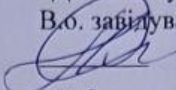


НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»  
Приладобудівний факультет  
Кафедра виробництва приладів

«На правах рукопису»  
УДК 629.7

«До захисту допущено»

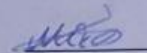
В.о. завідувача кафедри

 Антонюк В.С.

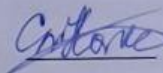
«10» 12 2020р.

Магістерська дисертація  
на здобуття ступеня магістра  
за освітньо-професійною програмою  
«Комп'ютерно-інтегровані технології виробництва приладів»  
зі спеціальності 151 – «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані  
технології»  
на тему: Автоматизація проєктування технології виготовлення  
конструкції каркасного типу на базі топологічної оптимізації

Виконав:  
студент II курсу, групи ПБ-91мп  
Мастенко І.В.



Науковий керівник:  
к.т.н., доц. Стельмах Н.В.

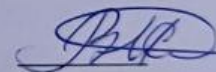


Консультант з розробки стартап-проєкту:  
д.е.н., доцент Бояринова К.О.



Рецензент:

к.т.н., доцент кафедри оптичних та  
оптико-електронних приладів  
Сокурченко В.М.



Засвідчую, що у цій магістерській  
дисертації немає запозичень з праць  
інших авторів без відповідних  
посилань.

Студент



Київ – 2020 року

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

Приладобудівний факультет  
Кафедра виробництва приладів

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність 151 – «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Освітньо-професійна програма - «Комп'ютерно-інтегровані технології  
виробництва приладів»

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувач кафедри

 Антонюк В.С.  
(підпис) (ініціали, прізвище)

26 / 10 2020 р.

**ЗАВДАННЯ**

**на магістерську дисертацію студенту**

Мастенку Ігорю Володимировичу

(прізвище, ім'я, по батькові)


1. Тема дисертації «Автоматизація проектування технології виготовлення конструкції каркасного типу на базі топологічної оптимізації», науковий керівник дисертації Стельмах Наталія Володимирівна, к.т.н., доцент, затверджені наказом по університету від «15» листопада 2020 р. №3228-с
2. Термін подання студентом дисертації 7 грудня 2020р.
3. Об'єкт дослідження: Конструкторсько-технологічне підготвлення механо-складального виробництва виробів каркасного типу.
4. Предмет дослідження: Автоматизація процесів конструкторського-технологічного підготвлення механо-складального виробництва виробів каркасного типу.
5. Перелік завдань, які потрібно розробити: виконати аналіз конструктивних рішень типового виробу каркасного типу; встановити нові конструкторсько-технологічні обмеження на виріб та ввести необхідні корективи в

технологічний процес виготовлення; виконати САЕ аналіз нової конструкторської моделі на визначення розподілу граничних навантажень на конструкцію; відкоригувати отриману топологічно-оптимізовану модель засобами CAD; спроектувати новий технологічний процес виготовлення виробу на базі відкоригованої 3D-моделі; розробити стартап-проект, для можливого представлення розробки на ринку.

6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу: 3D-модель виробу каркасного типу; технологічний процес виготовлення елементів конструкції; структурна схема складання виробу каркасного типу; технологічна схема складання виробу каркасного типу; встановлені конструкторсько-технологічні обмеження; оптимізована 3D-модель виробу.

7. Орієнтовний перелік публікацій: статті доповідей (надано в додатку у вигляді форми 2б)

8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 4. Розробка стартап-проекту <b>«Автоматизація проектування технології виготовлення конструкції каркасного типу на базі топологічної оптимізації»</b>	Бояринова К.О., д.е.н., доцент		

9. Дата видачі завдання 10.09.2020р

## Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Виконати аналіз конструктивних рішень типового виробу каркасного типу	11.09.2020	виконано <i>С.М.</i>
2	Встановити нові конструкторсько-технологічні обмеження на виріб та внести необхідні корективи в технологічний процес виготовлення	21.09.2020	виконано <i>С.М.</i>
3	Виконати САЕ аналіз конструкторської моделі на визначення розподілу граничних навантажень	05.10.2020	виконано <i>С.М.</i>
4	Відкоригувати отриману топологічно оптимізовану модель засобами CAD систем забезпечивши початкові конструкторсько-технологічні вимоги	19.10.2020	виконано <i>С.М.</i>
5	Спроекувати новий технологічний процес виготовлення виробу на базі відкоригованої моделі	09.11.2020	виконано <i>С.М.</i>
6	Розробити стартап-проект, для можливого представлення на ринку	23.11.2020	<i>С.М.</i>
7	Оформлення пояснювальної записки та графічної частини проекту	03.12.2020	<i>С.М.</i>

Студент

*С.М.*  
(підпис)

Мастенко І.В.

Науковий керівник дисертації

*С.М.*  
(підпис)

Стельмах Н.В.

## Анотація

Метою дисертаційного дослідження є зменшення маси конструкції каркасного типу методами топологічної оптимізації та проектування ТП виготовлення для нових топологічно-оптимізованих елементів конструкції з урахуванням всіх конструкторсько-технологічних обмежень.

Магістерська дисертація складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаної літератури, та додатків представлених кресленнями, програмними кодами, специфікацією, технологічною та структурною схемами складання оптимізованого виробу.

У вступі було обґрунтовано актуальність проблематики, сформульовано мету роботи, визначено об'єкт та предмет дослідження, а також наведено практичну цінність дисертаційного дослідження.

Призначення конструкції, її особливості, сфери застосування, початкові матеріали, було розглянуто у першому розділі. Проаналізовано методи топологічної оптимізації, виконано огляд наукових досліджень проблематики.

У другому розділі дисертації обґрунтовано та прийнято нові конструкторсько-технологічні рішення для конструкції. Всі необхідні граничні умови, силові навантаження на конструкцію було встановлено. Виконано САЕ аналіз в результаті чого отримано нову топологічну оптимізовану модель конструкції.

Третій розділ присвячено розробці технології виготовлення конструкції, а саме коригуванню ТП виготовлення для нової конструкції. В результаті було розроблено розгортки для елементів конструкції, та згенеровано відповідні коди керуючих програм. А також розроблено технологічну та структурну схеми складання а також маршрутну-операційну технологію засобами САПР.

У четвертому розділі виконано розробку стартап-проекту виготовлення конструкції каркасного типу. Представлено опис проекту, з аналізом можливостей виходу проекту на ринок.

Ключові слова: маса, топологічна оптимізація, конструкція, топологічний процес.

## ABSTRACT

The purpose of the dissertation research is to reduce the weight of the frame-type structure by methods of topological optimization and design of the manufacturing process for new topologically-optimized structural elements, taking into account all design and technological limitations.

The master's dissertation consists of an introduction, four chapters, conclusions, a list of references, and appendices, which are represented by drawings, scans of structural elements, program codes, specifications, technological and structural schemes of the optimized product.

In the introduction the urgency of the problem was substantiated, the purpose of the work was formulated, the object and subject of the research were determined, and the practical value of the dissertation research was given.

The purpose of the structure, its features, scope, initial materials, were presented in the first section. Methods of topological optimization are also analyzed and a review of modern scientific research on this issue is performed.

In the second section of the dissertation new design and technological solutions for structural elements are substantiated and made. All the necessary limit conditions, power loads on the structure were also set. CAE analysis was performed, resulting in a new topologically optimized design model.

The third section is devoted to the development of manufacturing technology, namely the adjustment of the manufacturing process for a new design. As a result, scans were developed for structural elements, and the corresponding control program codes were generated. And also the technological and structural schemes of assembly and also route-operational technology by means of CAD are developed.

In the fourth section, the development of a startup project for the manufacture of frame-type structures. A description of the project is presented, with an analysis of the project's market opportunities.

Keywords: mass, topological optimization, construction, topological process.

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	9
РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН РОЗВИТКУ МЕТОДІВ ТОПОЛОГІЧНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ ПРИ ВИРІШЕННІ КОНСТРУКТОРСЬКО- ТЕХНОЛОГІЧНИХ ЗАВДАНЬ .....	12
1.1 Аналіз конструкції каркасного типу .....	12
1.2 Огляд та аналіз методів топологічної оптимізації .....	17
1.3 Огляд сучасних наукових досліджень топології виробів та їх оптимізація .....	26
Висновки до розділу 1 .....	30
РОЗДІЛ 2. РОЗВИТОК МОДЕЛІ СКЛАДАЛЬНОГО ВИРОБУ І ТЕХНОЛОГІЇ СКЛАДАННЯ З УРАХУВАННЯМ КОНСТРУКТОРСЬКО- ТЕХНОЛОГІЧНИХ ОБМЕЖЕНЬ .....	31
2.1 Опис конструкції каркасного типу «Rackmount», .....	31
2.2 Обґрунтування та вибір конструкторсько-технологічних рішень для елементів конструкції .....	35
2.3 Проектування та підготовка нової 3D-моделі для оптимізації .....	38
2.4 Аналіз силових навантажень на конструкцію та встановлення граничних умов.....	40
2.5 Топологічно оптимізована модель конструкції каркасного типу .....	47
Висновки до розділу 2 .....	48
РОЗДІЛ 3. ПРОЕКТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИГОТОВЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ КАРКАСНОГО ТИПУ НА БАЗІ ТОПОЛОГІЧНО-ОПТИМІЗОВАНОЇ МОДЕЛІ .....	49
3.1 Розробка технологічного процесу виготовлення конструкції каркасного типу .....	49
3.2 Розробка керуючої програми для вирізання на верстатах з ЧПК .....	53
3.3 Технологічний процес складання конструкції каркасного типу.....	56
3.4 Оцінка ефективності удосконаленого технологічного процесу.....	60
Висновки до розділу 3 .....	61
РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ «АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЕКТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ КАРКАСНОГО ТИПУ НА БАЗІ ТОПОЛОГІЧНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ».....	62
4.1. Опис ідеї проекту .....	62
4.2 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту.....	65

4.3 Розроблення ринкової стратегії проекту .....	73
4.4 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту .....	76
Висновки до розділу 4 .....	79
<b>ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ДО РОБОТИ</b> .....	80
Список використаних джерел .....	82
Додаток А.....	87
Додаток Б .....	90
Додаток В.....	95
Додаток В.....	118

## **ВСТУП**

### **Актуальність теми**

Топологічна оптимізація - це математичний інструмент для оптимізованого розподілу матеріалів в об'єкті що проектується. Застосовуючи який, можна отримати більш складніші форми, з кращими показниками граничних навантажень.

Існують різні підходи до оптимізації топології виробів, розроблені протягом останніх трьох десятиліть. Наприклад, метод до встановленого рівня, метод гомогенізації, метод SIMP та метод задання різної щільності є одними з основних видів топологічної оптимізації. Застосування методу топологічної оптимізації почалось давно, однак існуючі на той час методи, не давали бажаного ефекту при такому проектуванні, оскільки були виробничі обмеження для отриманих оптимізованих конструкцій.

Однією із головних проблем у приладобудуванні є зменшення маси та матеріальних витрат при збереженні функціональних характеристик. Стрімкий розвиток адаптивного виробництва значно розширив можливості топологічної оптимізації при проектуванні нового виробу, або удосконалення уже існуючого. Поєднавши можливості 3Д – друку та креативність сучасних інженерів –конструкторів було отримано дуже цікаві результати оптимальних структур виробів де, зменшення маси досягалось до 40% від початкової.

### **Мета дослідження**

Підвищення ефективності проектування технології виготовлення конструкції каркасного типу на базі методу топологічної оптимізації, що забезпечить зменшення маси виробу, при збереженні всіх заданих функціональних показників.

### **Завдання магістерської дисертації**

1. Виконати аналіз конструктивних рішень типового виробу каркасного типу;

2. Встановити нові конструкторсько-технологічні обмеження на виріб та внести необхідні корективи в технологічний процес виготовлення конструкції каркасного типу;
3. Виконати CAE аналіз нової конструкторської моделі на визначення розподілу граничних навантажень на конструкцію при її експлуатації та на базі цього отримати нову топологічно оптимізовану модель;
4. Відкоригувати отриману топологічно оптимізовану модель засобами CAD систем забезпечивши початкові конструкторсько-технологічні вимоги;
5. Спроекувати новий технологічний процес виготовлення виробу на базі відкоригованої моделі;
6. Розробити стартап-проект, для можливого представлення на ринку.

#### **Об'єкт дослідження**

Конструкторсько-технологічне підготовлення механо-складального виробництва виробів каркасного типу.

#### **Предмет дослідження**

Автоматизація процесів конструкторського-технологічного підготовлення механо-складального виробництва виробів каркасного типу.

#### **Методи дослідження**

Базуються на використанні методів топологічної оптимізації та методах інженерного комп'ютерного проектування: CAD, CAM, CAE.

#### **Наукова новизна одержаних результатів**

Удосконалено методику зменшення маси виробу на базі організації та проведення конструкторсько-технологічних заходів, що включають в себе роботу з топологією 3D-моделей елементів конструкції та внесення відповідних коректив у технологічний процес виготовлення.

#### **Практичне значення одержаних результатів**

Запропонована удосконалена методика зменшення маси виробу забезпечила отримання результату на 56% зменшення маси від початкової та

дозволила знизити трудомісткість технологічного процесу виготовлення за рахунок його ефективної адаптації до нових технологічних умов.

### **Практична апробація**

Результати дисертаційного дослідження будуть впроваджені на підприємстві ТОВ «ДЕЛЬТА ПРЕМІУМ», про що отримано відповідний акт, який наведений у Додатку А.

Основні результати дисертаційних досліджень були висвітлені та обговорювались на наукових конференціях з публікацією тез доповідей:

XV Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Ефективність інженерних рішень у приладобудуванні», 10-11 грудня 2019 року.

XIII Науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Погляд у майбутнє приладобудування», 13-14 травня 2020 р., м. Київ,.

XVI Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Ефективність та автоматизація інженерних рішень у приладобудуванні», 8-9 грудня 2020 року.

Форму 26 наведено в Додатку А

# РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН РОЗВИТКУ МЕТОДІВ ТОПОЛОГІЧНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ ПРИ ВИРІШЕННІ КОНСТРУКТОРСЬКО- ТЕХНОЛОГІЧНИХ ЗАВДАНЬ

## 1.1 Аналіз конструкції каркасного типу

Конструкція каркасного типу «Rackmount» - це стандартизована конструкція або корпус для кріплення декількох модулів електронного обладнання (рис.1.1). Кожен модуль має передню панель шириною 19 дюймів (482,6 мм). Розмір 19 дюймів включає краї або "вушка", які виступають з кожної сторони обладнання, що дозволяє кріпити модуль до рами стійки гвинтами. Загальне використання включає комп'ютерні сервери, телекомунікаційне обладнання та мережеве обладнання, аудіовізуальне виробниче обладнання та наукове обладнання [1].

Дев'ятнадцять дюймових стійок у двопоюнїтовій або чотириюнїтовій формі вміщують більшість обладнання в сучасних центрах обробки даних, засобах провайдера та професійно оформлених корпоративних серверних кімнатах. Вони забезпечують щільну апаратну конфігурацію, не займаючи надмірної площі підлоги або вимагаючи стелажів.

Дев'ятнадцятидюймові стійки також часто використовуються для розміщення професійного аудіо- та відеообладнання, включаючи підсилювачі, модулі ефектів, інтерфейси, підсилювачі для навушників і навіть дрібні аудіоміксери. Третім загальним використанням обладнання, що монтується в стійку, є обладнання для промислового живлення, управління та автоматизації [2].



Рис. 1.1 Конструкція каркасного типу «Rackmount»

Встановлене в стійку обладнання традиційно монтується шляхом кріплення болтами або закріпленням його передньої панелі на стійці. Стійка виготовляється методом гнуття з листового металу, з попереднім вирізанням отворів на лазерному станку та нарізанням різьби, даний процес є трудомісткий але необхідним через те що висота рамки складається з певного формфактору.

Кожна стійка поділена на певні розмірні одиниці (юніти) висотою 37,45 мм (1,75 дюйма). Відповідно кожен юніт включає в себе три отвори, які рівновіддалені на 6,35 міліметрів (0,25 дюйма), 22,25 міліметрів (0,88 дюйма) та 38,15 міліметрів (1,50 дюйма) від верхньої або нижньої частини області. Така уніфікація широко відомий як U, для одиниці, RU для стійок або, німецькою мовою, HE, для Höheneinheit. Висота всередині стійок вимірюється типом. Обладнання, що монтується в стійку, зазвичай призначене для зайняття деякого цілого числа U. Наприклад, осцилограф може мати висоту 4U. Комп'ютери та сервери, що встановлюються в стійку, мають переважно висоту від 1U до 4U. Для корпусу блейд-сервера може знадобитися 10U[3-4].

Іноді можна побачити дробові U-пристрої, такі як сервер 1.5U, або пристрої, які мають ширину всього 22,5 або 15 см, що дозволяє встановлювати 2 або 3 такі пристрої поруч, але вони набагато рідше.



разів перевищують силу земного тяжіння. Крихкість приладу або частини обладнання зазвичай визначається лабораторними дослідженнями.

Шкала відношень сили «G» до стандартних приладів

1. 12 - 18 g's

Інерційне навігаційне обладнання (гіроскопи);

2. 18 - 25 g's

Електрооптичний (101 - 152 мм) та точне випробувальне обладнання;

3. 25 - 50 g's

Загальні електромеханічні, медико-біологічні, комп'ютери, кольорові телевізійні камери, принтери;

4. 50 - 80 g's

Твердотільна схема електроніки, радіолокаційні та мікрохвильові антени, аудіо-візуальні проектори, авіаційні двигуни, загальна електроніка для кріплення в стійку;

5. 80 - 120 g's

Плати для ПК, монітори для ПК, холодильники, мікрохвильові печі, контрольно-вимірювальні клапани, камери, аварійно-рятувальні прилади

6. 120 g's і вище

Найбільша дрібна побутова техніка, ліхтарики, інструменти, пістолети;  
300 g's

Мобільний телефон.



Рис. 1.3 Захисний контейнер

19-дюймовий формат стійки залишився незмінним з часів його першого застосування у 1934 році, тоді як технологія, за якою її виготовляють, значно змінилася, а набір засобів, які монтують в середині, значно розширився. 19-дюймовий (482,6 мм) типовий розмір стійки широко використовується в телекомунікаційній, обчислювальній, аудіо-, відео-, розважальній та інших галузях промисловості [6].

Початковими даними даної стійки являється набір деталей, які складають з себе стійку

1. Юнітова стійка – матеріал сталь товщиною 3 мм марки 08кп
2. Направляюча – матеріал сталь товщиною 2 мм марки 08кп
3. П-подібна направляюча – матеріал сталь товщиною 2 мм марки 08кп

Вага виробу складає 6.4 кг

Сталь марки 08кп

Твердість матеріалу: НВ 10 -1 = 179 МПа

Температура кування: ° С: початку 1250, кінця 800. Заготовки перерізом до 300 мм охолоджуються на повітрі.

Температура критичних точок:  $A_{c1} = 732$ ,  $A_{c3} (A_{cm}) = 874$ ,  $A_{r3} (A_{rcm}) = 854$ ,  $A_{r1} = 680$

Зварюваність матеріалу: без обмежень, крім хіміко - термічно оброблених деталей; способи зварювання: РДС, АДС під флюсом м газової захистом, КТС.

Флокеночутливість: не чутлива.

Схильність до відпускнуї крихкості: не схильна.

Різанням: в гарячекатані стані при НВ 131 і  $\sigma_B = 315 \div 410$  МПа, До  $\nu$  тв. спл = 2,1 і К $\nu$  б.ст = 1,65

## 1.2 Огляд та аналіз методів топологічної оптимізації

Оптимізація топології (ТО) - це математичний метод, який оптимізує компонування матеріалу в межах заданого проектного простору для заданого набору навантажень, граничних умов та обмежень з метою максимізації продуктивності системи. ТО відрізняється від оптимізації форми та оптимізації розмірів в тому сенсі, що конструкція може досягти будь-якої форми в дизайнерському просторі, замість того, щоб мати справу із заздалегідь визначеними конфігураціями [7].

Звичайна рецептура ТО використовує метод кінцевих елементів (МКЕ) для оцінки проектних показників. Дизайн оптимізований з використанням методів математичного програмування на основі градієнта, таких як алгоритм критеріїв оптимальності та метод переміщення асимптот, або не градієнтних алгоритмів, таких як генетичні алгоритми.

Оптимізація топології має широкий спектр застосування в аерокосмічній, механічній, біохімічній та цивільній галузі. В даний час інженери переважно використовують ТО на рівні концепції процесу проектування. Через вільні форми, які зустрічаються в природі, результат часто важко виготовити. З цієї причини результат, що впливає з ТО, часто підбирається з точки зору технологічності. Додавання обмежень до рецептури з метою підвищення технологічності є активною сферою досліджень. У деяких випадках результати ТО можуть бути безпосередньо виготовлені з

використанням адитивного виробництва; Таким чином, ТО є ключовою частиною дизайну для виробництва деталей [7-9].

Задачу оптимізації топології можна записати у загальному вигляді задачі оптимізації як:

$$F = F(u(p), p) = \int_{\Omega} f(u(p), p) dV$$

$$G_0(p) = \int_{\omega} p dV - V_0 \leq 0$$

$$G_j(u(p), p) \leq 0, \text{ при } j = 1, \dots, m$$

Цільова функція  $F(u(p), p)$ . Ця функція представляє кількість, яка мінімізується для найкращої роботи. Найбільш поширеною цільовою функцією є відповідність, де мінімізація відповідності призводить до максимізації жорсткості конструкції.

Розподіл матеріалу як змінна задачі. Це описується щільністю матеріалу в кожному місці  $p(u)$ . Матеріал або присутній, позначений 1, або відсутній, позначений 0.  $u$ - це поле стану, яке задовольняє лінійне або нелінійне рівняння стану.

Простір дизайну  $\Omega$  Це вказує на допустимий обсяг, в межах якого може існувати конструкція. Вимоги до складання та упаковки, доступність людей та інструментів є одними з факторів, які необхідно враховувати при визначенні цього простору. З визначенням робочої площини, полігони або компоненти в моделі, які не можуть бути змінені в процесі оптимізації, розглядаються як непроектні простори.

Обмеження  $m$  характеристика, якій повинен відповідати розв'язок. Прикладами є максимальна кількість матеріалу, що підлягає розподілу (обмеження об'єму), або максимальні значення напружень.

Оцінка  $u(p)$  часто включає вирішення диференціального рівняння. Найчастіше це робиться за допомогою методу скінченних елементів, оскільки ці рівняння не мають відомого аналітичного рішення.

## ESO/BESO-метод

Методи еволюційної оптимізації конструкцій (Evolutionary Structural Optimization - ESO) і двобічної еволюційної оптимізації конструкцій (Bi-directional Evolutionary Structural Optimization - BESO) інтенсивно вивчаються і розвиваються в останні роки [9]

Найбільш ефективним є застосування цих методів при оптимізації топології безперервних структур, тобто при знаходженні найкращого розміщення і геометрії порожнин всередині області моделювання. Крім того, цей тип оптимізації може застосовуватися не тільки для оптимізації натурних досить великогабаритних конструкцій, але і для оптимальної конструкції матеріалів на мікро- і нанорівні.

ESO-метод спочатку запропонований в 1992 р професорами Mike Xie і Grant Steven. ESO класифікується як метод жорсткого знищення, який ітераційно видаляє або додає кінцеве кількість матеріалу. Використовуються евристичні критерії, які можуть бути засновані на строго певній інформації про чутливість. Таким чином, ESO відносно простий в реалізації, що є перевагою для задач оптимізації топології за участю складних фізичних процесів.

Метод ESO заснований на визначенні рівня напружень в довільній частині конструкції методом кінцевих елементів. Індикатором неефективного використання матеріалу є низький рівень напруги (або деформацій) в тій чи іншій частині конструкції. В ідеалі рівень напружень в конструкції повинен бути однаковим, близьким до граничного, але безпечного значенням [9-11].

З цієї концепції слід принцип видалення матеріалу, згідно з яким недостатньо навантажений матеріал може бути видалений, що призводить до видалення окремих елементів звичайно-елементної моделі.

Рівень напруженості кожного елемента визначається порівнянням, наприклад напружень Мізеса цього елемента  $\sigma_e^m$  з критичним або максимальним значенням напруг Мізеса в конструкції  $\sigma_{\max}^m$ . Якщо в результаті кінцево-елементного аналізу елемент задовольняє умові

$$\frac{\sigma_e^{vm}}{\sigma_{max}^{vm}} < R_{Ri}$$

Де,  $R_R$  - граничне значення (коефіцієнт відбракування), при якому об'єкт був видалений.

Цикл аналізу кінцевих елементів і їх видалення повторюється для декількох ітерацій з використанням одного і того ж порогового відносини до досягнення стійкого стану, тобто відсутність елементів, що задовольняють цій порогу видалення. Потім коефіцієнт відбракування може бути збільшений відповідно до визначеного коефіцієнтом еволюції  $H_i$

$$R_{R(i+1)} = R_{Ri} + H_i$$

Далі зі збільшеним коефіцієнтом відбракування цикл проводиться до досягнення нового стаціонарного стану. Ітераційний процес продовжується, поки не буде досягнуто бажаного результату (наприклад, поки весь матеріал з тих областей, де рівень напруженості не перевищує 25% від максимального, не буде видалений) [10-13].

Кількісною оцінкою зміни жорсткості (або піддатливості) конструкції в результаті видалення  $i$ -го кінцевого елемента є індекс чутливості, який визначається для середньої податливості як

$$a_i^l = \frac{1}{2} u_j^T K_j u_i,$$

Де  $u_i$  - вектор вузлового зміщення  $i$ -го елемента;

$K_j$  - матриця жорсткості елемента

Функція чутливості вказує на збільшення середньої податливості в результаті видалення  $i$ -го елемента, що дорівнює елементарній енергії деформації  $i$ -го елемента. Для мінімізації середньої піддатливості (тобто максимізації жорсткості) за допомогою видалення елементів необхідно виключати елементи з мінімальним значенням коефіцієнтом чутливості.

Математична основа методу ESO досить проста і зрозуміла, а його програмна реалізація не вимагає складних прийомів програмування, він в рівній мірі застосовний до 2D- і 3D-задань. Видалення елемента проводиться

присвоєнням його модулю нульового значення, що призводить до його ігнорування при наступних ітераціях (при подальшому обчисленні глобальної матриці жорсткості). У міру віддалення елементів в ітераційне процесі число рівнянь зменшується, знижуючи обчислювальну трудомісткість завдання, що особливо важливо для 3D-завдань.

Однак віддалений на ранніх ітераціях матеріал може бути корисний на наступних, але метод ESO не дозволяє відновити його. Таким чином, в ряді випадків він не дозволяє отримати оптимального рішення. Ці недоліки в значній мірі усуваються в методі BESO[14-16].

Метод BESO (або метод двобічної еволюційної оптимізації конструкцій) дозволяє одночасно видаляти і додавати матеріал в області проектування. Принципова відмінність даного методу від ESO полягає в тому, що індекс чутливості порожніх елементів визначається шляхом лінійної екстраполяції поля зсувів, одержуваного в результаті кінцево-елементного аналізу [14]. Після цього заповнені елементи з мінімальними значеннями індексу чутливості видаляються зі структури, а порожні елементи з найбільшими значеннями чутливості заповнюються матеріалом. Кількості видаляються і додаються елементів на кожній ітерації визначені двома незалежними один від одного параметрами: ставленням видалення  $R_R$  і ставленням включення  $R_I$ .

Незважаючи на те, що методи ESO / BESO досить прості в реалізації, практично відсутня реалізація методу ESO для вирішення завдань оптимізації топології, орієнтованих на виробництво [17].

#### SIMP-метод

SIMP-метод (Solid Isotropic Material with Penalization), або метод пеналізації для твердого ізотропного тіла, - це метод ТО, основна ідея якого полягає в створенні поля віртуальної щільності, що представляє аналог деякої реальної характеристики об'єкта. Призначення методу полягає в зменшенні податливості конструкції внаслідок перерозподілу матеріалу в даній області простору при відомих граничних умовах. Результатом його використання є отримання рівномірного об'єкта в рамках даної задачі. Широке застосування

SIMP отримав в адитивних технологіях (технологіях 3D-друку), здатних створювати об'єкти необхідної форми.

На сьогоднішній день SIMP-метод широко застосовується в усьому світі. В якості розрахункової змінної розглядається щільність матеріалу. Оптимальна структурна топологія отримана шляхом перерозподілу матеріалу всередині області на основі критеріїв оптимальності або методу математичного програмування.

У методі SIMP область проектування  $\Omega$  дискретизується за допомогою кінцевих елементів. Властивості матеріалу постійні в кожному з цих елементів і залежать від відносної щільності  $x_i$ . Відносна щільність повинна дорівнювати 1 або 0 в розрахунковій області  $\Omega$  після оптимізації. Для обмеження проміжної відносної щільності використовується фактор відбраковування  $p$ .

Відношення між модулем пружності і відносною щільністю записується як

$$E(x_i) = E_{min} + (x_i)^p (E_0 - E_{min}),$$

де  $E_0$  - модуль пружності матеріалу. Для чисельної стійкості  $E_{min}$  приймається за  $E_0/1000$ ,  $x_i$  - відносна щільність  $i$ -го елемента;  $p$  - фактор відбраковування.

ESO-Simp-метод

$$\text{знайти: } X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}^T, i = 1, 2, 3, \dots, n,$$

$$\text{мінімізувати: } C(X) = F^T U = U^T K U = \sum_{i=1}^n u_i^T k_i u_i = \sum_{i=1}^n (x_i)^p u_i^T k_0 u_i,$$

$$\text{якщо } K U = F, V = f_0 V_0 = \sum_{i=1}^n x_i v_i$$

$$0 < x_{min} \leq x_i \leq x_{max} \leq 1,$$

де цільова функція  $C$  визначається як оптимальне співвідношення;  $X$  - вектор конструктивних змінних;  $X_{min}$  і  $X_{max}$  - мінімальна і максимальна відносна щільність елементів відповідно. Метою введення ненульового значення  $X_{min}$  є уникнення сингулярності;  $F$  - вектор навантаження;  $U$  - вектор

глобального зсуву;  $K$  - глобальний тензор жорсткості;  $k_i$  - тензор жорсткості елемента після інтерполяції щільності;  $k_0$  і  $u_i$  - тензор жорсткості і вектор зміщення вузлів елементів;  $V$  - об'єм матеріалу;  $V_0$  - початковий обсяг розрахункової області;  $F_0$  - заданий об'ємне відношення [18].

### ESO-Simp-метод

Даний метод гібридної топології під назвою ESO-SIMP націлений на об'єднання розглянутих раніше методів ESO та SIMP. При цьому в якості розрахункових змінних беруться відносні щільності елементів, а в якості цільової функції вибирається оптимальне співвідношення. Потім завдання оптимізації для мінімального середнього відповідності на основі алгоритму ESO-SIMP може бути записана у вигляді

$$\begin{aligned} \text{знайти: } X &= \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_i\}^T, i = 1, 2, 3, \dots, n, \\ \text{мінімізувати: } C(X) &= U^T K U = \sum_{i=1}^n u_i^T k_i u_i = \sum_{i=1}^n (x_i)^p u_i^T k_0 u_i, \\ \text{якщо } K U &= F, V = \sum_{i=1}^n x_i v_i \leq f_0 V_0 \\ 0 < x_{min} &\leq x_i \leq x_{max} \leq 1, \end{aligned}$$

Різниця між методами ESO-SIMP і SIMP - в обмеженні об'єму. У процесі кожної ітерації елементи, відносна щільність яких менше або дорівнює коефіцієнту відбракування, видаляються з області розробки, а все решта елементи вводяться в наступну ітерацію. Загальний обсяг всіх елементів, що залишилися  $V$  повинен задовольняти наступні умови

$$V = \sum_{i=1}^m x_i v_i \leq f_0 V_0$$

де  $m$  - число всіх елементів, що залишилися.

Однак  $V$  не є реальним повним обсягом елементів, що залишилися  $V'$ , який виражається як

$$V' = \sum_{i=1}^m v_i$$

Коли виконується обмеження обсягу, реальний загальний обсяг всіх елементів, що залишилися  $V'$  більше, ніж  $V$ , через проміжної відносної щільності, що є не вигідним для ТО. Таким чином, в процесі оптимізації повинен контролюватися реальний загальний обсяг всіх елементів, що залишилися  $V'$ .

Виявлено, що новий метод ESO-SIMP має безліч переваг в порівнянні з методом ESO і методом SIMP з точки зору ефективності та надійності [19].

#### Level-Set-метод

Основна ідея методу Level-Set (встановлення рівня або безлічі рівнів) полягає в тому, щоб виразити криву або поверхню в неявному вигляді. При цьому вони приймаються в якості встановленого нульового рівня багатовимірної функції. Потім простежується їх деформація за допомогою цієї функції.

Наприклад, в оптимізації топології структури криві або поверхні, що зображують її межі, деформуються, щоб мінімізувати енергію пружної деформації.

Для заданої області  $\Omega$  з гладкою межею передбачається існування неявної функції  $\varphi(x)$ , яка задовольняє умовам

$$\varphi(x) = \begin{cases} > 0, & x \in \Omega^+ \text{ (матеріал)} \\ = 0, & x \in \partial\Omega^+ \text{ (границя)} \\ < 0, & x \in \Omega^- \text{ (пустота)} \end{cases}$$

Двома найбільш часто використовуваними функціями в методі Level-Set є функція Хевисайда  $H(\varphi)$

$$H(\varphi(x)) = \begin{cases} 0 & \varphi \leq 0 \\ 1 & \varphi > 0 \end{cases}$$

і дельта-функція Дірака  $\delta(\varphi)$ , яка дорівнює 0 всюди, крім вузької смуги, що містить границю матеріалу:

$$\delta(\varphi(x)) = \frac{dH(\varphi(x))}{d\varphi}$$

Для функції  $f$  об'ємне і поверхневе інтегрування по кордоні можна виразити у вигляді

$$\int_{\Omega} f(x)H(\varphi(x))d\Omega$$

$$\int_{\partial\Omega} f(x)d = \int_{\Omega} f(x) \delta(\varphi(x))|\nabla\varphi(x)|d\Omega$$

З обчислювальної точки зору згладжена функція Хевісайда краще в процесі оптимізації.

Функція встановлення рівня є рівнянням типу Гамільтона-Якобі:

$$\frac{\partial\varphi}{\partial e} + V_n|\nabla\varphi|$$

де де  $v_n$  - нормальна швидкість рухомих кордонів.

Завдання оптимізації топології конструкції з обмеженою площею при мінімізації податливості можна описати таким чином:

$$\min C(\varphi) = \int_{\Omega} \frac{1}{2} E(\varphi) \varepsilon^T D \varepsilon d\Omega$$

$$\nabla \cdot (E(\varphi) \varepsilon) = f$$

$$\int_{\Omega} H(\varphi) d\Omega = V^*$$

де область проектування представлена  $\Omega$ ;  $E$  - розрахункова змінна, яка визначається поверхнею рівня  $E(\varphi) = E_0 H(\varphi) + (1 - H(\varphi)) E_{\min}$ , де  $E_0$  - модуль пружності матеріалу;

$E_{\min}$  - мінімальний модуль пружності;  $D$  - матриця пружності;  $V^*$  - допустимий обсяг матеріалу. Рівняння лінійного пружного рівноваги використовується для обчислення поля розміщення дислокації  $u$ , тензора деформації  $\varepsilon$  і тензора напружень  $\sigma$ .

Завдання оптимізації може бути вирішена з використанням методу критеріїв оптимальності, послідовного методу лінійного програмування або методу рухається асимптоти [20].

Шляхом варіації цільового функціоналу завдання мінімізації в двовимірному випадку формулюється як пов'язана задача лінійної пружності і рівняння дифузії:

$$\nabla \cdot (E(\varphi)\varepsilon) = f$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial e} - \left[ \frac{1}{2} (E_0 - E_{min} \varepsilon^T D \varepsilon + \lambda) \delta(\varphi) \cdot |\nabla \varphi| \right] = \alpha \Delta \varphi$$

де  $\alpha$  - коефіцієнт демпфірування, стабілізуючий алгоритм рішення

### **1.3 Огляд сучасних наукових досліджень топології виробів та їх оптимізація**

В роботі [1] розглядається питання застосування метод топологічної оптимізації в задачах проектування вантажопідйомної техніки, результати оптимізації показані на малюнку. Мета работ полягала в зниженні маси силових деталей без втрати жорсткості і міцності в порівнянні з традиційними конструкціями.

Застосування методу топологічної оптимізації в процесі проектування забезпечує зниження масово-габаритних параметрів конструкції і матеріаломісткості, що дає конструктору спільне бачення процесів, що відбуваються з точки зору міцності, жорсткості і зниження маси конструкції несучих деталей.

У статті [2] розглядається можливість застосування топологічної оптимізації при проектуванні не охолоджуваних робочих лопаток турбін, приклад показаний на малюнку. Аналіз отриманих результатів показав можливість застосування топологічної оптимізації при проектуванні неохолоджуваних лопаток турбін за допомогою виготовлення аддитивними технологіями

У роботі [3] йдеться про оптимізацію топології суцільних структур у статичній лінійній пружності. Тут це вирішується методом математичного програмування, що працює в подвійному просторі і спеціально розроблений для обробки дискретних змінних.

Джерело [4] представляє розширений метод двосторонньої еволюції структурної оптимізації, який застосовується до проблем статичних конструкцій з урахуванням взаємодії. Написано про різні типові задачі навантаження що залежать від проектування, описано методи топології на основі щільності заповнення, та чисельні методи, якими слід користуватись при роботі з ними.

У дисертації [5] дуже добре розглянутий підхід до оптимального проектування конструкцій. Теорія оптимального проектування зародилася ще в давнину, коли наші предки. Дослідним шляхом знаходили оптимальні характеристики зброї. У середні століття вирішувалося завдання Галілея, де розглядалося проектування равнопрочних конструкцій. Однак як самостійна наукова галузь, теорія оптимального проектування сформувалася в другій половині ХХ століття. це праці Банічука Н.В., Прагера В., Троїцького В.А., Петухова Л.В., Почтмана Ю.М., П'ятигорського З.І., Рейтмана М.І., Шапіро Г.С. Ці вчені розглядають широкий клас задач, що включає оптимізацію стрижнів, пластин і оболонок, оптимізацію форм пружних тел приділяючи уваги різним варіаційним формулювань завдань оптимізації і чисельні методи їх рішення. У своїй роботі Новокшенов розглянув оптимальне проектування деяких конструкцій для ракетно-космічної галузі з допомогою інтегрованої системи, багатоступеневу оптимізацію кронштейна під установку зоряного датчика, показано на малюнку 2.1, (РКК «Енергія» ім, С.П. Королева), параметричну оптимізацію обичайки герметичного відсіку (РКК «Енергія» ім, С.П. Корольова), топологічну оптимізацію кронштейна рефлектора, показано на малюнку 2.2 ( «ІСС» ім. М.Ф. Решетнева).

Джерело [6] наданий опис оптимізації структур, матеріалів та механізмів. У цій роботі проаналізовано та порівняно різні підходи до концепції топологічної оптимізації з урахуванням змінних меж ефективних властивостей композиційний матеріалів.

В роботі [7] приведена топологічна оптимізація двоступеневого циліндричного редуктора, результати показані на малюнку, за допомогою

програмного модуля SOLIDWORKS Simulation. основною метою дослідження є оптимізація загальної ваги редуктора за рахунок стоншування визначених площ литих елементів корпусу редуктора відповідно з розрахованою мінімальною енергією деформації. алгоритм оптимізації топології, який використовується в сучасних дослідженнях, дає оптимальну конструктивну форму елементів корпусу редуктора з найбільшою жорсткістю з урахуванням заданої кількості маси, яке буде видалено з вихідного розрахункового простору. показана повна послідовність кроків для проведення дослідження оптимізації управління топологією з урахуванням обмежень, що виникають з конструктивних особливостей і методу виготовлення елементів корпусу редуктора. Наведено висновки про використання результатів оптимізації топології і вказані можливі напрямки подальшого розвитку підходу

У наступній роботі [8] дається огляд методів топологічної оптимізації конструкцій на основі спеціальних моделей методу кінцевих елементів (МСЕ). Пропонується стратегія вибору раціональної силової схеми просторових тонкостінних конструкцій з використанням наочно подаються результатів оптимізації континуальної моделі змінної щільності,

У кожному елементі пружного середовища використовується тільки одна проектна змінна. Ця особливість, з одного боку, дозволяє будувати більш ефективні алгоритми оптимізації розподілу матеріалу в континуальній моделі в порівнянні, з іншого боку, висуває підвищені вимоги до процедур інтерпретації одержуваних результатів, в тому числі до аналізу силової роботи середовища змінної щільності.

В даний час топологічна оптимізація викликає інтерес з боку багатьох підприємств світу, так як цей метод веде до прямого зниження ваги виготовляються конструкцій, що в кінцевому рахунку позначається на багато параметрів кінцевого виробу.

[9-10] У цих статтях приводяться алгоритми, що працюють з конечно-елементарною моделлю тіла, та інтерактивно вносяться зміни в конструкцію, що видаляється з нелінійного матеріалу.

Проте дані двох статей представляють два досконало різні підходи до зміни геометрії тіла. Перша стаття пропонує усунути недонаванатажені елементи, в той час як автори в другій статті пропонують варіанти щільності елементів, збільшуючи її в перевантажених елементах і зменшуючи в недонаванатажені. Видалення елементів в алгоритмах, представлених у другому статті, передбачається лише тоді, коли щільність елементів зменшується менше, ніж попередній заданий епсилон, що означає, що елемент не грає практично ніякої ролі при використанні навантажень[21]..

## Висновки до розділу 1

Проведено аналіз початкової конструкції каркасного типу, описано призначення елементів конструкції та їх матеріали. Наведено сфери застосування даної конструкції, та вироби для яких вона призначена. Оглянуто характеристику G-стійкості навантаження монтажного обладнання.

В дисертаційній роботі було розглянуто методи топологічної оптимізації які є досить ефективними для вирішення задач зменшення маси, про що свідчить велика кількість існуючих наукових досліджень як вітчизняних вчених так і закордонних. В роботі був виконаний відповідний аналіз.

Також були розглянуті основні методи оптимізації топології конструкцій - такі, як методи еволюційної (ESO) і двобічної еволюційної (BESO) оптимізацій конструкцій, метод пеналізації для твердого ізотропного тіла (SIMP-метод), а також гібридний метод ESO-SIMP, створений завдяки об'єднанню методів ESO і SIMP, і метод встановлення рівня Level-Set.

Огляд сучасних наукових досліджень топології виробів продемонстрував, що галузь не стоїть на місці, і стрімко розвивається. Методи топологічної оптимізації застосовують для схожих так і для абсолютно різних галузей. А Нові наукові дослідження ще раз підтверджують актуальність даної теми.

## РОЗДІЛ 2. РОЗВИТОК МОДЕЛІ СКЛАДАЛЬНОГО ВИРОБУ І ТЕХНОЛОГІЇ СКЛАДАННЯ З УРАХУВАННЯМ КОНСТРУКТОРСЬКО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ОБМЕЖЕНЬ

### 2.1 Опис конструкції каркасного типу «Rackmount»,

В якості об'єкта оптимізації було обрано конструкцію каркасного типу «Rackmount», що показана на (рис. 2.1), яка складається із комплекту по 4 одиниці кожної із деталей: юнітової стійки 1, п-подібної деталь 2, та направляюча 3, з'єднаних між собою гвинтами М6 40 шт. Матеріал з якого виготовляється комплектуючі кракасу є Сталь марки 08КП.

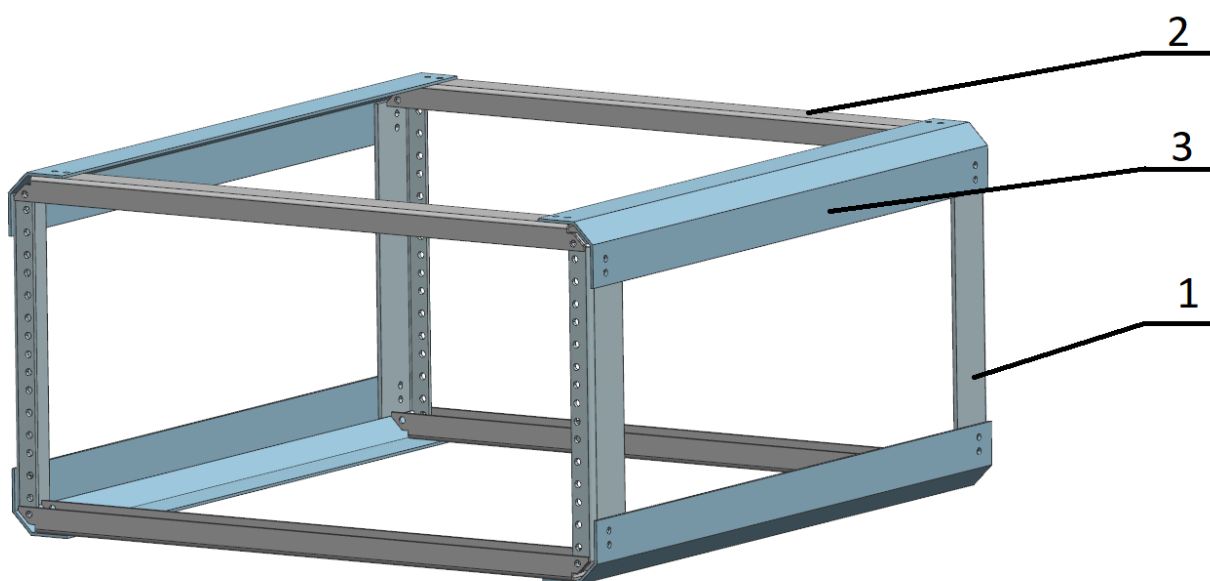


Рис. 2.1 Початкова конструкція каркасного типу

Юнітова стійка 1 (рис. 2.2) отримана методом гнуття із листового металу, вона призначена для закріплення спеціалізованого монтажного обладнання на гвинти М6, для цього у ній виконано 15 кріпильних отворів із різьбою М6, що ускладнює технологічний процес виготовлення даного виробу. Окрім цього ще є 6 різьбових отвори для складання каркасу.



Рис. 2.2 Юнітова стійка

П-подібна деталь (рис. 2.1.3) отримана методом гнуття із листового металу. При її виготовленні виконується 4 установочні операції, для запресовочних гайок М6, що також є трудомістким.

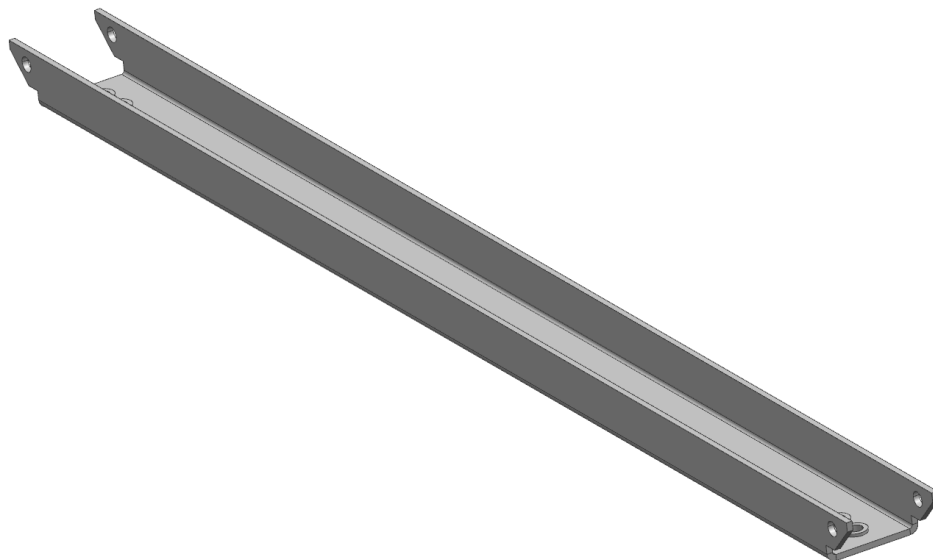


Рис. 2.3 П-подібна деталь

Направляюча 3 (рис. 2.4) , виготовлена методом гнуття із листового металу, та містить попередньо вирізані кріпильні отвори для з'єднання з іншими елементами конструкції каркасного типу, також на ній є попередньо виготовленні два отвори для жорсткого закріплення до корпусу, через антивібраційні опори гвинтами М8.

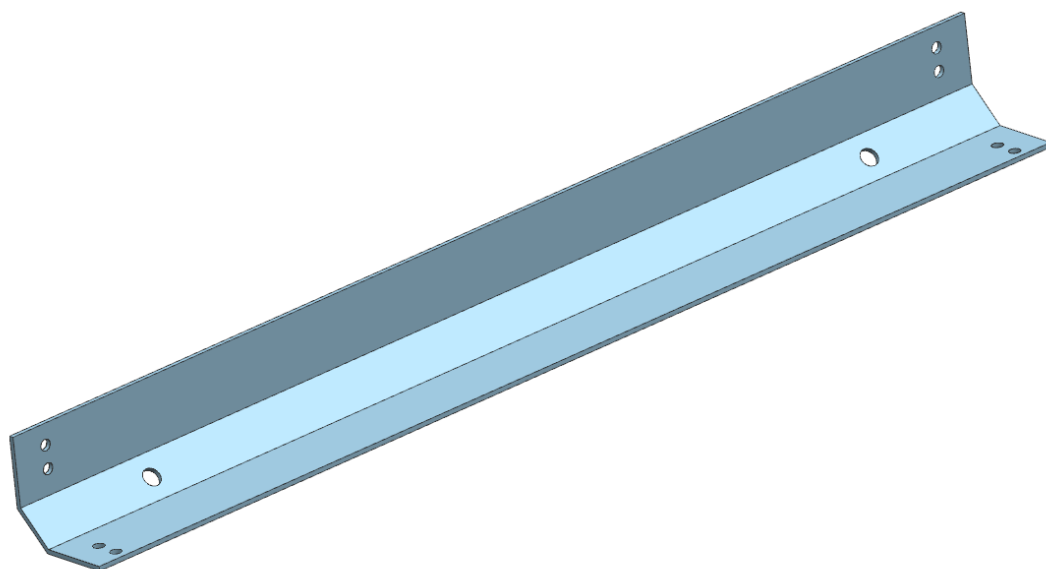


Рис. 2.4 Направляюча

Технологічний процес виготовлення даної каркасної конструкції, наведено у таблицях 2.1-2.3

Табл. 2.1 технологічний процес виготовлення юнітової стійки

Номер операції, назва	Технологічне обладнання	Номер переходу	Назва переходу
1	2	3	4
005 Програмна	Лазерний верстат MSFL1530S	1	Встановити, закріпити, зняти
		2	Вирізати отвори Ø5
		3	Вирізати заготовки згідно з заданим контуром
010 Формовочна	Верстат для гнуття листового металу NC E21	1	Встановити, закріпити, зняти
		2	Зігнути заготовки під кутом 90 °
015 Різьбонарізна	Свердлильний верстат PBD 40	1	Встановити, закріпити, зняти
		2	Нарізати різьбу М6
020 Фарбувальна	Фарборозпилювач пневматичний FSP 600	1	Встановити, закріпити, зняти
		2	Нанести ґрунтовку
		3	Нанести фарбу

Табл. 2.2 технологічний процес виготовлення П-подібної деталі

Номер операції, назва	Технологічне обладнання	Номер переходу	Назва переходу
1	2	3	4
005 Програмна	Лазерний верстат MSFL1530S	1	Встановити, закріпити, зняти
		2	Вирізати отвори Ø5
		3	Вирізати заготовки згідно з заданим контуром
010 Формовочна	Верстат для гнуття листового металу NC E21	1	Встановити, закріпити, зняти
		2	Зігнути заготовки під кутом 90 °
015 Пресувальна	Пресувальний верстат SB-9L	1	Встановити, закріпити, зняти
		2	Пресувати гайку
020 Фарбувальна	Фарборозпилювач пневматичний FSP 600	1	Встановити, закріпити, зняти
		2	Нанести ґрунтовку
		3	Нанести фарбу

Табл. 2.2 технологічний процес виготовлення П-подібної деталі

Номер операції, назва	Технологічне обладнання	Номер переходу	Назва переходу
1	2	3	4
005 Програмна	Лазерний верстат MSFL1530S	1	Встановити, закріпити, зняти
		2	Вирізати отвори Ø5
		3	Вирізати заготовки згідно з заданим контуром
010 Формовочна	Верстат для гнуття листового металу NC E21	1	Встановити, закріпити, зняти
		2	Зігнути заготовки під кутом 45 °
020 Фарбувальна	Фарборозпилювач пневматичний FSP 600	1	Встановити, закріпити, зняти
		2	Нанести ґрунтовку
		3	Нанести фарбу

## 2.2 Обґрунтування та вибір конструкторсько-технологічних рішень для елементів конструкції

Як було зазначено вище юнітова стійка, виготовляється із значною кількістю кріпильних різьбових отворів, що робить виготовлення деталі трудомістким, також різьба має властивість зношуватись, при багатократному використанні, тому дане завдання потребує альтернативного рішення.

Після проведення аналізу існуючих роз'ємних з'єднань, як альтернативу було запропоновано замінити різьбові отвори, на отвори квадратної форми, для закріплення в них монтажних гайок (рис. 2.5).



Рис. 2.5 Монтажна гайка

Перевагою монтажних гайок над різьбовим отвором, є їхня швидкозмінність у випадку зношення різьби, а також у випадку, коли необхідно максимально оптимізувати масу каркасної конструкції, можна встановлювати дані гайки лише у місцях закріплення обладнання, а у місцях, де немає відповідних отворів залишити пусті місця.

В початковій констукції для з'єднання елементів застосовуються гвинти, та запресовочні гайки, для зменшення трудомісткості виготовлення виробу, у новій конструкції, було запропоновано використати нержавіючі силові антивібраційні заклепки (рис 2.6), характеристики яких наведено на (рис.2.7) [21].



Рис. 2.6 Нержавіюча силова, антивібраційна заклепка

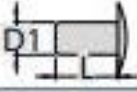




	F max		CODE			
4,8 x 13,0 mm	20,0 mm	4,5 - 8,4 mm	79905 04813	5700 N	4400 N	445 N
4,8 x 17,0 mm	27,0 mm	7,7 - 12,7 mm	79905 04817			

Рис. 2.7 Характеристики силових заклепок

Дане конструктивне рішення спростило технологічний процес виготовлення та складання деталей, відповідно від початкового технологічного процесу, було усунуто операції нарізання різьби та пресувальні, що значно спростило виготовлення елементів конструкції

Оскільки конструкція каркасного типу (рис. 1.1) виготовлена із листової сталі марки 08КП, яка схильна до корозії, елементи конструкції покривались захисним покриттям, а саме грантовою сумішшю та двома шарами захисної фарби, що також збільшувало трудомісткість при виготовленні елементів конструкції.

Для перевірки ударостійкості початкової конструкції проводилось випробування на ударостійкість наступним чином. Виріб був закріплений у корпус через антивібраційні опори, та падав з висоти 1.5м на жорстку основу, із закріпленням муляжу обладнання, вагою 30кг для імітації навантаження 20G, (рис. 2.8) [22].



Рис. 2.8 Випробування конструкції на ударостійкість

В ході проведення даного експерименту, було отримано наступні результати: юнітова стійка, та П-подібна деталь зазнають найбільших навантажень, тому було запропоновано їх виготовляти нержавіючої сталі марки AISI 304 товщиною 3мм та 1.5 мм відповідно, а направляючу із алюмінію марки АД0 (1050 ) товщиною 2 мм.

Заміна матеріалів елементів конструкції вплинула на початковий технологічний процес. Оскільки нові, запропоновані матеріали, є стійкими до корозії, то зникла необхідність у нанесенні покриття на деталі виробу [23].

### **2.3 Проектування та підготовка нової 3D-моделі для оптимізації**

Після вибору оптимальних матеріалів та перегляду конструктивних особливостей, елементи конструкції зазначали змін на основі яких, була спроектована нова 3D-модель, з урахуванням всіх конструкторсько-технологічних рішень (рис. 2.9). Було запропоновано збільшити кількість з'єднувальних точок конструкції, що дозволило покращити просторове позиціонування елементів так і міцність вузлових з'єднань. Нова 3D-модель була спроектована засобами САПР Siemens NX 11

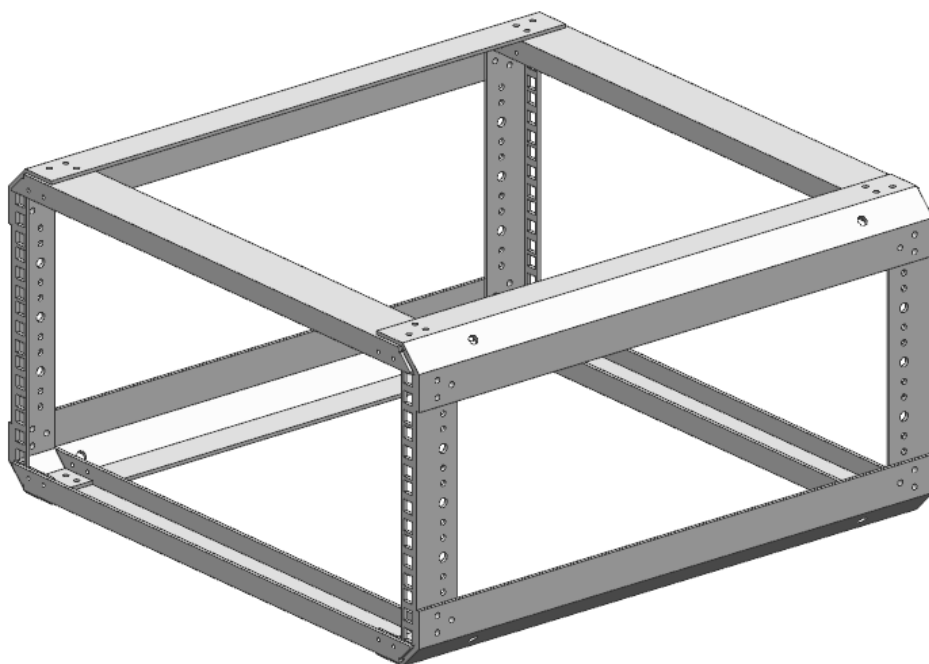


Рис.2.9 Оптимізована 3D- модель конструкції

Оскільки юнітова стійка (рис. 2.10), виготовляються із листової нержавіючої сталі, товщиною 3мм, що є найміцнішим елементом конструкції її було запропоновано взяти як базову, а п-деталь та направляючу кріпити безпосередньо до неї, для того, щоб конструкція каркасного типу витримала максимальне навантаження.

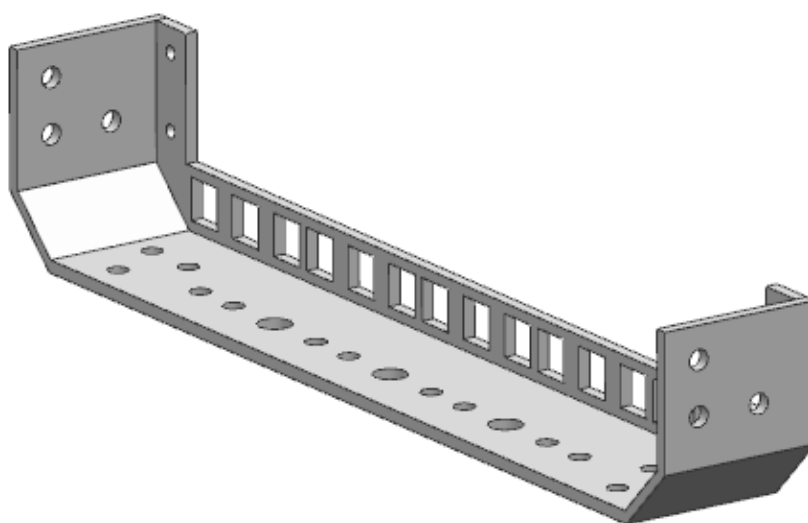


Рис.2.10 Нова юнітова деталь

## 2.4 Аналіз силових навантажень на конструкцію та встановлення граничних умов

Простір проектування – це область, яку можуть займати деталі конструкції, виходячи з компоновальних міркувань.

Простір проектування конструкції каркасного типу, представлений набором трьох конструктивних елементів по 4 одиниці кожного, поділено на нез'єднані елементи. Для проектування застосовується САПР «Autodesk Fusion 360» та його CAE модуль «Generative design» (рис. 2.11).

На початковій стадії моделювання були задані запропоновані раніше матеріали, для груп елементів конструкції їхні відповідні характеристики, які будуть використовуватись про отриманні рішення топологічної оптимізації.

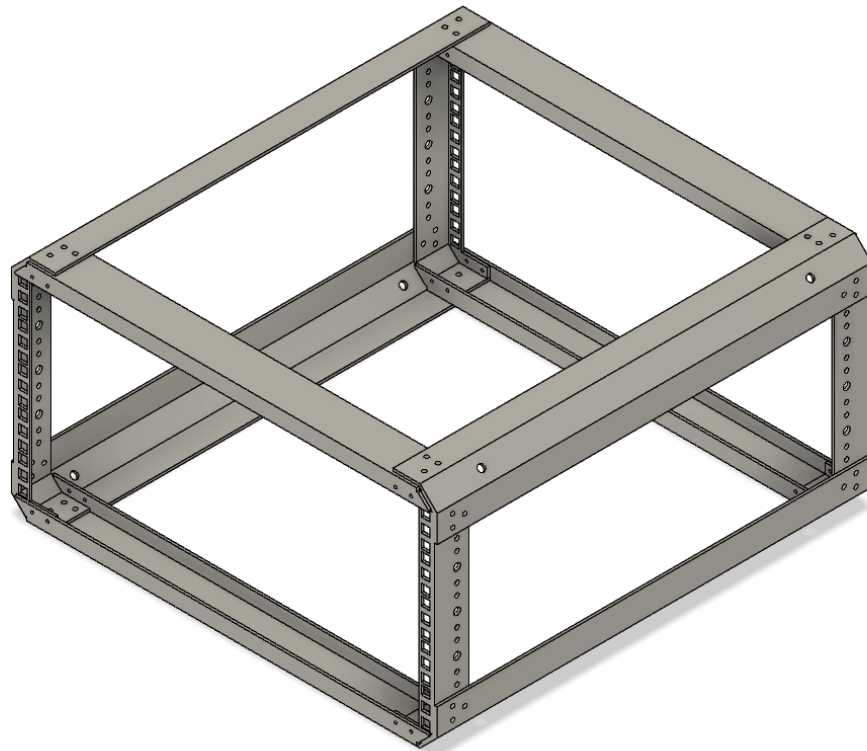


Рис. 2.11 Простір проектування конструкції в Autodesk Fusion 360

Щоб перетворити набір елементів в повноцінну конструкцію, було використано команду «constraints», та здійснене з'єднання деталей згідно отворів, з імітацією заклепок, та прикладанням відповідних сил стискання, які було задано у пункті 2.2 (рис.2.12).

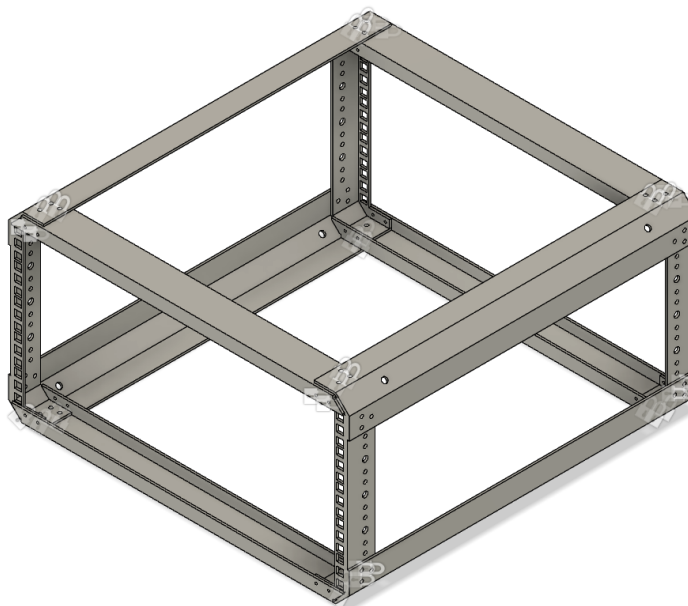


Рис. 2.12 Конструкція з встановленими кріпильними обмеженнями

Наступним кроком є встановлення неробочих областей в середовищі проектування, а саме виділення зон, які будуть вважатися «білими», а процедура топологічної оптимізації оmine їх. Першою із таких зон, будуть отвори для закріплення конструкції до корпусу, діаметр такого отвору складає 8 мм, а зовнішній діаметр віброізолятора 30мм, запропоновано зробити обмежувальну зону діаметром 32мм, щоб забезпечити щільне прилягання ізолятора та головки гвинта до направляючої 3, та забезпечити надійне з'єднання цих елементів (рис.2.13).

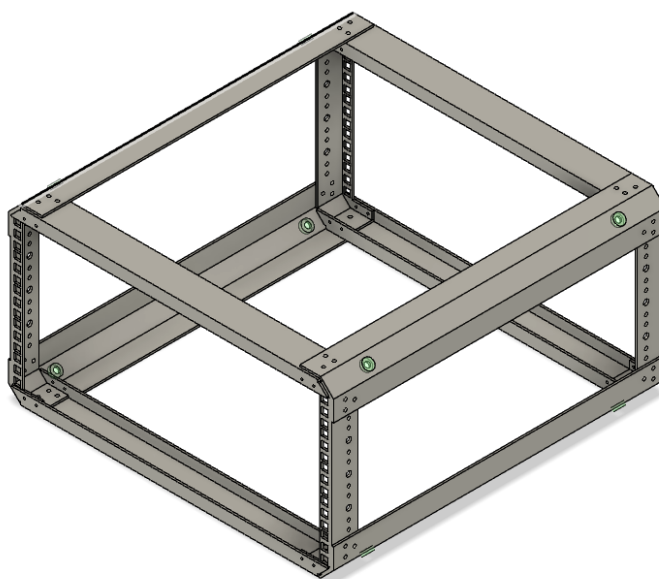


Рис. 2.13 Обмеження для кріпильних отворів

Ще одним важливим елементом направляючої є її геометрична форма, а саме 2 згини під  $45^\circ$  вони конструктивно необхідні для раціонального розподілу навантажень готової конструкції в усіх напрямках, при жорсткому закріпленні в корпусі, та рівносильної передачі навантаження на віброізолятори. Для виготовлення цих деталей, є певні технологічні обмеження, а саме необхідна наявність матеріалу «білої зони» у елементів згинання, прилягання елемента згинального обладнання до деталі, тому було виділено наступні зони (рис. 2.14).

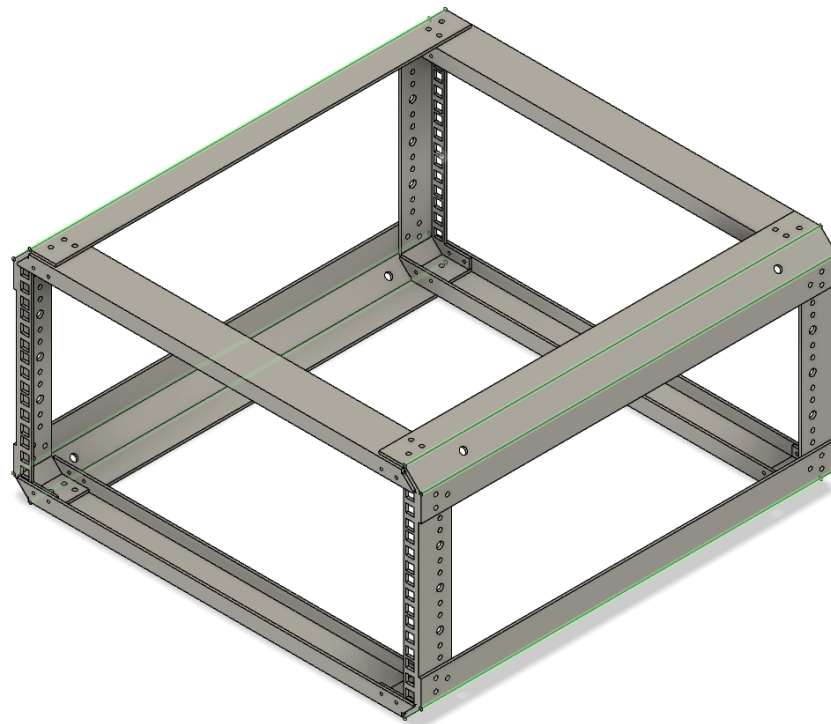


Рис. 2.14 Обмеження геометричної форми направляючої

Оскільки основним призначенням конструкції каркасного типу, являється безпечне транспортування високоточного обладнання та забезпечення його працездатності при робочих навантаженнях дуже важливим елементом виробу являється передня сторона конструкції, на яку здійснюється закріплення обладнання, скільки отвори під гайки уже спроектовані, вони також будуть обмежені при подальшому моделюванні, а додаткові бокові кріпильні отвори, будуть обмежені лише радіусними «білими зонами» (рис. 2.15).

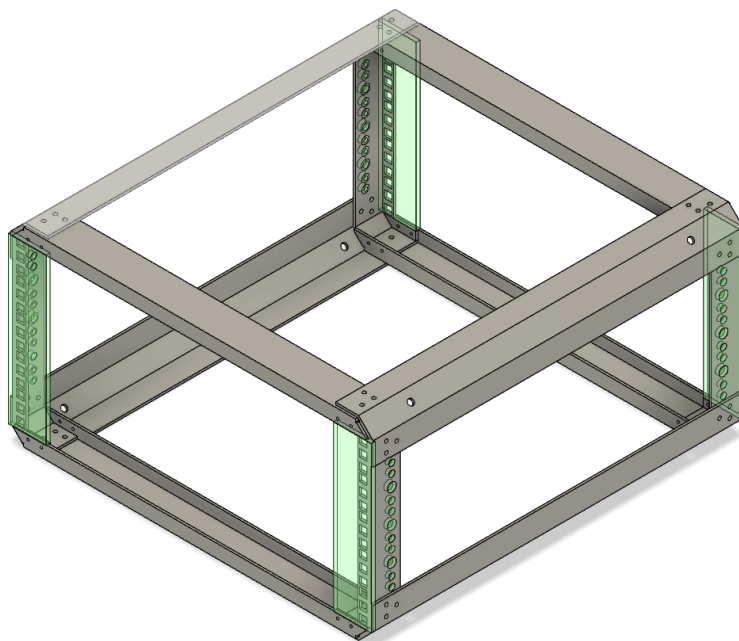


Рис. 2.15 Обмеження юнітової стійки

П-подібна деталь, була обмежена по двом згинам під  $90^\circ$ , через специфіку листозгинального обладнання, а виступ матеріалу, необхідний для згину був близький до мінімуму, тому було вирішено залишити згин не змінним (рис. 2.16)

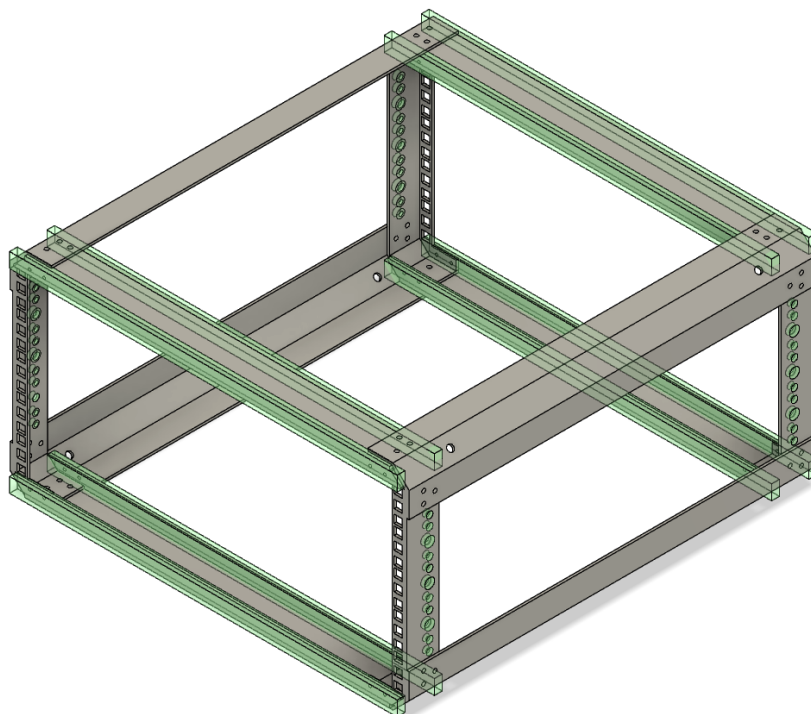


Рис. 2.16 Обмеження п-подібної деталі

Наступним кроком, було запропоновано не оптимізувати кутові елементи конструкції, через те, що вони містять складні елементи згинання а також вони

є опорними вузлами конструкції, тому було прийнято рішення не проводити процедуру оптимізації для них. (рис.2.17).

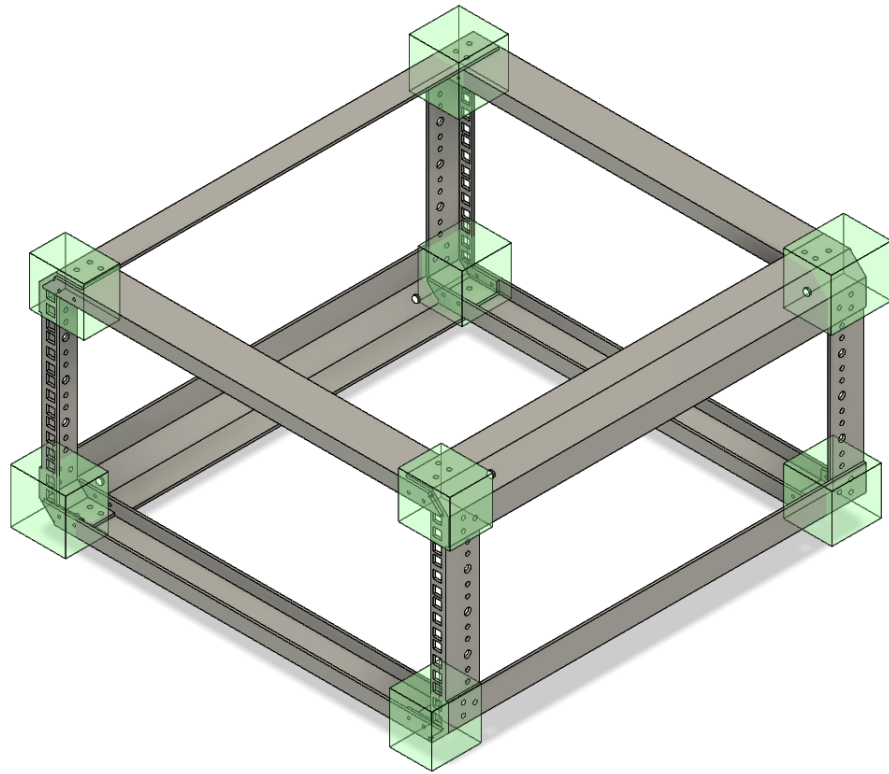


Рис. 2.17 Конструктивні обмеження кутів конструкції

Наступним і дуже важливим кроком, під час САЕ розрахунку, є побудова динамічної сітки, вона предсталвяє собою набір вершин, ребер та граней, що описують форму багатогранного об'єкта при твердотільному моделюванні. Грані зазвичай складаються з сітки, яка містить набір стандартних геометричних об'єктів що легко описуються: трикутників, чотирикутників, чи інших багатокутників. В залежності від заданого значення розбиття сітки, буде залежати точність оптимізації, відповідно і збільшиться час оптимізації моделі (рис 2.18) [24].

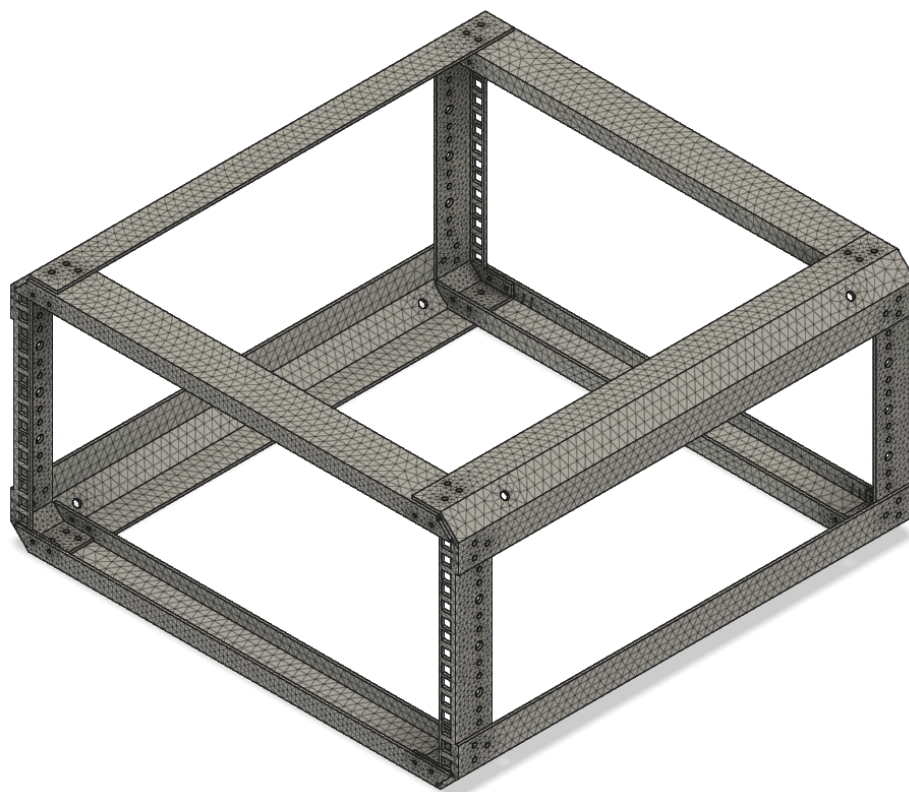


Рис. 2.18 3D-модель із динамічною сіткою

Фінальним етапом даного розділу є визначення робочих навантажень, оскільки конструкція повинна зберігати свою геометрію, забезпечувати належний стан та працездатність обладнання, яке закріплення на ній. Буде розраховано навантаження у розмірі 20G, згідно стандарту до конструкцій даного типу MIL-STD-810G та його підпункту 516.6

Дане навантаження задане відносно маси вхідної 3D-моделі конструкції каркасного типу перед топологічною оптимізацією, отриману з попередньому розділі.

Фізичну модель силового перенавантаження можна отримати імітаційним падінням конструкції з прикладеною силою (рис. 2.19).

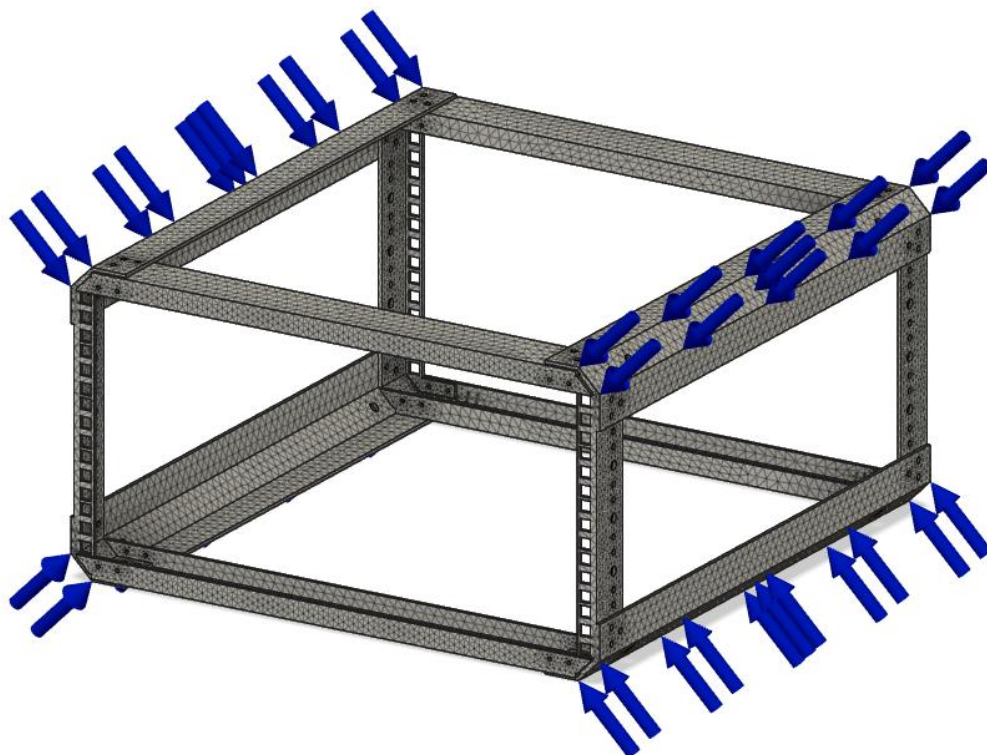


Рис. 2.19 Встановленні навантаження конструкції

Одже, врахувавши всі необхідні граничні умови, побудувавши динамічну сітку, та врахувавши необхідні слові навантаження, які будуть діяти на об'єкт дослідження було виконано процедуру оптимізацію маси моделі з заданим критерієм оптимізації (Рис. 2.20).

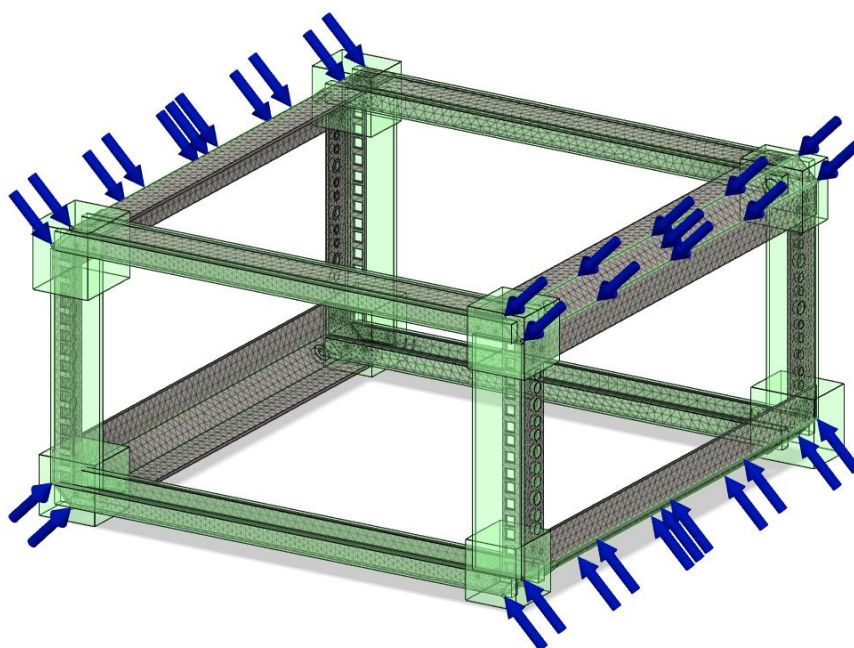


Рис. 2.20 Конструкція з урахуванням усіх граничних умов та навантажень

## 2.5 Топологічно оптимізована модель конструкції каркасного типу

В результаті топологічної оптимізації було отримано нову модель, представлена на рисунку 2.21. За результатами моделювання, було спроектовано твердодільну 3D-модель, яку продемонстровано на рисунку 2.22, яку додатково перевірено з тими самими силовими навантаженнями, що були прикладені в процесі оптимізації, та отримано результати, що відповідають початковим вимогам. Це дозволило комплексно вирішивши поставлене завдання зі зниження маси конструкції. В нашому випадку маса конструкції складає 3.6 кг, що на 56% легший від початкової маси конструкції.

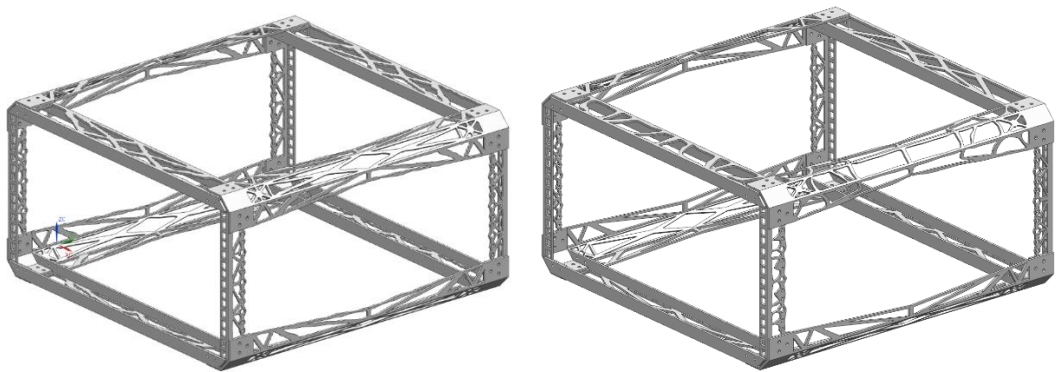


Рис. 2.21 Топологічно оптимізовані моделі конструкції каркасного типу

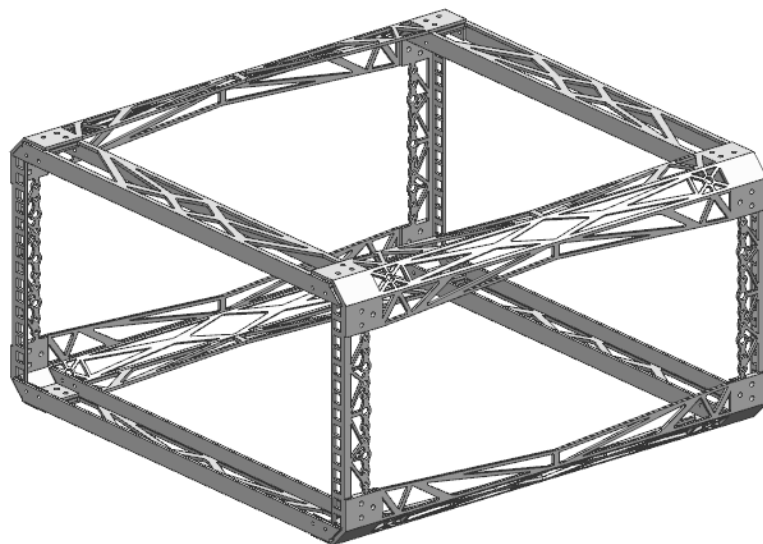


Рис. 2.22 3D-модель конструкції після топологічної оптимізації

## Висновки до розділу 2

В розділі було розглянуто конструкцію каркасного типу, та розглянуто основні елементи конструкції, проаналізовано старий технологічний процес виготовлення початкового виробу.

В результаті аналізу було отримано нові конструкторсько-технологічні рішення для елементів конструкції таким чином обґрунтовано та запропоновано заміну різьбових кріпильних отворів на монтажні гайки. Приведено технічні характеристики заклепок, що застосовуються в технологічному процесі виготовлення. Виконано підбір матеріалів для складових елементів нової конструкції.

Нову 3D-модель конструкції каркасного типу було спроектовано засобами САПР Siemens NX 11, яка в подальшому була оптимізована. В процесі проектування деталь юнітова стійка зазнала значних змін, які підвищили стійкість конструкції до навантажень в цілому.

3D-модель нової конструкції була створена у САД модулі САПР Siemens NX 11 та в подальшому була імпортована в САПР Autodesk Fusion 360, з метою подальшої обробки в САЕ модулі «Generative design». Початковими даними для виконання топологічної оптимізації були імпортована 3D-модель та введені характеристики матеріалів елементів конструкції, зазначення сил стискання заклепувальних з'єднань. Також були обґрунтовані та встановлені граничні обмеження на: кріпильні отвори, геометричну форму направляючу, юнітову стійку, п-подібну деталь та кути конструкції. Було створено динамічну сітку та встановлено точність розрахунку та робочі навантаження на конструкцію каркасного типу. В результаті виконання топологічної оптимізації було запропоновано декілька варіантів 3D-моделей для їх подальшого доопрацювання засобами твердотілого моделювання та вибору найоптимальнішої [25].

В підсумку було отримано нову, оптимізовану 3D-моделей конструкції каркасного типу, із масою меншою на 56% від початкової.

## РОЗДІЛ 3. ПРОЕКТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИГОТОВЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ КАРКАСНОГО ТИПУ НА БАЗІ ТОПОЛОГІЧНО-ОПТИМІЗОВАНОЇ МОДЕЛІ

### 3.1 Розробка технологічного процесу виготовлення конструкції каркасного типу

Після проведення процедури проектування твердотільної 3D-моделі початкові деталі, зазнали значних змін відповідно і технологічний процес виготовлення також потребує внесення відповідних коректив та доопрацювання[26].

Найбільше відмінностей зазнала юнітова деталь (рис.3.1), процес її виготовлення включає в себе більше формовочних та вирізних процесів, але відповідно було усунено різьбонарізну та фарбувальну операції з усіма переходами, що значно зменшило трудомісткість виготовлення деталі. При виготовленні даної деталі використовували два верстати: лазерний та листоформувальний. Новий технологічний процес юнітової стійки представлену у таблиці 3.1.

Перед запуском юнітової стійки на виготовлення на лазерний та листоформувальний верстати. 3D-модель необхідно доопрацювати з метою адаптації до технічними можливостями обладнання у відповідному модулі САПР Siemens NX «листовий метал». (рис. 3.2) [27].

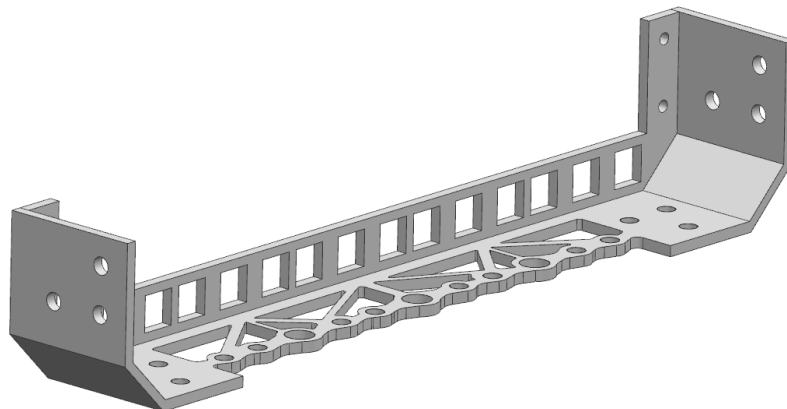


Рис 3.1 Топологічно оптимізована юнітова стійки

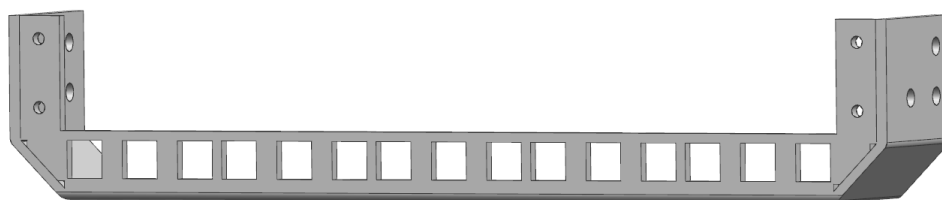


Рис. 3.2 Адаптована 3D-модель юнітової стійки

Табл. 3.1 Технологічний процес виготовлення юнітової стійки

Номер операції, назва	Технологічне обладнання	Номер переходу	Назва переходу
1	2	3	4
005 Програмна	Лазерний верстат MSFL1530S	1	Встановити, закріпити, зняти
		2	Вирізати отвори $\varnothing 4.8$ та $\varnothing 3.2$
		3	Вирізати заготовки згідно з заданим контуром
010 Формовочна	Верстат для гнуття листового металу NC E21	1	Встановити, закріпити, зняти
		2	Зігнути заготовки під кутом $90^\circ$
		3	Зігнути заготовки під кутом $45^\circ$
		4	Зігнути заготовки під кутом $45^\circ$

П-подібна деталь (рис. 3.3) відносно початкової зазнала незначних змін, а саме видалено «сірі зони» під час топологічної оптимізації, та змінена конфігурація з'єднувальних отворів (рис. 3.4). Технологічний процес

виготовлення даної деталі залишається практично незмінним теж, змінюється лиш час обробки на лазерному верстаті. За рахунок заміни матеріалів на корозостійкі фарбувальна операція тепер відсутня. Через заміну типу з'єднання елементів конструкції, була усунута пресувальна операція.

Новий технологічний процес п-подібної деталі представлену у таблиці 3.2.

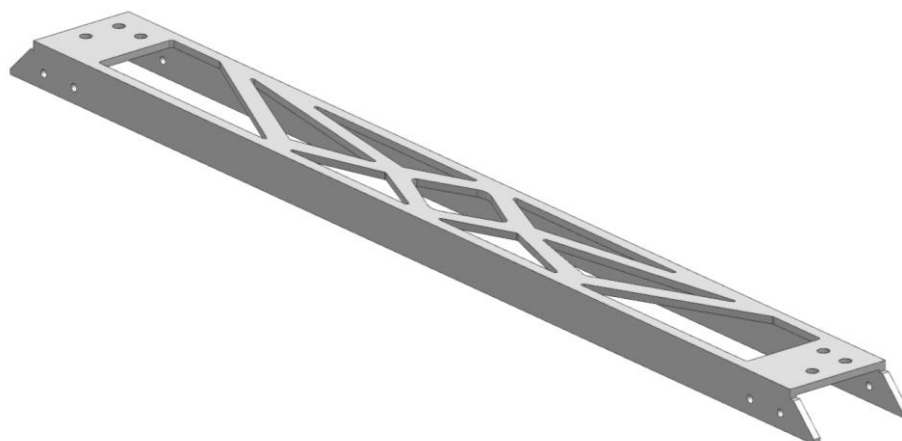


Рис. 3.3 Топологічно-оптимізована п-подібна деталь

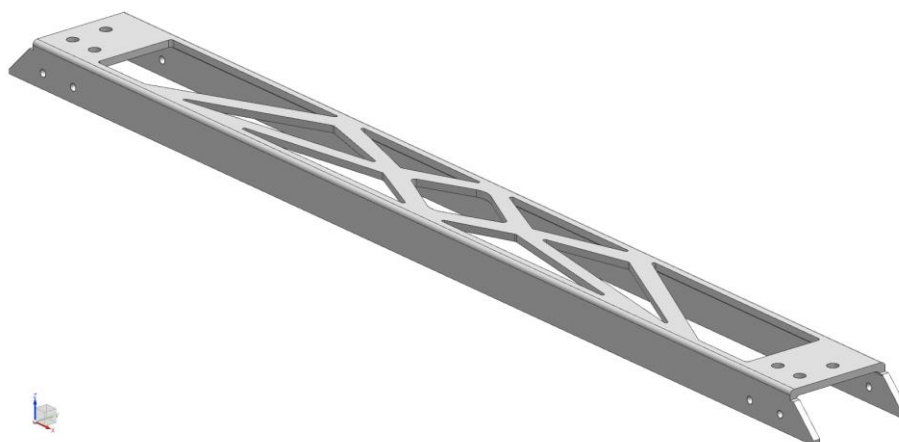


Рис. 3.4 Адаптована 3D-модель п-подібної деталі

Табл. 3.2 технологічний процес виготовлення П-подібної деталі

Номер операції, назва	Технологічне обладнання	Номер переходу	Назва переходу
1	2	3	4
005 Програмна	Лазерний верстат MSFL1530S	1	Встановити, закріпити, зняти
		2	Вирізати отвори Ø4.8 та Ø3.2
		3	Вирізати заготовки згідно з заданим контуром
010 Формовочна	Верстат для гнуття листового металу NC E21	1	Встановити, закріпити, зняти
		2	Зігнути заготовки під кутом 90 °

Технологічний процес направляючої (рис. 3.5) зазнав змін лише у програмній операції. Усунено фарбувальну операцію. Під час процесу топологічної оптимізації, було видалено «сірі зони» матеріалу (рис. 3.6), що не вплинуло на можливість формувати кути деталі на тому ж верстаті без спеціалізованих матриць.

Новий технологічний процес направляючої представлений у таблиці 3.3.

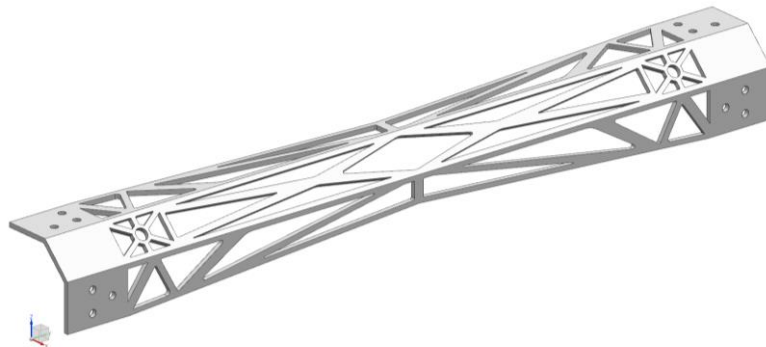


Рис. 3.5 Топологічно оптимізована направляюча

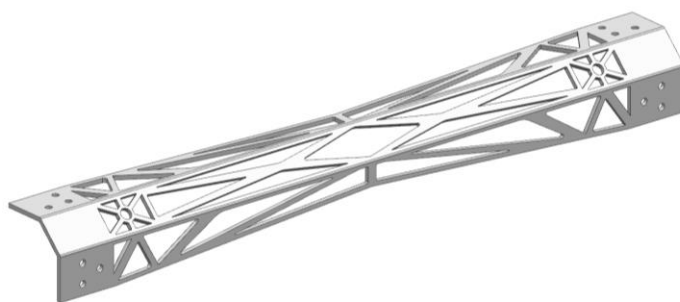


Рис 3.6 Адаптована 3D-модель направляючої

Табл. 3.3 технологічний процес виготовлення направляючої

Номер операції, назва	Технологічне обладнання	Номер переходу	Назва переходу
1	2	3	4
005 Програмна	Лазерний верстат MSFL1530S	1	Встановити, закріпити, зняти
		2	Вирізати отвори Ø4.8 Ø8
		3	Вирізати заготовки згідно з заданим контуром
010 Формовочна	Верстат для гнуття листового металу NC E21	1	Встановити, закріпити, зняти
		2	Зігнути заготовки під кутом 45 °

### 3.2 Розробка керуючої програми для вирізання на верстатах з ЧПК

Сучасне приладобудівне виробництво важко уявити без верстатів з числовим програмним управлінням. Сьогодні вони широко застосовуються як на промислових гігантах, так і на малих підприємствах. Безсумнівно, що успішний розвиток приладобудівної промисловості неможливо без активного використання обладнання з ЧПК і автоматизації виробництва[28].

Використання ЧПК підвищує вимоги до технологічної підготовки виробництва, а саме якості розробки керуючих програм (КП). Розробка КП - складний і трудомісткий процес, багато в чому визначає ефективність використання обладнання з ЧПК і якість оброблюваних деталей, тому зараз велику увагу звертається на розробку і вдосконалення систем і методів автоматизованої підготовки КП. САПР «Autodesk Fusion 360» забезпечує вирішення завдань автоматизованої підготовки керуючих програм ЧПК. Програма при цьому є результатом наскрізного циклу обробки інформації від креслення деталі до програми її виготовлення на верстатах з ЧПК, сукупність команд на мові програмування, відповідна заданим алгоритмом функціонування верстата з обробки конкретної заготовки. Система автоматизованого програмування (САП) обладнання з ЧПК - складова частина такої комплексної системи[29].

Сьогодні всі основні розробники САПР в складі своїх програмних комплексів пропонують модулі для розробки КП для верстатів з ЧПК. До переваг цих модулів можна віднести те, що, будучи інтегрованими в системи автоматизованого проектування і відповідно забезпечуючи коректний обмін моделями між конструкторськими і технологічними модулями, вони дозволяють успішно розробляти КП для основних видів металообробного обладнання зі стандартними технологічними можливостями - для фрезерних, токарних та верстатів. Недоліками ж багатьох систем є необхідність у високій кваліфікації технологів для роботи в САМ-системі, найчастіше неінформативне інтерфейс користувача, необхідність виконання численних ручних операцій, недостатньо розвинені функції діагностики програм на предмет виявлення помилок, обмежені можливості створення КП для найбільш сучасних або унікальних видів обладнання[30].

Далі розглянемо розгортки деталей елементів конструкції, відповідно до розроблених та адаптованих 3D-моделей (рис. 3.7-рис. 3.9).

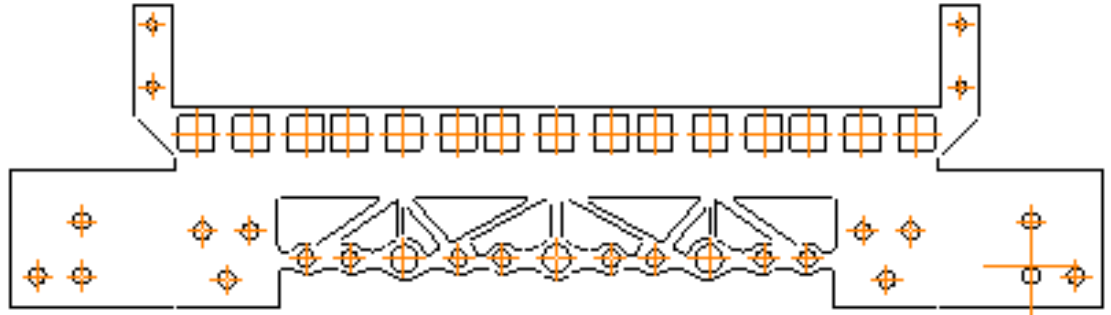


Рис. 3.7 Розгортка юнітової стійки

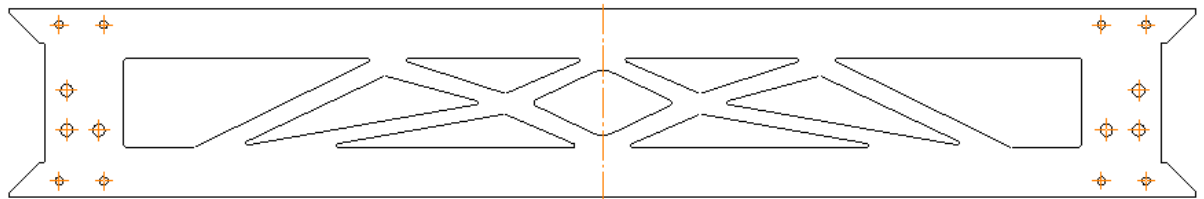


Рис. 3.8 Розгортка п-подібної деталі

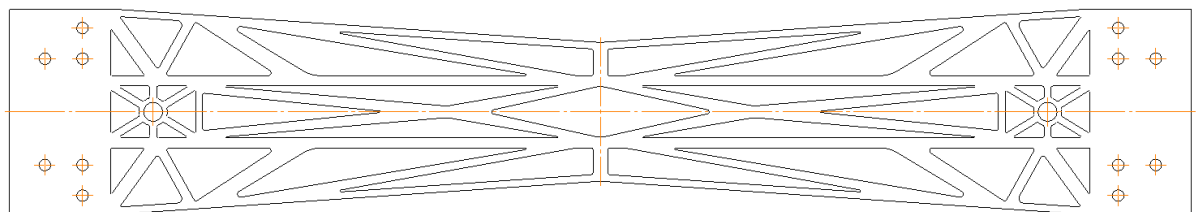


Рис. 3.9 Розгортка направляючої

Для створення керуючих програм на верстаті з ЧПК за основу беруться листові матеріали:

Юнітова стійка нержавіюча сталь AISI 304 товщиною 3мм

П-подібна деталь нержавіюча сталь AISI 304 товщиною 1,5мм

Напрвляюча алюміній марки АД0 (1050 ) товщиною 2 мм.

Розміри листа 1.25x2.5м

При порізці деталей лист установлюється на робоче поле лазерного верстата та вирізаються деталі із максимально можливим заповненням листа.

Керуючі програми наведено у Додатку В

### 3.3 Технологічний процес складання конструкції каркасного типу

Конструкція каркасного типу в своїй основі має монтажний вузол А1, до якого через отвори для кріплення приєднується направляюча (поз. 3) заклепками  $\varnothing 4.8 \times 14$  (поз. 4). Монтажний вузол А1 складається із двох юнітових стійок (поз. 1) та двох п-подібних деталей (поз. 2), поєднаних між собою за допомогою чотирьох заклепок  $\varnothing 3.2 \times 10$  (поз. 5).

Складальний кресленик та специфікація конструкції представлений наведено у додатках МД.ПБ91мп.13.1702.001СК(додаток Б)

Структурна схема складання використовується для аналізу та синтезу виробу в процесі складання. В цьому випадку під аналізом виробу розуміють напрямки розкладання складального елемента на найпростіші із встановленою послідовністю зав'язків від верхнього ступеню до нижчого, що вказує на обов'язкову придатність елементів до різноманітних складальних процесів[31].

Структурна схема складання «конструкції каркасного типу» наведена на (рис.3.10) та наведено у додатках МД.ПБ91мп.13.1702.002СХ (додаток Б)

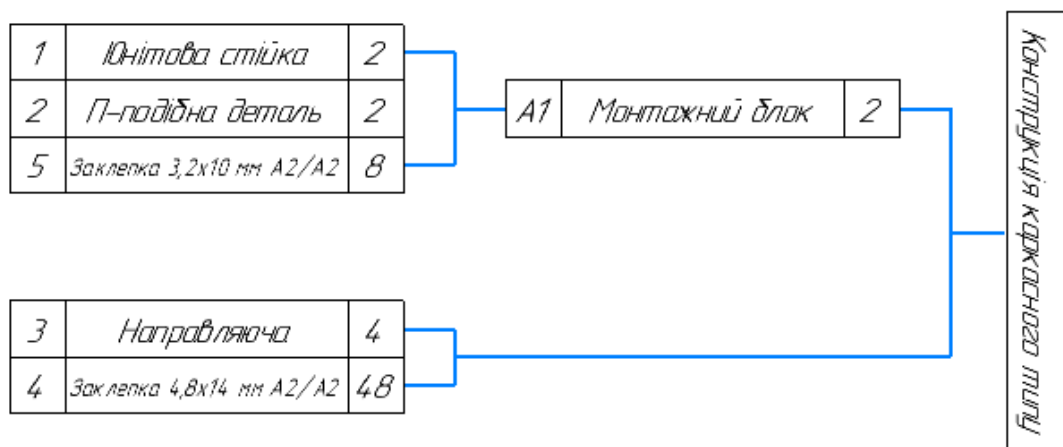


Рис. 3.10 Структурна схема складання конструкції каркасного типу

Технологічну схему складання проектуємо на основі складального кресленика виробу. Дана схема наочно демонструє, в якій послідовності

елементи поєднуються між собою. Такими елементами є монтажний вузол, направляюча та заклепки різних типів [32].

Проектування технологічної схеми складання конструкції каркасного типу розпочинаємо з призначення базового елемента. У нашому випадку базовим елементом буде юнітова стійка (поз. 1). Далі до неї кріпиться п-подібна деталь (поз. 2) заклепками (поз. 5) таким чином ми отримуємо монтажний блок А1. До якого закріплюємо направляючу (поз. 3) заклепками (поз. 4).

Технологічна схема складання «конструкції каркасного типу» представлена на (рис.3.11) та наведено у додатках МД.ПБ91мп.13.1702.003СХ (додаток Б)

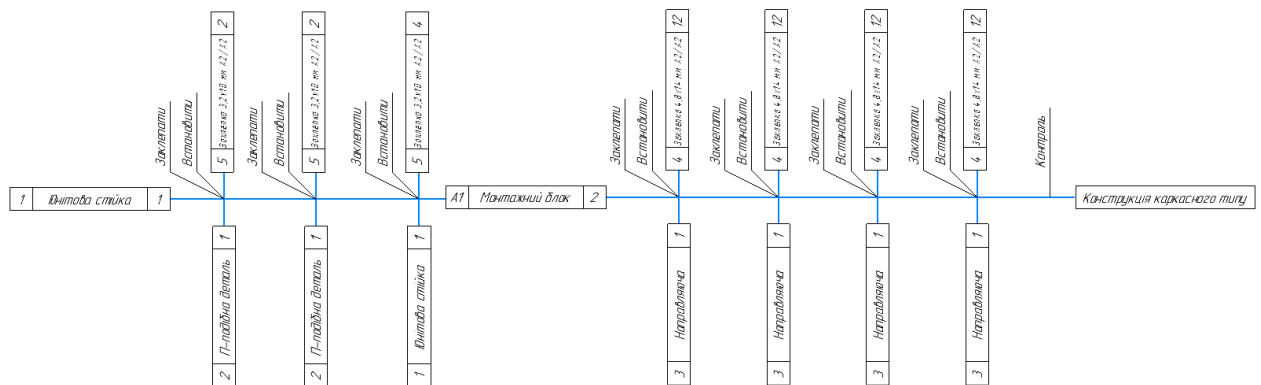


Рис. 3.11 Технологічна схема складання конструкції каркасного типу

Технологічний маршрут процесу складання. Послідовність операцій визначається на основі технологічних схем складання і загального переліку робіт [33].

Послідовність операцій визначається на основі технологічних схем і загального переліку робіт.

У технологічній схемі спосіб виготовлення відображається шляхом послідовного опису операцій, що протікають у відповідних апаратах, машинах або іншому устаткуванні. Умовний розподіл процесів на фізичні, механічні та хімічні сприяє їх типізації та полегшує вибір найефективнішого способу, складання вузлів та виробів (рис 3.12) [34].

**005 Комплектувальна**

1. Комплектувати деталі відповідно до специфікації

**010 Підготовча**

1. Підготувати деталі
2. Контролювати якість комплектуючих елементів

**015 Складальна (монтажний блок А1)**

1. Встановити юнітову стійку (поз. 1) до п-подібної деталі (поз. 2) закріпити двома заклепками (поз. 5).
2. Встановити П-подібну деталь (поз. 2) до юнітової стійки (поз. 1) закріпити двома заклепками (поз. 5).
3. Встановити Юнітову стійку (поз. 1) до встановлених п-подібних деталей, закріпити чотирьома заклепками (поз. 5) відповідно.

**020 Складальна**

1. До монтажного блоку А1, закріпити направляючу (поз. 3) дванадцятьма заклепками (поз.4 ).
2. До монтажного блоку А1, закріпити направляючу (поз. 3) дванадцятьма заклепками (поз.4 ).
3. До монтажного блоку А1, закріпити направляючу (поз. 3) дванадцятьма заклепками (поз.4 ).
4. До монтажного блоку А1, закріпити направляючу (поз. 3) дванадцятьма заклепками (поз.4 ).

**025 Контрольна**

1. Контролювати габаритні геометричні розміри конструкції

На основі технологічної схеми складання був розроблена маршрутно операційна технологія складання «конструкції каркасного типу» (рис.3.14) та наведена у Додатку Г.

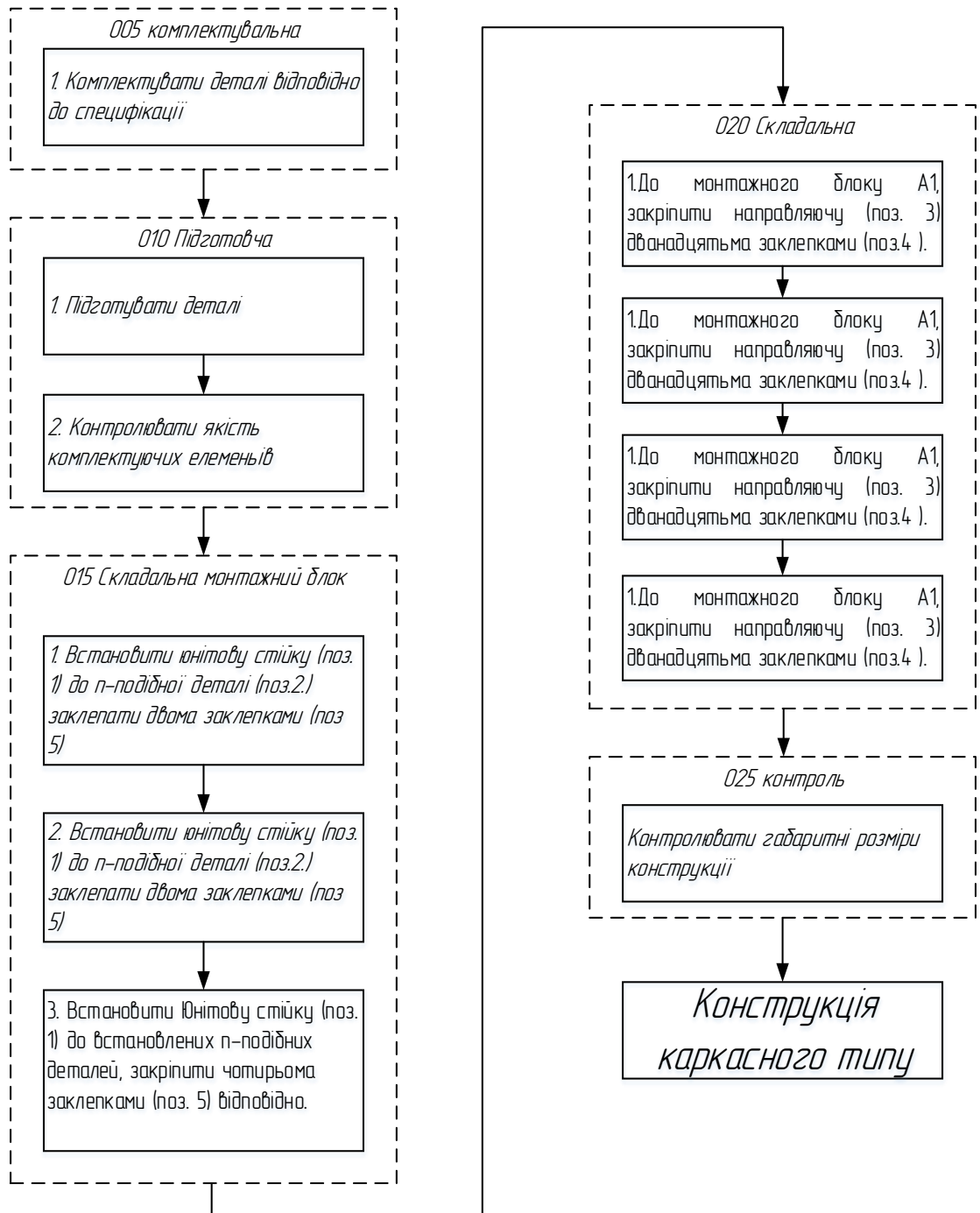


Рис 3.12 Технологічний процес складання конструкції каркасного типу

### 3.4 Оцінка ефективності удосконаленого технологічного процесу

Досить часто вирішення завдань по зменшенню маси виробу, а саме застосування методів топологічної оптимізації, призводить до змін в технологічному процесі, а також до збільшення часу виготовлення. Це пов'язано з необхідністю ускладнити конфігурацію деталей після проведення САЕ аналізу.

Це наглядно продемонстровано у таблиці 3.4, в якій наведено порівняльний час обробки однієї деталі на лазерному верстаті до оптимізації та після. Розрахунок часу порізки елементів конструкції на лазерному верстаті виконувався в САПР ProNest [35].

Табл 3.4 Час обробки елементів конструкції на лазерному верстаті

Назва	Час різання вихідної деталі, хв	Час різання оновленої деталі, хв
Юнітова стійка	5:34	9:37
П-подібна деталь	0:57	4:04
Направляюча	1:55	11:53

Збільшення часу на порізку елементів конструкції, компенсується конструкторсько-технологічними рішеннями:

- Всі різьбові з'єднання були замінені на інші типи кріплення, що в результаті зменшило трудомісткість виготовлення конструкції;
- Заміна матеріалів елементів конструкції також призвела до зменшення трудомісткості, оскільки корозостійкі матеріали не потребують нанесення додаткового покриття у вигляді фарби.

Тому, проаналізувавши дані зміни в ТП, можна зробити висновок, що топологічно-оптимізована конструкція каркасного типу, з оновленим технологічним процесом виготовлення стала менш трудомісткою.

### Висновки до розділу 3

Процедура топологічної оптимізації не дає готових рішень для виробництва, тому на основі отриманих результатів топології та спроектованої оптимізованої 3D-моделі конструкції каркасного типу була виконана процедура проектування елементів у модулі «листового металу» засобами САПР Siemens NX 11.

Отримані листові елементи, були представлені у вигляд розгорток та експортовані у форматі .DFX для подальшої обробки у САПР ProNest. Засобами програмного забезпечення на розгортки були встановленні відповідні матеріали та створені керуючі програми для лазерного верстата з ЧПК.

Враховуючи отримані нові 3D-моделі конструкції, а також конструкторсько-технологічні рішення внесені в ТП були спроектовані структурна та технологічна схема складання, а також розроблений технологічний процес складання виробу засобами САПР «ADEM» [36].

## **РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ «АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЕКТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ КАРКАСНОГО ТИПУ НА БАЗІ ТОПОЛОГІЧНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ»**

### **4.1. Опис ідеї проекту**

Ідея стартап-проекту полягає в тому, щоб за допомогою топологічно-оптимізованої конструкції каркасного типу «raskmount», полегшити захисні корпуси для крихкого обладнання

Основним напрямками застосування є промислові галузі галузі: приладобудування радіотехнічна й електронна промисловість, ракетно-космічна галузь та авіаційна промисловість.

Основною перевагою використання даної конструкції каркасного типу є знижена маса виробу на 56% та висока корозостійкість, стійкість до ударних навантажень, спрощений технологічний процес виготовлення. Можливість коригувати масу конструкції відповідно до розрахункового ударного та вібраційного навантаження кріпильного обладнання.

На ринку існує декілька схожих конструкцій поміщених у протиударний корпус, але перевагою даного виробу є простота складання, легкість та надійність. Корозостійкі, антивібраційні з'єднувальні елементи, можливість закріплення додаткових антивібраційних опор. А також можливість виготовлення оптимізованої стійкий у доволі великому асортименті розмірів.

Для реалізації даної конструкції каркасного типу, потрібно провести аналіз можливості виходу виробу на загальний ринок захисних корпусів. Важливим аспектом являється його конкурентоспроможність в порівнянні з зарубіжними та вітчизняними аналогами [37].

Зміст запропонованої ідеї, зниження маси, базові напрямки застосування конструкції та потенційних клієнтів корпусів за групами наведено у таблиці 4.1 [37].

Таблиця 4.1. Опис ідеї стартап-проекту

<i>Зміст ідеї</i>	<i>Напрямки застосування</i>	<i>Вигоди для користувача</i>
За допомогою розробленої конструкції каркасного типу, знизити масу готового продукту напрямку, яка підвищить мобільність при транспортуванні, не знижуючи при цьому стійкість до вібрацій та ударних нагрузок.	Приладобудування	Можливість розміщення важчого обладнання, враховуючи нагрузку при переносі.
	радіотехнічна промисловість	Закріплення габаритного обладнання,
	Ракетобудування	Можливість транспортування більш точного обладнання не боячись втрати попередніх налаштувань
	Авіабудування	Зниження маси виробу при транспортуванні безпілота.

Отже, пропонується новий продукт каркасного типу, який знижує масу готового виробу, забезпечуючи при цьому функціональні та габаритні характеристики початкового. На основі отриманих результатів з таблиці проведемо порівняльний аналіз потенційних переваг конструкції каркасного типу, власної ідеї виробу з ринковими пропозиціями вітчизняних та зарубіжних конкурентів [37].

Для цього визначено показники, що мають такі значення:

- гірші (W, слабкі);
- аналогічні (N, нейтральні);
- кращі (S, сильні) (табл. 4.2).

Таблиця 4.2 Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№ п/п	Техніко-економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів				W (Слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проект	Peli cases	SKB cases	CP cases			
1.	Торгівельна марка	Немає	є	є	є	+		
2.	Стійкість до корозії	Є	Немає	є	є			+
3.	Номенклатура розмірів	є	є	немає	немає			+
4.	Показник часу виготовлення	Високий	Низький	Середній	Низький			+
5.	Легка маса конструкції	є	немає	немає	немає			+
6.	Вібраційна стійкість конструкції	Високий	Середній	Високий	Низький		+	
7.	Ринкова ціна	низька ціна	Висока ціна	Середня ціна	Висока ціна			+

Проведено порівняння техніко-економічних характеристик проекту конструкції каркасного типу з потенційними конкурентами в цій галузі. В результаті проведеного аналізу було визначено, що слабкою стороною нашої конструкції є те, що він безіменний і без відомої всім торгівельної марки. Хорошу стійкість до вібрацій мають всі конструкції, але основними перевагами продукту є його ціна, корозостійкість та знижена маса конструкції.

Наступним кроком є необхідність провести аудит технології виготовлення, за допомогою якого, можна реалізувати ідею проекту.

Визначення виробничих можливостей здійсненності ідеї проекту передбачає аналіз складових які вказані в таблиці 4.3 [37].

Табл. 4.3 Технологічна здійсненність ідеї проекту

<i>№ п/п</i>	<i>Ідея проекту</i>	<i>Технології її реалізації</i>	<i>Наявність технологій</i>	<i>Доступність технологій</i>
1	Легша конструкція з збереженням функціоналу	Впровадження програмного забезпечення розрахунку.	Наявна	Доступна
2	Оптимізований технологічний процес виготовлення конструкції	Використання автоматизованої методології розрахунку.	Наявна	Доступна
3	Спрощення складання конструкції	Заміна кріпильних елементів конструкції	Наявна	Доступна

Проаналізувавши таблицю 4.3, бачимо, що даний проект доступний до реалізації як теоретично так і практично, усі виробничі технології є доступними до виконання даного проекту каркасного типу. Єдиним параметром, який недоступним нам на даний момент є відсутність матеріальних можливостей [37].

#### 4.2 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

У даному пункті, визначимо ринкові можливості конструкції каркасного типу, які можна використати під час ринкового впровадження полегшеного продукту, та загрози, які можуть перешкодити його реалізації.

Для цього проведемо аналіз попиту на захисні корпуси: наявність попиту, обсяг, динаміку розвитку (табл. 4.4) [37].

Таблиця 4.4. Попередня характеристика потенційного ринку стартап проекту

<i>№ п/п</i>	<i>Показники стану ринку (найменування)</i>	<i>Характеристика</i>
1	Кількість головних гравців, од	3
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум. од	10000
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Конкуренція вітчизняних та зарубіжних фірм
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Присутні
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	63,2%

Провівши аналіз потенційного ринку конструкцій каркасного типу, виявлено, що не зважаючи на наявність на ринку вітчизняних та зарубіжних конкурентоспроможних фірм, які займаються схожими напрямками, динаміка ринку зростає, і це дає нам шанси, специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації присутні і дуже жорсткі, середня арифметична норма рентабельності складає 63,2 %. Наведені фактори надають позитивний вплив на умови виходу конструкції каркасного типу на ринок[37].

Визначаємо потенційні групи клієнтів, яким це може бути цікаво, їх характеристики, та сформуємо орієнтовний перелік вимог до конструкції каркасного типу для кожної групи (табл. 4.5) [37].

табл. 4.5 Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

<i>№ n/n</i>	<i>Потреба, що формує ринок</i>	<i>Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)</i>	<i>Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів</i>	<i>Вимоги споживачів до товару</i>
1	Зниження маси виробу, при збереженні функціоналу	Приладобудівні, авіа- та ракетобудівні підприємства радіотехнічна промисловість	Підприємства спрямовані на різні типи стійкості обладнання	Зниження маси виробу, для кращого транспортування

Проаналізувавши табл. 4.5 бачимо, що основною групою клієнтів, яких може зацікавити конструкція каркасного типу є приладобудівна, авіа- та ракетобудівні підприємства а також радіотехнічна галузь. Зважаючи на те, що основними вимогами є зменшення маси конструкції та збереження її функціоналу [37].

При впровадженні даного проекту конструкції існують загрози, які необхідно врахувати, визначити та проаналізувати можливу ринкову реакцію на появу того чи іншого фактору. Фактори загроз наведено в таблиці 4.6 [37].

Таблиця 4.6. Фактори загроз

№ n/n	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Конкуренція	Виготовлення більшого асортименту продукції	Введення більш ширшої лінійки конструкцій
2	Старіння	Поява нових версій обладнання	Моніторинг ринку, постійна модернізація
3	Відсутність попиту на продукцію	Через те, що технологія нова, покупці не поспішають купувати товар	Розповсюдження реклами з наведенням аргументів та переваг даного продукту
4	Технічний	Недостатньо спеціалістів в даній області	Проведення атестації та навчання кадрів, для підвищення рівня їх знань
5	Інфляція	Зміна курсу гривні, що спричинить зміну ціни товару	Моніторинг економічної ситуації в країні

Аналізуючи ринкове середовище конструкцій каркасного типу зроблено висновок, що найбільшою загрозою для реалізації конструкції є наявність конкурентно спроможних фірм на ринку, у яких уже є певний досвід у виробництві.[37].

В таблиці 4.7 визначено існуючі фактори можливостей конструкції. Проаналізовано можливості, які сприяють виходу конструкції каркасного типу на ринок та переваги, які отримає покупець згідно відгуку на той чи інший фактор можливостей [37].

Таблиця 4.7. Фактори можливостей

№ n/n	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Попит на якісний легкий продукт	Можливість виготовляти конструкції, надійної та легкої конфігурації.	Дослідження нових технологій, вдосконалення виробництва
2	Економічні	Підтримка інноваційного виробництва	Підвищення/пониження ціни на продукт; зменшення податкового тиску
3	Можливість стати монополістом	Акцентуючи увагу на перевагах та постійно вдосконалювати технологію, можна стати монополістом.	Робота над вдосконаленням конструкцій, створення нових функціональних можливостей товару.
4	Науково-технічні	Модернізація технології виготовлення продукту	Впровадження нової технології, підвищення функціональних можливостей товару та ціни
5	Інфляція	Зміна курсу гривні, що спричинить зміну ціни товару	Моніторинг економічної ситуації в країні

У таблиці 4.7 показано основні фактори можливостей конструкції каркасного типу, які сприяють виходу продукту на загальний ринок. Основні можливості це зацікавленість у полегшення та зміцнення конструкції, що приведе до розширення ринку збуду конструкції каркасного типу, а також його вдосконаленні в майбутньому. [37]

Далі необхідно провести аналіз пропозиції конструкцій каркасного типу: визначити загальні риси конкуренції на вітчизняному та зарубіжному ринку (табл. 4.8).

Табл. 4.8 Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

<i>Особливості конкурентного середовища</i>	<i>В чому проявляється дана характеристика</i>	<i>Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)</i>
Чиста конкуренція	На ринку мала кількість схожих пропозицій	Створення легкого та надійного продукту, який буде конкурентоспроможний
Національний	Конкуренція на міжнародному рівні	Розповсюдження реклами участь на промислових виставках
Внутрішньогалузевий	Виробники здійснюють виготовлення продуктів, які задовольняють одну потребу	Виготовлення товару з перевагою в багатьох характеристиках.
Товарно-видова	Конкуренція між товарами спільного виду та призначення	Вдосконалення товару
Марочна	Вказує на відповідальне за готовий продукт підприємство	Створення власної торгівельної марки
Цінова	Застосування ціни як засобу забезпечення кращих умов збуту	Зменшення кількості робочих кадрів за рахунок автоматизації виробництва, що призведе до зниження собівартості продукту.

Було проаналізовано ринок збуту конструкції та виявлено, що на ринку присутня чиста конкуренція конструкцій, так як окремі виробники не можуть впливати на ціну конструкцій каркасного типу на ринку в цілому. За рівнем конкурентної боротьби – міжнародна з міжгалузевими відчизняними ознаками. [37]

Після аналізу конкуренції конструкцій каркасного типу проведемо більш детальний аналіз умов конкуренції в галузі (за моделлю 5 сил М. Портера) (табл.4.9).

Табл.4.9 Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

<i>Складові аналізу</i>	<i>Прямі конкуренти в галузі</i>	<i>Потенційні конкуренти</i>	<i>Постачальники</i>	<i>Клієнти</i>	<i>Товари-замінники</i>
	Pel cases SK cases PC cases	Наявність торгівельної марки, наявність постійних споживачів конструкції.	Значні розміри поставок, диференціація витрат	Приладобудування Авіа та ракетобудівні промисловість	Вироби, яким не властива стійкість до ударів вібрацій
<i>Висновки</i>	Високий рівень конкуренції серед виробників в продукції, збільшення прибутку через попит.	Наявність можливості входу на ринок користуючись технічними перевагами своєї конструкції	Постачальники не установлюють ціну для ринку	Наявність вимог щодо якості, точності та термінів поставки продукту	Товари-замінники не можуть задовольнити всі необхідні потреби

Зробивши детальний аналіз умов конкуренції в області конструкції каркасного типу, визначено ринок збуту конструкцій, прямі конкуренти продукту, та їх сильні сторони, функції постачальників конструкцій та клієнтів, а також наявність товарів-замінників конструкцій каркасного типу на ринку. Після проведення аналізу визначаємо та обґрунтовується перелік факторів конкурентоспроможності нашого продукту. На момент, поки проект конструкції не реалізовано, точність аналізу не велика, проводиться лише попередня оцінка ступенів конкурентоспроможності конструкції (табл. 4.10) [37].

Таблиця 4.10. Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1	Якість	Елементом конструкції властива стійкість до корозії
2	Точність	За рахунок виготовлення на лазерному станку точність кратна 0.05 мм
3	Підтримка клієнтів	Підбір розміру відповідно до потреб
4	Ціновий	Низька ціна виготовлення за рахунок оптимізованого технологічного процесу
5	Термін виготовлення	Оптимізована робота при виготовленні різної номенклатури

Визначивши та обґрунтувавши фактори конкурентоспроможності нашої конструкції (табл. 4.10) зроблено порівняльний аналіз сильних та слабких сторін конструкції каркасного типу. Аналізуючи наведений фактор, що роблять фактори конструкції в порівнянні з конкурентними проектами значущими, визначено, що основними перевагами конструкції каркасного типу є оптимізована маса конструкції за збереженого стандартного функціоналу.

Таблиця 4.11. Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін конструкції «Формування функціонального покриття утвореного методом йонно-плазмового термоциклічного азотування»

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з «SKB CASE»						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1	Ціна	19						+	
2	Швидкість проектування	19						+	
3	Надійність	15					+		
4	Технічна підтримка	16						+	
5	Безпомилковість проектування	18							+

Складання SWOT-аналізу є фінальним етапом ринкового аналізу конструкції каркасного типу та можливостей впровадження проекту конструкції. Розроблено матриці аналізу сильних та слабких сторін

конструкції, переваг та загроз на основі виділених ринкових можливостей та загроз, сильних і слабких сторін конструкції (табл. 4.12) [37].

Таблиця 4.12. SWOT- аналіз стартап-проекту

<p><i>Сильні сторони:</i> зниження маси конструкції; підвищення надійності конструкції; з'єднання на заклепки; прорахована навантаження конструкції; корозостійкі елементи конструкції; новизна технології;</p>	<p><i>Слабкі сторони:</i> наявність фірм конкурентів; продукт ще не зарекомендував себе на ринку; немає торгової марки.</p>
<p><i>Можливості:</i> попит на якісний та точний продукт; наявність можливості створення роздрібної мережі в Україні; можливість стати монополістом; модернізація технологій; підтримка інновації.</p>	<p><i>Загрози:</i> конкуренція; наявність технологій, які перевірені часом; старіння продукції з часом; відсутність кадрів з обслуговування.</p>

Перелік слабких та сильних сторін конструкції, а також можливостей і загроз перед нею був представлений на основі попередніх даних розділу стартап проекту. Зважаючи на наведені вище фактори можна впевнено сказати, що у конструкції каркасного типу є можливість виходу на сучаний ринок, і її закріплення зважаючи на його конкурентні переваги: знижена маса конструкції, підвищення надійності конструкції, з'єднання на заклепки прорахована навантаження конструкції, корозостійкі елементи конструкції, новизна технології, стійкість покриття; . Слабкою стороною проекту можна вважати те, що конструкція не відома на ринку і це може сповільнити її швидкий розвиток для виробника. Через що необхідно буде вести сильну рекламну компанію, для забезпечення нас достатньою кількістю клієнтів. [37]

Здійснивши SWOT-аналіз конструкції каркасного типу було розроблено альтернативи ринкової поведінки конструкції, складено перелік заходів для впровадження стартап-проекту конструкції на вітчизняний ринок та оцінено час її ринкової реалізації не зважаючи на потенційні проекти конструкцій конкурентів, що можуть бути також виведені на ринок (табл. 4.9, аналіз потенційних конкурентів). Визначені альтернативи аналізуються з точки зору строків та ймовірності отримання ресурсів (табл.4.13). [37]

Табл.5.13 Альтернативи ринкового впровадження  
стартап-проекту конструкції

<i>№ n/n</i>	<i>Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки</i>	<i>Ймовірність отримання ресурсів</i>	<i>Строки реалізації</i>
1	Розробка нової оптимізованої конструкції	низька	12 міс.
2	Стратегія компенсації слабких сторін стартапу наявними ринковими можливостями	висотка	6 міс.

Отже, Проаналізувавши табл.5.13, вибираємо найкращий варіант альтернативної ринкової поведінки конструкції, який має ймовірність отримання ресурсів та короткий термін реалізації конструкції. Отже нам необхідна стратегія нейтралізації ринкових загроз конструкції сильними перевагами, оскільки там висока ймовірність отримання позитивних результатів та найменший строк реалізації з представлених [37].

### 4.3 Розроблення ринкової стратегії проекту

Розроблення ринкової стратегії конструкції каркасного типу першим кроком передбачає визначення стратегії охоплення обраного ринку: опис цільових груп потенційних споживачів конструкцій (табл. 4.14).

Табл.4.14 Вибір цільових груп потенційних споживачів

<i>№ n/n</i>	<i>Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів</i>	<i>Готовність споживачі в сприйняти продукт</i>	<i>Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)</i>	<i>Інтенсивність конкуренції в сегменті</i>	<i>Простота входу у сегмент</i>
1	Державні підприємства	Готові	Високий попит	Висока	Складна
2	Приватні підприємства	Готові	Середній попит	Середня	Середня
3	Науково-дослідний інститут	Готові	Середній попит	Низька	Середня

Аналізуючи готовність споживачів прийняти конструкцію каркасного типу, орієнтовний попит конструкцій в межах цільової групи, інтенсивність конкуренції продукту в сегменті, простота входу у сегмент вітчизняного ринку зроблено висновки. При виборі у якості потенційних клієнтів конструкцій державні та приватні підприємства існує великий та середній рівень конкуренції, а також складний вхід на ринок конструкцій, проте попит на конструкції каркасного типу більший ніж в науково-дослідницькому інституті, що спричинить швидшу реалізацію прибутку за рахунок конструкції та збільшення продукції.

Так як конструкція каркасного типу працює із кількома сегментами ринку, використаємо стратегію диференційованого маркетингу. [37] Обираємо стратегію розвитку (табл. 4.15).

Табл. 4.15 Визначення базової стратегії розвитку конструкції

<i>№ п/ п</i>	<i>Обрана альтернатива розвитку проекту</i>	<i>Стратегія охоплення ринку</i>	<i>Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи</i>	<i>Базова стратегія розвитку*</i>
1	Стратегія спеціалізації	Стратегія одно сегментної концентрації	Низька маса, висока надійність, стійкість до корозії	Стратегія диференціації

Проаналізувавши таблицю 4.15 Визначення базової стратегії розвитку конструкції каркасного типу було обрано за базову стратегію розвитку конструкції – стратегію диференціації, тому що вона передбачає надання конструкції важливої з точки зору споживача властивостей, які роблять конструкцію відмінною від товарів конкурентів. [37]

Наступним кроком є вибір стратегії конкурентної поведінки конструкції каркасного типу (табл. 4.16).

Табл. 4.16 Визначення базової стратегії конкурентної поведінки конструкції

№ n/ n	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки
1	Проект не є «першопрохідцем»	Створена компанія забиратиме клієнтів у конкуруючих фірм.	Однаковими характеристиками будуть габаритні розміри	Стратегія заняття конкурентної ніші

За стратегію конкурентної поведінки конструкції каркасного типу було обрано стратегію зайняття конкурентного місця на ринку конструкцій. В такому випадку в якості цільового констркції ринку ми займамо декілька сегментів ринку, і займається розвитком конкурентоспроможності конструкції каркасного типу за рахунок розвитку і формування рекламної політики. [37]

На основі вимог споживачів до конструкції каркасного типу з обраних сегментів, а також в залежності від стратегії розвитку та стратегії конкурентної поведінки конструкції розробляється стратегія позиціонування (табл.4.17), що полягає у формуванні ринкової позиції конструкції каркасного типу, за яким споживачі мають ідентифікувати нашу торгівельну марку/проект. [37]

Табл. 4.17 Визначення базової стратегії розвитку

№ n/ n	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувавши комплексну позицію власного проекту (три ключових)
1	Низька маса, при надійному функціоналі	Стратегія диференціації	Знижена маса на 56%	Легко Міцно Дешево

За базову стратегію розвитку конструкції каркасного типу було обрано стратегію диференціації. Цільовими групами для нас є вітчизняні державні та приватні підприємства, наша ринкова компанія буде забирати клієнтів у конкурентів, та за рахунок цього дуже швидко розвиватися в даному

напрямку, за рахунок технічної підтримки відповідних спеціалістів, дшевизни продукту та його якості і надійності конструкції. [37]

#### 4.4 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Першим кроком є формування маркетингової концепції конструкції каркасного типу, який отримає споживач. Для цього у табл. 4.18 потрібно підсумувати всі попередні результати аналізу конкурентоспроможності конструкції каркасного типу.

Табл.4.18 Визначення ключових переваг концепції потенційного конструкції

<i>№ n/n</i>	<i>Потреба</i>	<i>Вигода, яку пропонує товар</i>	<i>Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)</i>
1	Необхідність у легкій та міцній конструкції, стійкій до корозії	Поєднання надійності та легкості конструкції, без значних удорожчань виробу	Легкість, міцність, дшевизна

Висновок: в результаті визначення ключових переваг нашої конструкції каркасного типу, стало можливим створення цільової реклами конструкції і продемонструвати ключові переваги перед конкурентами. [37]

Надалі розробимо трирівневу маркетингову модель конструкції каркасного типу: уточнимо ідею нашого продукту, його елементарні складові, особливості процесу його вибору (табл.4.19). [37]

Табл.4.19 Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові		
I. Товар за задумом	Конструкція каркасного типу, зі зниженою масою, зі збереженими функціональними характеристиками та високою стійкістю до корозії		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх /Тл/Е/Ор
	1. Надійність	Нм	Тл
	2. Точність	Нм	Тл
	3. Технічна підтримка	М	Тх
	4. Термін реалізації	Нм	Тл
	5. Ціна	Нм	Е
	6. Транспортабельність	М	Тх
	Якість відповідає нормам MIL-std-810f «ряд стандартних параметрів для лабораторних випробувань військового стандарту»		
	Пакування: захисний пластиковий контейнер, торгівельної марки та назвою продукту		
	Марка: назва організації-розробника		
III. Товар із підкріпленням	Розповсюдження реклами		
	Знижка за умови оптової закупівлі		
За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: Захист інтелектуальної власності, патент на винахід.			

Наступним кроком для аналізу нашої конструкції каркасного типу є визначення цінових меж конструкції, якими необхідно керуватися при встановленні ціни на конструкцію каркасного типу, це передбачає аналіз цін та товарів конкурентів, та доходів споживачів товару - конструкції каркасного типу (табл. 4.20) [37].

Таблиця 4.20. Визначення меж встановлення ціни для конструкції

№ п/п	Рівень цін на товари замітники	Рівень цін на товари аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
1	1200-2000 у.о.	1500-3000 у.о.	20000-25000 у. о	800-1300 у.о

В таблиці 4.20 вказано рівень цін на конструкцію каркасного типу замітники та аналоги, та рівень доходів нашої цільової аудиторії, а також межі встановлення цін на конструкцію. Було обрано середню цінову категорію, для збільшення кількості споживачів конструкції. [37]

Далі визначимо оптимальну системи збуту конструкції каркасного типу, в межах якого приймається рішення (табл. 4.21).

Табл. 4.21 Формування системи збуту конструкції

<i>№ n/n</i>	<i>Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів</i>	<i>Функції збуту, які має виконувати постачальник товару</i>	<i>Глибина каналу збуту</i>	<i>Оптимальна система збуту</i>
1	Купівля	Поставка товару продавцю, технічна підтримка	Канал нульового рівня	Прямий, розповсюдження через Інтернет та журнали

Основним каналом збуду конструкції каркасного типу є прямий продаж, через вузьку специфіку конструкції доцільним є продаж без перекупів, так як це суттєво знизить ціну продукту каркасного типу. Тому було обрано канал нульового рівня збуту. [37]

Останньою складовою маркетингової програми для конструкції каркасного типу є розроблення концепції маркетингових комунікацій, що базується на обраних раніше основах основу для позиціонування на конструкцію, визначену специфіку поведінки клієнтів (табл. 4.22). [37]

Табл.4.22 Концепція маркетингових комунікацій конструкції

<i>№ n/n</i>	<i>Специфіка поведінки цільових клієнтів</i>	<i>Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти</i>	<i>Ключові позиції, обрані для позиціонування</i>	<i>Завдання рекламного повідомлення</i>	<i>Концепція рекламного звернення</i>
1	Наявність якісного товару зі специфічними властивостями та доступною ціновою політикою	Інтернет ресурси, виробничі виставки, каталоги, наукові статті, презентації виробників	Доступність та змістовність інформації щодо фірми та товару. Раціональне прийняття рішень.	Розповсюдження інформації про товар та його властивості, формування знань про товарну марку	Зниження маси на 56%, витриманий функціонал та надійність

Низька ціна, легкість конструкції, корозостійкість висока стійкість до ударних навантажень основні показники маркетингу. Маркетингова кампанія конструкції в основному буде проведена через інтернет, журнали, тематичні виставки, полігони де може бути продемонстровано конструкцію каркасного типу та її технічні можливості перед потенційними клієнтами. [37]

## Висновки до розділу 4

Даний розділ магістерської дисертації присвячений розробці стартап-проєкту «конструкції каркасного типу». Описано практичні сторони застосування конструкції, для реалізації її маркетингових можливостей та пошуку шляхів виходу на ринок продажу конструкції. Вихід конструкції каркасного типу на комерційний вітчизняний ринок можливий тільки за рахунок зниження маси, підвищення стійкості до корозії і як наслідок збільшення попиту на дану конструкцію.

Під час розробки стартап-проєкту «конструкції каркасного типу» було наведено основні ідеї та сформовано список основних напрямків реалізації стартап-проєкту конструкції, розглянуто основні переваги досліджуваного продукту. Проаналізовано сильні та слабкі сторони конструкції каркасного типу у порівнянні з вітчизняними та зарубіжними конкурентами, що дало змогу стверджувати про наявний конкурентоспроможний потенціал нашої конструкції.

Попередній аналіз ринкової характеристики конструкції каркасного типу продемонстрував, що ринок має хороший попит на неї і незмінно зростаючу динаміку розвитку. Також було визначено, що створена каркасна конструкція є рентабельною у вибраній галузі, але зважаючи на конкурентних конструкцій можна стверджувати, що поріг виходу на ринок нашого виробу каркасного типу є досить високим серед інших.

Під час аналізу потенційних груп споживачів конструкції було вирішено акцентувати нашу основну увагу на держаних та приватних підприємствах адже вони основні споживачі.

Беручи до уваги все вище зазначене, з впевненістю можна стверджувати, що подальший розвиток конструкції є доцільним для проєкту «конструкції каркасного типу», за рахунок зростаючого попиту на ринку на виріб та сильних сторін продукту.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ДО РОБОТИ

За результатами магістерського дисертаційного дослідження, можна зробити висновок, що застосування методів топологічної оптимізації та раціональним встановленням конструкторсько-технологічних обмежень може бути дуже ефективним при вирішенні завдань зниження маси виробів.

Виконаний в роботі аналіз чисельних наукових досліджень топологічної оптимізації свідчить про актуальність напрямку, його перспективність та ефективність у досягненні бажаного результату при вирішенні сучасних конструкторсько-технологічних завдань.

В результаті отримано топологічно-оптимізовану конструкцію зі зниженням маси на 56% від початкової з урахуванням всіх заданих функціональних характеристик виробу та технологічних обмежень виробництва.

Для вирішення поставленого завдання було проведено аналіз початкового технологічного процесу виготовлення виробу та проаналізовано матеріали елементів конструкції каркасного типу і виконано огляд та підбір методів для топологічної оптимізації виробу.

З метою зниження маси конструкції в роботі було запропоновано внести зміни до технологічного процесу, а саме заміна елементів кріплення з гвинтового з'єднання на антивібраційні заклепки. Також були встановлені конструкторсько-технологічні обмеження на виріб та з їх урахуванням було обґрунтовано необхідні корективи в технологічний процес виготовлення конструкції. Після виконання CAE аналізу конструкції отримано топологічно-оптимізовану 3D-модель, яка була опрацьована засобами CAD в твердотільну, а в подальшому в листовий метал з отриманням розгорток, які були імпортовані в векторну графіку та на їх основі були сформовані керуючі програми для верстату лазерної порізки з ЧПК.

Для нової оптимізованої конструкції було розроблено структурну схему складання та технологічну схему складання. Розроблено новий повноцінний

технологічний процес виготовлення, сформовано операційно-маршрутну технологію складання виробу засобами САПР «АДЕМ».

Розроблений стартап-проект за темою магістерської дисертації «Топологічно-оптимізована конструкція каркасного типу» продемонстрував потребу виробу та його конкурентоспроможність на ринку подібних товарів.

### Список використаних джерел

1. Muzzupappa, Maurizio; Barbieri, Loris; Bruno, Fabio; Cugini, Umberto (2010). "Methodology and Tools to Support Knowledge Management in Topology Optimization". *Journal of Computing and Information Science in Engineering*. 10 (4): 044503. [doi:10.1115/1.3518386](https://doi.org/10.1115/1.3518386).
2. Sigmund, Ole; Maute, Kurt (2013). "Topology optimization approaches". *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 48 (6): 1031–1055. [doi:10.1007/s00158-013-0978-6](https://doi.org/10.1007/s00158-013-0978-6).
3. Beckers, M. (2012). "Topology optimization using a dual method with discrete variables". *Structural Optimization*. 17: 14–24. [doi:10.1007/BF01197709](https://doi.org/10.1007/BF01197709).
4. Bendsøe, M. P. (2015). "Optimal shape design as a material distribution problem". *Structural Optimization*. 1 (4): 193–202. [doi:10.1007/BF01650949](https://doi.org/10.1007/BF01650949).
5. Bendsøe, M. P.; Sigmund, O. (2013). "Material interpolation schemes in topology optimization". *Archive of Applied Mechanics (Ingenieur Archiv)*. 69 (9–10): 635–65. [doi:10.1007/s004190050248](https://doi.org/10.1007/s004190050248).
6. Van Dijk, NP. Langelaar, M. van Keulen, F. Critical study of design parameterization in topology optimization; The influence of design parameterization on local minima. 2nd International Conference on Engineering Optimization, 2010
7. Yoon, Gil Ho (2010). "Topology optimization for stationary fluid-structure interaction problems using a new monolithic formulation". *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 82 (5): 591- 616. Bibcode: 2010IJNME.82..591Y. [doi:10.1002/nme.2777](https://doi.org/10.1002/nme.2777)
8. Lundgaard, Christian; Sigmund, Ole (2018). "A density-based topology optimization methodology for thermoelectric energy conversion problems". *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 57 (4): 1427–1442. [doi:10.1007/s00158-018-1919-1](https://doi.org/10.1007/s00158-018-1919-1).
9. Lundgaard, Christian; Alexandersen, Joe; Zhou, Mingdong; Andreasen, Casper Schousboe; Sigmund, Ole (2018). "Revisiting density-based topology optimization for fluid-structure-interaction problems". *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 58 (3): 969–995. [doi:10.1007/s00158-018-1940-4](https://doi.org/10.1007/s00158-018-1940-4).

10. Picelli, R.; Vicente, W.M.; Pavanello, R. (2017). "Evolutionary topology optimization for structural compliance minimization considering design-dependent FSI loads". *Finite Elements in Analysis and Design*. 135: 44–55. doi:10.1016/j.finel.2017.07.005.

11. Oganesyanyan P.A., Shevcov S.N. Optimizatsiya topologii konstrukcij v pakete ABAQUS [Optimizing the design topology in the ABAQUS software]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj Akademii Nauk*, 2014, Vol. 16, pp. 543-549.

12. Temis Yu.M., Yakushev D.A. Optimizatsiya konstrukcii detalej i uzlov GTD [Optimization of GTE parts and components design]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aehrokosmicheskogo universiteta im. akademika S.P. Korolyova (nacionalnogo issledovatel'skogo universiteta)*, 2011, no. 3-1, pp. 183-188.

13. Borovikov A.A., Tenenbaum S.M. Topologicheskaya optimizatsiya perekhodnogo otseka KA [Topological optimization of the spacecraft transfer compartment]. *Aehrokosmicheskij nauchnyj zhurnal. MGTU im. N.EH. Baumana. EHlektron. zhurn.* 2016, no. 05, pp. 16-30.

14. Vasilev B.E., Magerramova L.A. Analiz vozmozhnosti primeneniya topologicheskoy optimizatsii pri proektirovanii neohlazhdaemyih rabochih lopatok turbin [Analysis of the possibility of applying topological optimization in the design of uncooled turbine blades]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aehrokosmicheskogo universiteta im. akademika S.P. Korolyova (nacionalnogo issledovatel'skogo universiteta)*. 2015, no. 3-1, pp. 139-147.

15. Shevcov S.N. Metody optimizatsii konstrukcij: kurs lekcij [Methods of optimization of constructions: a course of lectures]. – Rostov-na-Donu: DGTU, 2010, 97 p.

16. Jikai Liu, Yongsheng Ma. A survey of manufacturing oriented topology optimization methods. *Advances in Engineering Softwar*, August 2016, pp. 161-175.

17. Deaton, J.D. & Grandhi, R.V. A survey of structural and multidisciplinary continuum topology optimization: post 2000. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. January 2014, Vol. 49, Is. 1, pp 1-38.
18. Altair Hyper-Works, available at: <http://www.altairhyperworks.com> (accessed 15 September 2017).
19. Abaqus, available at: <https://www.3ds.com/products-services/simulia> (accessed 15 September 2017).
20. Simulation Driven Product Development / ANSYS, available at: <http://www.ansys.com> (accessed 15 September 2017).
21. MSC Nastran. Raschet i optimizaciya konstrukcij, available at: <http://www.mssoftware.ru> (accessed 15 September 2017).
22. Munk D.J., Vio G.A. & Steven G.P. Topology and shape optimization methods using evolutionary algorithms: a review. *Struct Multidisc Optim*, September 2015, Vol. 52, Is. 3, pp. 613-631.
23. Kim Y.H., Tan A., Yang B.S. et al. Optimum shape design of rotating shaft by ESO method. *Journal of Mechanical Science and Technology*. July 2007, Vol. 21, Is. 7, pp. 1039-1047.
24. Xia L., Xia Q., Huang X. et al. Bi-directional Evolutionary Structural Optimization on Advanced Structures and Materials: A Comprehensive Review. *Archives of Computational Methods in Engineering*. Pp. 1-42.
25. Bryuhova K.S., Maksimov P.V. Algoritm topologičeskoj optimizacii na osnove metoda eso [Algorithm of topological optimization based on the eso method]. *Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal*, 2016, № 9, pp. 16-24.
26. Kozik A.M., Guzh T.S., Ilichev V.A. Sovremennye tendencii v voprose optimizacii metallicheskih konstrukcij [Modern trends in the optimization of metal structures]. *Molodezhnyj nauchnyj forum: tekhnicheskie i matematicheskie nauki*, 2017, no. 2 (42), pp. 51-57.
27. Krotkih A.A., Maksimov P.V. Issledovanie i modifikaciya metoda topologičeskoj optimizacii simp [Research and modification of the simp

topological optimization method]. *Mezhdunarodnyj nauchnoissledovatel'skij zhurnal*, 2016, no. 01(55), pp. 91-94.

28. Bruns T. A reevaluation of the SIMP method with filtering and an alternative formulation for solid– void topology optimization. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. December 2005, Vol. 30, Is. 6, pp. 428-436.

29. Мастенко, И. В., Стельмах, Н. В. Влияние плотности заполнения 3d-печатных моделей на их прочностные характеристики / И. В. Мастенко, Н. В. Стельмах // Новые направления развития приборостроения. Материалы 12-й Международной научно-технической конференции молодых ученых и студентов. БНТУ, Минск, 2019. – С. 138.

30. Мастенко, І. В. Аналіз методів топологічної оптимізації при проектуванні елементів приладів / І. В. Мастенко, Н. В. Стельмах // XIII Науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Погляд у майбутнє приладобудування», 13-14 травня 2020 р., м. Київ, Україна : збірник праць конференції. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – С. 109–111.

31. Мастенко, І. В. Застосування топологічної оптимізації при проектуванні деталі типу кронштейн / І. В. Мастенко, Н. В. Стельмах // XV Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Ефективність інженерних рішень у приладобудуванні», 10-11 грудня 2019 року, м. Київ, Україна : збірник праць конференції / КПІ ім. Ігоря Сікорського, ПБФ, ФММ. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського; Центр учбової літератури, 2019. – С. 147–150.

32. Румбешта В.О., Стельмах Н.В. Прийняття рішень в автоматизованій системі технологічної підготовки приладобудівного виробництва на базі дискретної оптимізації // *Наук. вісн. Кремен. ун-ту економіки, інформ. технол. і управ. Нові технології*. — 2009. — № 1 (23). — С. 189—191.

33. Стельмах Н.В. Програмний модуль для прискореної технологічної підготовки складального дрібносерійного виробництва приладів // *Вісн. НТУУ “КПІ”. Машинобудування*. — 2009. — № 54. — С. 12—17.

34. Стельмах Н., Сапон С., Рижук Я. Вибір оптимального технологічного процесу на базі автоматизованої оцінки його техніко-економічних параметрів. Технічні науки та технології. 2020. № 1 (19). С. 89-97. DOI:10.25140/2411-5363-2020-1(19)-89-97.

35. Антонюк В.С. Методологія наукових досліджень: [Текст] : навч. посіб./ В.С. Антонюк, Л.Г. Полонський, В.І. Аверченков, Ю.А. Малахов. – К.: НТУУ «КПІ», 2015. – 276 с.

36. Автоматизированное проектирование технологических процес сов: Учеб. пособие / В.С. Антонюк, С.П. Выслоух, В.И. Аверченков – К. : УМК ВО, 1989. – 116 с.

37. Розроблення стартап-проекту [Електронний ресурс] : Методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей / За заг. ред. О.А. Гавриша. – Київ : НТУУ «КПІ», 2016. – 28 с.

# Додаток А


## Список

Форма 26

наукових праць Мастенка Ігоря Володимировича

№ з/п	Назва	Видавництво, журнал (назва, номер, рік) чи номер авторського свідоцтва	Кількість друкованих сторінок	Прізвища співавторів
1	2	3	4	5
1	Аналіз методів топологічної оптимізації при проектуванні елементів приладів	XIII Науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Погляд у майбутнє приладобудування», 13-14 травня 2020 р., м. Київ, Україна ПБФ, КПІ ім. Ігоря Сікорського, С. 109–111.	3	Н. В. Стельмах
2	Застосування топологічної оптимізації при проектуванні деталей типу кронштейн	XV Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Ефективність інженерних рішень у приладобудуванні», 10-11 грудня 2019 року, м. Київ, Україна ПБФ, КПІ ім. Ігоря Сікорського, С. 147–150.	4	Н. В. Стельмах
3	Проектування конструкції каркасного типу методом топологічної оптимізації	XVI Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Ефективність та автоматизація інженерних рішень у приладобудуванні», 8-8 грудня 2020 року, м. Київ, Україна, ПБФ, КПІ ім. Ігоря Сікорського, 103–106.	4	В.О. Сірош, Н. В. Стельмах

Автор  
В.О. завідувача кафедри

  
Мастенко І.В.  
Антонюк В.С.



ТОВ "ДЕЛЬТА ПРЕМІУМ"

01011, м.Київ, вул. Панаса Мирного 7

тел.: (044) 207-92-81

моб.: (095) 535-07-73

### АКТ

**про використання матеріалів та результатів магістерської дисертації  
на тему: «Автоматизація проектування технології виготовлення  
конструкції каркасного типу на базі топологічної оптимізації»**

**Виконав: Мастенко Ігор Володимирович**  
студент II курсу, групи ПБ-91мп  
кафедри виробництва приладів, приладобудівного факультету  
Національного технічного університету України  
«Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»

Дослідження виконані в магістерській дисертації відповідають напрямку професійної діяльності підприємства ТОВ Дельта преміум» та будуть використанні на підставі наступних тверджень:

Результати дослідження є актуальними і будуть застосовуватись при виготовленні продукції. Будуть використовуватись розроблені та прораховані 3D-моделі, розгортки елементів, програмні коди та технологічний процес виготовлення конструкції каркасного типу.

Отримані в результаті виконання роботи результати: зниження маси конструкції на 56% при збереженні функціональних характеристик відповідає потребам ТОВ «Дельта преміум», що дало змогу знизити загальну вагу виробу, яка включає в себе конструкцію каркасного типу на 30%.

Отримані результати будуть використані ТОВ «Дельта преміум» в майбутніх наукових дослідженнях та практичних розробках.

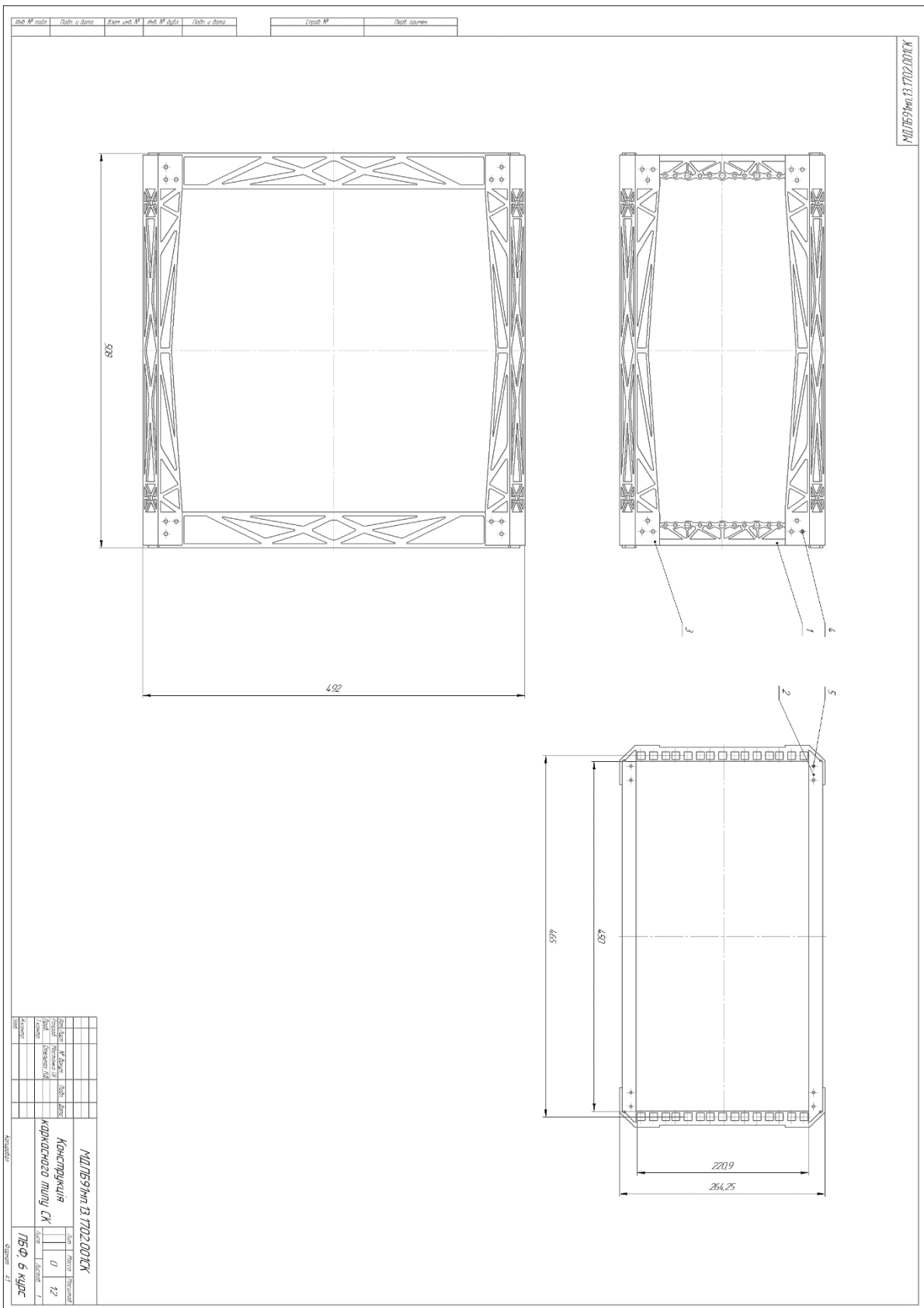
ЗАТВЕРДЖУЮ  
Директор ТОВ «Дельта преміум»

Поляк О.О.

« 3 » грудня 2020 р.

# Додаток Б

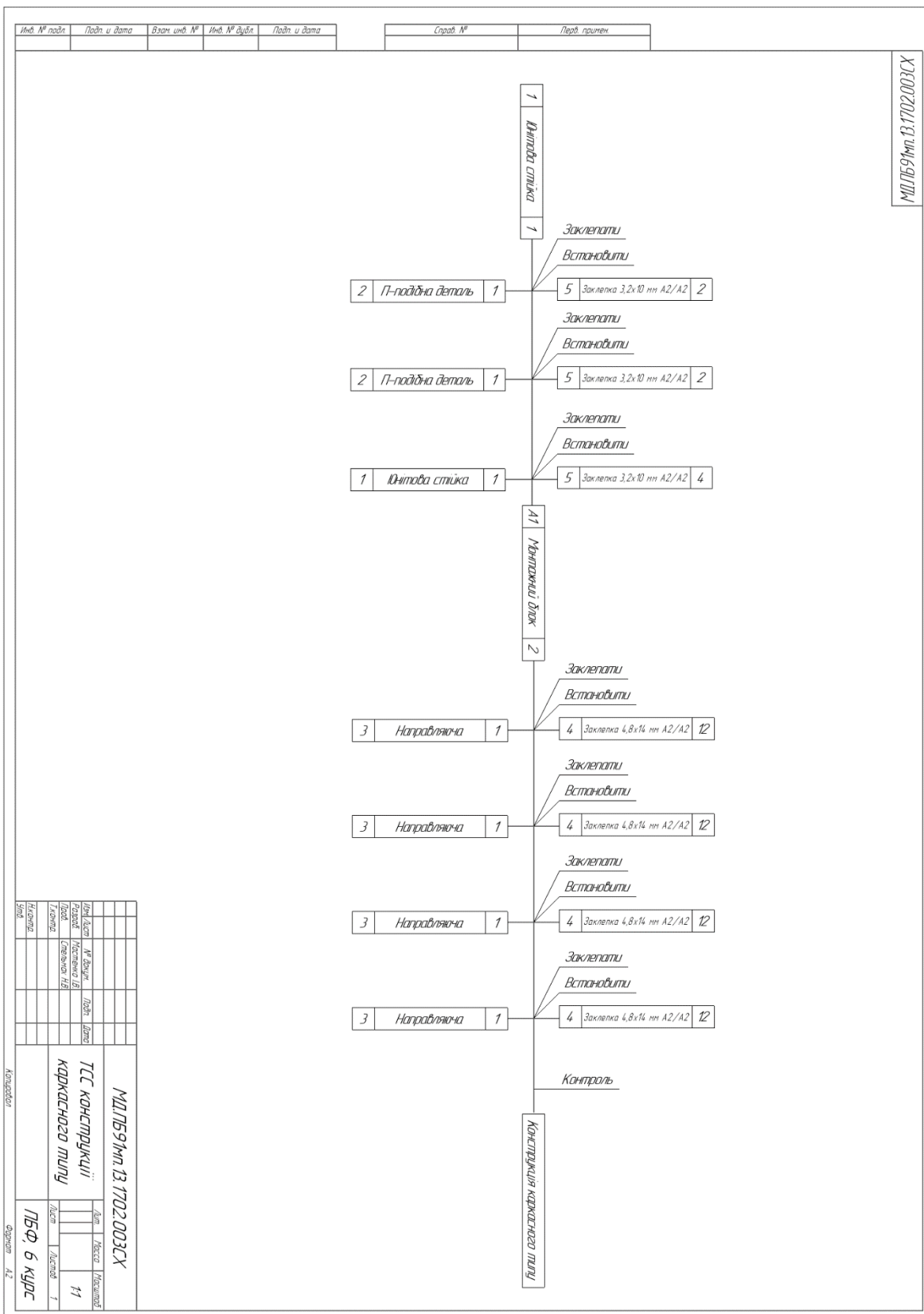
Конструкція каркасного типу СК







Технологічна схема складання конструкції каркасного типу



# Додаток В

## Програмний код для Юнітової стійки

O001	G00 X581.303 Y30.302	Y-14.148
G00 G90 G17 F450	M3	M5
(Contour 0)	G01 Y40.302	(Contour 7)
X581.303 Y74.752	X571.303	G00 X571.303 Y-20.023
M3	Y30.302	M3
G01 X571.303	X581.303	G01 Y-30.023
Y84.752	M5	X581.303
X581.303	(Contour 4)	Y-20.023
Y74.752	G00 X571.303 Y14.427	X571.303
M5	M3	M5
(Contour 1)	G01 X581.303	(Contour 8)
G00 X581.303 Y58.877	Y24.427	G00 X571.303 Y-35.898
M3	X571.303	M3
G01 X571.303	Y14.427	G01 Y-45.898
Y63.877	M5	X581.303
Y68.877	(Contour 5)	Y-35.898
X581.303	G00 X581.303 Y8.552	X571.303
Y63.877	M3	M5
Y58.877	G01 X571.303	(Contour 9)
M5	Y-1.448	G00 X583.789 Y-46.713
(Contour 2)	X581.303	M3
G00 X581.303 Y53.002	Y8.552	G01 X583.803
M3	M5	M5
G01 X571.303	(Contour 6)	(Contour 10)
Y43.002	G00 X571.303 Y-14.148	G00 X602.353 Y-39.149
X581.303	M3	M3
Y53.002	G01 X581.303	G03 X606.536 Y-37.416
M5	Y-4.148	I2.45
(Contour 3)	X571.303	

X602.353 Y-39.149 I- 1.732 J-1.732 M5 (Contour 11) G00 X602.353 Y-25.149 M3 G03 X606.536 Y-23.416 I2.45 X602.353 Y-25.149 I- 1.732 J-1.732 M5 (Contour 12) G00 X620.536 Y-30.416 M3 G03 X616.353 Y-32.149 I-1.732 J-1.732 X620.536 Y-30.416 I2.45 M5 (Contour 13) G00 X615.303 Y-9.049 M3 G03 I-2.5 M5 (Contour 14) G00 X608.575 Y-5.676 M3 G01 X595.53 Y12.733 G03 X594.803 Y12.501 I-0.326 J-0.231 G01 Y-16.149	G03 X595.803 Y-17.149 I1. G01 X608.847 G03 X610.759 Y-15.733 J2. G01 X611.297 Y-13.976 G03 X610.92 Y-13.136 I- 0.669 J0.205 G02 X608.714 Y-7.17 I1.883 J4.087 G03 X608.575 Y-5.676 I- 1.363 J0.626 M5 (Contour 15) G00 X608.579 Y1.573 M3 G01 X608.305 Y3.523 G02 X609.397 Y6.592 I4.498 J0.128 G03 X610.271 Y8.324 I- 3.028 J2.614 G01 X610.649 Y9.996 G03 X610.636 Y10.262 I-0.488 J0.11 G01 X609.342 Y14.212 G03 X608.782 Y15.073 I-1.901 J-0.623 G02 X607.271 Y17.203 I4.021 J4.453	G03 X606.534 Y17.693 I-0.738 J-0.31 G01 X596.078 G03 X595.915 Y17.377 J-0.2 G01 X607.436 Y1.119 G03 X608.579 Y1.573 I0.516 J0.366 M5 (Contour 16) G00 X615.303 Y3.651 M3 G03 I-2.5 M5 (Contour 17) G00 X616.803 Y19.526 M3 G03 I-4. M5 (Contour 18) G00 X611.863 Y26.249 M3 G02 X611.47 Y25.376 I- 0.527 J-0.287 G03 X606.845 Y20.232 I1.333 J-5.85 G02 X606.05 Y19.526 I- 0.794 J0.094 G01 X597.6
--	---	--

G02 X597.468 Y19.876	G03 X610.087 Y51.957	M5
J0.2	I-0.671 J0.741	(Contour 23)
G01 X608.146 Y29.294	G01 X610.551 Y54.01	G00 X617.315 Y59.822
G02 X610.42 Y28.893	G03 X610.499 Y55.078	M3
I0.977 J-1.108	I-1.951 J0.441	G03 X617.297 Y59.792
G01 X611.863 Y26.249	G01 X609.218 Y58.958	I0.075 J-0.066
M5	G03 X608.916 Y59.406	M5
(Contour 19)	I-0.95 J-0.314	(Contour 24)
G00 X608. Y33.165	G02 X607.382 Y61.405	G00 X617.297 Y67.962
M3	I3.887 J4.57	M3
G03 X608.021 Y33.288	G03 X606.479 Y61.976	G03 X617.315 Y67.931
I-0.066 J0.075	I-0.904 J-0.429	I0.094 J0.035
G01 X596.04 Y55.242	G01 X596.488	M5
G03 X594.803 Y54.926	G03 X595.61 Y60.497 J-	(Contour 25)
I-0.578 J-0.315	1.	G00 X608.804 Y63.877
G01 Y22.191	G01 X607.51 Y38.688	M3
G03 X595.302 Y21.966	G03 X608.353 Y38.634	G03 X616.802 I3.999
I0.3	I0.439 J0.239	J0.099
G01 X608. Y33.165	G02 X611.679 Y40.785	X608.804 I-3.999 J-0.099
M5	I4.45 J-3.232	M5
(Contour 20)	M5	(Contour 26)
G00 X611.679 Y40.785	(Contour 21)	G00 X615.303 Y79.652
M3	G00 X615.303 Y35.401	M3
G03 X611.835 Y41.015	M3	G03 I-2.5
I-0.041 J0.196	G03 I-2.5	M5
G01 X611.442 Y43.297	M5	(Contour 27)
G03 X610.883 Y44.032	(Contour 22)	G00 X611.835 Y86.739
I-0.985 J-0.17	G00 X615.303 Y48.101	M3
G02 X609.782 Y51.437	M3	G03 X611.679 Y86.969
I1.92 J4.07	G03 I-2.5	I-0.197 J0.034

G02 X608.353 Y89.12	M5	M5
I1.124 J5.384	(Contour 29)	(Contour 31)
G03 X607.51 Y89.066 I-	G00 X608. Y94.589	G00 X616.803 Y108.227
0.405 J-0.294	M3	M3
G01 X595.61 Y67.256	G02 X608.021 Y94.466	G03 I-4.
G03 X596.488 Y65.777	I-0.066 J-0.075	M5
I0.878 J-0.479	G01 X596.04 Y72.512	(Contour 32)
G01 X606.479	G02 X594.803 Y72.828	G00 X615.303 Y124.102
G03 X607.382 Y66.349	I-0.578 J0.315	M3
J1.	G01 Y105.563	G03 I-2.5
G02 X608.916 Y68.348	G02 X595.302 Y105.788	M5
I5.421 J-2.571	I0.3	(Contour 33)
G03 X609.218 Y68.796	G01 X608. Y94.589	G00 X608.305 Y124.23
I-0.648 J0.762	M5	M3
G01 X610.499 Y72.675	(Contour 30)	G01 X608.579 Y126.18
G03 X610.551 Y73.743	G00 X611.47 Y102.377	G03 X607.436 Y126.634
I-1.899 J0.627	M3	I-0.627 J0.088
G01 X610.087 Y75.796	G02 X611.863 Y101.505	G01 X595.915 Y110.376
G03 X609.782 Y76.317	I-0.133 J-0.585	G03 X596.078 Y110.061
I-0.975 J-0.22	G01 X610.42 Y98.86	I0.163 J-0.116
G02 X610.883 Y83.722	G02 X608.146 Y98.46 I-	G01 X606.534
I3.021 J3.335	1.297 J0.708	G03 X607.271 Y110.551
G03 X611.442 Y84.457	G01 X597.468 Y107.877	J0.8
I-0.427 J0.904	G02 X597.6 Y108.227	G02 X608.782 Y112.68
G01 X611.835 Y86.739	I0.132 J0.15	I5.532 J-2.324
M5	G01 X606.05	G03 X609.342 Y113.542
(Contour 28)	G02 X606.845 Y107.522	I-1.34 J1.484
G00 X615.303 Y92.352	J-0.8	G01 X610.636 Y117.492
M3	G03 X611.47 Y102.377	G03 X610.649 Y117.758
G03 I-2.5	I5.958 J0.706	I-0.475 J0.156

G01 X610.271 Y119.429	M5	G03 X615.492 Y141.659
G03 X609.397 Y121.161	(Contour 36)	I0. J-2.
I-3.902 J-0.882	G00 X606.536 Y151.17	G01 X616.974 Y137.999
G02 X608.305 Y124.23	M3	G02 X617.011 Y134.715
I3.406 J2.941	G03 X602.353 Y152.902	I-4.171 J-1.689
M5	I-1.732 J1.732	G01 X615.778 Y131.461
(Contour 34)	X606.536 Y151.17 I2.45	G03 X615.741 Y128.019
G00 X608.575 Y133.43	M5	I4.676 J-1.772
M3	(Contour 37)	G01 X616.299 Y126.443
G01 X595.53 Y115.021	G00 X616.353 Y159.902	G02 X617.119 Y122.334
G02 X594.803 Y115.252	M3	I-3.496 J-2.833
I-0.326 J0.231	G03 X620.536 Y158.17	G01 X615.913 Y118.255
G01 Y143.902	I2.45	G03 X616.031 Y115.07
G02 X595.803 Y144.902	X616.353 Y159.902 I-	I4.795 J-1.417
I1.	1.732 J1.732	G01 X617.303 Y111.703
G01 X608.847	M5	G02 Y103.766 I-4.5 J-
G02 X610.759 Y143.487	(Contour 38)	3.969
J-2.	G00 X606.536 Y165.17	G01 X616.031 Y100.399
G01 X611.297 Y141.73	M3	G03 X615.913 Y97.214
G02 X610.92 Y140.889	G03 X602.353 Y166.902	I4.677 J-1.768
I-0.669 J-0.205	I-1.732 J1.732	G01 X617.119 Y93.135
G03 X608.714 Y134.924	X606.536 Y165.17 I2.45	G02 X617.011 Y90.265
I1.883 J-4.087	M5	I-4.315 J-1.276
G02 X608.575 Y133.43	(Contour 39)	G01 X615.778 Y87.011
I-1.363 J-0.626	G00 X586.803 Y174.902	G03 X615.741 Y83.569
M5	M3	I4.676 J-1.772
(Contour 35)	G01 Y222.902	G01 X615.752 Y83.538
G00 X615.303 Y136.802	X626.803	G03 X616.417 Y82.273
M3	Y144.41	I4.713 J1.67
G03 I-2.5	X617.346	

G02 X617.098 Y78.435	G03 X616.031 Y27.354	X538.803
I-3.614 J-2.62	I4.795 J-1.417	Y186.992
G01 X615.825 Y73.944	G01 X617.303 Y23.988	X571.264
G03 X615.958 Y70.812	G02 Y16.05 I-4.5 J-3.969	Y185.992
I4.81 J-1.364	G01 X616.031 Y12.684	X572.264
G01 X616.919 Y68.27	G03 X615.913 Y9.499	X586.803 Y174.466
G03 X617.133 Y67.931	I4.677 J-1.768	Y174.902
I0.935 J0.354	G01 X617.119 Y5.42	M5
G02 X618.802 Y63.877	G02 X616.299 Y1.311 I-	(Contour 40)
I-4.33 J-4.154	4.315 J-1.276	G00 X583.789 Y174.466
X617.133 Y59.822 I-	G01 X615.741 Y-0.266	M3
5.999 J0.099	G03 X615.778 Y-3.707	G01 X583.803
G03 X616.919 Y59.484	I4.713 J-1.67	M5
I0.722 J-0.692	G01 X617.011 Y-6.962	(Contour 41)
G01 X615.958 Y56.941	G02 X616.974 Y-10.245	G00 X581.303 Y163.652
G03 X615.825 Y53.81	I-4.208 J-1.594	M3
I4.677 J-1.768	G01 X615.492 Y-13.905	G01 X571.303
G01 X617.098 Y49.319	G03 X617.346 Y-16.656	Y173.652
G02 X616.417 Y45.481	I1.854 J-0.751	X581.303
I-4.295 J-1.217	G01 X626.803	Y163.652
G03 X615.752 Y44.216	Y-95.149	M5
I4.048 J-2.935	X586.803	(Contour 42)
G01 X615.741 Y44.184	Y-46.713	G00 X571.303 Y147.777
G03 X615.778 Y40.743	X572.264 Y-58.238	M3
I4.713 J-1.67	X571.264	G01 Y157.777
G01 X617.011 Y37.488	Y-59.238	X581.303
G02 X617.119 Y34.618	X538.803	Y147.777
I-4.208 J-1.594	Y-47.748	X571.303
G01 X615.913 Y30.539	X568.803	M5
	Y175.502	(Contour 43)

G00 X571.303 Y141.902	X581.303	M3
M3	M5	G03 I-1.65
G01 X581.303	(Contour 47)	M5
Y131.902	G00 X564.453 Y181.502	(Contour 53)
X571.303	M3	G00 X546.453 Y-53.748
Y141.902	G03 I-1.65	M3
M5	M5	G03 I-1.65
(Contour 44)	(Contour 48)	M5
G00 X581.303 Y119.202	G00 X546.453 Y181.502	(Contour 54)
M3	M3	G00 X604.253 Y-74.149
G01 X571.303	G03 I-1.65	M3
Y129.202	M5	G03 I-2.45
X581.303	(Contour 49)	M5
Y119.202	G00 X604.253 Y201.902	(Contour 55)
M5	M3	G00 X620.253 Y-74.149
(Contour 45)	G03 I-2.45	M3
G00 X571.303 Y113.327	M5	G03 I-2.45
M3	(Contour 50)	M5
G01 X581.303	G00 X620.253 Y201.902	(Contour 56)
Y103.327	M3	G00 X620.253 Y-87.149
X571.303	G03 I-2.45	M3
Y113.327	M5	G03 I-2.45
M5	(Contour 51)	M5
(Contour 46)	G00 X620.253 Y214.902	G00 X0. Y0.
G00 X581.303 Y97.452	M3	M30
M3	G03 I-2.45	%
G01 Y87.452	M5	
X571.303	(Contour 52)	
Y97.452	G00 X564.453 Y-53.748	

## Програмний код для П-подібної стійки

G00 G90 G17	G01 Z-2. F150	(Contour 7)
M03 S3000	G03 I-1.65 F450	X884.673 Y392.558
(Contour 0)	G00 Z5.	G01 Z-2. F150
T1 M06	(Contour 4)	G03 I-1.65 F450
X881.756 Y364.325	X884.673 Y329.558	G00 Z5.
G01 Z-2. F150	G01 Z-2. F150	(Contour 8)
G03 X880.023 Y368.508	G03 I-1.65 F450	X714.853 Y360.362
I-1.732 J1.732 F450	G00 Z5.	G01 Z-2. F150
X881.756 Y364.325 J-	(Contour 5)	G02 X714.783 Y361.922
2.45	X828.969 Y343.058	I0.139 J0.788 F450
G00 Z5.	G01 Z-2. F150	G01 X751.253 Y371.783
(Contour 1)	X855.623 F450	G02 X752.218 Y371.696
X881.756 Y348.325	G03 X857.023 Y344.458	I0.365 J-1.351
G01 Z-2. F150	J1.4	G01 X807.275 Y345.605
G03 X880.023 Y352.508	G01 Y377.658	G02 X806.793 Y344.094
I-1.732 J1.732 F450	G03 X855.623 Y379.058	I-0.343 J-0.723
X881.756 Y348.325 J-	I-1.4	G01 X714.853 Y360.362
2.45	G01 X758.692	G00 Z5.
G00 Z5.	G03 X758.34 Y377.539	(Contour 9)
(Contour 2)	J-0.8	X703.11 Y356.353
X867.023 Y352.508	G01 X828.353 Y343.201	G01 Z-2. F150
G01 Z-2. F150	G03 X828.969 Y343.058	G02 X703.906 Y356.445
G03 X868.756 Y348.325	I0.616 J1.257	I0.553 J-1.286 F450
J-2.45 F450	G00 Z5.	G01 X770.574 Y344.645
X867.023 Y352.508 I-	(Contour 6)	G02 X770.435 Y343.058
1.732 J1.732	X866.673 Y392.558	I-0.139 J-0.788
G00 Z5.	G01 Z-2. F150	G01 X676.051
(Contour 3)	G03 I-1.65 F450	G02 X675.735 Y344.593
X866.673 Y329.558	G00 Z5.	J0.8

G01 X703.11 Y356.353  
 G00 Z5.  
 (Contour 10)  
 X673.771 Y377.524  
 G01 Z-2. F150  
 X702.721 Y364.993  
 F450  
 G03 X703.708 Y364.946  
 I0.556 J1.285  
 G01 X742.446 Y377.497  
 G03 X742.2 Y379.058 I-  
 0.247 J0.761  
 G01 X674.089  
 G03 X673.771 Y377.524  
 J-0.8  
 G00 Z5.  
 (Contour 11)  
 X637.173 Y359.795  
 G01 Z-2. F150  
 G02 Y362.321 I0.604  
 J1.263 F450  
 G01 X659.708 Y373.101  
 G02 X668.339 I4.315 J-  
 9.021  
 G01 X690.874 Y362.321  
 G02 Y359.795 I-0.604 J-  
 1.263  
 G01 X668.339 Y349.014  
 G02 X659.708 I-4.315  
 J9.021

G01 X637.173 Y359.795  
 G00 Z5.  
 (Contour 12)  
 X585.6 Y377.497  
 G01 Z-2. F150  
 X624.338 Y364.946  
 F450  
 G03 X625.326 Y364.993  
 I0.432 J1.332  
 G01 X654.275 Y377.524  
 G03 X653.958 Y379.058  
 I-0.318 J0.734  
 G01 X585.847  
 G03 X585.6 Y377.497 J-  
 0.8  
 G00 Z5.  
 (Contour 13)  
 X569.354 Y379.058  
 G01 Z-2. F150  
 G02 X569.706 Y377.539  
 J-0.8 F450  
 G01 X499.693 Y343.201  
 G02 X499.077 Y343.058  
 I-0.616 J1.257  
 G01 X472.423  
 G02 X471.023 Y344.458  
 J1.4  
 G01 Y377.658  
 G02 X472.423 Y379.058  
 I1.4 J0.

G01 X569.354  
 G00 Z5.  
 (Contour 14)  
 X557.472 Y344.645  
 G01 Z-2. F150  
 X624.14 Y356.445 F450  
 G02 X624.936 Y356.353  
 I0.244 J-1.379  
 G01 X652.311 Y344.593  
 G02 X651.996 Y343.058  
 I-0.316 J-0.735  
 G01 X557.611  
 G02 X557.472 Y344.645  
 J0.8  
 G00 Z5.  
 (Contour 15)  
 X521.253 Y344.094  
 G01 Z-2. F150  
 G02 X520.771 Y345.605  
 I-0.139 J0.788 F450  
 G01 X575.828 Y371.696  
 G02 X576.793 Y371.783  
 I0.6 J-1.265  
 G01 X613.263 Y361.922  
 G02 X613.193 Y360.362  
 I-0.209 J-0.772  
 G01 X521.253 Y344.094  
 G00 Z5.  
 (Contour 16)  
 X464.673 Y329.558

G01 Z-2. F150	G00 Z5.	Y397.058
G03 I-1.65 F450	(Contour 20)	X891.023 Y385.058
G00 Z5.	X448.023 Y368.508	X889.023
(Contour 17)	G01 Z-2. F150	Y337.058
X446.673 Y329.558	G03 X449.756 Y364.325	X891.023
G01 Z-2. F150	J-2.45 F450	X903.023 Y325.058
G03 I-1.65 F450	X448.023 Y368.508 I-	Y323.058
G00 Z5.	1.732 J1.732	X425.023
(Contour 18)	G00 Z5.	Y325.058
X448.023 Y352.508	(Contour 21)	X437.023 Y337.058
G01 Z-2. F150	X446.673 Y392.558	X439.023
G03 X449.756 Y348.325	G01 Z-2. F150	Y385.058
J-2.45 F450	G03 I-1.65 F450	X437.023
X448.023 Y352.508 I-	G00 Z5.	X425.023 Y397.058
1.732 J1.732	(Contour 22)	Y399.058
G00 Z5.	X464.673 Y392.558	G00 Z5.
(Contour 19)	G01 Z-2. F150	X0. Y0.
X462.756 Y348.325	G03 I-1.65 F450	M05
G01 Z-2. F150	G00 Z5.	M30
G03 X461.023 Y352.508	(Contour 23)	%
I-1.732 J1.732 F450	X425.023 Y399.058	
X462.756 Y348.325 J-	G01 Z-2. F150	
2.45	X903.023 F450	

## Програмний код для направляючої

G00 G90 G17	G00 Z5.	G00 Z5.
M03 S3000	(Contour 3)	(Contour 8)
(Contour 0)	X255.186 Y114.18	X241.618 Y100.45
T1 M06	G01 Z-2. F150	G01 Z-2. F150
X237.268 Y114.256	X248.263 Y102.821	G03 X241.676 Y101.26
G01 Z-2. F150	F450	I-0.54 J0.445 F450
G02 X237.481 Y114.636	G00 Z5.	G00 Z5.
I0.213 J0.13 F450	(Contour 4)	(Contour 9)
G01 X254.93	X247.517 Y102.501	X240.625 Y98.723
G02 X255.186 Y114.18	G01 Z-2. F150	G01 Z-2. F150
J-0.3	G03 X244.983 I-1.267 J-	G02 X239.781 Y98.136
G00 Z5.	5.865 F450	I-0.844 J0.313 F450
(Contour 1)	G00 Z5.	G01 X236.079
X256.664 Y110.842	(Contour 5)	G02 X235.279 Y98.936
G01 Z-2. F150	X244.237 Y102.821	J0.8
G02 X257.22 Y110.686	G01 Z-2. F150	G01 Y110.686
I0.256 J-0.156 F450	X237.268 Y114.256	G02 X235.836 Y110.842
G01 Y98.936	F450	I0.3 J0.
G02 X256.42 Y98.136 I-	G00 Z5.	G00 Z5.
0.8 J0.	(Contour 6)	(Contour 10)
G01 X252.719	X235.836 Y110.842	X238.384 Y118.517
G02 X251.875 Y98.723	G01 Z-2. F150	G01 Z-2. F150
J0.9	X241.676 Y101.26 F450	G03 X239.18 Y117.636
G00 Z5.	G00 Z5.	I0.796 J-0.081 F450
(Contour 2)	(Contour 7)	G01 X253.32
X250.824 Y101.26	X241.618 Y100.45	G03 X254.116 Y118.517
G01 Z-2. F150	G01 Z-2. F150	J0.8
X256.664 Y110.842	G03 X240.625 Y98.723	G00 Z5.
F450	I4.632 J-3.814 F450	(Contour 11)

X256.821 Y127.553	(Contour 14)	G01 Z-2. F150
G01 Z-2. F150	X256.74 Y288.802	X256.821 Y127.553
G03 X257.22 Y127.57	G01 Z-2. F150	F450
I0.199 J0.017 F450	X247.13 Y332.127 F450	G00 Z5.
G01 Y268.654	G00 Z5.	(Contour 20)
G03 X256.823 Y268.688	(Contour 15)	X254.116 Y118.517
I-0.2 J0.	X245.372 Y332.126	G01 Z-2. F150
G00 Z5.	G01 Z-2. F150	X246.548 Y193.012
(Contour 12)	X235.785 Y288.797	F450
X256.74 Y284.471	F450	G00 Z5.
G01 Z-2. F150	G00 Z5.	(Contour 21)
G03 Y288.802 I-9.763	(Contour 16)	X245.951 Y193.012
J2.166 F450	X235.785 Y284.476	G01 Z-2. F150
G00 Z5.	G01 Z-2. F150	X238.384 Y118.517
(Contour 13)	X245.372 Y241.147	F450
X271.957 Y289.75	F450	G00 Z5.
G01 Z-2. F150	G00 Z5.	(Contour 22)
G03 X272.955 Y290.682	(Contour 17)	X235.679 Y127.553
J1. F450	X247.13 Y241.146	G01 Z-2. F150
G01 X280.209 Y396.792	G01 Z-2. F150	X243.691 Y220.121
G03 X279.416 Y396.89	X256.74 Y284.471 F450	F450
I-0.399 J0.027	G00 Z5.	G00 Z5.
G01 X261.719 Y297.768	(Contour 18)	(Contour 23)
G03 X261.564 Y296.01	X256.823 Y268.688	X243.584 Y222.677
I9.844 J-1.758	G01 Z-2. F150	G01 Z-2. F150
G01 Y290.55	X248.916 Y222.677	X235.676 Y268.688
G03 X262.364 Y289.75	F450	F450
I0.8	G00 Z5.	G00 Z5.
G01 X271.957	(Contour 19)	(Contour 24)
G00 Z5.	X248.809 Y220.121	X230.936 Y254.627

G01 Z-2. F150	G03 X230.936 Y103.464	X244.237 Y90.452 F450
G03 X230.142 Y254.693	I0.488 J0.873	G00 Z5.
I-0.4 J0. F450	G00 Z5.	(Contour 31)
G01 X210.045 Y133.981	(Contour 27)	X244.983 Y90.772
G03 X212.442 Y133.098	X227.071 Y97.709	G01 Z-2. F150
I1.282 J-0.213	G01 Z-2. F150	G03 X244.237 Y90.452
G01 X228.79 Y160.273	G03 X226.972 Y99.392	I-0.148 J-0.684 F450
G03 X230.936 Y168.005	I-0.586 J0.81 F450	G00 Z5.
I-12.853 J7.732	G01 X210.51 Y108.589	(Contour 32)
G01 Y254.627	G03 X207.539 Y106.979	X244.983 Y90.772
G00 Z5.	I-0.975 J-1.746	G01 Z-2. F150
(Contour 25)	G01 X205.886 Y82.8	G03 X247.517 I1.267
X235.676 Y268.688	G03 X206.203 Y82.624	J5.865 F450
G01 Z-2. F150	I0.2 J-0.014	G00 Z5.
G03 X235.279 Y268.654	G01 X227.071 Y97.709	(Contour 33)
I-0.197 J-0.034 F450	G00 Z5.	X248.263 Y90.452
G01 Y127.57	(Contour 28)	G01 Z-2. F150
G03 X235.679 Y127.553	X240.625 Y94.55	X255.186 Y79.093 F450
I0.2 J0.	G01 Z-2. F150	G00 Z5.
G00 Z5.	G03 X241.618 Y92.822	(Contour 34)
(Contour 26)	I5.625 J2.087 F450	X256.664 Y82.431
X230.936 Y103.464	G00 Z5.	G01 Z-2. F150
G01 Z-2. F150	(Contour 29)	X250.824 Y92.013 F450
Y145.478 F450	X241.676 Y92.013	G00 Z5.
G03 X228.652 Y146.156	G01 Z-2. F150	(Contour 35)
I-1.243	X235.836 Y82.431 F450	X250.882 Y92.822
G01 X208.522 Y115.259	G00 Z5.	G01 Z-2. F150
G03 X208.803 Y114.124	(Contour 30)	G03 X250.824 Y92.013
I0.67 J-0.437	X237.268 Y79.017	I0.54 J-0.445 F450
G01 X229.449 Y102.591	G01 Z-2. F150	G00 Z5.

(Contour 36)	G02 X237.268 Y79.017	G03 X250.882 Y100.45
X250.882 Y92.822	J0.25	I-5.625 J-2.087 F450
G01 Z-2. F150	G00 Z5.	G00 Z5.
G03 X251.875 Y94.55 I-	(Contour 40)	(Contour 44)
4.632 J3.814 F450	X235.836 Y82.431	X250.824 Y101.26
G00 Z5.	G01 Z-2. F150	G01 Z-2. F150
(Contour 37)	G02 X235.279 Y82.587	G03 X250.882 Y100.45
X250.25 Y96.636	I-0.256 J0.156 F450	I0.598 J-0.364 F450
G01 Z-2. F150	G01 Y94.336	G00 Z5.
G03 I-4. F450	G02 X236.079 Y95.136	(Contour 45)
G00 Z5.	I0.8	X247.517 Y102.501
(Contour 38)	G01 X239.781	G01 Z-2. F150
X251.875 Y94.55	G02 X240.625 Y94.55	G03 X248.263 Y102.821
G01 Z-2. F150	I0. J-0.9	I0.148 J0.684 F450
G02 X252.719 Y95.136	G00 Z5.	G00 Z5.
I0.844 J-0.313 F450	(Contour 41)	(Contour 46)
G01 X256.42	X241.676 Y92.013	X244.237 Y102.821
G02 X257.22 Y94.336 J-	G01 Z-2. F150	G01 Z-2. F150
0.8	G03 X241.618 Y92.822	G03 X244.983 Y102.501
G01 Y82.587	I-0.598 J0.364 F450	I0.598 J0.364 F450
G02 X256.664 Y82.431	G00 Z5.	G00 Z5.
I-0.3 J0.	(Contour 42)	(Contour 47)
G00 Z5.	X248.263 Y90.452	X261.881 Y92.87
(Contour 39)	G01 Z-2. F150	G01 Z-2. F150
X255.186 Y79.093	G03 X247.517 Y90.772	G03 X261.564 Y92.708
G01 Z-2. F150	I-0.598 J-0.364 F450	I-0.117 J-0.162 F450
G02 X254.93 Y78.636 I-	G00 Z5.	G01 Y78.836
0.256 J-0.156 F450	(Contour 43)	G03 X261.764 Y78.636
G01 X237.481	X251.875 Y98.723	I0.2 J0.
	G01 Z-2. F150	G01 X280.954

G03 X281.071 Y78.999	X284.256 Y53.636	G03 X215.244 Y67.636
I0. J0.2	I1.732 J-1.732	I1.732 J1.732 F450
G01 X261.881 Y92.87	G00 Z5.	X215.961 Y65.904 I2.45
G00 Z5.	(Contour 51)	G00 Z5.
(Contour 48)	X266.074 Y55.369	(Contour 55)
X286.297 Y82.624	G01 Z-2. F150	X211.429 Y78.999
G01 Z-2. F150	G03 X270.256 Y53.636	G01 Z-2. F150
X265.429 Y97.709 F450	I1.732 J-1.732 F450	G03 X211.546 Y78.636
G02 X265.527 Y99.392	X266.074 Y55.369 I-2.45	I0.117 J-0.162 F450
I0.586 J0.81	J0.	G01 X230.736
G01 X281.99 Y108.589	G00 Z5.	G03 X230.936 Y78.836
G02 X284.961 Y106.979	(Contour 52)	I0. J0.2
I0.975 J-1.746	X222.244 Y53.636	G01 Y92.708
G01 X286.614 Y82.8	G01 Z-2. F150	G03 X230.619 Y92.87 I-
G02 X286.297 Y82.624	G03 X222.961 Y51.904	0.2 J0.
I-0.2 J-0.014	I2.45 J0. F450	G01 X211.429 Y78.999
G00 Z5.	X222.244 Y53.636	G00 Z5.
(Contour 49)	I1.732 J1.732	(Contour 56)
X277.256 Y67.636	G00 Z5.	X261.564 Y145.478
G01 Z-2. F150	(Contour 53)	G01 Z-2. F150
G03 X273.074 Y69.369	X208.244 Y53.636	G02 X263.848 Y146.156
I-2.45 J0. F450	G01 Z-2. F150	I1.243 J0. F450
X277.256 Y67.636	G03 X208.961 Y51.904	G01 X283.977 Y115.259
I1.732 J-1.732	I2.45 J0. F450	G02 X283.697 Y114.124
G00 Z5.	X208.244 Y53.636	I-0.67 J-0.437
(Contour 50)	I1.732 J1.732	G01 X263.051 Y102.591
X284.256 Y53.636	G00 Z5.	G02 X261.564 Y103.464
G01 Z-2. F150	(Contour 54)	I-0.488 J0.873
G03 X280.074 Y55.369	X215.961 Y65.904	G01 Y145.478
I-2.45 F450	G01 Z-2. F150	G00 Z5.

(Contour 57)	X246.548 Y193.012	X220.543 Y283.523
X280.058 Y133.098	G01 Z-2. F150	G01 Z-2. F150
G01 Z-2. F150	G03 X245.951 I-0.298 J-	G03 X219.545 Y282.591
G03 X282.455 Y133.981	0.03 F450	J-1. F450
I1.114 J0.67 F450	G00 Z5.	G01 X212.291 Y176.481
G01 X262.358 Y254.693	(Contour 60)	G03 X213.084 Y176.383
G03 X261.564 Y254.627	X243.691 Y220.121	I0.399 J-0.027
I-0.395 J-0.066	G01 Z-2. F150	G01 X230.781 Y275.505
G01 Y168.005	G03 X243.584 Y222.677	G03 X230.936 Y277.263
G03 X263.71 Y160.273	I-9.963 J0.862 F450	I-9.844 J1.758
I15. J0.	G00 Z5.	G01 Y282.723
G01 X280.058 Y133.098	(Contour 61)	G03 X230.136 Y283.523
G00 Z5.	X248.916 Y222.677	I-0.8
(Contour 58)	G01 Z-2. F150	G01 X220.543
X280.209 Y176.481	G03 X248.809 Y220.121	G00 Z5.
G01 Z-2. F150	I9.856 J-1.694 F450	(Contour 65)
G02 X279.416 Y176.383	G00 Z5.	X235.676 Y304.585
I-0.399 J-0.027 F450	(Contour 62)	G01 Z-2. F150
G01 X261.719 Y275.505	X245.372 Y241.147	X243.584 Y350.595
G02 X261.564 Y277.263	G01 Z-2. F150	F450
I9.844 J1.758	G03 X247.13 I0.879	G00 Z5.
G01 Y282.723	J0.194 F450	(Contour 66)
G02 X262.364 Y283.523	G00 Z5.	X243.691 Y353.152
I0.8	(Contour 63)	G01 Z-2. F150
G01 X271.957	X235.785 Y288.797	X235.679 Y445.72 F450
G02 X272.955 Y282.591	G01 Z-2. F150	G00 Z5.
I0. J-1.	G03 Y284.476 I9.764 J-	(Contour 67)
G01 X280.209 Y176.481	2.16 F450	X238.384 Y454.756
G00 Z5.	G00 Z5.	G01 Z-2. F150
(Contour 59)	(Contour 64)	

X245.951 Y380.261	(Contour 72)	G03 X250.824 Y472.013
F450	X237.268 Y459.017	I0.54 J-0.445 F450
G00 Z5.	G01 Z-2. F150	G00 Z5.
(Contour 68)	G03 X237.481 Y458.636	(Contour 76)
X246.548 Y380.261	I0.213 J-0.13 F450	X248.263 Y470.452
G01 Z-2. F150	G01 X254.93	G01 Z-2. F150
X254.116 Y454.756	G03 X255.186 Y459.093	G03 X247.517 Y470.772
F450	I0. J0.3	I-0.598 J-0.364 F450
G00 Z5.	G00 Z5.	G00 Z5.
(Contour 69)	(Contour 73)	(Contour 77)
X255.186 Y459.093	X256.664 Y462.431	X244.237 Y470.452
G01 Z-2. F150	G01 Z-2. F150	G01 Z-2. F150
X248.263 Y470.452	G03 X257.22 Y462.587	X237.268 Y459.017
F450	I0.256 J0.156 F450	F450
G00 Z5.	G01 Y474.336	G00 Z5.
(Contour 70)	G03 X256.42 Y475.136	(Contour 78)
X250.824 Y472.013	I-0.8	X235.836 Y462.431
G01 Z-2. F150	G01 X252.719	G01 Z-2. F150
X256.664 Y462.431	G03 X251.875 Y474.55	X241.676 Y472.013
F450	I0. J-0.9	F450
G00 Z5.	G00 Z5.	G00 Z5.
(Contour 71)	(Contour 74)	(Contour 79)
X254.116 Y454.756	X250.882 Y472.822	X240.625 Y474.55
G01 Z-2. F150	G01 Z-2. F150	G01 Z-2. F150
G03 X253.32 Y455.636	G03 X251.875 Y474.55	G03 X241.618 Y472.822
I-0.796 J0.081 F450	I-4.632 J3.814 F450	I5.625 J2.087 F450
G01 X239.18	G00 Z5.	G00 Z5.
G03 X238.384 Y454.756	(Contour 75)	(Contour 80)
I0. J-0.8	X250.882 Y472.822	X241.676 Y472.013
G00 Z5.	G01 Z-2. F150	G01 Z-2. F150

G03 X241.618 Y472.822  
 I-0.598 J0.364 F450  
 G00 Z5.  
 (Contour 81)  
 X240.625 Y474.55  
 G01 Z-2. F150  
 G03 X239.781 Y475.136  
 I-0.844 J-0.313 F450  
 G01 X236.079  
 G03 X235.279 Y474.336  
 I0. J-0.8  
 G01 Y462.587  
 G03 X235.836 Y462.431  
 I0.3  
 G00 Z5.  
 (Contour 82)  
 X244.983 Y470.772  
 G01 Z-2. F150  
 G03 X244.237 Y470.452  
 I-0.148 J-0.684 F450  
 G00 Z5.  
 (Contour 83)  
 X244.983 Y470.772  
 G01 Z-2. F150  
 G03 X247.517 I1.267  
 J5.865 F450  
 G00 Z5.  
 (Contour 84)  
 X250.25 Y476.636  
 G01 Z-2. F150

G03 I-4. F450  
 G00 Z5.  
 (Contour 85)  
 X251.875 Y478.723  
 G01 Z-2. F150  
 G03 X250.882 Y480.45  
 I-5.625 J-2.087 F450  
 G00 Z5.  
 (Contour 86)  
 X250.824 Y481.26  
 G01 Z-2. F150  
 G03 X250.882 Y480.45  
 I0.598 J-0.364 F450  
 G00 Z5.  
 (Contour 87)  
 X251.875 Y478.723  
 G01 Z-2. F150  
 G03 X252.719 Y478.136  
 I0.844 J0.313 F450  
 G01 X256.42  
 G03 X257.22 Y478.936  
 J0.8  
 G01 Y490.686  
 G03 X256.664 Y490.842  
 I-0.3 J0.  
 G00 Z5.  
 (Contour 88)  
 X255.186 Y494.18  
 G01 Z-2. F150

G03 X254.93 Y494.636  
 I-0.256 J0.156 F450  
 G01 X237.481  
 G03 X237.268 Y494.256  
 I0. J-0.25  
 G00 Z5.  
 (Contour 89)  
 X235.836 Y490.842  
 G01 Z-2. F150  
 G03 X235.279 Y490.686  
 I-0.256 J-0.156 F450  
 G01 Y478.936  
 G03 X236.079 Y478.136  
 I0.8  
 G01 X239.781  
 G03 X240.625 Y478.723  
 I0. J0.9  
 G00 Z5.  
 (Contour 90)  
 X241.618 Y480.45  
 G01 Z-2. F150  
 G03 X241.676 Y481.26  
 I-0.54 J0.445 F450  
 G00 Z5.  
 (Contour 91)  
 X241.618 Y480.45  
 G01 Z-2. F150  
 G03 X240.625 Y478.723  
 I4.632 J-3.814 F450  
 G00 Z5.

(Contour 92)	(Contour 97)	G03 X283.697 Y459.149
X241.676 Y481.26	X248.263 Y482.821	I-0.67 J0.437
G01 Z-2. F150	G01 Z-2. F150	G01 X263.051 Y470.682
X235.836 Y490.842	X255.186 Y494.18 F450	G03 X261.564 Y469.809
F450	G00 Z5.	I-0.488 J-0.873
G00 Z5.	(Contour 98)	G00 Z5.
(Contour 93)	X256.664 Y490.842	(Contour 101)
X237.268 Y494.256	G01 Z-2. F150	X256.821 Y445.72
G01 Z-2. F150	X250.824 Y481.26 F450	G01 Z-2. F150
X244.237 Y482.821	G00 Z5.	X248.809 Y353.152
F450	(Contour 99)	F450
G00 Z5.	X265.429 Y475.564	G00 Z5.
(Contour 94)	G01 Z-2. F150	(Contour 102)
X247.517 Y482.501	G03 X265.527 Y473.881	X248.916 Y350.595
G01 Z-2. F150	I0.586 J-0.81 F450	G01 Z-2. F150
G03 X248.263 Y482.821	G01 X281.99 Y464.684	X256.823 Y304.585
I0.148 J0.684 F450	G03 X284.961 Y466.294	F450
G00 Z5.	I0.975 J1.746	G00 Z5.
(Contour 95)	G01 X286.614 Y490.473	(Contour 103)
X247.517 Y482.501	G03 X286.297 Y490.649	X261.564 Y318.646
G01 Z-2. F150	I-0.2 J0.014	G01 Z-2. F150
G03 X244.983 I-1.267 J-	G01 X265.429 Y475.564	G03 X262.358 Y318.58
5.865 F450	G00 Z5.	I0.4 J0. F450
G00 Z5.	(Contour 100)	G01 X282.455 Y439.292
(Contour 96)	X261.564 Y469.809	G03 X280.058 Y440.175
X244.237 Y482.821	G01 Z-2. F150	I-1.282 J0.213
G01 Z-2. F150	Y427.795 F450	G01 X263.71 Y413.
G03 X244.983 Y482.501	G03 X263.848 Y427.117	G03 X261.564 Y405.267
I0.598 J0.364 F450	I1.243	I12.853 J-7.732
G00 Z5.	G01 X283.977 Y458.014	G01 Y318.646

G00 Z5.	G00 Z5.	X230.936 Y427.795
(Contour 104)	(Contour 108)	G01 Z-2. F150
X256.823 Y304.585	X248.809 Y353.152	G02 X228.652 Y427.117
G01 Z-2. F150	G01 Z-2. F150	I-1.243 J0. F450
G03 X257.22 Y304.619	G03 X248.916 Y350.595	G01 X208.522 Y458.014
I0.197 J0.034 F450	I9.963 J-0.862 F450	G02 X208.803 Y459.149
G01 Y445.703	G00 Z5.	I0.67 J0.437
G03 X256.821 Y445.72	(Contour 109)	G01 X229.449 Y470.682
I-0.2	X245.951 Y380.261	G02 X230.936 Y469.809
G00 Z5.	G01 Z-2. F150	I0.488 J-0.873
(Contour 105)	G03 X246.548 I0.298	G01 Y427.795
X235.679 Y445.72	J0.03 F450	G00 Z5.
G01 Z-2. F150	G00 Z5.	(Contour 112)
G03 X235.279 Y445.703	(Contour 110)	X212.442 Y440.175
I-0.199 J-0.017 F450	X212.291 Y396.792	G01 Z-2. F150
G01 Y304.619	G01 Z-2. F150	G03 X210.045 Y439.292
G03 X235.676 Y304.585	G02 X213.084 Y396.89	I-1.114 J-0.67 F450
I0.2	I0.399 J0.027 F450	G01 X230.142 Y318.58
G00 Z5.	G01 X230.781 Y297.768	G03 X230.936 Y318.646
(Contour 106)	G02 X230.936 Y296.01	I0.395 J0.066
X247.13 Y332.127	I-9.844 J-1.758	G01 Y405.267
G01 Z-2. F150	G01 Y290.55	G03 X228.79 Y413. I-15.
G03 X245.372 I-0.879 J-	G02 X230.136 Y289.75	J0.
0.195 F450	I-0.8	G01 X212.442 Y440.175
G00 Z5.	G01 X220.543	G00 Z5.
(Contour 107)	G02 X219.545 Y290.682	(Contour 113)
X243.584 Y350.595	J1.	X230.619 Y480.403
G01 Z-2. F150	G01 X212.291 Y396.792	G01 Z-2. F150
G03 X243.691 Y353.152	G00 Z5.	G03 X230.936 Y480.565
I-9.856 J1.694 F450	(Contour 111)	I0.117 J0.162 F450

G01 Y494.436	(Contour 116)	(Contour 119)
G03 X230.736 Y494.636	X208.244 Y519.636	X270.256 Y519.636
I-0.2 J0.	G01 Z-2. F150	G01 Z-2. F150
G01 X211.546	G03 X212.426 Y517.904	G03 X269.539 Y521.369
G03 X211.429 Y494.274	I2.45 F450	I-2.45 F450
I0. J-0.2	X208.244 Y519.636 I-	X270.256 Y519.636 I-
G01 X230.619 Y480.403	1.732 J1.732	1.732 J-1.732
G00 Z5.	G00 Z5.	G00 Z5.
(Contour 114)	(Contour 117)	(Contour 120)
X206.203 Y490.649	X226.426 Y517.904	X284.256 Y519.636
G01 Z-2. F150	G01 Z-2. F150	G01 Z-2. F150
X227.071 Y475.564	G03 X222.244 Y519.636	G03 X283.539 Y521.369
F450	I-1.732 J1.732 F450	I-2.45 F450
G02 X226.972 Y473.881	X226.426 Y517.904	X284.256 Y519.636 I-
I-0.586 J-0.81	I2.45	1.732 J-1.732
G01 X210.51 Y464.684	G00 Z5.	G00 Z5.
G02 X207.539 Y466.294	(Contour 118)	(Contour 121)
I-0.975 J1.746	X202.694 Y537.636	X276.539 Y507.369
G01 X205.886 Y490.473	G01 Z-2. F150	G01 Z-2. F150
G02 X206.203 Y490.649	X289.806 F450	G03 X277.256 Y505.636
I0.2 J0.014	Y493.183	I-1.732 J-1.732 F450
G00 Z5.	X275.685 Y286.636	X276.539 Y507.369 I-
(Contour 115)	X289.806 Y80.09	2.45
X215.244 Y505.636	Y35.636	G00 Z5.
G01 Z-2. F150	X202.694	(Contour 122)
G03 X219.426 Y503.904	Y80.09	X281.071 Y494.274
I2.45 F450	X216.815 Y286.636	G01 Z-2. F150
X215.244 Y505.636 I-	X202.694 Y493.183	G03 X280.954 Y494.636
1.732 J1.732	Y537.636	I-0.117 J0.162 F450
G00 Z5.	G00 Z5.	G01 X261.764

G03 X261.564 Y494.436	G01 X281.071 Y494.274	%
I0. J-0.2	G00 Z5.	
G01 Y480.565	X0. Y0.	
G03 X261.881 Y480.403	M05	
I0.2 J0.	M30	

# Додаток Г





Только для некоммерческого использования !										ГОСТ 3.1404-86		Форма 1а					
Дцкл.																	
Взам.																	
Подл.																	
										A1.02088.47906		2					
										A1.50088.47906							
A	Цех	Уч.	РМ	Опер.	Код	наименование операции	Обозначение документа										
B	Код наименования оборудования						СМ	Проф.	Р	УТ	КР	КОИД	ЕН	ОП	Кшм.	Тпз.	Тшм
P							ПИ	Д	УИИ	В	+	+	+	+	+	+	+
O 01	2. Встановити П-подфінду деталь (ноз. 2) до юнфтово стфійки (ноз. 1) закрфлпшт двома заклепками (ноз. 5).																
O 02																	
O 03	3. Встановити юнфтофду стфійку (ноз. 1) до встановлених п-подфінх деталей, закрфлпшт чотирьома заклепками (ноз. 5)																
O 04	вфдровфіню.																
O 05																	
O 06																	
A 07	020 8800 СБОРКА																
O 08	1. До монтажного блоку А1, закрфлпшт напрадвянчю (ноз. 3) дв анадцятъма заклепками (ноз. 4 ).																
O 09																	
O 10	2. До монтажного блоку А1, закрфлпшт напрадвянчю (ноз. 3) дв анадцятъма заклепками (ноз. 4 ).																
11																	
O 12	3. До монтажного блоку А1, закрфлпшт напрадвянчю (ноз. 3) дв анадцятъма заклепками (ноз. 4 ).																
13																	
O 14	4. До монтажного блоку А1, закрфлпшт напрадвянчю (ноз. 3) дв анадцятъма заклепками (ноз. 4 ).																
15																	
16																	
17																	
КТП	Только для некоммерческого использования !										Карта технологического процесса				Конструкц.ф.адп	3	

