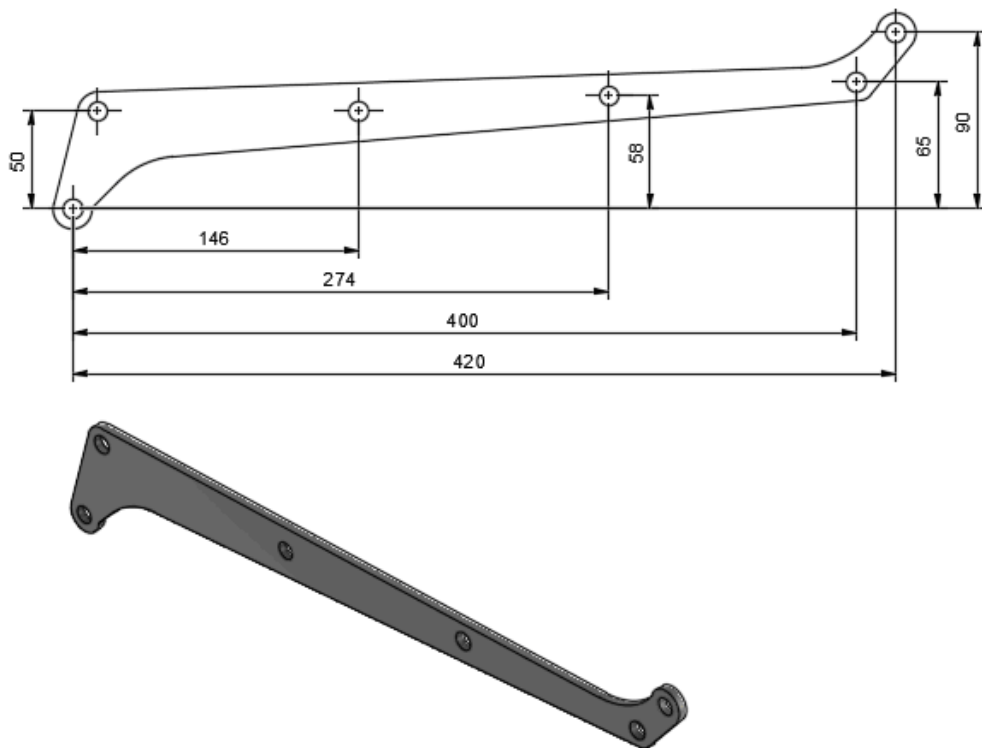


Рисунок 3.5 – Положення та розміри кріпильних отворів 2-ї ланки

На рис 3.5 також видно, що діаметри деяких отворів більші ніж інші, це через те, що декі з них мають додаткове призначення, окрім надавання жорсткості конструкції, вони слугують кріпленням для лінійних актуаторів. Лінійні актуатори поступальним рухом циліндра будуть рухати ланку. Ланка 2 виконує обертальний рух, але її рух обмежений довжиною циліндра актуатора, тобто вона може рухатися в межах сектора, дозволеного базовими характеристиками лінійного актуатора.

На рис. 3.6 зображено, як виглядатиме ланка та лінійний актуатор у зібраному стані, знаходячись закріпленими на платформі. Оскільки початкова ланка здійснює обертальний рух – нема особливої необхідності створювати об'ємний рух в наступних ланках, достатньо плоского кінематичного ланцюга, просторовість якого буде надаватись обертанням всієї конструкції в основі.

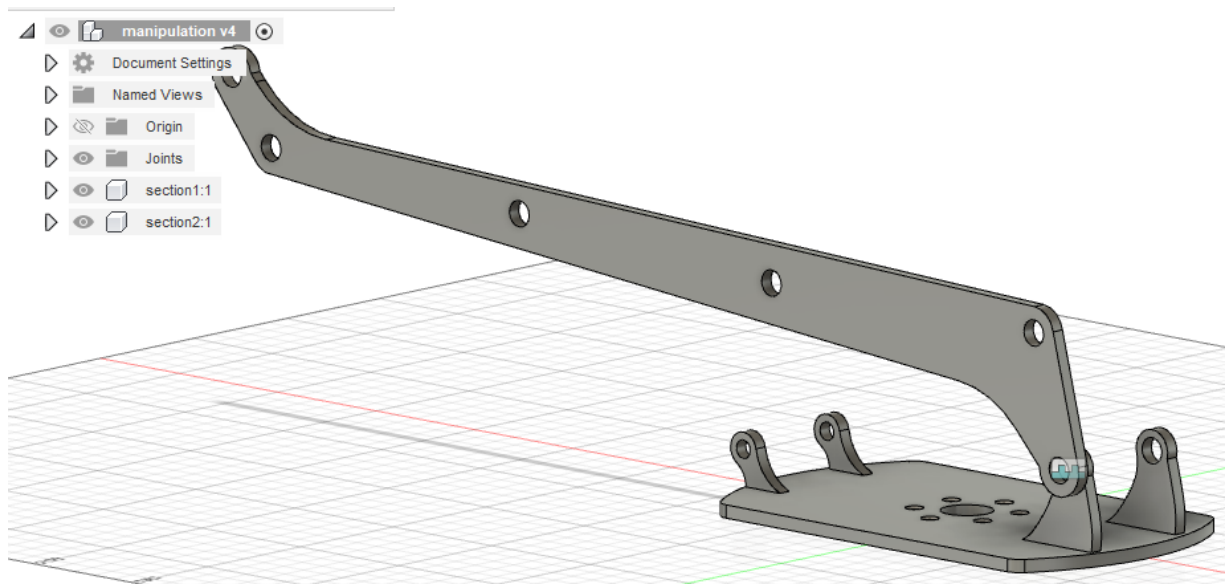


Рисунок 3.6 – Положення та розміри кріпильних отворів 2-ї ланки

Також такий вигляд дає можливість візуально оцінити правильність вибраних розмірів та елементів. Виникає здатність перевірити естетичну складову та переконатися в тому, що конструкція працездатна.

Наступними кроками буде створення ще двох ланок (3-ї та 4-ї) та чотирьох допоміжних елементів. Оскільки послідовність така ж сама, то доцільним буде просто показати їх розміри (рис. 3.7).

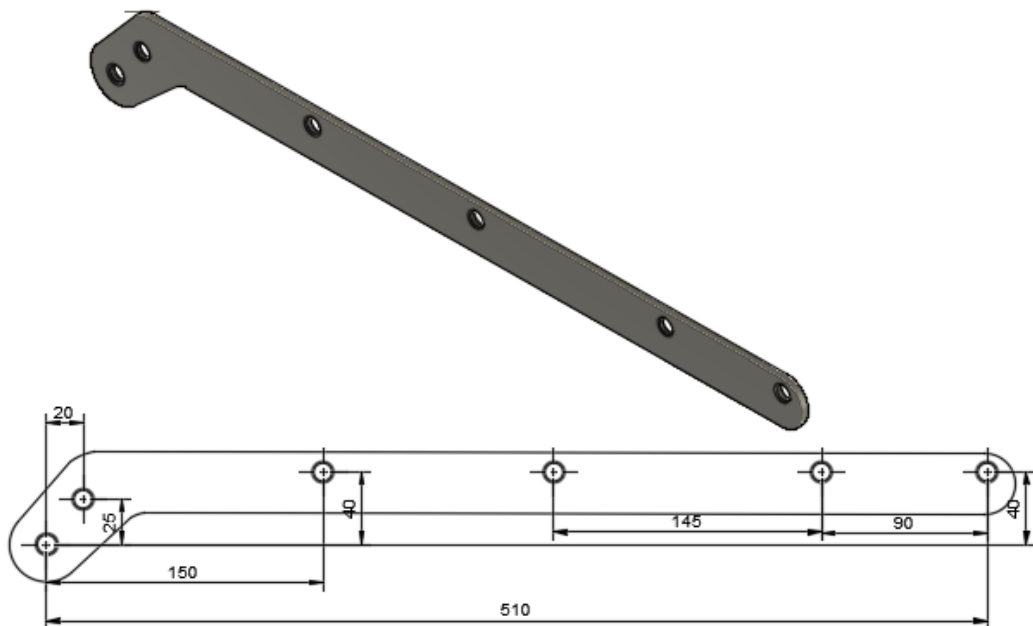


Рисунок 3.7 – Положення та розміри кріпильних отворів 3-ї ланки

Для кріплення всіх елементів механізму потрібно спроектувати нові ланки, які б мали відповідні отвори та форму для оптимального використання. На рис. 3.8 можна спостерігати створену форму ланок. На рис. 3.9 представлений кресленик з таблицею створених компонентів.

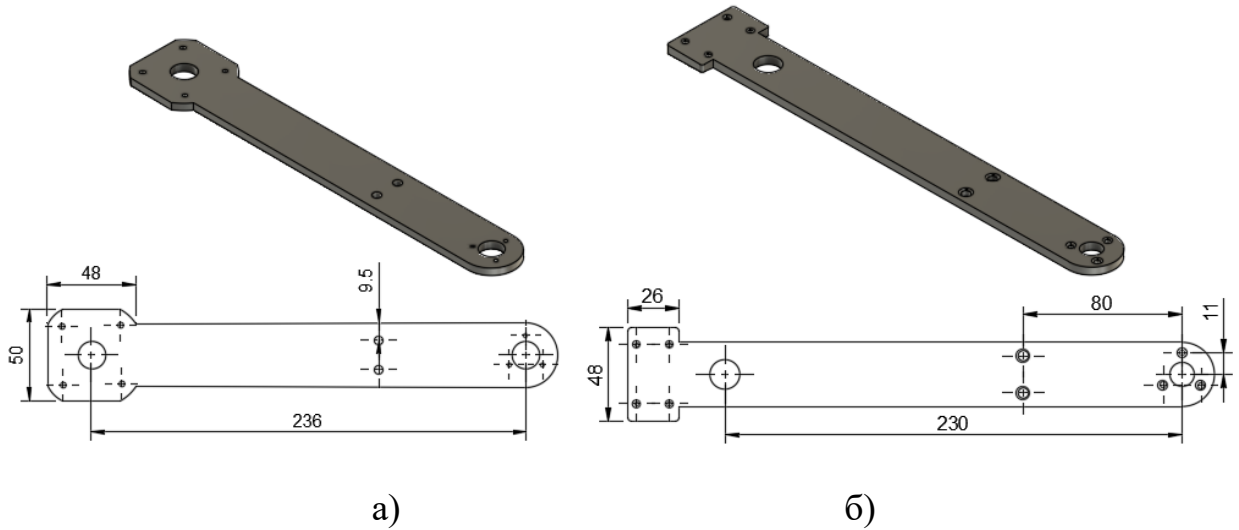


Рисунок 3.8 – Ланка 4 (а – права, б – ліва)

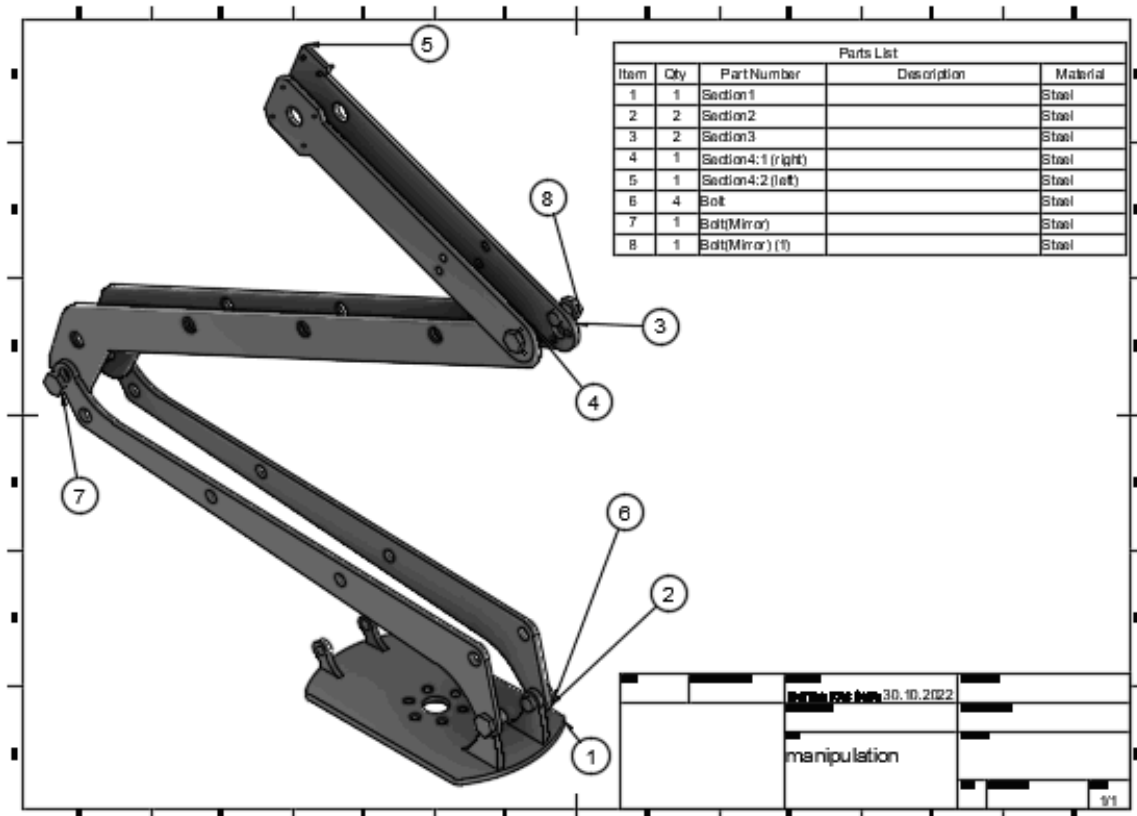


Рисунок 3.9 – Компоненти корпусу маніпулятора

Стосовно ЗП, були розглянуті варіанти різних конструкцій захватного механізму (рис. 3.10).

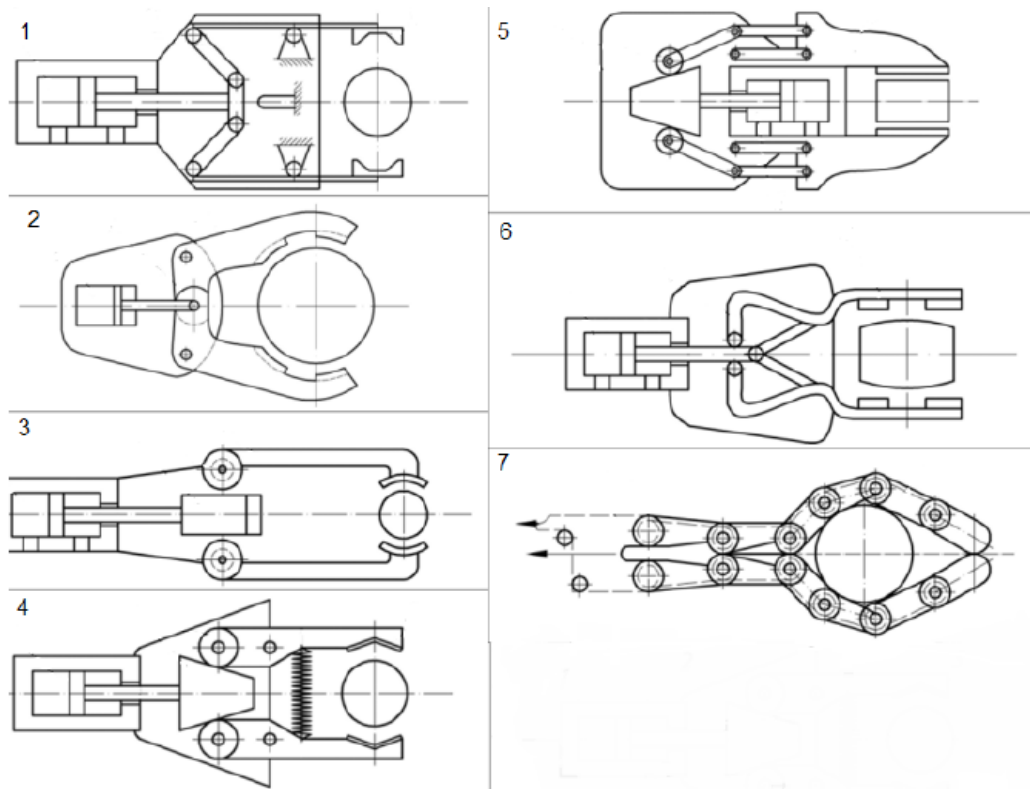


Рисунок 3.10 – Механічні захватні пристрої

На рис. 3.11 зображено тривимірну модель захвату та схему його роботи.

Механізм затиску працює наступним чином: при затиску, двигун обертається за годинниковою стрілкою спричинюючи поступальний рух плоского елемента 3 в сторону двигуна, рух цього компонента створює паралельно-поступальний рух губ затиску у протилежні сторони.

При розтиску відбувається зворотній процес, плоский компонент рухається від двигуна в результаті чого губи затиску паралельно розходяться. Гніздо для крокуючого двигуна 1 являє собою вал на якому розміщаються два радіальні підшипники, зафіксовані в блоці 2 для кріплення на ланку.

Також гніздо має в своїй будові зубчасте колесо, яке буде відтворювати обертальні рухи від зацеплення з шестрінею.

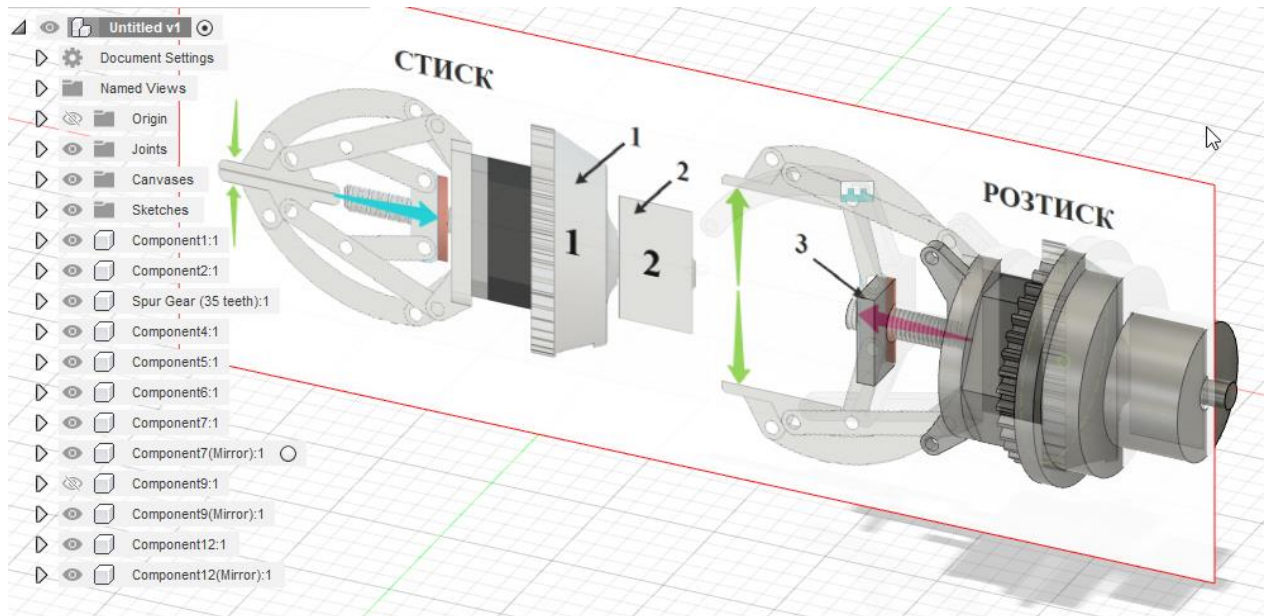


Рисунок 3.11 – Побудова моделі захватного пристрою

При проектуванні роботизованого комплексу виникає необхідність у виконанні кінематичного та кінетостатичного аналізу обраної просторової кінематичної схеми (рис. 3.1).

Для опису геометричних параметрів маніпулятора найбільш доцільно застосовувати метод перетворення координат. При цьому використовуються системи координат, жорстко зв'язані із ланками маніпулятора. Система координат побудована таким чином: вісь X_i направлена вздовж ланки; вісь Y_i доповнює побудовану вісь та повинна своїм напрямком створити правосторонню систему координат; у якості початку системи координат як правило використовується точка перетину ланок.

Математична модель яка описує кінематику маніпулятора, може бути представлена за допомогою система із 12 рівнянь [14-16]. Оскільки маніпулятор роботизованого комплексу складається із ланок, з'єднаних поворотними вузлами (O, A, B, C, D), то робочі процеси поворотних вузлів визначають характеристики всієї механічної системи. Деформації ланок OA, AB, BC та CD, що мають довжини L_1 , L_2 , L_3 , L_4 також впливають на точність. На основі даних, що визначають закон руху вихідної ланки,

проводиться розрахунок траєкторії схвату у т. D. При розрахунках та кінетостатичному аналізі виникає необхідність у чисельному розв'язку рівнянь, оскільки ці розрахунки мають вестися у режимі реального часу.

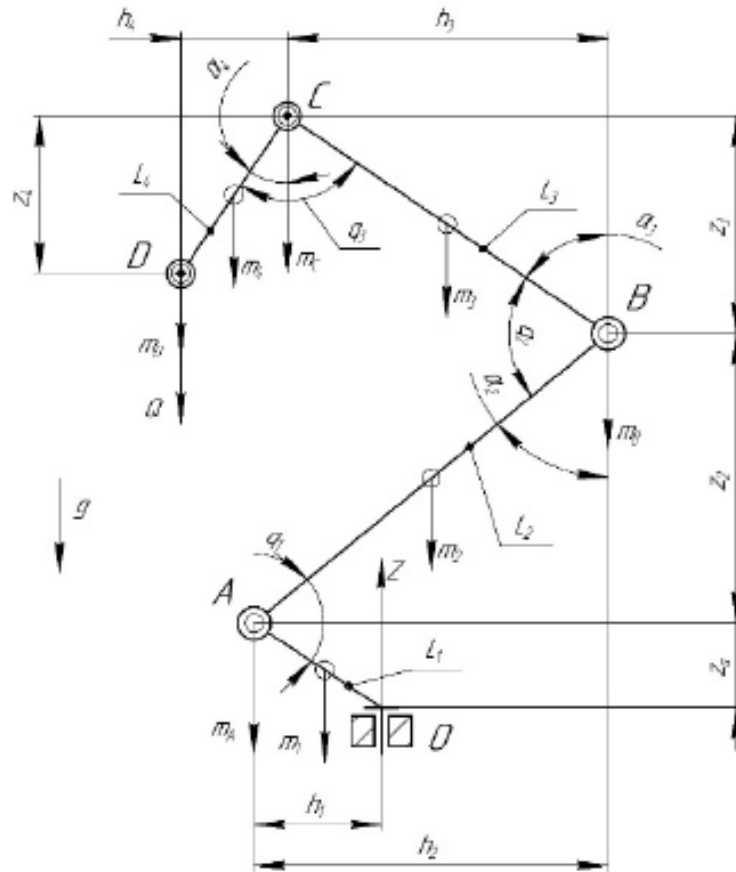
Розрахунки кінетостатичних параметрів проводяться за відомою методикою [17-20] (рис. 3.12), причому ці розрахунки виконуються окремо, для кожної рухомої частини маніпулятора. Згідно запропонованої розрахункової схеми за типовою залежністю визначимо статичний момент у вузлі A, що є одним із найбільш навантажених поворотних вузлів маніпулятора:

$$\begin{aligned}
 Mx_{a_i} &= (Q + m_D) \cdot (h_{4i} + h_{3i} + h_{2i}) + m_4 \cdot \left(\frac{h_{4i}}{2} + h_{3i} + h_{2i} \right) + m_C \cdot \\
 &\cdot (h_{3i} + h_{2i}) + m_3 \cdot \left(\frac{h_{3i}}{2} + h_{2i} \right) + m_D \cdot (h_{2i} + h_{3i} + h_{4i}) + m_2 \cdot \\
 &\cdot \left(h_{2i} + h_{3i} + \frac{h_{4i}}{2} \right); \\
 Mz_{a_i} &= (Q + m_D) \cdot (z_{2i} + z_{3i} - z_{4i}) + m_4 \cdot \left(z_{3i} + z_{2i} - \frac{z_{4i}}{2} \right) + \\
 &+ m_C \cdot (z_{3i} + z_{2i}) + m_3 \cdot \left(\frac{z_{3i}}{2} + z_{2i} \right) + m_D \cdot z_{2i} + m_2 \cdot \frac{z_{2i}}{2}. \quad (3.1)
 \end{aligned}$$

Відповідно сумарний статичний момент:

$$Ma_i = \sqrt{Mza_i^2 + Mxa_i^2}. \quad (3.2)$$

Отримані аналітичні результати статичного моменту дають можливість зробити дослідження у модулі програмного комплексу CAD/CAE напружено-деформованого стану ланок маніпулятора та зубців механічної передачі [21-30]. Також отримані результати аналітичних досліджень дають можливість врахувати особливості робочих процесів при розробці системи управління електричними двигунами, що приводять у рух ланки маніпулятора.



A, B, C, D, O - поворотні вузли; L_1, L_2, L_3, L_4 – довжини ланок; ω, q_1, q_2, q_3 – кути повороту ланок у вузлах; h_1, h_2, h_3, h_4 – відстань між вузлами вздовж осі X ; z_1, z_2, z_3, z_4 – відстань між вузлами вздовж осі Z ; m_1, m_2, m_3, m_4 – маса ланки; m_A, m_B, m_C, m_D – маса вузла

Рисунок 3.12 – Розрахункова схема силового навантаження маніпулятора

Для оцінки жорсткості ланки необхідно визначити її прогин ω_{Ci} та кут повороту θ_{Ci} від дії корисного навантаження, при цьому врахувавши вагу ланок та поворотних вузлів. Для забезпечення необхідної жорсткості, що чинить вплив на точність, задача зводиться до виконання умови, де найбільший прогин ланки (кут повороту) не повинен перевищувати допустимого значення:

$$\theta_{Di} \leq [\theta_i]; \omega_{Di} \leq [\omega_i]. \quad (3.3)$$

Розглянемо статичну рівновагу шарнірів маніпулятора, склавши для кожної із ланок диференціальне рівняння деформованої осі ланки або диференціальне рівняння пружної лінії [4]:

$$\pm \frac{d^2 y}{dz^2} \leq \frac{M_z}{EI_x}, \quad (3.4)$$

де M_z – згинальний момент в січєні;

EI_x – жорсткість поперечного перетину ланки (балки) при згині.

Відповідно, отримаємо залежності для визначення деформацій ланки ВС, що будуть мати вигляд:

– рівняння для визначення кута повороту:

$$\theta_{C_i} = \frac{-\frac{Z_{23} \cdot h_{3i}^3}{2} + \frac{m_c \cdot h_{3i}^3}{2} + \frac{m_3 \cdot \frac{h_{3i}^3}{2}}{2} - M_{34} \cdot h_{4i}}{EI}; \quad (3.5)$$

– рівняння для визначення прогину:

$$\omega_{C_i} = -\theta_{C_i} \cdot I_3 - \frac{\frac{Q \cdot h_{3i}^2}{6} + \frac{m_c \cdot h_{3i}^2}{6} + \frac{m_3 \cdot \frac{h_{3i}^2}{2}}{6} - M_{34} \cdot h_{4i}^2}{EI}, \quad (3.6)$$

де h_{3i} – горизонтальна відстань (плече) сили;

M_{34} – величина, що враховує корисне навантаження;

m_c – вага поворотного вузла С;

m_3 – вага ланки СВ;

EI – характеристики жорсткості ланки, модуль пружності та момент інерції січення, відповідно.

Із аналізу та проведених розрахунків отримуємо шукані величини кутів повороту та переміщень у вузлах, що дають змогу врахувати знайдені кутові

похибки позиціювання у аналітичних залежностях, що визначають положення вихідної ланки маніпулятора.

3.3 Аналіз силового навантаження

Маніпулятор це досить складний механізм, який має бути здатним сприймати навантаження. Конструкція створеного маніпулятора розподіляє навантаження між двома симетричними (окрім ланки 4) ланками і таким чином можливо досягти більшого потенційного навантаження, що сприймається.

Для того, щоб правильно навантажити окремі елементи маніпулятора потрібно розглянути варіант у розгорнутому вигляді (рис. 3.13).

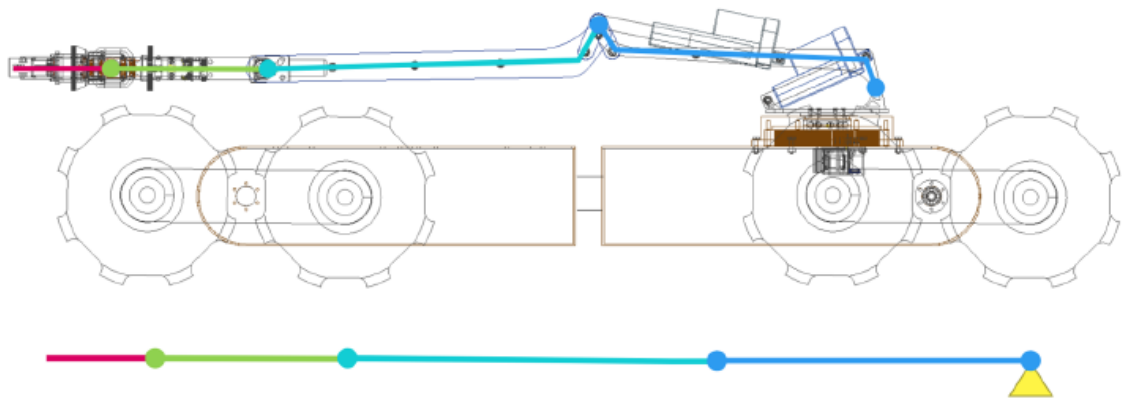


Рисунок 3.13 – Маніпулятор в розгорнутому вигляді та спрощена схема

Розглянемо ланки, як незалежні один від одного елементи. На рис 3.14 можна спостерігати, що кожна ланки защемлена з одного боку, це зроблено з розрахунком на те, що в з'єднаннях не буде випадкових рухів.

Отже бачимо, що всі ланки мають посередині навантаження, це навантаження від маси самої ланки, є певні відхилення від реальних точок прикладання та центрів мас, але для простішого розрахунку було обрано саме половину довжини.

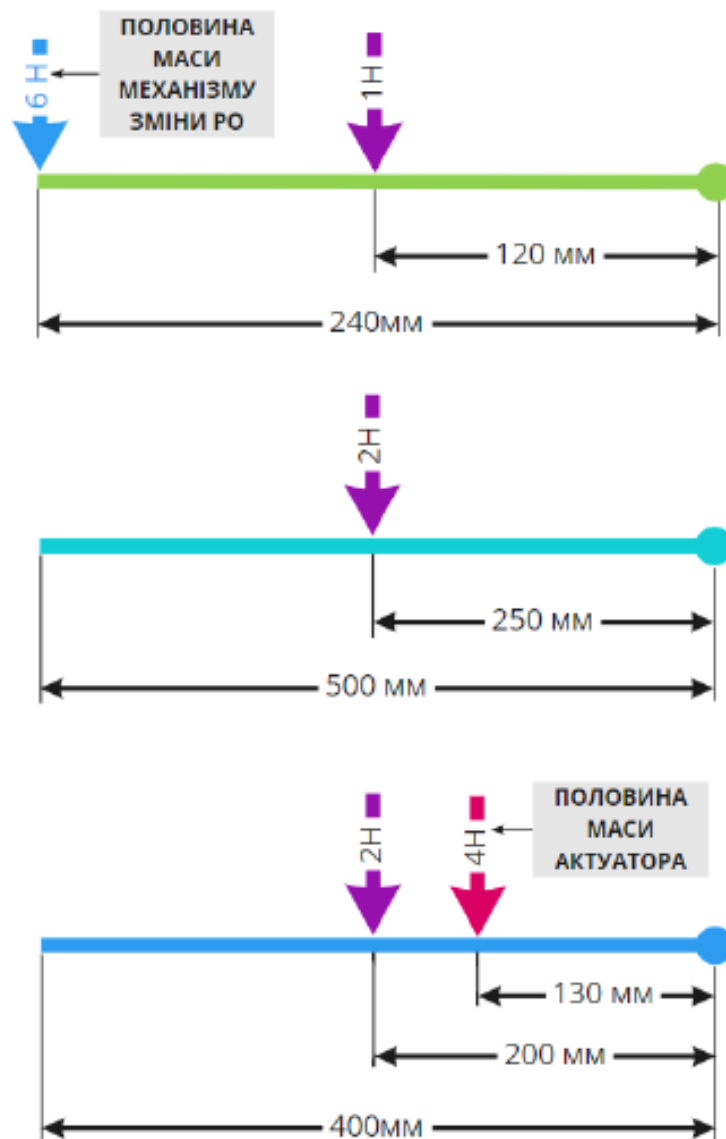


Рисунок 3.14 – Навантаження які сприймають ланки незалежно одна від одної

Отже сумарна вага механізму для зими РО складає 1,2 кг, навантаження на одну ланку складає 0,6 кг або 6 Н. Крім того потрібно враховувати максимальну вагу об'єкту транспортування, задача була поставлена так, що маніпулятор повинен бути здатним піднімати та транспортувати об'єкт вагою 10 Н. Тоді сумарне навантаження на ланку буде $(12 \text{ Н} + 10) \cdot 0,5 = 11 \text{ Н}$. Отже, маючи значення навантаження зробити симуляцію в середовищі Autodesk Fusion 360 (рис. 3.15).

Можемо спостерігати схему навантаження правою частиною вагою в

15 Н та коефіцієнт запасу. Вся деталь одного кольору та має запас міцності 15 (рис. 3.15), що показує здатність ланки витримувати навантаження.

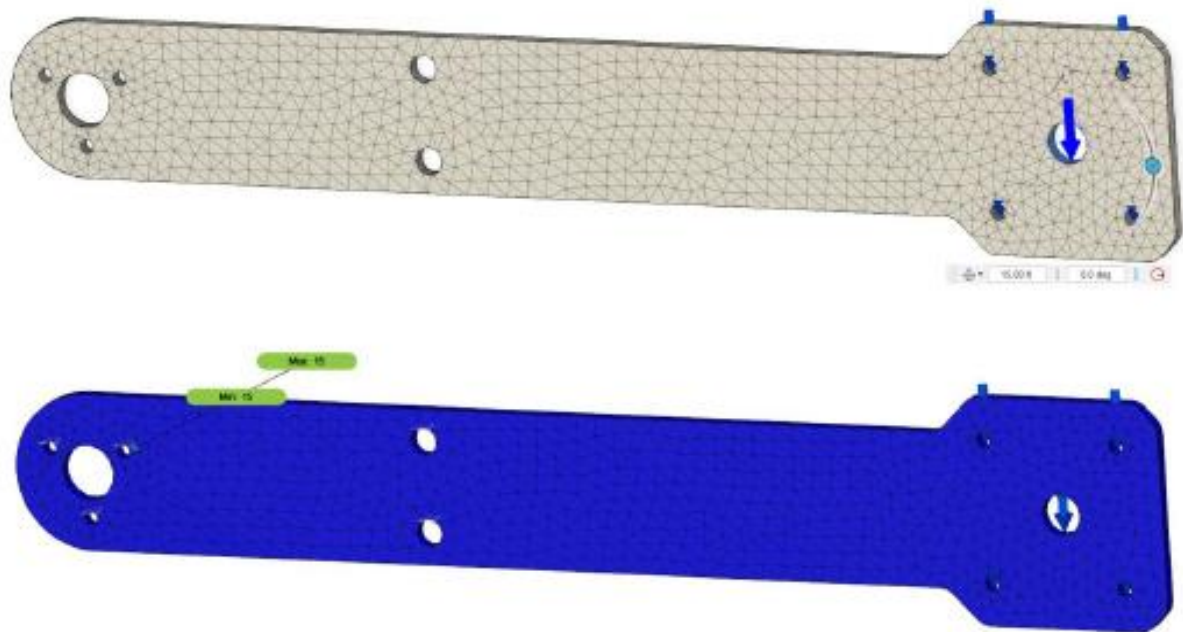


Рисунок 3.15 – Навантажена права частина ланки 4 та симуляція

Відповідним чином робимо навантаження лівої частини ланки 4 (рис. 3.16).

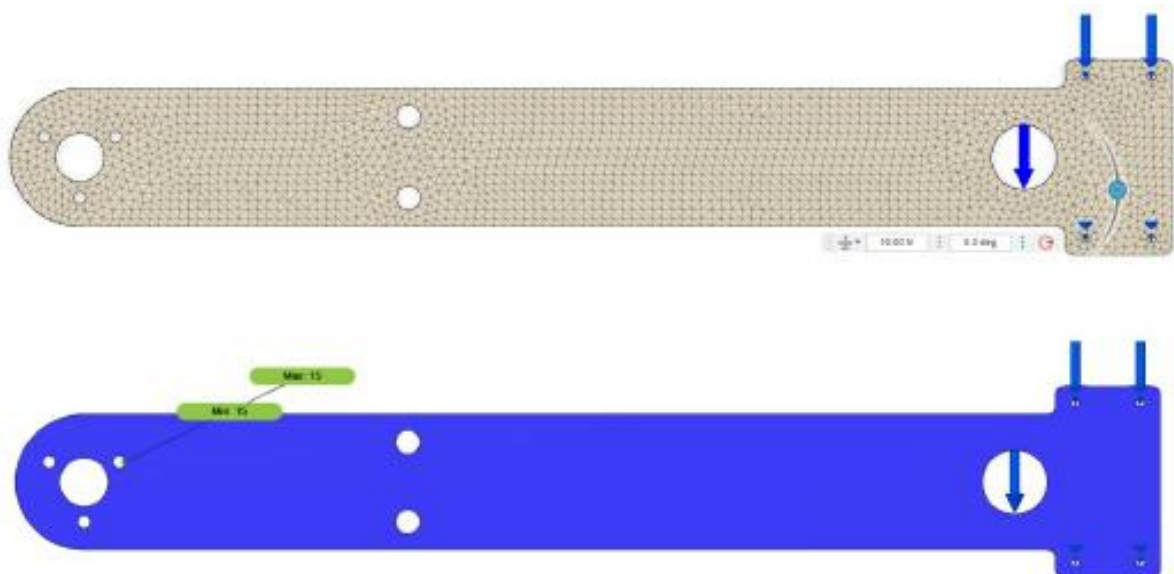


Рисунок 3.16 – Навантажена ліва частина ланки 4 та симуляція

Навантаження всіх наступних ланок буде мати накопичувальний характер. Якщо вихідна ланка 4 сприймала навантаження в 15 Н, то ланка 3 (рис. 3.14) буде сприймати сумарне навантаження обох ланок. Таким чином навантаження, яке сприймає ланка 3 буде складати $11\text{ Н} + 2\text{ Н} = 13\text{ Н}$, але для більшої безпеки буде прикладене навантаження в 16 Н. Симуляція навантаження вказана на рис. 3.17.

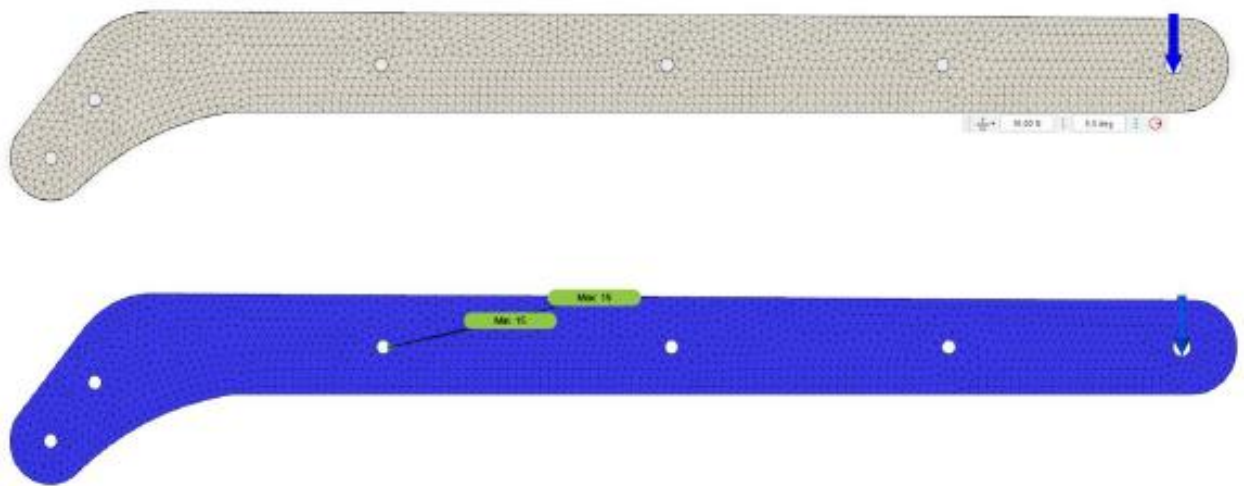


Рисунок 3.17 – Навантаження ланки 3 та симуляція

На рис. 3.17 бачимо, щоб деталь здатна легко витримувати навантаження і має високий коефіцієнт запасу.

Наступною деталлю для перевірки на номінальне навантаження є ланка 2 (рис. 3.18), яка повинна сприймати сумарне навантаження від всіх попередніх, тобто від 3-ї та 4-ї ланок.

Крім того вона має додаткове навантаження спричинене вагою лінійного актуатора та звичайно власною також. Отже, навантаження для перевірки буде складати (рис. 3.14) $16\text{ Н} + 4\text{ Н} + 2\text{ Н} = 22\text{ Н}$, для безпеки приймаємо 25 Н.

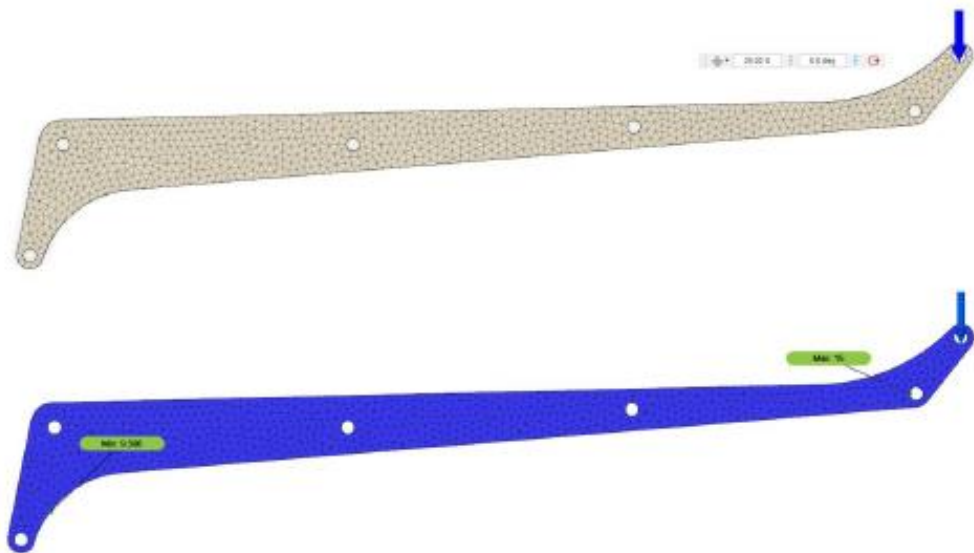


Рисунок 3.18 – Навантаження ланки 2 та симуляція

Можемо постерігати, що ланка легко сприймає встановлене навантаження, та має коефіцієнт запасу ваги щонайменше в 9 разів.

І останньою ланкою для перевірки є Ланка 1 (рис. 3.19), яка є основою маніпулятора. Вона сприймає найбільше навантаження, тому важливо правильно нагрузити та провести аналіз.

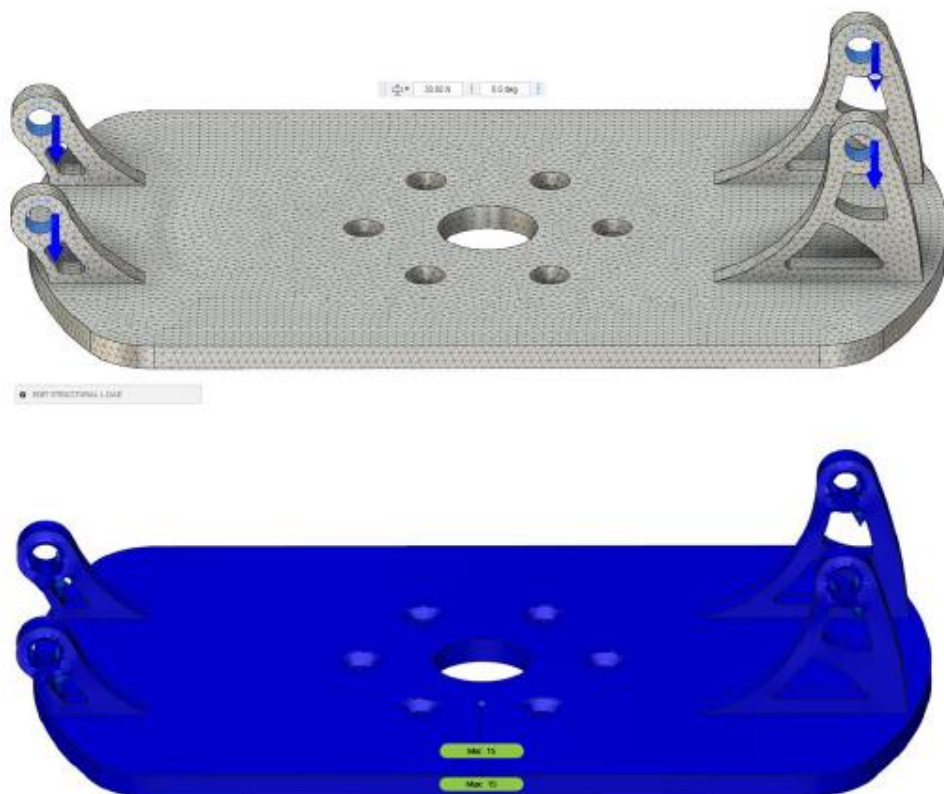


Рисунок 3.19– Навантаження ланки 1 та симуляція

Основне навантаження становить 25 Н, воно розподіляється між двома кріпильними виступами, але для забезпечення нормального сприйняття ланкою навантаження, вирішено перевірити кожен з кріпильних отворів на максимально можливе, тобто 30 Н.

3.4 Висновки по розділу

Проведений аналіз (рис. 3.19) показує, що деталь витримує навіть надмірні навантаження із забезпеченням високого коефіцієнту запасу, а саме 15.

В цьому розділі були проведені навантаження та перевірка на міцність усіх ланок маніпулятора. Результатами більшості перевірок є надзвичайно високі коефіцієнти запасу, що може свідчити про надмірне використання матеріалу, який застосовується.

4 ОПТИМІЗАЦІЯ ФОРМИ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЇ

4.1 Методика моделювання удосконаленої геометричної моделі деталі за допомогою генеративного дизайну

Для можливості практичного використання генеративного дизайну з метою створення удосконаленої геометричної моделі деталі розроблено відповідну методику.

Першим етапом є аналіз конструкції деталі та умов її експлуатації.

На основі інформації виконується побудова твердотільної 3D моделі деталі в будь якій системі автоматизованого проектування з можливістю збереження її у форматі STP. Адже, формат STP (STEP формат) є універсальним форматом представлення даних (тривимірні моделі, креслення, специфікації) в системах автоматизованого проектування (CAD-систем).

Всі STEP моделі, які генеруються в CAD системі, підкоряються вимогам стандартів ISO 10303.

Формат STP широко застосовується в самих різних галузях промислового виробництва, включаючи автомобілебудування, кораблебудівну індустрію, і навіть аерокосмічну сферу. Універсальність – це головна перевага формату STP. Робота з файлами STP особливо ефективна при реалізації проекту групою фахівців: 3D моделі окремих конструктивних елементів виробу, що створені в різних САПР, можуть бути універсалізовані та зібрані в окрему складальну одиницю.

Далі проводиться аналіз напружено-деформованого стану деталі з початковою геометрією.

В результаті аналізу маємо потрібну інформацію про напружено-деформований стан деталі.

Далі виконується моделювання удосконаленої геометричної моделі

деталі за допомогою генеративного дизайну в САПР.

4.2 Оптимізація форми основи

Генеративний дизайн – це метод оптимізації, який використовує алгоритмічні моделі для оптимізації компонування матеріалу в межах визначеного користувачем простору для заданого набору навантажень, умов і обмежень.

ТО максимізує продуктивність та ефективність конструкції, видаляючи зайвий матеріал із ділянок, які не потребують значних навантажень, щоб зменшити вагу або вирішити такі завдання, як зменшення резонансу або теплового навантаження. Конструкції, створені з оптимізацією топології, часто включають вільні форми та складні форми, які складно або неможливо виготовити традиційними методами виробництва.

Однак конструкції ГД ідеально підходять для адитивних виробничих процесів, які мають більш спрощені правила проектування і можуть легко відтворювати складні форми без додаткових витрат.

Оптимізація форми ГД зазвичай відбувається в кінці процесу проектування, коли бажана частина повинна мати меншу вагу або використовувати менше матеріалів.

Потім конструктор працює, щоб виявити певні попередньо встановлені параметри, такі як прикладені навантаження, тип матеріалу, обмеження та компонування. Оптимізація структурної форми спочатку визначає мінімально допустимий простір для проектування, необхідний для оптимізації форми виробу. Потім, практично, програмне забезпечення для оптимізації форми застосовує тиск на проект під різними кутами, перевіряє його структурну цілісність і визначає непотрібний матеріал.

Найпоширенішим і практичним методом оптимізації форми є метод скінченних елементів (FEM). По-перше, FEM враховує геометричний дизайн для мінімального дозволеного простору – разом з іншими факторами – і

розбиває проект на частини. Потім він перевіряє кожен кінцевий елемент на жорсткість, відповідність і надлишковий матеріал. Нарешті, FEM зшиває частини разом, щоб завершити повний дизайн.

Перевірка проекту включає визначення порогу для поля щільності елемента між значенням від 0 до 1. Значення 0 скасовує матеріал у визначеній ділянці конструкції, тоді як значення 1 визначає призначену область як твердий матеріал. Потім дизайнер може видалити з моделі весь непотрібний матеріал і завершити оптимізацію топології [26].

Отже для зменшення маси кожної з ланок нам потрібно провести аналіз та оптимізацію форми. Для проведення аналізу скористуємось середовищем автоматизованого програмного керування Autodesk Fusion 360, а саме плагіном Simulation: Shape Optimization.

Навантаження встановлюємо ідентичні попереднім дослідом та спостерігаємо за градацією показаною на рис. 4.1. Бачимо, що більша частина об'єму синього кольору, що свідчить про його непотрібність у використанні.

На рис. 4.1 (3) видно, що прибраний матеріал, який не приймав участі у розподіленні навантаження. Якщо подивитися на шкалу справа, то бачимо, що навантаження повністю сприймається деталлю на лише 40% об'єму, тому є можливість змінити, модифікувати форму деталі та зробити її більш раціональною у використанні ресурсів.

Взагалі зменшення маси із збереження міцності та стійкості є одною із головних задач в аерокосмічній промисловості, оскільки кожен грам важливий та може стати причиною більших витрат палива.

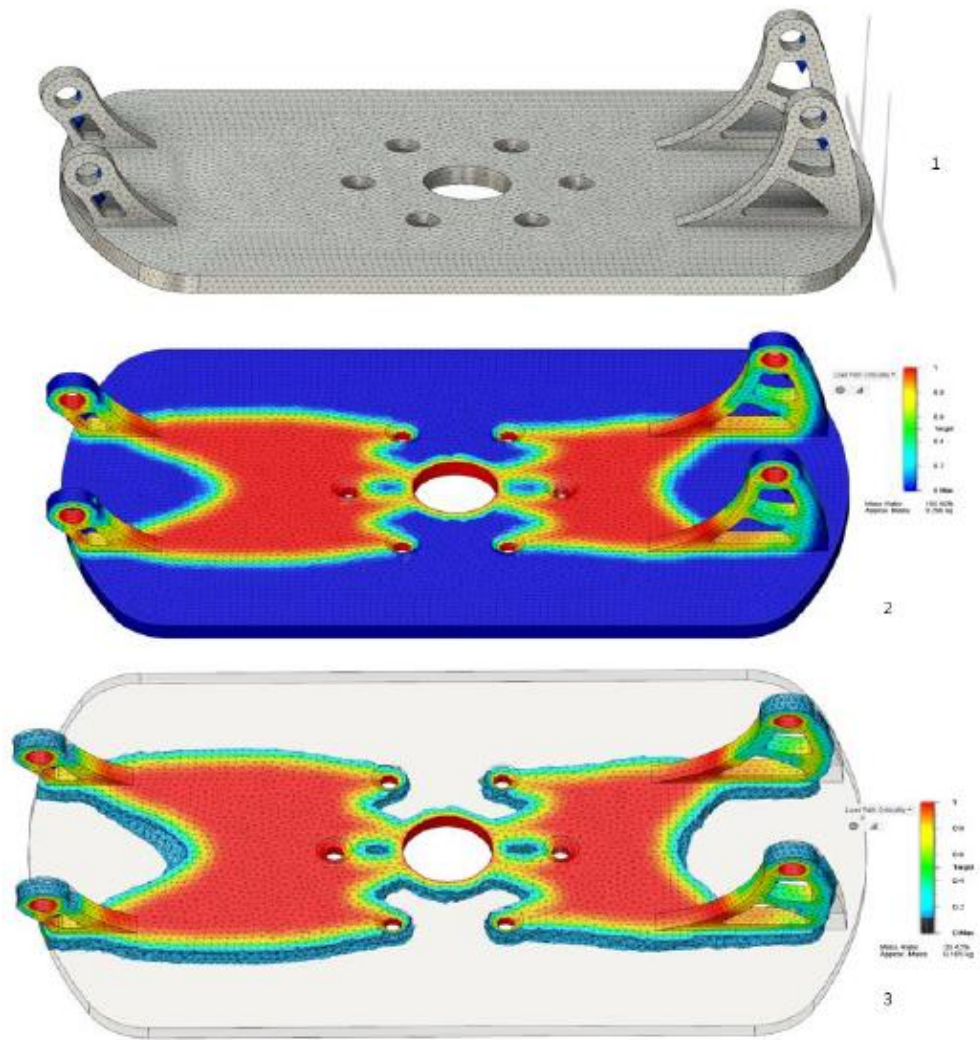


Рисунок 4.1 – Результати топологічного аналізу ланки 1

В результаті оптимізації було зменшено використання матеріалу на 55%, маса змінилась з 266 г на 120 г (рис. 4.2) та збережено всі показники міцності, коефіцієнт запасу 15.

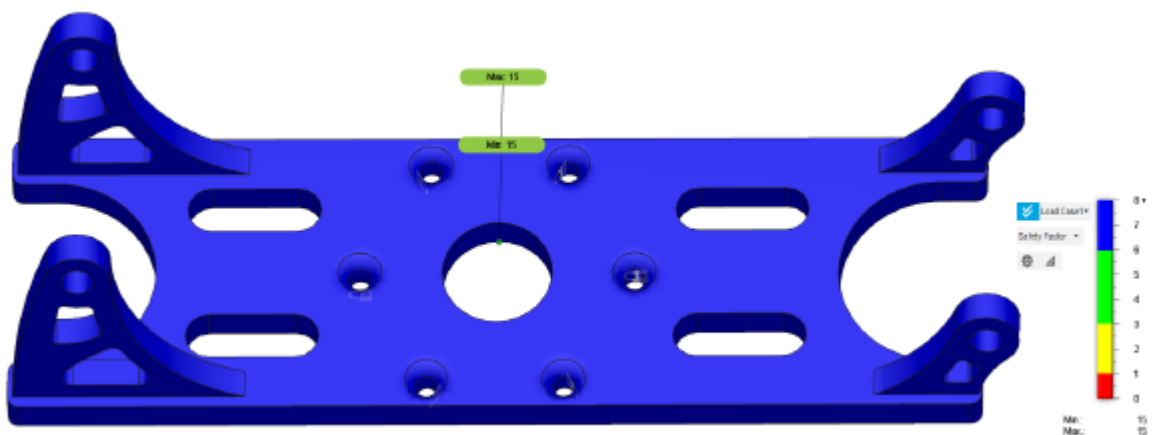


Рисунок 4.2 – Оптимізована ланка 1

4.3 Оптимізація форми ланок

На рисунку 4.3 показано процес оптимізації ланки 2. Результатом є зменшена в плані ваги ланка (рис. 4.3, 3) від 82 г до 57 г, тобто зменшено масу на 31%.

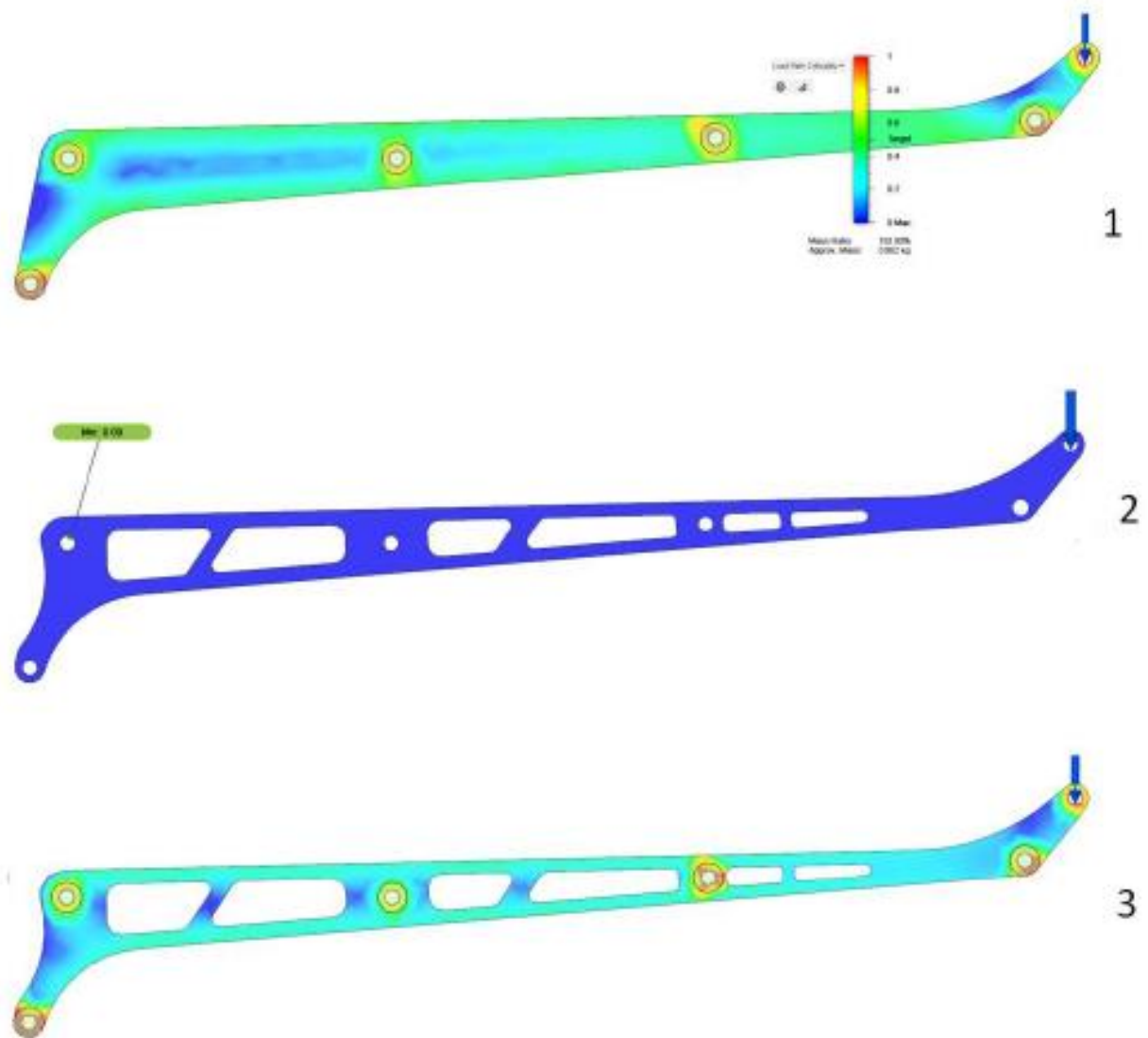


Рисунок 4.3 – Оптимізація ланки 2

На рисунку 4.4 показано процес оптимізації ланки 3. Результатом є зменшена в плані ваги ланка (рис. 4.4, 3) з 188 г до 110 г, тобто зменшено масу на 39%.

Варто відмітити зручність використання Autodesk Fusion 360, він

здатен виконувати симуляції не лише для плоских деталей, і не лише для статичного навантаження, він дає широкі можливості для симуляції, як температурного так і вітрового навантаження. Інтерфейс є інтуїтивним та дуже зручним у використанні.

Більше того всі процеси розрахунків можливо проводити у хмарі, що також є великою перевагою, тому що для аналізу тепер не потрібен надпотужний пристрій, достатньо звичайного планшета.

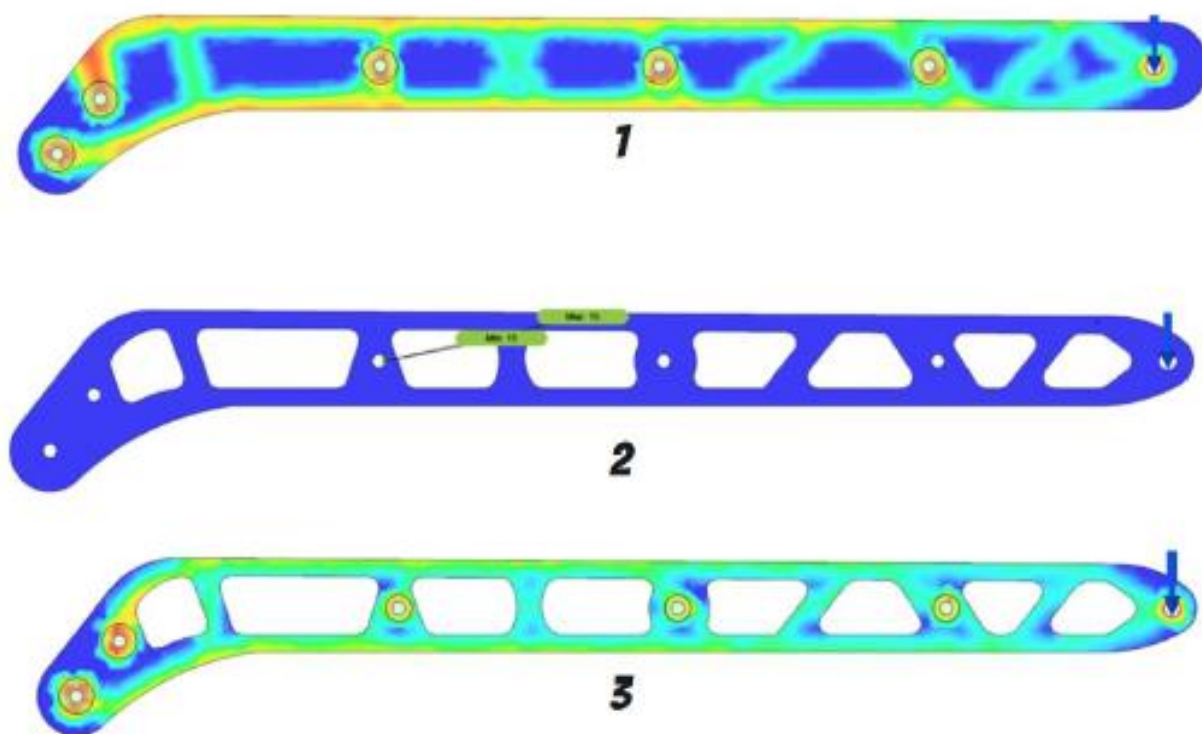


Рисунок 4.4 – Оптимізація ланки 3

На рисунку 4.5 показано процес оптимізації правої частини ланки 4. Результатом є зменшена в плані ваги ланка (рис. 4.5, 3) з 77 г до 52 г, тобто зменшено масу на 33%.

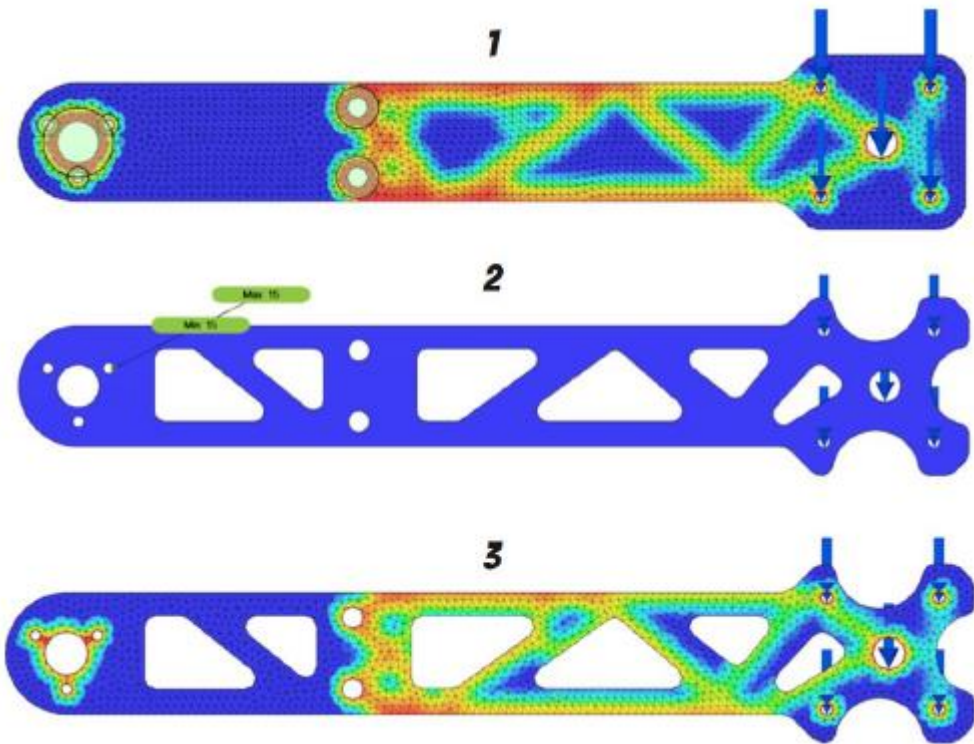


Рисунок 4.5 – Оптимізація правої частини ланки 4

На рисунку 4.6 показано процес оптимізації лівої частини ланки 4. Результатом є зменшена в плані ваги ланка (рис. 4.6, 3) від 77 г до 47 г, тобто зменшено масу на 39% та оптимізовано форму додаткової ланки 4 на рис 4.7.

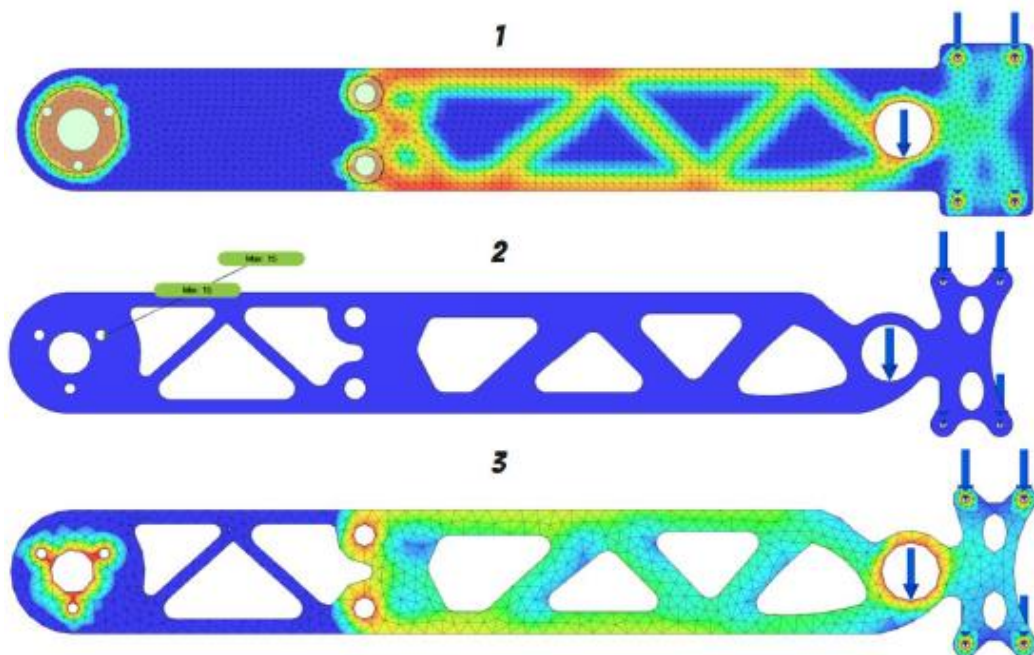


Рисунок 4.6 – Оптимізація лівої частини ланки №4

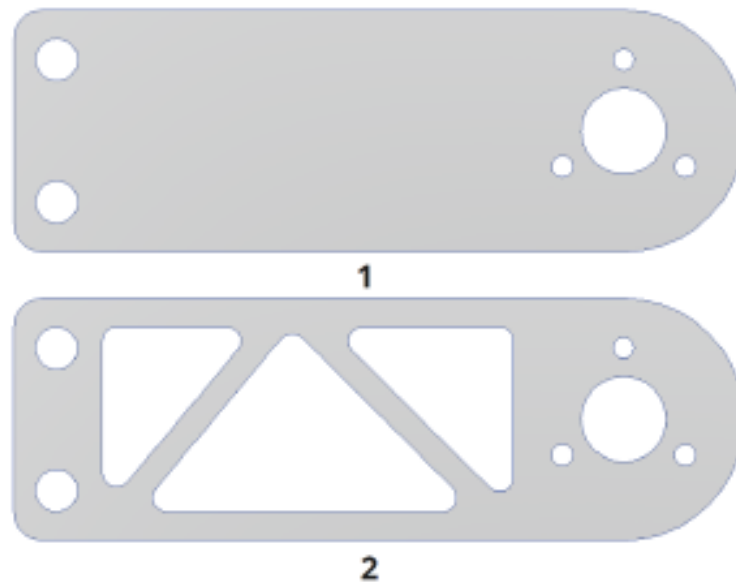


Рисунок 4.7 – Оптимізація форми допоміжної ланки 4

4.4 Фінальна конструкція маніпулятора

Фінальна конструкція включає в себе: 7 основних та 6 допоміжних ланок, 2 лінійних актуатора, 3 крокових двигуна Nema 17, 2 мотор-редуктора, захоплювального механізму, кріпильних елементів.

Конструкція є плоским механізмом, який обертається навколо вертикальної осі за допомогою двигуна, розміщеного в основі маніпулятора.

Маніпулятор витримує очікувані навантаження та відповідає заданим вимогам щодо рухомості та розмірів у складеному, закріпленому на платформі маніпулятора, вигляді. На рис. 4.8 зображено маніпулятор закріплений на платформі до проведення оптимізації, сумарна вага ланок складала 1060 г.

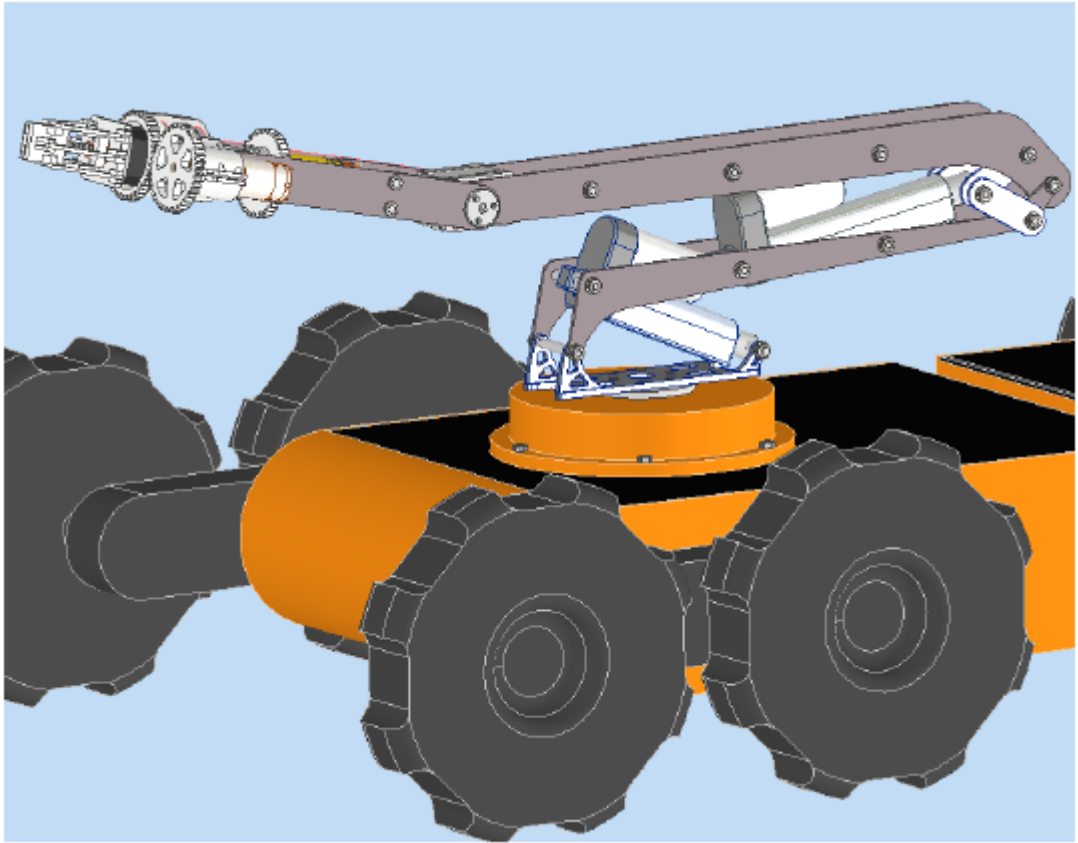


Рисунок 4.8 – Маніпулятор до оптимізації ланок

Після оптимізації конструкція зменшила свою масу (рис. 4.9), проте зберегла необхідну міцність. Така форма ланок додає не лише раціональності у використанні матеріалу, а й естетичного вигляду.

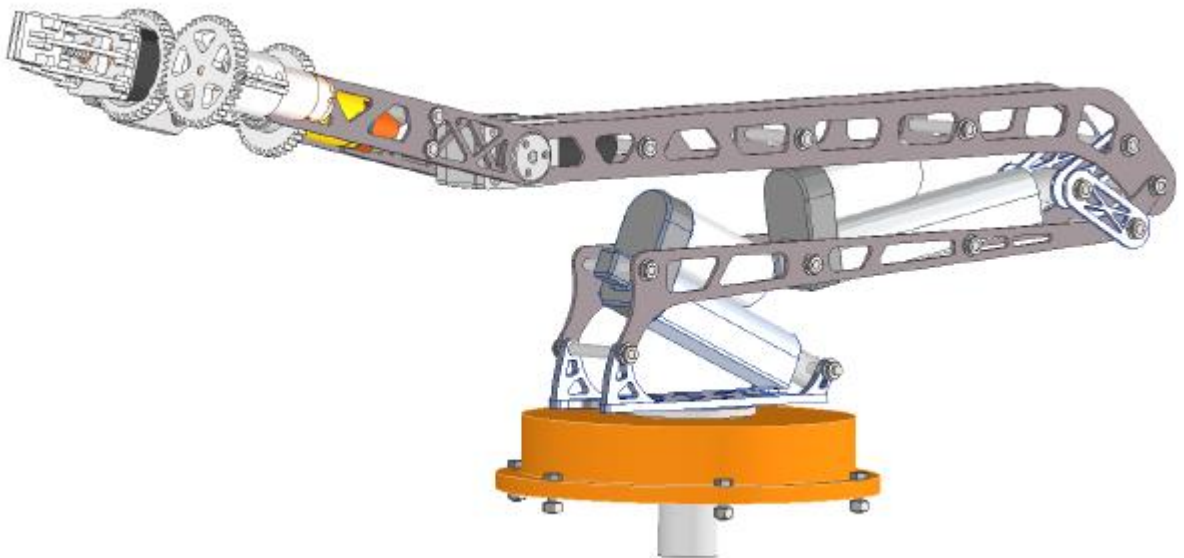


Рисунок 4.9 – Маніпулятор після оптимізації ланок

Отже в результаті оптимізації форми ланок було досягнуто значних змін у формі та вазі маніпулятора. Вдалося зменшити сумарну масу ланок ПР від 1060 г (рис 4.8) до 601 г (рис. 4.9), тобто загальна маса зменшилась на 41,5%.

4.5 Питання забезпечення безпечних умов роботи інженера-дослідника при проведенні дослідницької діяльності за допомогою ПК

Суб'єктом в роботі розглядається інженер-дослідник, який здійснює проектування модуля РТС та їх удосконалення. На основі аналізу отриманих даних, інженер проводить дослідження, що дозволять покращити конструкцію.

Оскільки аналіз отриманих результатів здійснюється за допомогою персонального комп'ютера, то в процесі виконання посадових обов'язків на інженера-дослідника можуть впливати шкідливі та небезпечні виробничі фактори, які призводять до серйозних проблем фізичного та психологічного характеру.

Необхідність розробки заходів з охорони праці для інженера-дослідника пояснюється тим, щоб забезпечити безпечні та нешкідливі умови праці, оскільки не дотримання умов праці призводить до передчасного стомлення інженерадослідника та зниження продуктивності праці.

При проведенні дослідницької діяльності в приміщенні лабораторії на інженера-дослідника впливають наступні небезпечні і шкідливі виробничі фактори:

- низька чи занадто висока освітленість виробничого приміщення (штучне та природне освітлення);
- високий рівень статичної електрики;
- неналежна зміна мікроклімату: температура, вологість, швидкість руху повітря, теплове випромінювання;
- неіонізуючі електромагнітні поля і випромінювання:

електромагнітні випромінювання радіочастотного діапазону;

– шум і вібрації.

Робота користувачів ПК характеризується значним напруженням зорового аналізатора, тому важливе значення має забезпечення раціонального освітлення робочих місць. Згідно «Правил охорони праці під час експлуатації електроннообчислюваних машин», освітлення у приміщеннях з ПК має бути змішаним (природне і штучне).

Природне світло повинно проникати через бічні світлопрорізи, зорієнтовані, як правило, на північ чи північний схід. Вікна приміщень повинні мати регульовані пристрої для відкривання, а також жалюзі, штори зовнішні, зовнішні козирки тощо. У лабораторії де виконуються роботи інженером-дослідником спостерігається нестача природного світла обумовлена тим, що робоче місце знаходиться далеко від джерела природного освітлення.

Штучне освітлення передбачається в усіх виробничих та побутових приміщеннях, де недостатньо природного світла, а також для освітлення приміщень у темний період доби. Штучне освітлення здійснюється за допомогою системи загального рівномірного освітлення і через екрани комп'ютера. Згідно з Державними будівельними нормами ДБН-В.2.5-28- 2006 «Природне і штучне освітлення» на робочому місці інженера-дослідника нормативне значення освітленості має бути в межах 300 – 750 Лк.

Фактичне значення освітленості складає 220 – 270 Лк. Це пов'язане із застарілістю системи освітлювання. У відповідності до норм штучного та природного освітлення приміщень (ДБН В.2.5-28-2006), рівень освітлення під час роботи за ПК, що відноситься до класу робіт «середньої точності» повинен складати – 400 Лк. Для штучного освітлення в даному випадку найкраще підходять LED-лампи, які мають один з найвищих показників світловіддачі.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі було проведено пошук оптимальної конструкції маніпулятора МР з використанням методу генеративного моделювання. Цей метод передбачає отримання однієї або декількох конструкцій маніпулятора з різних матеріалів для забезпечення максимально необхідної жорсткості при меншій масі.

У процесі написання НДР існуючих технологій з оптимізації проектування конструкцій маніпуляторів МР. Було розглянуто технологію генеративного дизайну та топологічної оптимізації. У ході аналізу було зазначено, що генеративний підхід є більш простим, ніж стандартний, оскільки він створює органічні, оптимізовані рішення, хоча обидва підходи мають однакову базову концепцію. Крім того, на відміну від ТО, ГД не вимагає готової 3D-моделі. Програма створює прототип з нуля по обмеженнях, заданих проектувальником. ГД дозволяє замінити вузол з декількох деталей, на вузол з однієї деталі, котрий буде працювати як мінімум не гірше, а то і краще.

Також було проведено аналіз та обрано САПР для проведення топологічної оптимізації та застосування технологій генеративного проектування. Після проведеного аналізу було вирішено, що дослідження в даній роботі буде проводитися із застосуванням функцій генеративного дизайну у двох САПР – Fusion 360 та Solid Edge.

Для досягнення поставленої мети спочатку було наведено початкову інформацію для дизайну та проведені навантаження та перевірка на міцність усіх ланок маніпулятора. Результатами більшості перевірок є надзвичайно високі коефіцієнти запасу, що може свідчити про надмірне використання матеріалу, який застосовується.

Фінальним кроком було проведення оптимізації форми елементів конструкції. У результаті оптимізації форми ланок було досягнуто значних

змін форми та ваги ланокманіпулятора. Вдалося зменшити сумарну масу ланок МР від 1060 г (рис 4.8) до 601 г (рис. 4.9), тобто загальна маса зменшилась на 41,5%.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Дорошенко В. С. Топологічна оптимізація конструкцій виливків при адитивному виробництві з застосуванням цифрового двійника. Процеси лиття. 2020. № 4 (142) 53-62

2. Механика промышленных роботов: Учеб. пособие для вузов: В 3 кн./Под ред. К. В. Фролова, Е. И. Воробьева. Кн. 3: Основы конструирования/Е. И. Воробьев, А. В. Бабич, К. П. Жуков и др.—М.: Высш. шк., 1989.— 383 с.

3. Детали и механизмы роботов: Основы расчета, конструирования и технологии производства: Учеб. пособие / Р. С. Веселков, Т. Н. Гонтаровская, В. П. Гонтаровский и др.; под ред. Б. Б. Самотокина. К. : В.шк., 1990. 343 с.

4. Методичні вказівки з підготовки та захисту кваліфікаційної роботи здобувачами другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології, освітньо-професійних програм: «Автоматизоване управління технологічними процесами», «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва», «Комп'ютеризовані та робототехнічні системи» / Упоряд. І. Ш. Невлюдов, Р. В. Артюх, В. В. Безкоровайний, Н. П. Демська, В. В. Євсєєв, О. І. Филипенко, О. М. Цимбал. – Харків: ХНУРЕ, 2021. – 65 с.

5. ДСТУ 3008: 2015. Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення. К.: ДП “УкрНДНЦ”. 2016. 30 с.

6. Гаврик С. С., Кострова Г. Ю. Моделювання корпусу багатоцільової мобільної робототехнічної платформи з удосконаленими маніпуляційними можливостями. Автоматизація та приладобудування («Automation and Development of Electronic Devices» ADED-2021) [Електронний ресурс]: збірник студентських наукових статей [редкол.: І.Ш. Невлюдов та ін.]. Харків : ХНУРЕ, 2021. Вип. 2. С. 79–84.

7. Moussavi, S. M., Svatoš-Ražnjević, H., Körner, A., Tahouni, Y., Menges,

A., & Knippers, J. (2022). Design based on availability: Generative design and robotic fabrication workflow for non-standardized sheet metal with variable properties. *International Journal of Space Structures*, 37(2), 119-134.

8. Briard, T., Segonds, F., & Zamariola, N. (2020). G-DfAM: a methodological proposal of generative design for additive manufacturing in the automotive industry. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 14(3), 875-886.

9. Buonamici, F., Carfagni, M., Furferi, R., Volpe, Y., & Governi, L. (2021). Generative Design: An Explorative Study. *Computer-Aided Design & Applications*, 18(1), 2021, 144-155

10. Autodesk generative design used on electric VW bus concept, <https://www.pesmedia.com/autodesk-generative-design-fusion-360-volkswagen-vw-bus/>, Autodesk.

11. Autodesk Robot Gripper Arm Design Challenge | Engineering & Design Challenges, <https://grabcad.com/challenges/autodesk-robot-gripper-arm-design-challenge>, GrabCAD.

12. Cloud Powered 3D CAD/CAM Software for Product Design | Fusion 360, <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/overview>, Autodesk.

14. 6 Examples of Generative Design in Manufacturing, <https://www.autodesk.com/redshift/generative-manufacturing/>, Autodesk

15. Serhii Strutynskyi, Roman Semenchuk, «INVESTIGATION OF THE ACCURACY OF THE MANIPULATOR OF THE ROBOTIC COMPLEX CONSTRUCTED ON THE BASIS OF CYCLOIDAL TRANSMISSION» DOI: 10.15587/2706-5448.2021.237326

16. Khan, S., & Awan, M. J. (2018). A generative design technique for exploring shape variations. *Advanced Engineering Informatics*, 38, 712-724.

17. Vlah, D., Žavbi, R., & Vukašinović, N. (2020, May). Evaluation of topology optimization and generative design tools as support for conceptual design. In *Proceedings of the design society: DESIGN conference* (Vol. 1, pp. 451-460). Cambridge University Press.

18. Valme, D., Kudelina, K., Belolipetskaja, D., Rassölkin, A., Vaimann, T., & Kallaste, A. (2021, January). Generative Design in Weight Optimization of Reconfigurable Continuous Track Robot. In *2021 28th International Workshop on Electric Drives: Improving Reliability of Electric Drives (IWED)* (pp. 1-6). IEEE.

19. Malgıt, B., Işıkdag, Ü., Bekdaş, G., & Yücel, M. (2022). A generative design-to-BIM workflow for minimum weight plane truss design. *Revista de la construcción*, 21(2), 473-492.

20. Kumaran, M., & Senthilkumar, V. (2021). Generative Design and Topology Optimization of Analysis and Repair Work of Industrial Robot Arm Manufactured Using Additive Manufacturing Technology. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 1012, No. 1, p. 012036). IOP Publishing.

21. Isakhani, H., Bellotto, N., Fu, Q., & Yue, S. (2021). Generative design and fabrication of a locust-inspired gliding wing prototype for micro aerial robots. *Journal of Computational Design and Engineering*, 8(5), 1191-1203.

22. Jang, S., Yoo, S., & Kang, N. (2022). Generative design by reinforcement learning: enhancing the diversity of topology optimization designs. *Computer-Aided Design*, 146, 103225.

23. Rajput, S., Burde, H., Singh, U. S., Kajaria, H., & Bhagchandani, R. K. (2021). Optimization of prosthetic leg using generative design and compliant mechanism. *Materials Today: Proceedings*, 46, 8708-8715.

24. Shrestha, P. R., Timalina, D., Bista, S., Shrestha, B. P., & Shakya, T. M. (2021, September). Generative design approach for product development. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2397, No. 1, p. 020008). AIP Publishing LLC.

25. Tran, T. H. T., Nguyen, D. S., Vo, N. T., & Le, H. N. (2020, November). Design of Delta Robot Arm based on Topology optimization and Generative Design Method. In *2020 5th International Conference on Green Technology and Sustainable Development (GTSD)* (pp. 157-161). IEEE.

26. Gowtham, V. K., Sidharth, B. S., Schilberg, D., & Doss, A. S. A. (2023).

Optimization of a Robotic Arm Using Generative Design. In *Recent Advances in Materials Technologies* (pp. 347-369). Springer, Singapore.

27. Srinivasan, N., Sanyal, A., Bheda, T., & Harshwardhan, L. (2022, October). Design development and optimization of disc brake using generative design on fusion 360. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2653, No. 1, p. 020016). AIP Publishing LLC.

28. Ntintakis, I., Stavroulakis, G. E., Sfakianakis, G., & Fiotodimitrakis, N. (2022). Utilizing Generative Design for Additive Manufacturing. In *Recent Advances in Manufacturing Processes and Systems* (pp. 977-989). Springer, Singapore.

29. Junk, S., & Burkart, L. (2021). Comparison of CAD systems for generative design for use with additive manufacturing. *Procedia CIRP*, 100, 577-582.

30. Altuna-Galfarsoro, I., Serrano-Muñoz, A., Alfaro, I. C., Aurrekoetxea, J., & Arana-Arexolaleiba, N. (2021, June). Generative design of 3D printed grippers for robot/human collaborative environments. In *2021 IEEE International Workshop of Electronics, Control, Measurement, Signals and their application to Mechatronics (ECMSM)* (pp. 1-5). IEEE.