

Вінницький національний технічний університет
(повне найменування вишого навчального закладу)

Факультет машинобудування та транспорту
(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра технологій та автоматизації машинобудування
(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

**«УДОСКОНАЛЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРИВОДУ МОДУЛЯ
ЛІНІЙНИХ ПЕРЕМІЩЕНЬ З ВИКОРИСТАННЯМ САД/CAE-СИСТЕМ»**

08-64.МКР.026.00.000 ПЗ

Виконала: студентка 2-го курсу, гр. 2ПМ-24м
спеціальності 131 – Прикладна механіка

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальність)

Максим СОКОЛОВСЬКИЙ

(прізвище та ініціал)

Керівник: к.т.н., доц., доц. каф. ТАМ

Олег ПІОНТКЕВИЧ

(прізвище та ініціал)

« 16 »

12

2025 р.

Опонент: к.т.н., доц., доц. каф. АТМ

Олег АНТОНЮК

(прізвище та ініціал)

« 16 »

12

2025 р.

Допущено до захисту

Завідувач кафедри ТАМ

д.т.н., проф. Козлов Л.Г.

(прізвище та ініціал)

« 16 »

12

2025 р.

Кафедра Технологій та автоматизації машинобудування

Вінницький національний технічний університет
Факультет Машинобудування та транспорту
Кафедра Технологій та автоматизації машинобудування
Рівень вищої освіти II-ї (магістерський)
Галузь знань 13- Механічна інженерія
Спеціальність 31 - Прикладна механіка
Освітньо-професійна програма - Технології машинобудування

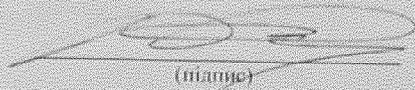
ЗАТВЕРДЖУЮ
Директор ТОВ «Техносміт груп»

 В.В. Дмитриш

«06» жовтня 2025 р.



ЗАТВЕРДЖУЮ
зав. кафедри ТАМ
д.т.н., проф. Л.Г. Козлов



«06» жовтня 2025 р.

ЗАВДАННЯ
НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТЦІ

Соколовському Максиму Євгеновичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

- Тема роботи. «Удосконалення автоматизованого приводу модуля лінійних переміщень з використанням САД/САЕ-систем»
керівник роботи к.т.н., доц., доц. кафедри ТАМ Піонткевич О.В.
затверджені наказом вищого навчального закладу від 24.09.2025 року №
- Строк подання студентом роботи 17 грудня 2025 року
- Вихідні дані до роботи: кінематична схема автоматизованого приводу, габаритні розміри каретки 1100x1100 мм, вантажопідйомність 400 кг; максимальна швидкість переміщень 0,4 м/с; робоча швидкість переміщення 0,02 м/с; хід каретки 3 м.
- Зміст текстової частини: вступ, анотації, службове призначення виробу; аналіз кінематичної схеми з вибором двигуна; вибір редуктора; алгоритм керування рухом зварювального робота; обґрунтування конструкції рами приводу; розрахунок точності переміщення; дослідження кронштейну; вибір зварювального робота та інших комплектуючих; розрахунок зубчасто-рейкової передачі та підшипників приводу; обслуговування приводу; економічне обґрунтування розробки.
- Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): креслення деталі «Кронштейн», креслення автоматизованого приводу, плакати з результатами дослідження.

Кафедра технологій та автоматизації машинобудування

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	виконав прийняв
Освітня частина	к.т.н., доц. Олег ПОНТКЕВИЧ	01.10.2025	01.12.2025
Економічна частина	к.е.н., проф. Олександр ЛЕСЬКО	12.10.2025	20.11.2025

7. Дата видачі завдання 07 жовтня 2025 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

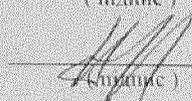
№ з/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Пр
1	Визначення об'єкту та предмету дослідження	до 25. 10.2025	В
2	Аналіз відомих рішень, постановка задачі	до 25. 10.2025	В
3	Техніко-економічне обґрунтування метабі досліджень	до 30. 10.2025	В
4	Розв'язання поставлених задач	до 20. 11.2025	В
5	Формування висновків по роботі, наукової новизни, практичної цінності результатів	до 22. 11.2025	В
6	Виконання розділу «Економічна частина»	до 25. 11.2025	В
7	Попередній захист МКР	до 02. 12.2025	В
8	Перевірка роботи на плагіат	до 04. 12.2025	В
9	Нормоконтроль МКР	до 13. 12.2025	В
10	Рецензування МКР	до 13. 12.2025	В
11	Захист МКР	до 25. 12.2025	В

Студентка


(підпис)

Максим СОКОЛОВС

Керівник роботи


(підпис)

Олег ПОНТКЕВИЧ

АНОТАЦІЯ

УДК 621.8

Соколовський М. Є. Удосконалення автоматизованого приводу модуля лінійних переміщень з використанням CAD/CAE-систем: магістерська кваліфікаційна робота на здобуття освітньо-кваліфікаційного рівня «Магістр» за спеціальністю 1314 «Прикладна механіка» / М. Є. Соколовський. Вінницький національний технічний університет. Вінниця, 2025. 112 ст.

На укр. мові. Бібліограф. 25 назв; рис.: 48; табл. 16.

Метою роботи є удосконалення конструкції модуля лінійних переміщень на основі автоматизованого приводу для зварювальних робіт шляхом використанням CAD/CAE-систем.

Для досягнення поставленої мети проведено огляд існуючих конструкцій зварювальних комплексів; розроблено та проведено розрахунки для кінематичної схеми приводу; удосконалено раму модуля лінійних переміщень; розраховано точність переміщення; досліджено вплив циклічних навантажень на втому матеріалу деталей; вибрано зварювального робота та його компоненти; розраховано інші елементи приводу та вибрано лінійні підшипники; проведено економічне обґрунтування розробки.

Отримала подальший розвиток методика кінцево-елементного аналізу деталі «Кронштейн» на втому матеріалу, що дозволило удосконалити конструкцію модуля лінійних переміщень з метою забезпеченням необхідного коефіцієнту запасу міцності.

В економічній частині роботи розраховані капітальні вкладення, собівартість механічної обробки заготовки деталі, термін окупності та економічний ефект.

Графічна частина ілюстративно доповнює матеріали, які представлені в пояснювальній записці.

Ключові слова: кронштейн, автоматизований привод, CAD/CAE-системи, модуль лінійних переміщень

ABSTRACT

Sokolovsky M. Ie. Improvement of the automated drive of the linear displacement module using CAD/CAE systems: master's qualification work for the competition of the educational qualification level "Master" in specialty 131 "Applied mechanics" / M. Ie. Sokolovsky. Vinnitsa National Technical University. Vinnitsa, 2025. 112 p.

In Ukrainian speech bibliography: 25 titles; Fig.: 48; table 16.

The purpose of the work is to improve the design of the linear displacement module based on an automated drive for welding operations using CAD/CAE systems.

To achieve the set goal, a review of existing designs of welding complexes was conducted; calculations for the kinematic scheme of the drive were developed and performed; the frame of the linear displacement module was improved; the accuracy of movement was calculated; the influence of cyclic loads on the fatigue of the material of the parts was investigated; a welding robot and its components were selected; other drive elements were calculated and linear bearings were selected; economic justification of the development was carried out.

The method of finite element analysis of the part "Bracket" for material fatigue was further developed, which allowed to improve the design of the linear displacement module in order to ensure the required safety factor.

In the economic part of the work, capital investments, the cost of machining the workpiece of the part, the payback period and the economic effect are calculated. The work also developed measures for labor protection and safety in emergency situations.

The graphic part illustratively complements the materials presented in the explanatory note.

Key words: bracket, automated drive, CAD/CAE systems, linear displacement module

ЗМІСТ

ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРИВОДУ МОДУЛІВ ЛІНІЙНОГО ПЕРЕМІЩЕННЯ ДЛЯ ЗВАРЮВАЛЬНИХ ОПЕРАЦІЙ	7
1.1 Службове призначення автоматизованого приводу модуля лінійних переміщень та особливості проектування	7
1.2 Огляд автоматизованого приводу модулів лінійних переміщень для зварювальних робіт	10
1.3 Кінематична схема приводу та його розрахунок	18
1.4 Алгоритм керування рухом зварювального робота	29
РОЗДІЛ 2 УДОСКОНАЛЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРИВОДУ МОДУЛЯ ЛІНІЙНИХ ПЕРЕМІЩЕНЬ	34
2.1 Удосконалення рами модуля лінійних переміщень	34
2.2 Розрахунок точності переміщення	41
2.3 Дослідження кронштейну сервомотора на втому матеріалі	43
2.4 Вибір зварювального робота та його компонентів для роботи	50
РОЗДІЛ 3 КОНСТРУКТИВНІ РОЗРАХУНКИ ТА ПРОЄКТУВАННЯ ІНШИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПРИВОДУ	54
3.1 Розрахунок параметрів зубчасто-рейкової передачі	54
3.2 Проектування елементів зубчасто-рейкової передачі	59
3.3 Підбір лінійних підшипників	60
3.4 Особливості обслуговування приводу	64
РОЗДІЛ 4 ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ РОЗРОБКИ	66
4.1 Проведення наукового аудиту науково-дослідної роботи.....	66
4.2 Прогнозування витрат на виконання науково-дослідної роботи.....	68
4.3 Розрахунок економічної ефективності науково-технічної розробки за її можливої комерціалізації потенційним інвестором.....	78
ВИСНОВКИ	85
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	86

ДОДАТКИ.....	89
ДОДАТОК А – ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ.....	90
ДОДАТОК Б – ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА.....	91
ДОДАТОК В – ЛІСТИНГ 1 «ПРИКЛАД КЕРУЮЧОЇ ПРОГРАМИ ЗВАРЮВАЛЬНОГО ЦИКЛУ	111

Кафедра технологій та автоматизації машинобудування

ВСТУП

Актуальність теми дослідження.

Зварювальні роботи дозволяють підвищити продуктивність та точність виготовлення деталей на підприємстві. Сучасні промислові роботи можуть реалізовувати шести-координатний рух пальника, а використання платформи для переміщення промислового робота дозволяє забезпечити йому координату. Такі підходи дозволяють працювати з великогабаритними рамами, таврами та іншими виробами. Викликом для сучасного виробництва є забезпечення конкурентного виготовлення продукції, саме тому доцільність проектування зварювальних роботів із платформами є безперечною.

В роботі представлено сучасні підходи до виготовлення автоматизованого обладнання на основі модуля лінійних переміщень для зварювальних робіт. Отримані результати дозволяють впровадити розробку у виробництво, що є особливо актуальним.

Мета та задачі роботи дослідження.

Метою роботи є удосконалення конструкції модуля лінійних переміщень на основі автоматизованого приводу для зварювальних робіт шляхом використання CAD/CAE-систем.

Для досягнення мети планується розв'язати такі *задачі*:

- провести огляд існуючих конструкцій зварювальних комплексів;
- розробити та провести розрахунки для кінематичної схеми приводу;
- удосконалити раму модуля лінійних переміщень;
- розрахувати точність переміщення;
- дослідити вплив циклічних навантажень на втому матеріалу деталей;
- вибрати зварювального робота та його компоненти;
- розрахувати інші елементи приводу та підібрати лінійні підшипники;
- провести економічне обґрунтування розробки.

Об'єкт дослідження – фізико-механічні процеси в конструкції модуля лінійних переміщень.

Предмет дослідження – модуль лінійних переміщень з автоматизованим приводом.

Методи дослідження. Математична логіка, методи функціонального моделювання та методи твердотільного моделювання та інженерного аналізу за допомогою програмного пакету SolidWorks.

Наукова новизна одержаних результатів. Отримала подальший розвиток методика кінцево-елементного аналізу деталі «Кронштейн» на втому матеріалу, що дозволило удосконалити конструкцію модуля лінійних переміщень з метою забезпеченням необхідного коефіцієнту запасу міцності.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблено модуль лінійних переміщень для промислового робота моделі «Fanuc Arc Mate 120iD» для зварювальних робіт.

Особистий внесок магістранта. Основні теоретичні та симуляційні результати розрахунків і моделювання, що наведені у магістерській кваліфікаційній роботі, отримано самостійно.

Публікації: Соколовський М. Є., Горбачов А. О., Піонткевич О. В. Проектування та використання промислових роботів. Матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції "Перспективи розвитку машинобудування та транспорту-2025", 03-05 червень 2025 : Збірник тез доповідей. Вінниця: ВНТУ, 2025. С. 3. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/prmt/pmrt2025/paper/view/25050>.

РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРИВОДУ МОДУЛІВ ЛІНІЙНОГО ПЕРЕМІЩЕННЯ ДЛЯ ЗВАРЮВАЛЬНИХ ОПЕРАЦІЙ

1.1 Службове призначення автоматизованого приводу модуля лінійних переміщень та особливості проектування

Модулі лінійного переміщення стають все більш популярними засобами для вирішення широкого спектра технічних завдань у галузі прикладної механіки, пов'язаних із транспортуванням та зварюванням (рисунок 1) заготовок, деталей та інших компонентів виробничих систем. Ці процеси вирізняються високою точністю, закономірністю і, у більшості випадків, забезпечуються автоматизованим управлінням механізмів. Принцип роботи таких модулів ґрунтується на перетворенні обертального руху електродвигуна в лінійний поступальний рух. Це здійснюється за допомогою різноманітних механічних передавальних систем, зокрема кулькових і трапецієподібних гвинтів, ремінних передач та зубчастих механізмів.

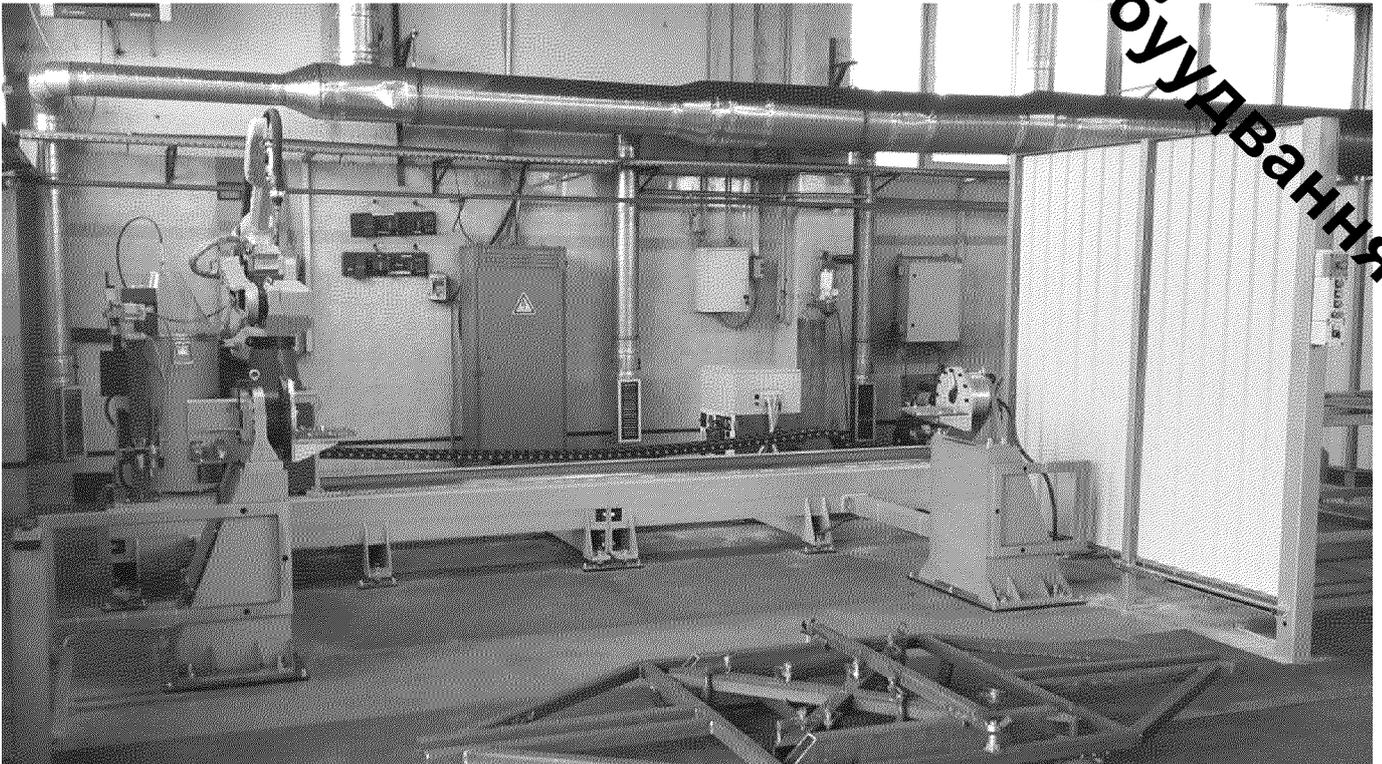


Рисунок 1.1 – Комплекс РК759 для зварювальних робіт [1]

Залежно від особливостей конструкції та сфери застосування, в модулях можуть використовуватися різні типи електродвигунів: промислові асинхронні двигуни загального призначення, серводвигуни (як асинхронні, так і синхронні), крокові двигуни і крокові сервоприводи (рисунки 1.1, 1.2). Для забезпечення максимальної точності позиціонування, необхідної швидкості руху та безпеки експлуатації модулі часто доповнюють кінцевими вимикачами (рисунки 1.3, 1.4), датчиками лінійного положення, системами захисту від перенапруги і спеціальними покриттями для роботи в агресивному середовищі.

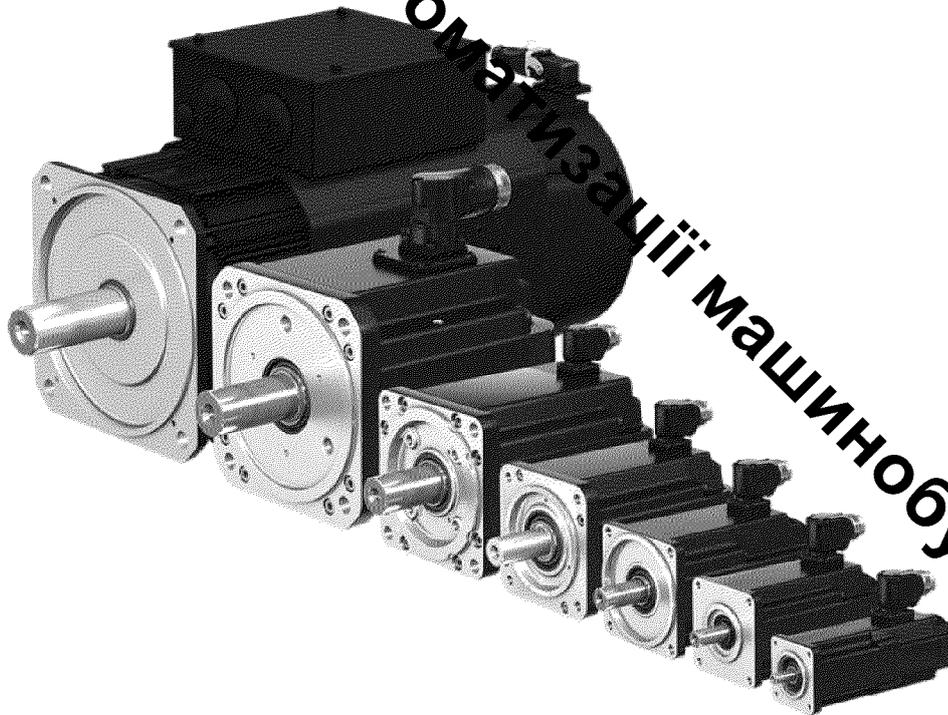


Рисунок 1.2 – Синхронні серводвигуни MS2N

Серед переваг модулів лінійного переміщення особливо виділяється їх висока точність та конструктивна жорсткість, яка вигідно відрізняє їх від звичайних систем на кшталт конвеєрних стрічок. Це дозволяє створювати багатоосьові системи та роботизовані комплекси. Водночас вибір великої кількості складових для проектування таких модулів може ускладнити їхню конструкцію та спричинити зайві витрати. Таким чином, проектування та програмування нових модулів вимагає раціонального підходу до вибору конструктивних елементів приводу.



Рисунок 1.3 – Кінцеві вимикачі та датчики

Основну увагу при цьому слід приділяти вимогам до точності, стабільності та динамічних характеристик роботи систем. Для теоретичного аналізу точності або динаміки існують чіткі інженерні методики. Точність позиціонування розраховується за рахунок середньоквадратичної суми похибок усіх ланок ланцюга з'єднань. Для дослідження швидкості, прискорення або споживаної потужності достатньо математичного моделювання в таких потужних програмах як SOLIDWORKS Motion, SOLIDWORKS Simulation, MATLAB та інші. Статичний аналіз конструкції установки дозволяє провести перевірку платформи на міцність, оцінити її жорсткість у вигляді кольорових карт «епюрів».

1.2 Огляд автоматизованого приводу модулів лінійних переміщень для зварювальних робіт

Сучасне машинобудування неможливо уявити без автоматизації зварювальних процесів. Перехід від ручного зварювання до використання автоматичних порталів та робототехнологічних комплексів дозволяє не лише підвищити продуктивність у 5–10 разів, але й забезпечити стабільну якість шва, недосягну для людини-оператора. У цьому огляді проаналізовано три типи обладнання: порталні установки для ємностей, наприклад Gantry Welding Unit (виробник Deuma в країні Німеччина), лінії для виготовлення балок, наприклад Builder HST (виробник Cogitrex в країні Італія) та універсальні роботизовані комплекси, наприклад РК759 (виробник ТОВ «НАВКО-ТЕХ» в країні Україна).



Рисунок 1.4 – Зовнішній вигляд порталної рами установки Gantry Welding Unit [2]

Установки типу Gantry Welding Unit або аналоги (рисунок 1.4) від компанії Deima [2] – це важкі спеціальні порталні машини, призначені для автоматичного зварювання під шаром флюсу (типу SAW) або в середовищі захисних газів (типу MIG/MAG). Основне призначення – точне зварювання довгих поздовжніх швів (наприклад, обшивки цистерн, мостові конструкції) та/або кільцевих швів за рахунок використання роликів обертачів.

Основою установки типу Gantry Welding Unit є портална рама Gantry, яка переміщується по рейкових напрямних, прокладених уздовж цеху. Жорсткість рами забезпечується за рахунок зварення з товстостінних коробчастих профілів для мінімізації вібрацій. Портал має привід який забезпечує рух вздовж виробу по осі X. Крім цього на поперечній балці встановлені супорти (спеціальні каретки), що рухаються поперек відносно виробу по осі Y та вертикально відносно виробу по осі Z. Зазвичай така установка оснащена кріслом оператора безпосередньо на порталі для візуального контролю процесу.

Точність обладнання установки типу Gantry Welding Unit забезпечується механічною жорсткістю та системою стеження за стиком. При цьому забезпечується точність позиціонування: $\pm 0.5-1.0$ мм (для великогабаритних конструкцій деталей це відповідає високому показнику). Для досягнення такої точності використовуються лазерні або тактильні (механічні щупи) системи стеження за швом. Тобто, щуп фізично "відчуває" розробку кромки і коригує положення пальника в реальному часі через сервоприводи супортів.

Орієнтовна вартість такої установки 120 000 – 250 000 євро залежно від довжини колій та комплектації зварювальним обладнанням (наприклад, ESAB або Lincoln Electric).

Установка типу Corimrex Builder [3] (серія HFI/HST на рисунку 1.5) – це спеціалізовані комплекси для автоматичного складання та зварювання двотаврових балок (H-beams) та таврових профілів. Її особливістю є те, що зварювання відбувається одночасно з двох сторін, а конструкція дозволяє компенсувати теплові деформації ("грибоподібність" полиць).



Рисунок 1.5 – Зовнішній вигляд порталної рами установки Corimrex Bender [3]

Рама установки аналогічно до попередньої стаціонарна та масивна, однак інтегрованою системою гідравлічних притисків. Конструкція передбачає «прохідний» тип доступу до усіх частин обладнання. Деталь «Балка» встановлюється крізь установку за допомогою рольганга. Система HST (розшифровується як: Hydraulic Straightening) включає потужні ролики, які механічно виправляють деформацію полиці, що приварюється до деталі «Балки» одразу після зварювання, поки метал ще гарячий. Це дозволяє суттєво зекономити на виготовленні довгих двотаврів, адже після зварювання відсутня потреба в окремій операції правки.

Використовується програмований логічний контролер PLC Siemens. Зазвичай використовують 2 або 4 зварювальні головки для зварювання під флюсом (SAW). Синхронізація приводів подачі балки та швидкість зварювання відбувається жорстко з високою точністю. При цьому точність забезпечується напрямними роликами, які центрують стінку деталі «Балка» відносно полиць. Точність симетрії деталі «Балка» після виготовлення складає до ± 1 мм.

Вартість установка типу Corimrex Builder досить висока, може сягати 300 000 – 500 000 євро за повну лінію рольгангами та орієнтована тільки на спеціалізоване виготовлення типових деталей «Балка».

Компанія Valk Welding (Нідерланди) спеціалізується на розробці високотехнологічних зварювальних комплексів на базі японських роботів Panasonic (рисунок 1.6). Розглянута установка має високу гнучкість за рахунок лінійного треку,. Вона призначена для зварювання довгих різних конструкцій: напівпричепи, рами вантажівок, будівельні ферми та інші. Основна відмінність від розглянутих конкурентів – це використання технології "All-in-One" (перекладі з англійського: «Все в одному»), де джерело зварювального струму є не окремою "тумбочкою", а інтегроване безпосередньо в контролер робота.

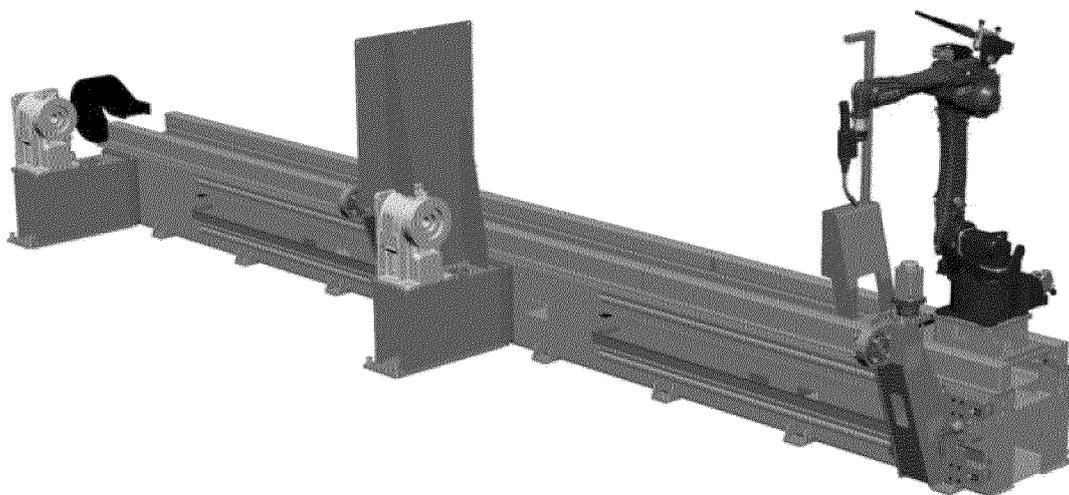


Рисунок 1.6 – Зовнішній вигляд зварювального комплексу фірми Valk Welding [4]

Основною комплексу є модульна система переміщення. Використовується фірмова система переміщення VWPR (Valk Welding Pneumatic Rack) з типом рами «Трек». Розглянута рама типу «Трек» характеризується як масивна сталева зварна конструкція, що монтується на підлогу. Особливістю конструкції є те, що на відміну від класичних систем, кабелеукладачі (гусениця з проводами) тут часто схований всередину рами «Трек» або розташований збоку так, щоб мінімізувати ширину установки. В якості промислового робота використовується робот японської фірми Panasonic серії TM (Towers) (наприклад, TM-1800 або TL-2000). Ці спеціалізовані роботи створені виключно для дугового зварювання. Вони мають порожнистий вал (Hollow Wrist), через який проходять усі кабелі, що виключає їх зачіпання за заготовку.

Система фірми Valk Welding вважається однією з найточніших у світі завдяки унікальній інтеграції. Точність позиціонування при цьому досягається за рахунок якісного робота та треку. При цьому робот Panasonic забезпечує повторюваність ± 0.06 мм, а лінійний трек має похибку менше 0.1 мм на довжині 10 метрів.

Основні елементами, які забезпечують точність: лазерна система Arc-Eye, швидкісний CPU та калібрування. Замість "дотику" дротом (як у Taurus), цей робот використовує лазерну камеру Arc-Eye, яка сканує стик перед зварюванням у 3D-форматі. Вона бачить не тільки зміщення, а й ширину зазору, автоматично змінюючи параметри зварювання. Оскільки керування рухом робота і керування зварювальною дугою відбувається в одному процесорі (технологія Towers), реакція на зміну довжини дуги відбувається у 10 разів швидше, ніж у класичних зв'язках "Робот + Окремий апарат". А також здійснюється постійне калібрування, а саме, використовується автоматична станція перевірки гусака пальника. Якщо робот вдариться, він сам заїжджає на станцію, перевіряє геометрію пальника і програмно компенсує викривлення.

Це обладнання вважається преміум-класу та вартість подібного комплексу (робот + трек 6 метрів + лазерна система) стартує від 180 000 – 250 000 євро.

Робототехнологічний комплекс РК759 (рисунок 1.7) – це спеціалізований роботизований комплекс українського виробництва (фірми ТОВ "НАВКО-ТЕХ"),

розроблений для зварювання габаритних рамних конструкцій (наприклад, для сільськогосподарської техніки). Розміри габаритів для зварювання складають до 4 метрів.

Використовується промисловий робот Fanuc ArcMate 120iC або 120iD (виробництво країни Японія). Це 6-осьовий маніпулятор зі спеціалізованим порожнистим зап'ястком для кабелів. При цьому робот встановлений на лінійній осі або лінійному треку (7-ма вісь), що дозволяє йому переміщатися вздовж виробу на відстань до 7–9 метрів. Зварювального комплексу РК759 оснащений двома обертачами (кантувачами) вантажопідйомністю 500–1500 кг. Це дозволяє варити на одній позиції, поки оператор завантажує деталь на іншу.

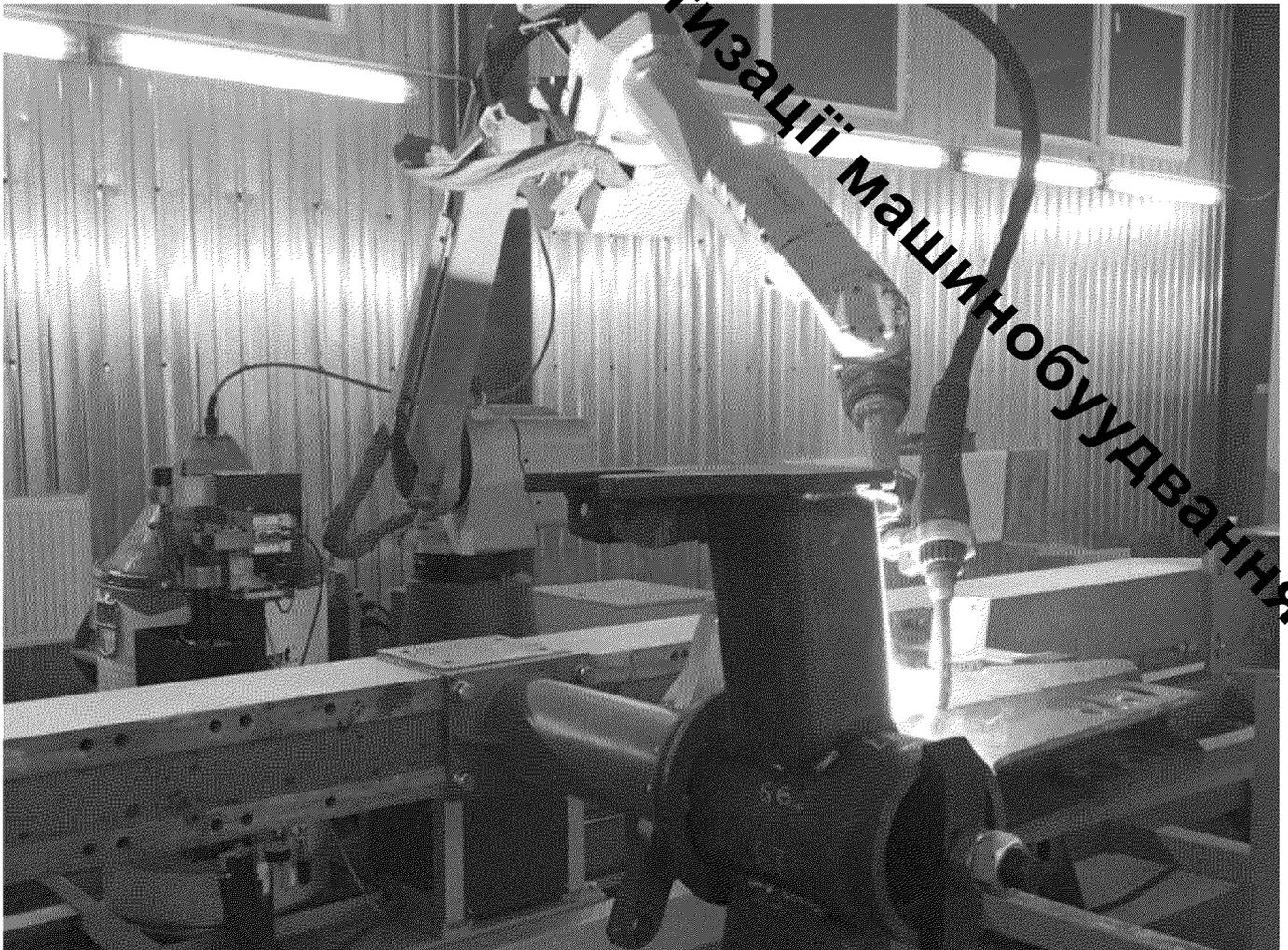


Рисунок 1.7 – Зовнішній вигляд зварювального комплексу РК759 [1]

Забезпечується точність робота ± 0.03 мм (для серії ArcMate). При цьому використовуються сервоприводи з абсолютними енкодерами, які не потребують калібрування після ввімкнення. Сучасна технологія Touch Sensing дозволяє роботу торкатися дротом або соплом деталі перед зварюванням та визначати зміщення заготовки. Це дозволяє робити автоматичний зсув в програмі робота.

Значний результат в досягненні точного зварювання забезпечується за рахунок технології Through Arc Seam Tracking (TAST). При цьому відбувається відстеження шва через дугу під час зварювання (корекція по напрузі/струму).

Орієнтовна вартість такого комплексу "під ключ" становить 80 000 – 140 000 євро, залежно від джерела зварювання (Fronius коштує дорожче за китайські аналоги) та довжини треку.

Отже, варто проаналізувати результати огляду. Портальна конструкція (Gantry) забезпечує доступ до великих площ та призначена для великогабаритних деталей, але вимагає ідеально рівних рейок. Стационарна прохідна конструкція (Corimpex) має високу жорсткість при зварюванні довгих деталей, а також дозволяє виправляти деталь після зварювання безпосередньо на зварювальному столі, застосовуючи великі зусилля з гідравлічним обладнанням. Перемищене обладнання призначене для типових деталей, а для більшого різноманіття використовують установки на основі роботів із 6-ма координатами переміщення: фірми Valke Welding та ТОВ "НАВКО-ТЕХ". При цьому використовується консольна та антропоморфна система (робот). Робот сам по собі не є жорсткою системою порівняно з порталом, тому точність досягається досконалою електронікою та математичними алгоритмами компенсації гравітації. Сучасні методи позиціонування (лазерна система Arc-Eye, Touch Sensing та Through Arc Seam Tracking) в зварювальних комплексах відіграють значну роль в цьому. Результат огляду автоматизованого приводу модулів лінійних переміщень для зварювальних робіт подано в таблиці 1.1.

Проведений огляд показує, що вибір обладнання суттєво залежить від номенклатури виробів. Для серійного виробництва однотипних довгих балок безальтернативним лідером є лінії типу Corimpex, який економить витрати часу на виправлення деталі після термічних деформацій. Для великогабаритних ємностей

варті обирати портали Deuma GWU. Проте для сучасного гнучкого виробництва складних вузлів сільськогосподарської техніки найбільш ефективним є впровадження обладнання фірми Valk Welding або робототехнологічних комплексів типу PK759 на базі роботів Fanuc, які забезпечують найкращу точність (до ± 0.05 мм) та швидку перенастроюваність.

Таблиця 1.1 – Порівняння технічних характеристик та результати аналізу установок

Параметри	GWU (Portal)	Corimpex (Builder)	Valk Welding (Robotic Cell)	PK759 (Robotic Cell)
Тип процесу	SAW / MIG/MAG	SAW (під флюсом)	MIG/MAG (дугове)	MIG/MAG (дугове)
Основне застосування	Цистерни, мости, вагони	Двотаврові балки	Складні просторові конструкції	Складні просторові рами
Гнучкість	Середня (тільки довгі шви)	Низька (тільки балки)	Дуже висока (будь-яка геометрія)	Дуже висока (будь-яка геометрія)
Точність (похибка)	± 1.0 мм	± 1.0 мм	± 0.05 мм	± 0.05 мм
Продуктивність	Висока з швидким наплавленням	Висока з паралельною правкою виробу	Середня/Висока	Середня/Висока
Орієнтовна вартість	від €120,000	від €300,000	від €180,000	від €80,000

1.3 Кінематична схема приводу та його розрахунок

Для проектування даного механізму використаємо вихідні дані:

- габаритні розміри каретки (в плані) – 1100x1100 мм;
- вантажопідйомність – 400 кг;
- максимальна швидкість переміщення – 0,4 м/с;
- робоча швидкість переміщення – 0,02 м/с;
- хід каретки – 3,0 м.

Рациональним рішенням для забезпечення рівномірного переміщення каретки є використання лінійних напрямних. Вони характеризуються низьким рівнем опору, високою довговічністю, надійністю та простотою в обслуговуванні. Як передавальний механізм приводу передбачено використання зубчасто-рейкової передачі, де шестерня напряду з'єднується із редуктором через електричним двигуном (рисунок 1.8).

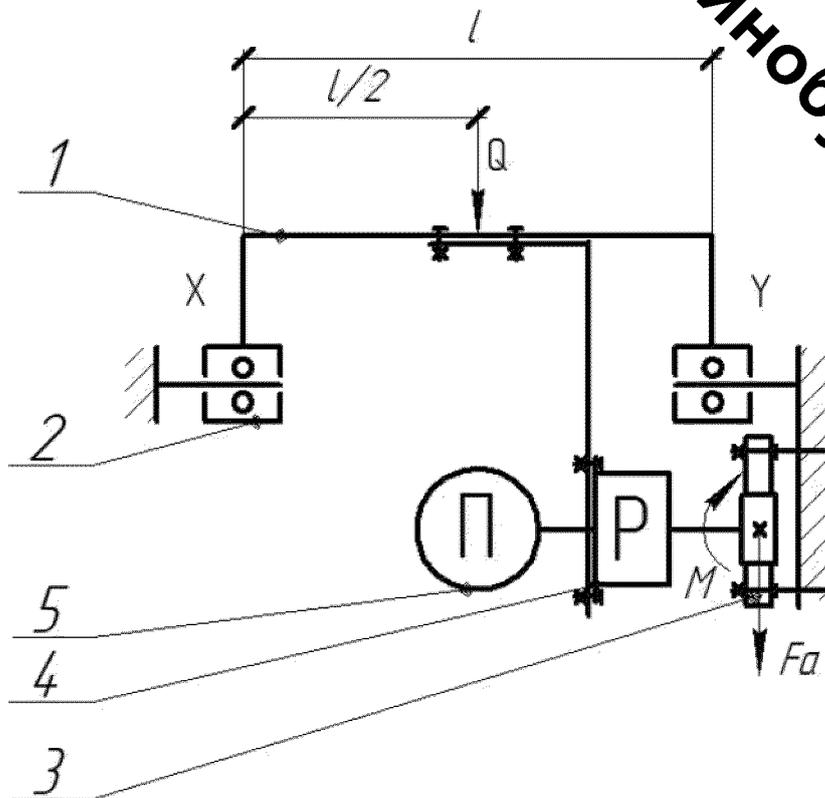


Рисунок 1.8 – Запропонована кінематична схема автоматизованого модуля

Лінійних переміщень: 1 – каретка, 2 – опора кочення, 3 – зубчасто-рейкова передача, 4 – редуктора, 5 – електричний двигун

Виходячи із завдання з заданою вантажопідйомністю, проведемо приблизний розрахунок маси каретки з електричним двигуном та редуктором (еквівалентної маси платформи) за наступною умовою:

$$m_k = (0,25 \dots 0,5) \cdot m \text{ [кг]}, \quad (1.1)$$

де m – маса вантажу, що встановлюється на платформу, $m = 300$ кг. Таким чином,

$$m_k = (0,25 \dots 0,5) \cdot 400 = 100 \dots 200 \text{ (кг)}.$$

Обґрунтуємо вибір еквівалентної маси платформи. На основі вихідних даних в середовищі SolidWorks [1] спроектовану пластину 1100x1100 мм для каретки (рисунок 1.9) та визначимо відповідні масові характеристики – 238 кг, також врахуємо вагу крокового електродвигуна [5] з кронштейном, редуктором та шестірнею до 22 кг.

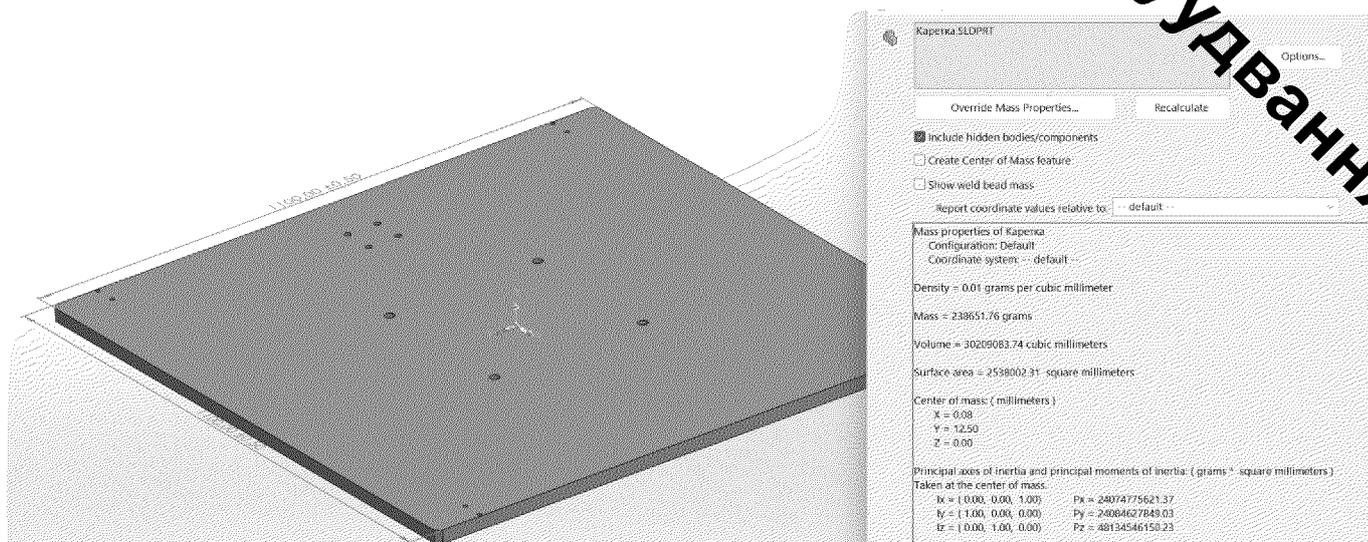


Рисунок 1.9 – Визначення маси каретки модуля лінійних переміщень

Основну частину маси каретки утримує платформа (верхня плита), під якою

розташований кроковий електродвигун. Це відповідає попередньо визначеним розрахункам еквівалентної маси каретки $m_k = 260$ кг. На верхню частину каретки монтуються всі необхідні технологічні елементи та обладнання, які фіксуються у заздалегідь підготовлених отворах діаметром $\varnothing 18$ мм. Каретка має форму прямокутного паралелепіпеда з товщиною 25 мм, виготовлена з високоякісної конструкційної сталі марки 20 (за стандартом ДСТУ 7809:2015), аналог якої у США – AISI 1020.

Навантаження на платформу представляється у вигляді вертикальної статичної сили, яка враховує еквівалентну вагу платформи та вантажопідіймальність. Ця сила діє в центральній частині прольоту платформи. Розрахункове значення навантаження на платформу також враховується:

$$Q = (m_k + m_p) \cdot g \text{ [Н]}, \quad (1.2)$$

$$Q = (400 + 260) \cdot 9,81 = 6475 \text{ (Н)}.$$

Розрахунок розрахункової колової сили для зубчасті-рейкової передачі виконується за наведеною формулою.:

$$F_t = F_{on} + F_i \text{ [Н]}, \quad (1.3)$$

де F_{on} – сила статичного опору зумовлена тертям в лінійних напрямних, Н;

F_i – інерційна сила при розгоні системи, Н.

Силу статичного опору у рейковій напрямній кулькового типу розраховують за формулою [6]:

$$F_{on} = n \cdot F_0 \cdot z + f_k \cdot Q \text{ [Н]}, \quad (1.4)$$

де $F_0 = 6(H)$ – попередня сила тертя в кульковій напрямній внаслідок створення попереднього натягу;

$z = 4$ – число контактних доріжок (в одному опорному елементі);

$f = 0,15$ – коефіцієнт тертя кочення сталь по сталі із мащенням;

$n = 4$ – кількість напрямних кулькового типу.

$$F_{on} = 4 \cdot 6 \cdot 4 + 0,15 \cdot 6475 = 1067(\text{H}).$$

Силу інерції розраховуємо з врахуванням маси платформи з вантажем та швидкості його руху за наступною формулою:

$$F_i = (m_k + m) \cdot \frac{v}{t_p} \quad [\text{H}], \quad (1.5)$$

де t_p – час розгону платформи з вантажем, який орієнтовно приймати рівним:

$$t_p \geq (1,4 \dots 1,7)v. \quad (1.6)$$

Розраховуємо час розгону платформи з вантажем:

$$t_p \geq (1,4 \dots 1,7) \cdot 0,4 = 0,56 \dots 0,68(\text{с}).$$

Приймаємо $t_p = 0,6$ с та розраховуємо інерційну силу за формулою (1.5):

$$F_i = (400 + 260) \cdot \frac{0,4}{0,6} = 440(\text{H}).$$

Розрахункову колову силу можна визначити за допомогою відповідної формули, що враховує характерні параметри задачі. (1.3):

$$F_t = 1067 + 440 = 1507(\text{H}).$$

Потужність приводу розраховується як добуток обчисленої колової сили на максимальну швидкість руху платформи відповідно до формули:

$$P_2 = F_t \cdot v [\text{Вт}], \quad (1.7)$$

$$P_2 = 1507 \cdot 0,4 = 602,8 (\text{Вт})$$

Потужність електричного двигуна приводу з врахуванням коефіцієнту корисної дії зубчасто-рейкової передачі та редуктора розрахуємо за формулою (1.8):

$$P_1 = \frac{P_2}{\eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3} [\text{Вт}], \quad (1.8)$$

де $\eta_1 = 0,94$ – коефіцієнт корисної дії зубчасто-рейкової передачі; $\eta_2 = 0,97$ – коефіцієнт корисної дії редуктора; $\eta_3 = 0,92$ – коефіцієнт корисної дії електричного двигуна приводу, який приводить в рух платформу.

Розрахуємо потужність електродвигуна приводу за формулою (1.8):

$$P_1 = \frac{602,8}{0,94 \cdot 0,97 \cdot 0,92} = 718,6 (\text{Вт}).$$

Попередньо визначимо розрахункову потужність електричного двигуна приводу 750 Вт.

Відповідно до кінематичної схеми, переміщення платформи здійснюється за допомогою зубчасто-рейкової передачі через редуктор, причому найбільш оптимальним рішенням є застосування серводвигуна. Цей тип електричного двигуна забезпечує високу швидкість обертання, що важливо для досягнення потрібної швидкості руху платформи у системах лінійних переміщень. Крім того, перевагами такого електричного двигуна є висока точність позиціонування та зручність

програмування, особливо у порівнянні з іншими системами, які потребують значної кількості додаткового обладнання для контролю положення.

Попередньо приймаємо параметри зубчасто-рейкова передачі:

– к-сть зубців шестірні $z=25$.

– модуль передачі $m=3$ мм.

А також параметри передавальне відношення редуктора $i=10$.

Наступним кроком розраховуємо дільний діаметр шестірні розраховуємо за формулою (1.9):

$$d_r = mz[\text{мм}], \quad (1.9)$$

$$d_r = 3 \cdot 25 = 75(\text{мм}).$$

Для визначеного розрахункового дільного діаметра шестірні обчислимо її кутову швидкість:

$$\omega_r = \frac{2v}{d} [\text{рад/с}], \quad (1.10)$$

$$\omega_r = \frac{2 \cdot 0,4}{0,075} = 10,7(\text{рад/с}).$$

Проводимо перетворення значення розрахункової кутової швидкості шестірні у розрахункову частоту її обертання відповідно до заданої формули (1.11):

$$n_r = \frac{\omega \cdot 30}{\pi} [\text{об / хв}], \quad (1.11)$$

$$n_r = \frac{10,7 \cdot 30}{3,14} = 102,2(\text{об/хв}).$$

Японська компанія FANUC [7] пропонує досить широкий асортимент серводвигунів. Для підбору відповідного крокового двигуна використовується їхній каталог. Основними параметрами, що враховуються при виборі, є:

- приведена потужність, $P_{pr} \geq P_1 = 0,75$ кВт;
- приведена частота обертання, $n_{pr} \geq n_r = 102,2$ об/хв ;
- приведений крутний момент:

$$T_1 = \frac{P_1}{i \cdot \omega_r} [H \cdot m], \quad (1.12)$$

де ω_r – розрахункова кутова швидкість на валу крокового двигуна.

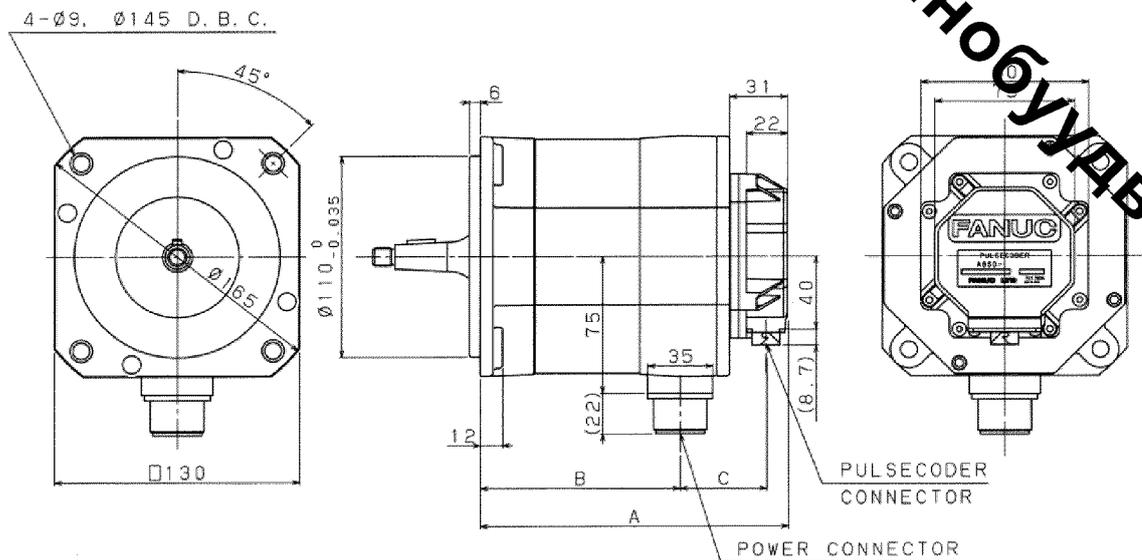
$$T_{pr} \geq T_1 \frac{750}{10 \cdot 10,7} = 7 (H \cdot m).$$

Відповідно до окреслених параметрів у каталозі сайту [7], для використання був обраний серводвигун моделі Fanuc $\beta i S$ Y23000 (рисунок 1.10) разом із гібридним серводрайвером Servo Amplifier. На підставі обраного типу крокового двигуна було отримано більш детальну інформацію з каталогу, включно з його технічними характеристиками, які зазначені нижче.:

- максимальний крутний момент – 11 Н·м;
- потужність – 1,8 кВт;
- максимальна швидкість – 3000 об/хв;
- номінальна швидкість – 2000 об/хв;
- максимальний струм – 20 А;
- максимальна температура – 80 °С;
- робочий діапазон температур від -20°С до +50°С;
- діаметр валу – 16/19/24 мм;
- габаритні розміри – 130x130x222 мм;
- маса – 13 кг.

Рисунок 1.10 – Фото вибраного серводвигуна Fanuc βiS 12/3000

Основні розміри для відтворення тривимірної моделі серводвигуна Fanuc βiS 12/3000 взято із рис. 1.11.



MODEL	A	B	C
βiS 8, βiS 8HV	166	108	47
βiS 12, βiS 12HV	222	164	

Рисунок 1.11 – Конструктивні розміри серводвигуна Fanuc βiS 12/3000

Знайшли характеристику відповідності для крутного моменту відносно частоти обертання валу серводвигуна (рисунок 1.12).

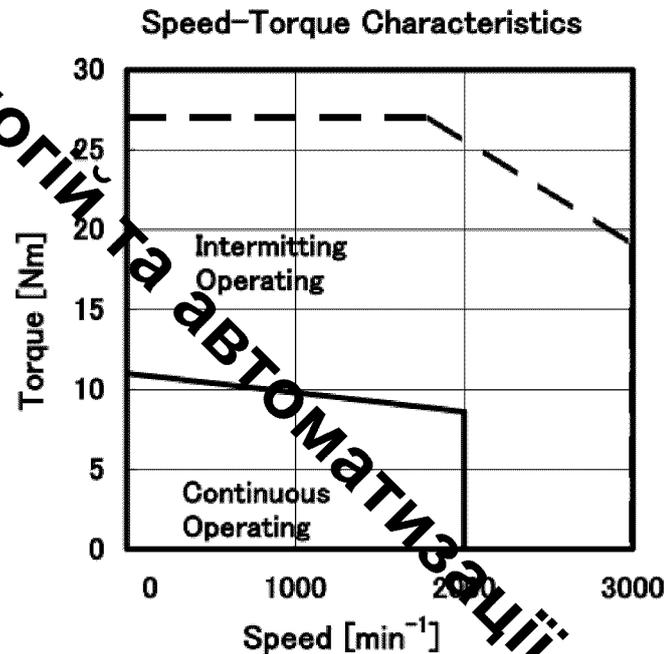


Рисунок 1.12 – Паспортні дані відповідності крутного моменту до частоти обертання валу серводвигуна

Згідно знайденої паспортної характеристики кроковий двигун при розрахунковій частоті валу серводвигуна в при максимальній швидкості переміщення 1022 об/хв, відповідає крутний момент 9 Нм, і це значення вище потрібного 7 Нм. А також знайдемо робочий режим роботи, при цьому досягається частота обертання валу серводвигуна при робочій 51 об/хв, а крутний момент відповідає 11 Нм, при необхідному значенні 6,8 Нм. Тобто при всіх режимах буде забезпечена необхідний крутний момент та швидкість руху.

Так як підбрано серводвигун Fanuc βiS 12/3000, то для нього підбираємо редуктор з передавальним відношенням $i=10$. Найкраще для нашого варіанту підходить редуктор фірми APEX DYNAMICS [8], а марка редуктора становить AF100 (рисунок 1.13).

Отже, для передачі крутного моменту від серводвигуна до ведучої шестерні обрано прецизійний планетарний редуктор серії AF100 (виробник Apex Dynamics або аналог Wittenstein SP+).

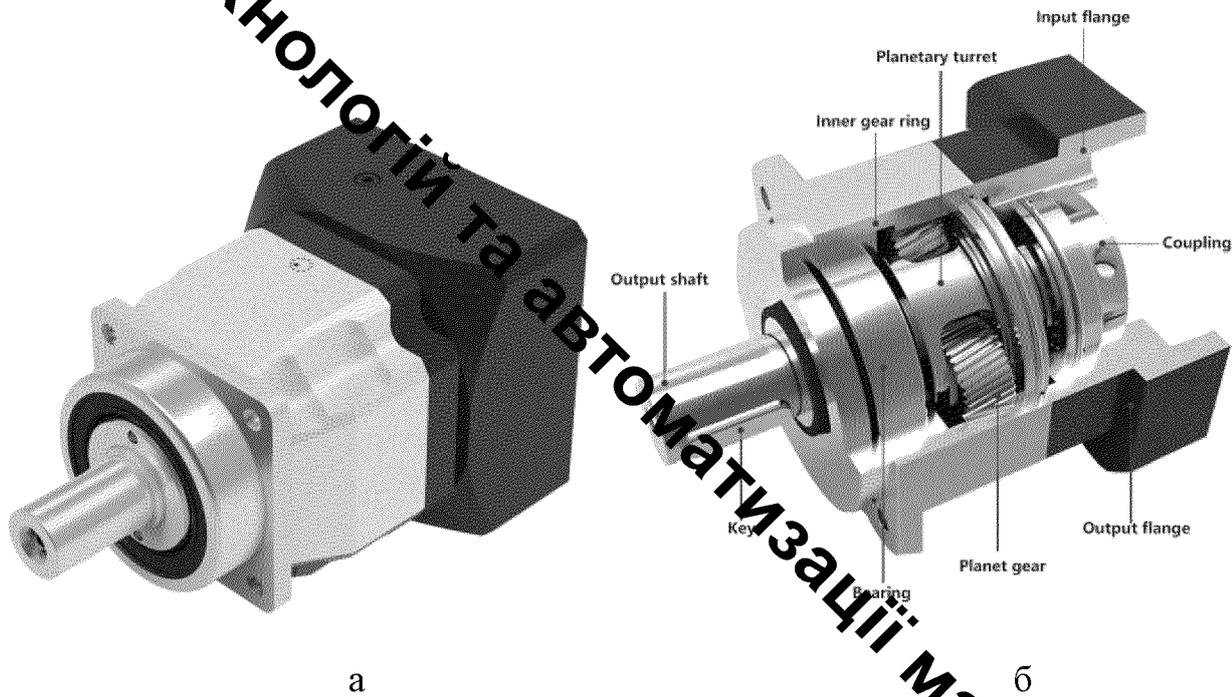


Рисунок 1.13 – Редуктор AF100: а – зовнішній вигляд; б – силові елементи і розріз редуктора

Основні характеристики:

- тип передачі – планетарна, одноступінчаста.
- передавальне відношення i – 10.
- вихідний діаметр – до 32 мм.
- номінальний вихідний момент T_N – 230 Н·м (забезпечує запас динаміки при розгоні маси 660 кг).
- люфт – < 3 кутових хвилин (стандарт P1). Низький люфт мінімізує похибку при зміні напрямку руху (реверсі).
- робочий діапазон температур від -10°C до +90°C.
- коефіцієнт корисної дії планетарного редуктора – > 0.97.
- ступінь захисту – IP67.
- маса – 6,9 кг.

Із паспортних даних вибрано основні геометричні параметри (див. таблиця 1.2) для створення тривимірної моделі та складальних операцій (рисунок 1.14).

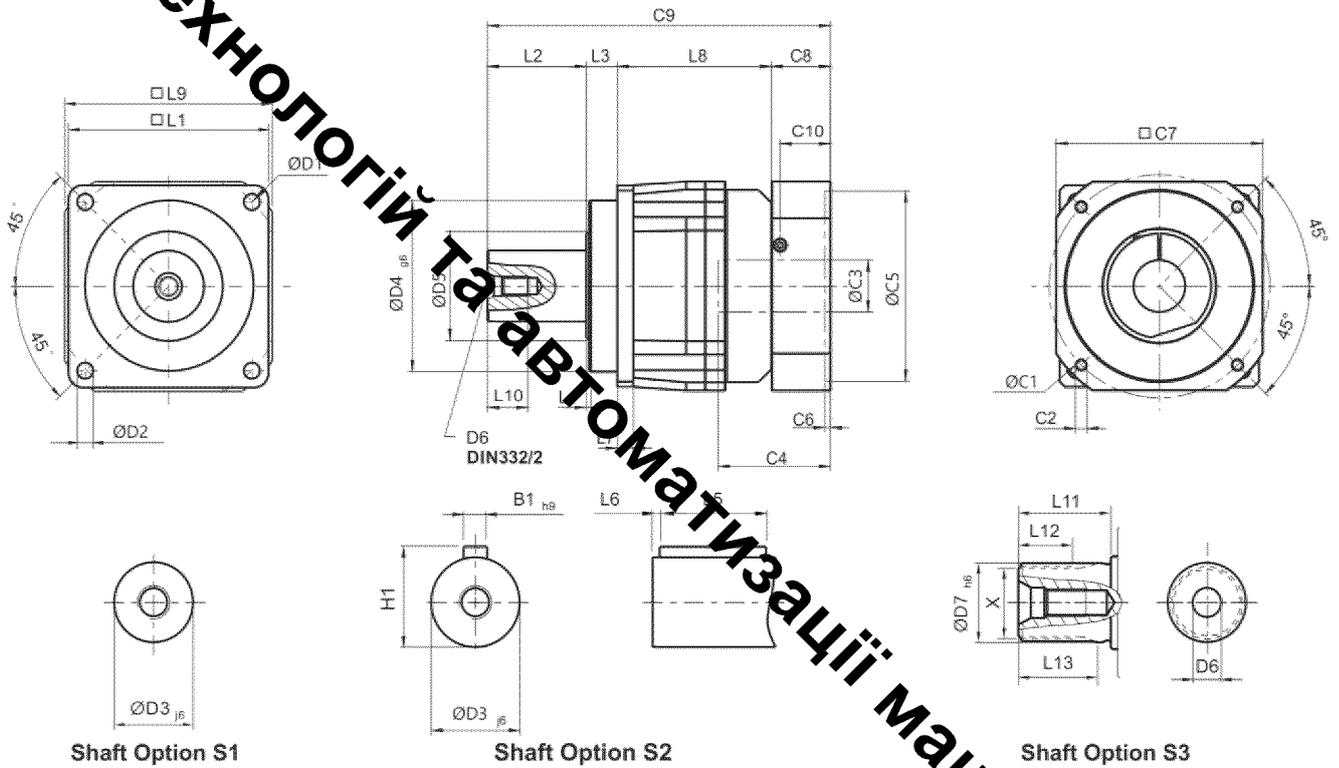


Рисунок 1.14 – Кресленик редуктора AF100

Таблиця 1.2 – Основні геометричні параметри для моделювання пластмасового редуктора

Model	D1	D2	D3 j6	D4 g6	D5	D6	D7 h6	L1
AF100	120	9	32	90	80	M12 x 1.75P	32	105
L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10
58	30	2	40	5	10	89.5	115	28
L11	L12	L13	C1	C2	C3	C4	C5	C6
26	15	23	130	M8 x 1.25P	≤32	50	110	5
C7	C8	C9	C10	B1 h9	H1	X (DIN5480)		
115	19,5	197	13	10	35	W32 x 1.25 x 30 x 24 x 6m		

Усі складові тягового механізму збирається гвинтовими з'єднаннями та забезпечують надійний механізм.

1.4 Алгоритм керування рухом зварювального робота

Оскільки ми обрали робота Fanuc і оригінальні серводвигуни Fanuc β iS, керування буде централізованим. Це значно спрощує життя: нам не потрібно писати окремий код для двигуна (на C++ чи PLC) і окремий для робота. Все робиться в одному контролері.

Для керування всім комплексом (6 осей робота + 1 вісь платформи + зварювальне джерело) використовується контролер Fanuc R-30iB Plus (рисунок 1.15).



Рисунок 1.15 – Зовнішній вигляд контролера Fanuc R-30iB Plus

Контролер R-30iB Plus – це високопродуктивне рішення, створене для підвищення інтелектуальної продуктивності. Його розроблено з метою спростити використання роботів і автоматизації у виробничих процесах. Маючи вбудовані апаратні засоби та понад 250 програмних функцій, він забезпечує максимальну ефективність роботи за параметрами часу циклу, швидкості, точності та рівня безпеки. Контролер також орієнтований на простоту у використанні та низький

рівень енергоспоживання. R-30iB Plus пропонується в різних корпусах, які відповідають моделі вашого робота. Інтерфейс користувача /HMI вирізняється гнучким дизайном, високою роздільною здатністю дисплея й потужними можливостями обробки даних.

Архітектура контролера підтримує керування до 40 осей одночасно. А інтеграція платформи відбувається дуже просто. Серводвигун лінійної осі підключається як 7-ма вісь (Extended Axis / Group 2). Для системи керування він стає просто ще одним "суглобом" робота, який позначається як вісь E1 (External 1) або J7.

Основною мовою програмування є Fanuc TP (Teach Pendant). Це мова високого рівня, спеціалізована для руху. Файли програм мають розширення .TP або .LS. Логіка зварювання реалізується через введени макроманди (Arc Start, Arc End).

Перед написанням програми контролер має "знати", скільки імпульсів енкодера відповідає 1 міліметру руху. Це називається Scale Ratio або Scale Factor. Розрахунок коефіцієнта на основі даних:

Серводвигун Fanuc β iS 12/3000 (Енкодер має роздільну здатність 1 000 000 імпульсів/оберт).

Редуктор AF100 (прийmemo $i=10$, оскільки це стандарт для таких серій).

Зубчасто-рейкова передача включає шестірню $z=25$, $m=3$. Довжина кола ділильного діаметра при цьому розраховується за формулою (1.13):

$$L_{rev} = \pi \cdot m \cdot z \text{ [мм]}, \quad (1.13)$$

$$L_{rev} = \pi \cdot 3 \cdot 25 = 235,5 \text{ (мм)}.$$

Розрахуємо кількість імпульсів на 1 мм ходу каретки за формулою (1.14):

$$CMR = 1000000 \cdot i / L_{rev} \text{ [імп/мм]}, \quad (1.14)$$

$$CMR = 1000000 \cdot 10 / 235,5 = 42462,85 \text{ (імп/мм)}.$$

При цьому буде пропрацьовано алгоритм роботи обладнання (рисунок 1.16):

Старт системи (Ініціалізація контролера, перевірка готовності приводу платформи та зварювального модуля).

2. Початкове положення: «Дім» (Вивід обладнання в нульову верстату).

3. Переїзд у точку 1 (0 м → позиція початку, де відбувається позиціонування платформи та контроль досягнення координати).

4. Зварювання шва №1 (Увімкнення зварювального режиму, виконання шва №1 та вимкнення зварювання).

5. Переїзд у точку 2 (Відбувається рух платформи до середньої позиції ~ 1,5 м та контроль досягнення координати).

6. Зварювання шва №2 (Увімкнення зварювання, виконання шва №2 та вимкнення зварювання).

7. Переїзд у точку 3 (Рух платформи до кінцевої позиції ~3,0 м та контроль досягнення координати).

8. Зварювання шва №3 (Увімкнення зварювання, виконання шва №3 та вимкнення зварювання).

9. Повернення в «Дім» (Зворотний рух платформи до початку 0 м. Фіксація початкового положення та завершення циклу).

Наведено приклад реальної програми мовою Fanuc TP в Додатку В – Лістинг 1. «Приклад керуючої програми зварювального циклу».

При цьому використано символи які характерні для мови програмування Fanuc TP:

- J (Joint) – Швидкий рух "через повітря" (нелінійний).
- L (Linear) – Робочий рух по прямій лінії (зварювання).
- E1 – Координата лінійної платформи (в мм).
- Arc Start/End – Команди керування зварювальним апаратом.
- Fine / CNT100 – Точність зупинки (Fine = повна зупинка, CNT = згладжування кутів).

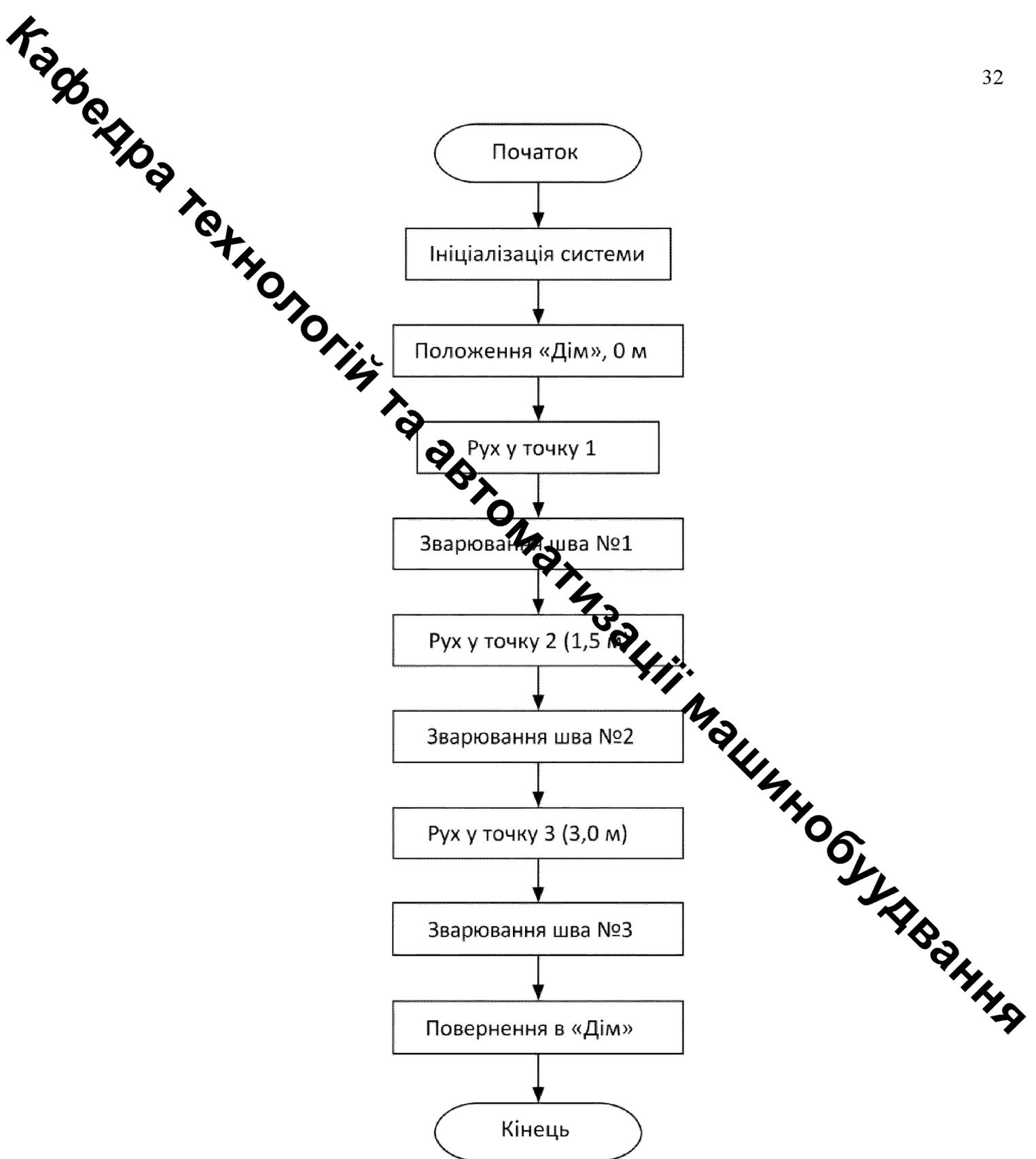


Рисунок 1.16 – Алгоритм роботи автоматизованого приводу

У наведеному коді Додатку В використано простий (асинхронний) метод, де робот приїжджає на позицію, зупиняється і варить. Якщо ж потрібно варити під час

руху платформи (наприклад, варити довгий шов 3 метри без зупинки), це також можна здійснити.

Для забезпечення безперервного зварювання довгих швів використовується опція Coordinated Motion (J518). У цьому режимі контролер динамічно пов'язує систему координат робота з рухомою кареткою. Програмно це виглядає як додавання інструкції COORD у рядок руху: L P[2] 10mm/sec FINE COORD. У цьому випадку швидкість зварювання (мінімальна швидкість руху платформи 0,02 м/с) підтримується сумарним вектором швидкостей робота та платформи, забезпечуючи рівномірне проплавлення.

РОЗДІЛ 2 УДОСКОНАЛЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРИВОДУ МОДУЛЯ ЛІНІЙНИХ ПЕРЕМІЩЕНЬ

2.1 Удосконалення рами модуля лінійних переміщень

Під час проектування та виготовлення рами приводу слід забезпечити її міцнісні характеристики. Відповідно до поставленого завдання, конструкція рами приводу реалізована у вигляді конструктивного рішення, представленого на рисунку 2.1.

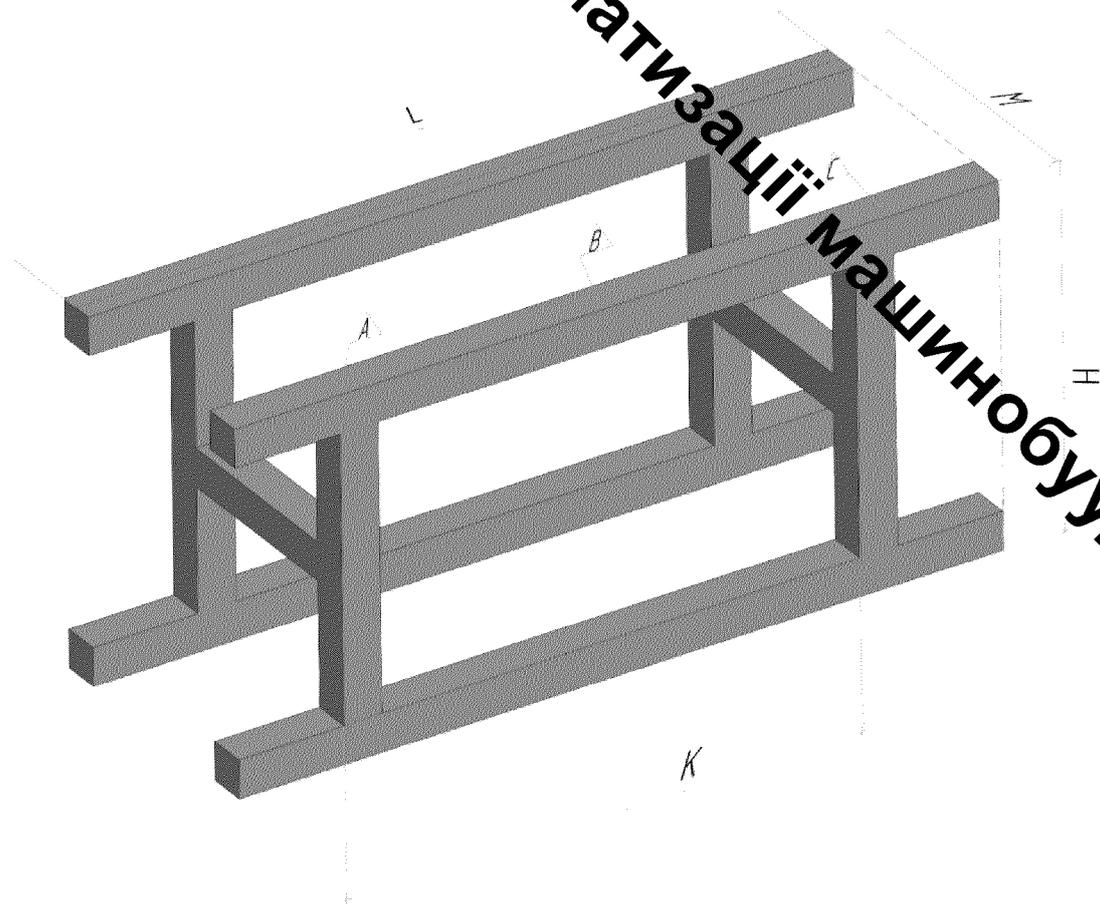


Рисунок 2.1 – Конструктивне рішення рами приводу

Вихідними даними для розробки несучої конструкції виробу є наступні параметри згідно рисунку 2.1: $K = 1025$ мм, $M = 900$ мм, $H = 250$ мм, $L = 4500$ мм.

У представленій роботі описується конструктивне рішення привідної рами,

яка є зварною конструкцією та складається з труб прямокутного профілю. У конструкції також передбачені пластини для підсилення жорсткості рами. Платформа розташована у верхній частині рами і здійснює рух відповідно до керувальної програми: від крайнього лівого до центра та до крайнього правого положення і назад на початок, із затримками у крайніх точках. Верхні та нижні частини рами з'єднуються опорами, виготовленими з труб прямокутного профілю, між якими відстань становить 1025 мм. Опори додатково підсилені перемичками, розміщеними по центру для забезпечення жорсткості.

Під час експлуатації конструкції можуть виникати такі проблеми, пов'язані зі зниженням жорсткості або міцності: прогинання рами в центральній частині під дією зовнішнього навантаження, втрата стійкості опор при високих навантаженнях, розрив зварних швів та інші пошкодження.

Для оцінки міцності конструкції рами запропоновано використати метод скінченних елементів (МСЕ). Основна суть методу полягає у розподілі досліджуваної конструкції на певну кількість простих компонентів (скінченних елементів). На основі рівнянь, що описують напружено-деформований стан кожного окремого елемента, формується система рівнянь, яка відображає поведінку всієї конструкції. При цьому умови сумісності виконуються лише в дискретних точках (вузлах) моделі. Метод дозволяє замінити безперервну область із нескінченним числом ступенів свободи на кінцеву кількість дискретних областей зі скінченною свободою в межах кожної з них.

Для проведення досліджень створено тривимірну модель прототипу рами, яка включає необхідні вихідні дані. В основі конструкції використано трубу прямокутного перерізу 70x40 мм із товщиною стінки 5,0 мм, виготовлену з матеріалу Сталь 20 (згідно ДСТУ 7809:2015) або її аналога — AISI 1020.

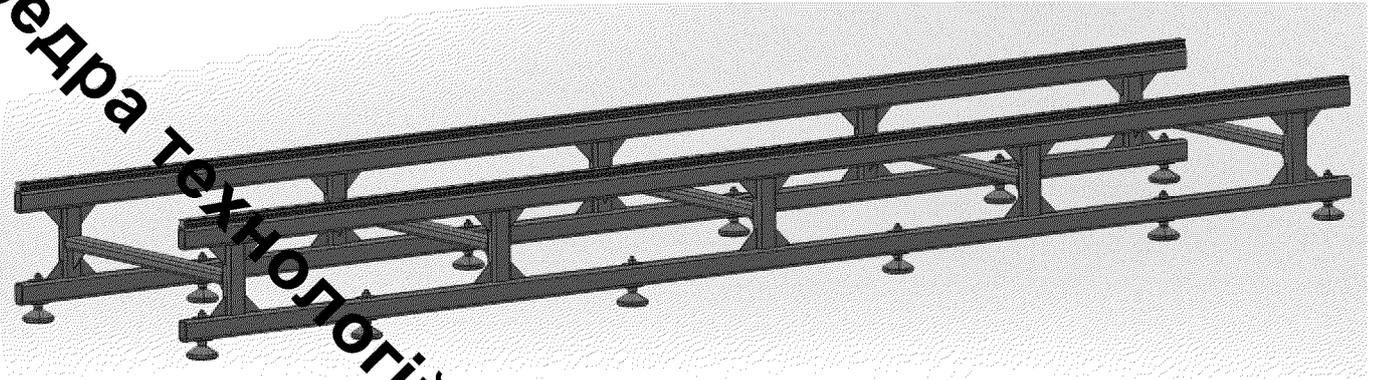


Рисунок 2.2 – Прототип конструкції рами приводу

Для створення прототипу рами приводу були використані пластини для підсилення жорсткості стиків труб, виготовлені з матеріалу тієї ж марки, що й основна конструкція, з товщиною 5,0 мм. З'єднання усіх компонентів здійснювалося за допомогою зварних швів відповідно до стандарту ДСТУ EN ISO 5817:2022.

На рамі передбачено встановлення попередньо обраних напрямних KUVE35-B, які підходять для використання в модулях лінійного переміщення. Також на рамі закріплено регульовані опори, що дозволяють встановлювати її на нерівних поверхнях.

Подальший етап передбачав проведення статичних розрахунків на міцність у програмному забезпеченні SOLIDWORKS Simulation, яке базується на методі скінченних елементів із створенням високоточних тетрадральних сіток. Розмір елементів сітки становив 55 мм (рисунок 2.3). Основні початкові умови для моделювання представлені на рис. 2.4.

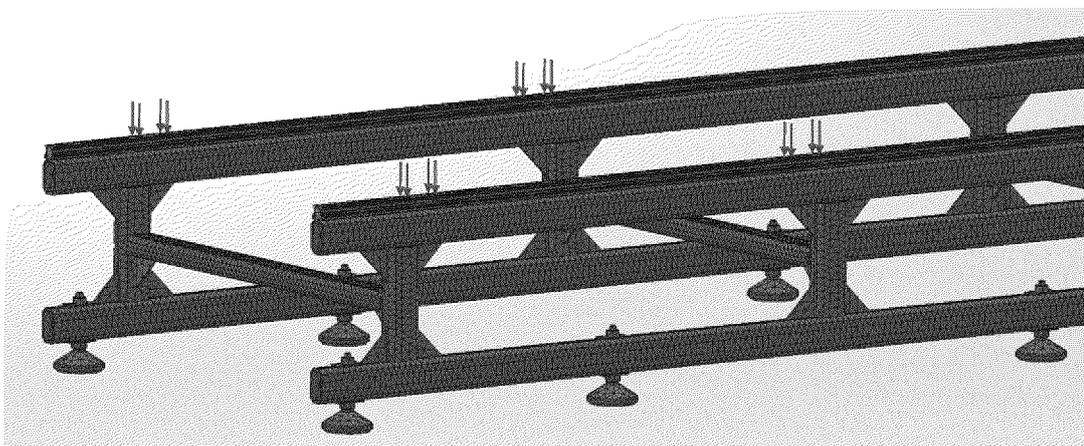


Рисунок 2.3 – Частина рами з схемою накладання скінчено-елементної сітки

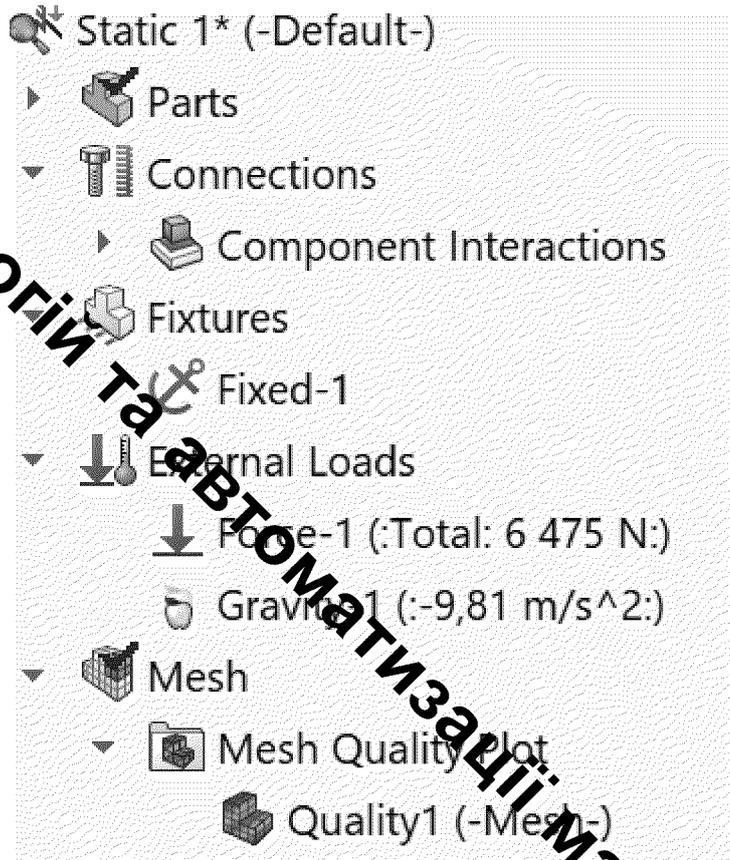


Рисунок 2.4 – Налаштування навантаження рами

Згідно з рис. 2.5, прототип рами піддається навантаженню, яке складає 6475 Н. Це навантаження обумовлене вагою платформи разом із прикладеним навантаженням. Фіолетові стрілки на схемі вказують точки прикладання сил, тоді як зелені позначають місця фіксації рами.

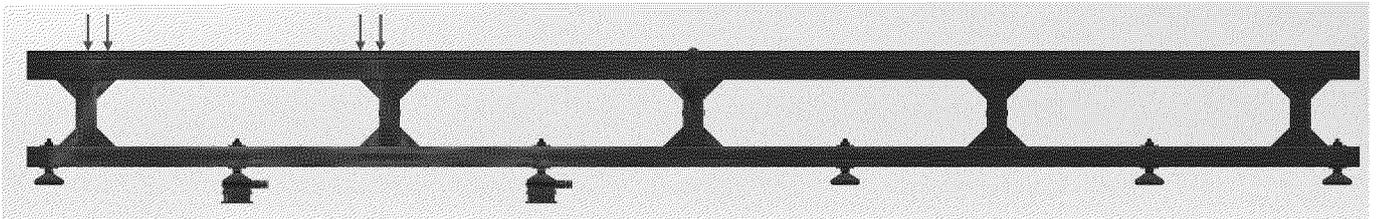


Рисунок 2.5 – Схема навантаження в лівій позиції рами

Складемо схему навантажень і деформацій, представлену на рисунках 2.6 та 2.7. Ці схеми відображають напруження і деформацію, які виникають у конструкції, коли каретка знаходиться на краю рами.

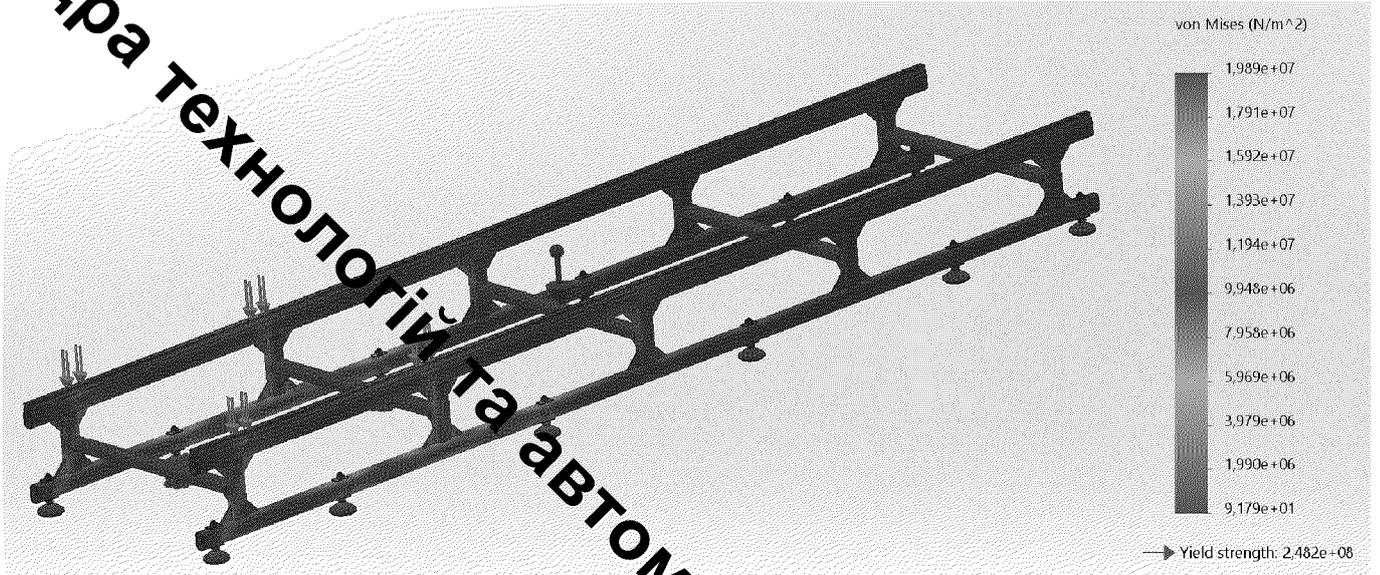


Рисунок 2.6 – Напруження, що виникають в конструкції рами

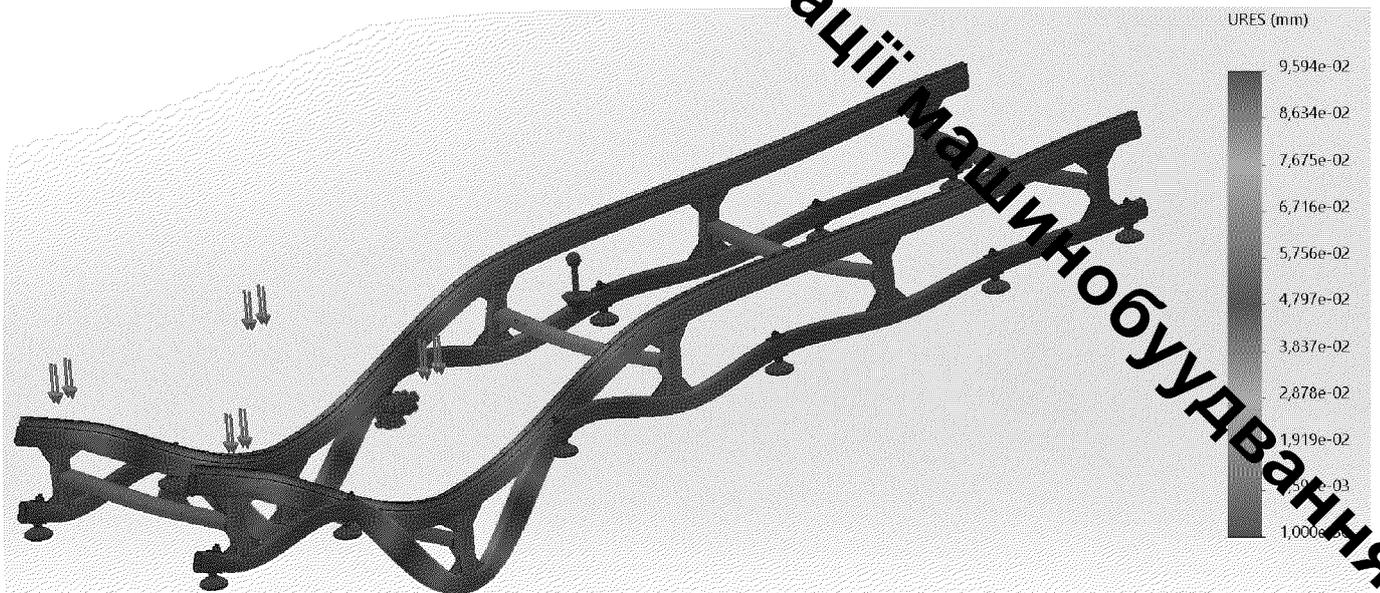


Рисунок 2.7 – Максимальна деформація, що виникає в конструкції рами

Це свідчить про коректність вибору профілю для проектування рами за умови, що межа плинності матеріалу становить 351 МПа. На представленій схемі (рисунок 2.8) зображено розрахований коефіцієнт запасу міцності, який для найнавантаженого сегмента конструкції прототипу рами дорівнює 12,5. Такий показник є цілком прийнятним і відповідає встановленим вимогам.

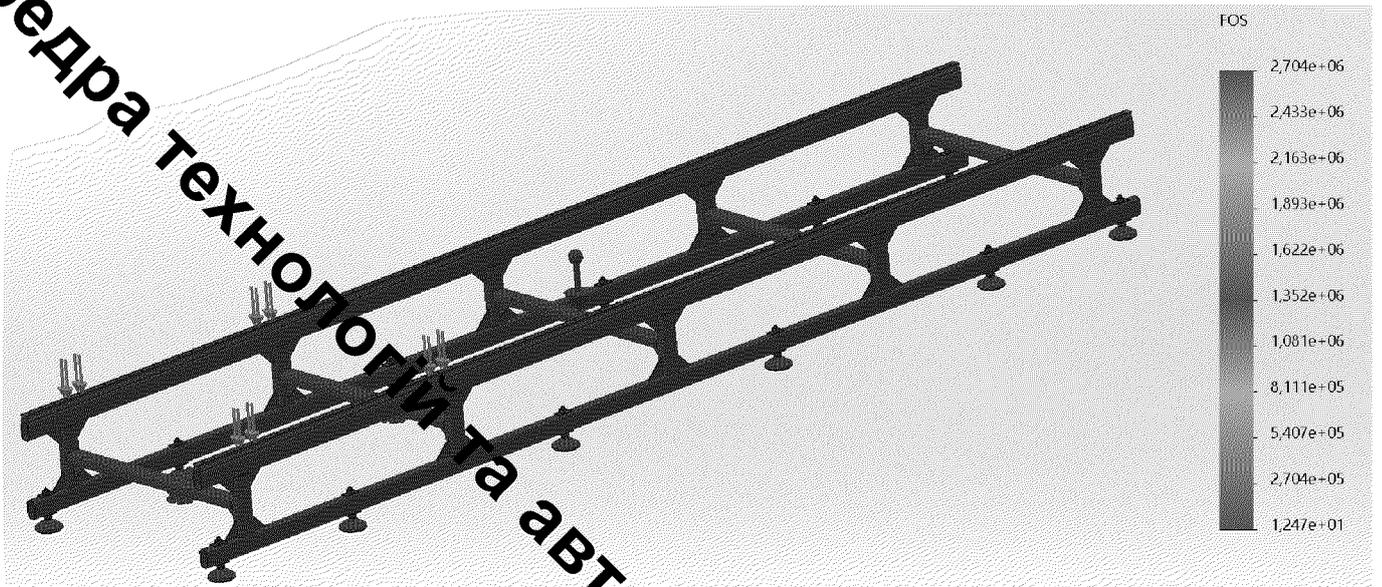


Рисунок 2.8 – Розрахований коефіцієнт запасу міцності для найнавантаженої ділянки прототипу конструкції рами

Один із потенційно небезпечних варіантів навантаження конструкції виникає, коли каретка перебуває у центральному положенні. Особливості розподілу навантаження в цьому випадку відображено на схемах прототипу рами, представлених на рисунках 2.9–2.12.

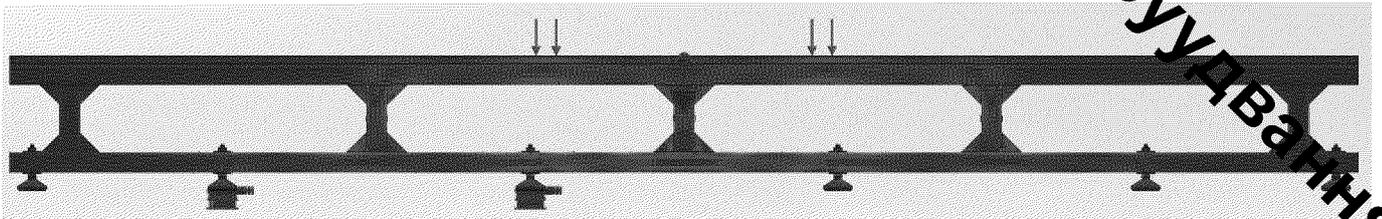


Рисунок 2.9 – Схема навантаження в центральній позиції рами

При цьому опори платформи знаходяться на рамі де немає стійок, судячи з розподілу сил матимемо більше плече під час дії навантаження та більші напруження і менший коефіцієнт запасу.

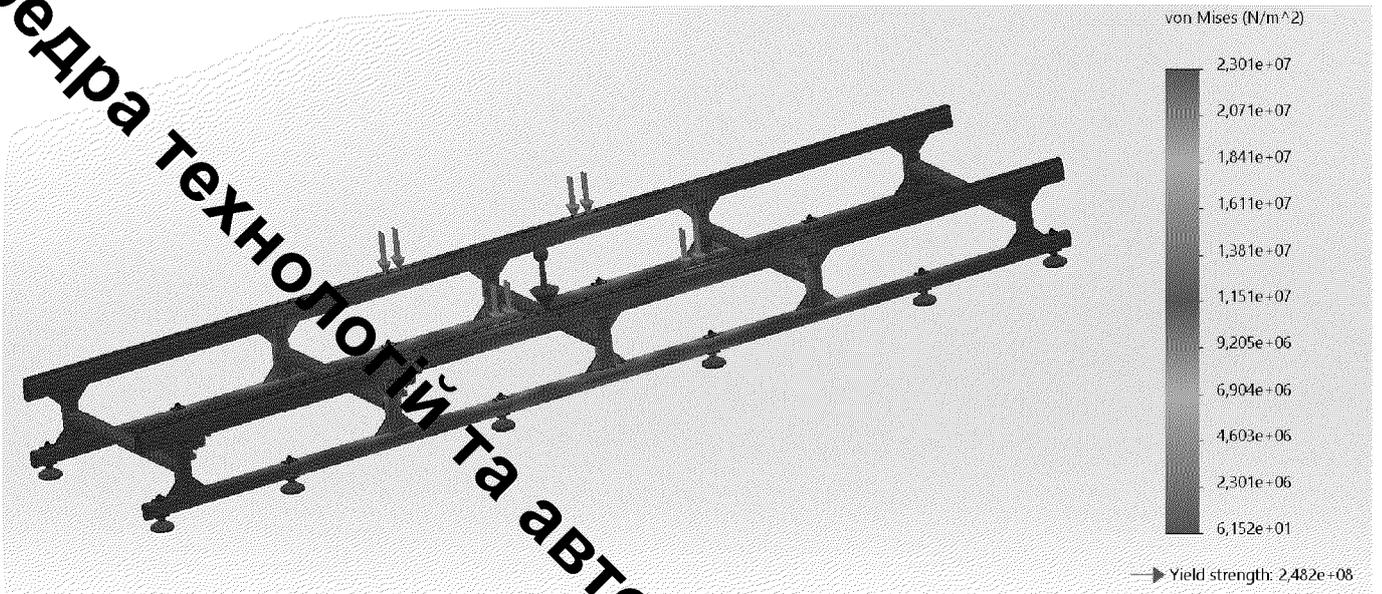


Рисунок 2.10 – Найбільші напруження по Мізесу для схеми навантаження в центральній позиції рами

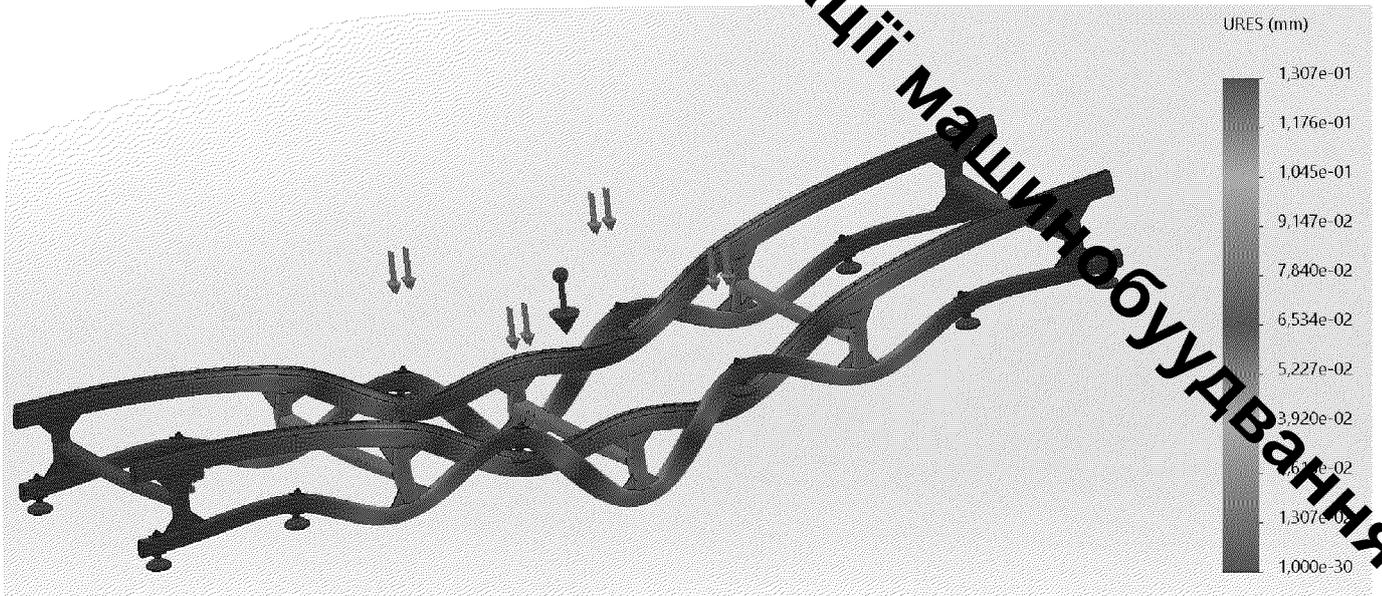


Рисунок 2.11 – Найбільші деформації для схеми навантаження в центральній позиції рами

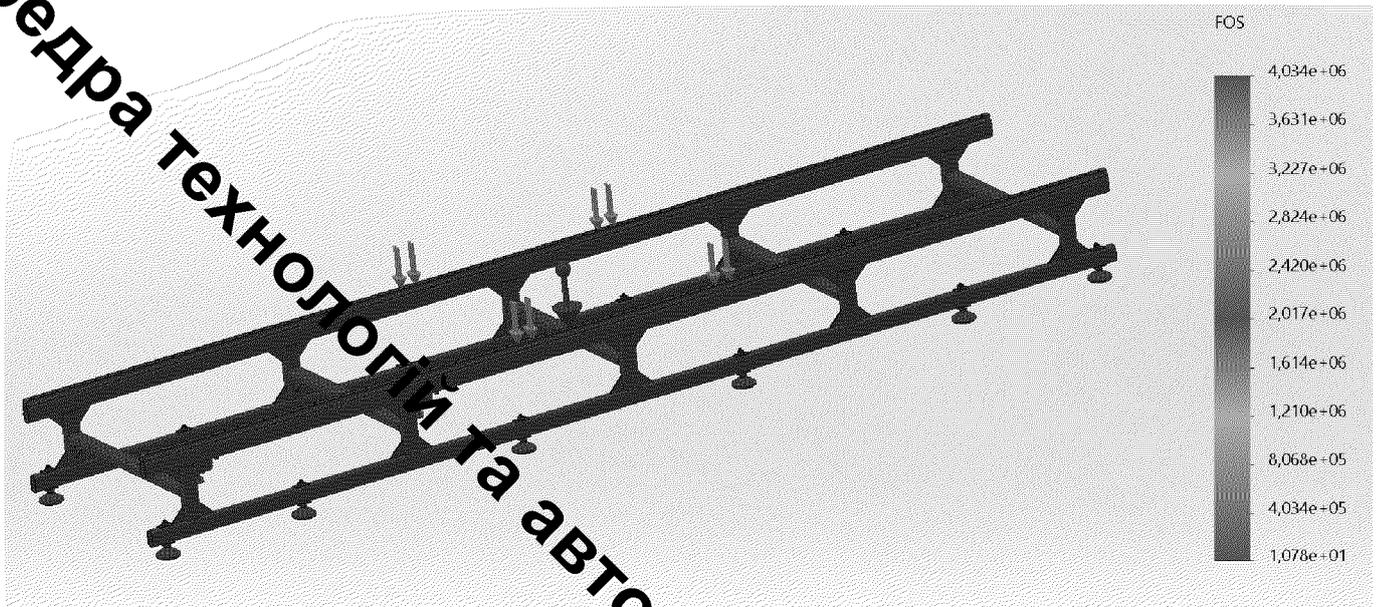


Рисунок 2.12 – Коефіцієнт запасу міцності для схеми навантаження в центральній позиції рами

На основі отриманих результатів можна зробити висновок, що використання труб прямокутного перерізу розміром 70x40 мм з товщиною стінки 5,0 мм, а також пластин завтовшки 5,0 мм для зміцнення місць їх з'єднання забезпечує мінімальний запас міцності, який перевищує показник 10,78. Це дозволяє стверджувати, що застосування даної конструкції рами є доцільним і задовольняє необхідні вимоги до міцності, демонструючи високу надійність і можливість протидіяти впливу навіть динамічних навантажень.

2.2 Розрахунок точності переміщення

Загальна похибка позиціонування інструменту у просторі складається з похибки самого маніпулятора та похибки лінійної осі. Розрахунок виконується за методом середньоквадратичного підсумовування (RSS — Root Sum Squared), оскільки похибки є випадковими величинами.

Вихідними даними для розрахунку є:

- паспортна повторюваність для зварювального робота Fanuc Arc Mate 120iD – ± 0.03 мм;

- рейкова передача має модуль зуба 3 мм, кількість зубів 25 та дільний діаметр 75 мм;

- кутовий люфт редуктора 3 кутові хвилини;

- клас точності рейки приймаємо Q6 за ISO 1328 при якому накопичена похибка кроку $\Delta_{track} = 0.03$ мм на 1000 мм довжини.

Похибка від люфту в редукторі Δ_{trans} призводить до лінійного зміщення каретки при реверсі руху. Формула перерахунку кутового люфту (де α у хвилинах) у лінійний:

$$\Delta_{trans} = \pi \cdot D \cdot \alpha / (360 \cdot 60) \text{ [мм]}, \quad (2.1)$$

$$\Delta_{trans} = \pi \cdot 75 \cdot 3 / (360 \cdot 60) = 0,033 \text{ (мм)}.$$

При чому похибка виготовлення рейки Δ_{geom} розраховується для рейки класу Q6 на довжині робочого ходу (необхідно приймати зону зварювання 3 метри, оскільки робот може варить 3 метри одночасно без зупинки, переміщуючись по платформі):

$$\Delta_{geom} = \Delta_{track} \cdot 3 \text{ [мм]}, \quad (2.2)$$

$$\Delta_{geom} = 0,03 \cdot 3 = 0,09 \text{ (мм)}.$$

В результаті сумарна похибка лінійного модуля буде враховувати середнє геометричне цих похибок:

$$\Delta_{axis} = \sqrt{\Delta_{trans}^2 + \Delta_{geom}^2} \text{ [мм]}, \quad (2.3)$$

$$\Delta_{axis} = \sqrt{0,033^2 + 0,09^2} = 0,096 \text{ (мм)}.$$

Визначення загальної точності комплексу за рахунок врахування точності робота. Повна точність позиціонування зварювального пальника Δ_{Σ} визначається як

середня квадратична сума похибки лінійної осі та власної похибки робота Fanuc Arc Mate 120iD:

$$\Delta_{\Sigma} = \sqrt{\Delta_{axis}^2 + \Delta_{robot}^2} [мм], \quad (2.3)$$

$$\Delta_{\Sigma} = \sqrt{0,096^2 + 0,06^2} = 0,113(мм).$$

Отримане значення похибки має дуже гарні показники по точності. Маючи допуск на дугового зварювання (MIG/MAG) допустимим відхиленням пальника вважається ± 0.5 мм (половина діаметра зварювального дроту 1.0 мм) встановлюємо що отримана похибка дозволяє в 9 разів краще забезпечити необхідний параметр позиціонування. У випадку значного збів в програмі робота передбачені спеціальні методи, якими він може підлаштовуватися та знаходити відповідну зону зварювання.

2.3 Дослідження кронштейну сервомотора на втому матеріалу

Деталь «Кронштейн» для закріплення автоматизованого привода головного руху платформи працює не тільки при статичному навантаженні, але й при циклічному, адже змінюється напрямок руху платформи і в свою чергу прикладання тягової сили. Сприйняте навантаження від дії сили ваги яка складає 300 Н та тягової сили в 1507 Н із циклічною дією може суттєво впливати на довговічність роботи такої деталі.

Для початку проведено статичні дослідження деталі «Кронштейн». На рисунку 2.13 показано основні параметри моделювання. Встановлено, що при товщині деталі «Кронштейн» 4 мм вона має максимальні напруження по Мізесу 130МПа (рисунок 2.14), а коефіцієнт запасу міцності становить 1,835 (рисунок 2.15). Для такої деталі це гарний показник. Однак подальші дослідження втому матеріалу показали погіршення ситуації.

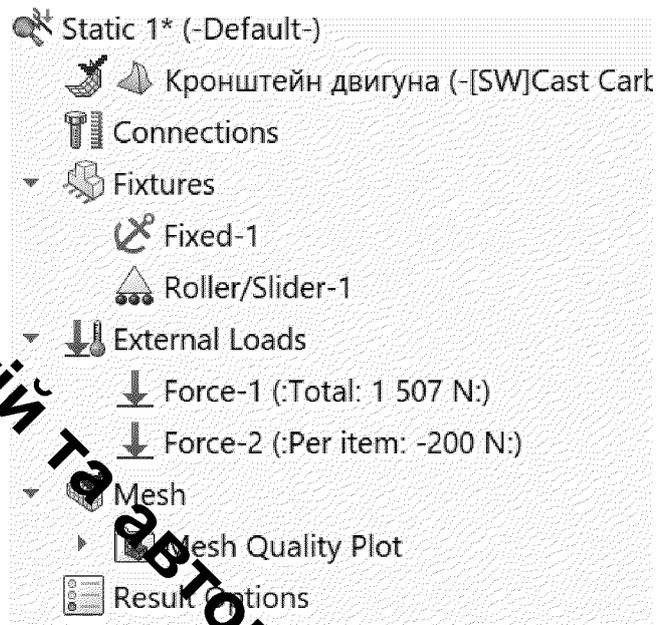


Рисунок 2.13 – Параметри для статичного аналізу деталі на міцність

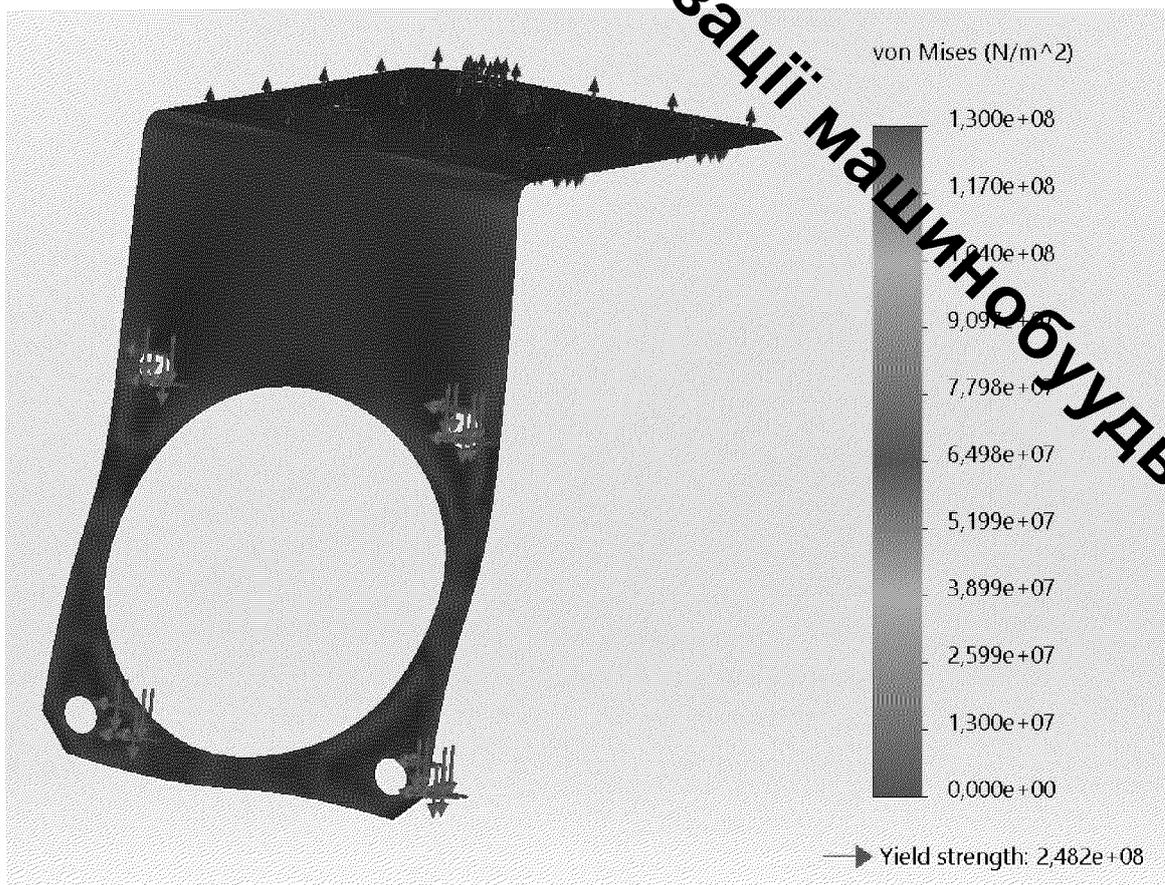


Рисунок 2.14 – Міцність деталі «Кронштейн» по Мізесу

Для врахування наявних циклічних навантажень запропоновано використовувати імітаційний модуль SOLIDWORKS Simulation, а саме можливість

імпувати циклічні навантаження за допомогою функції «Fatigue». Налаштований інтерфейс програми показано на рисунку 2.6.

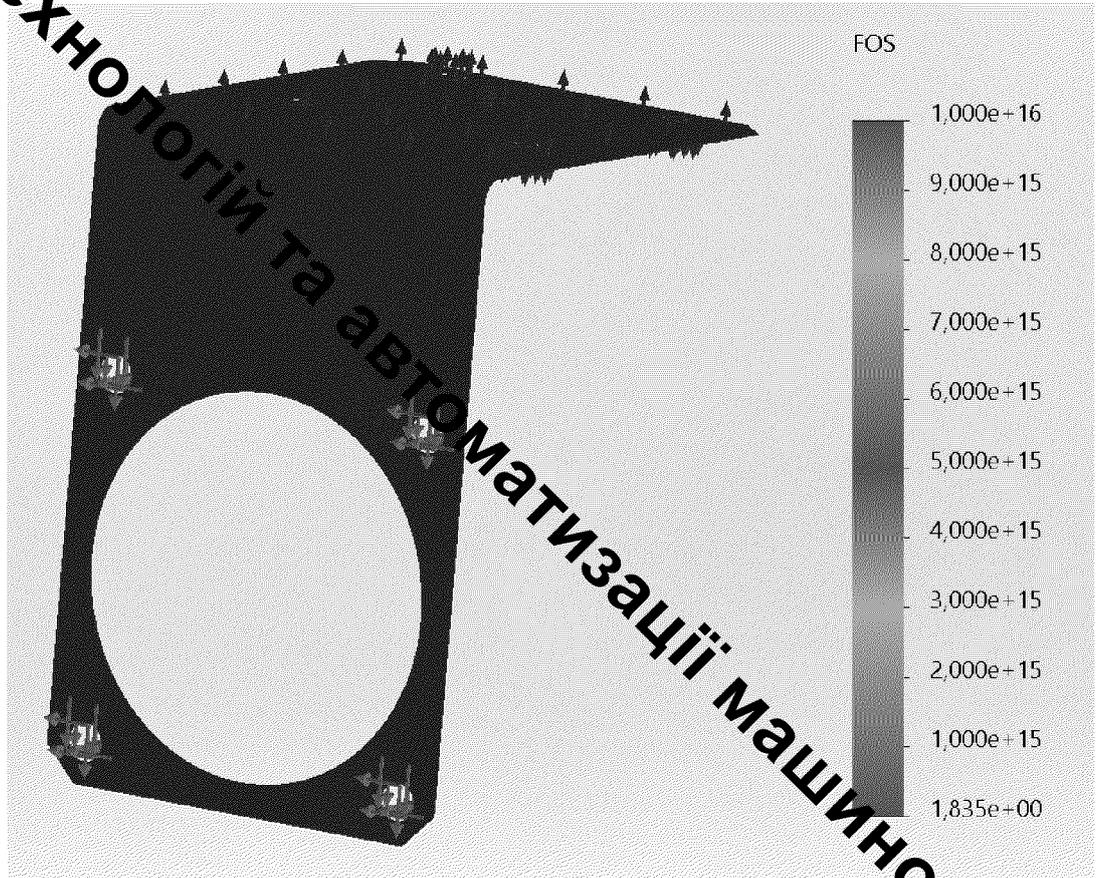


Рисунок 2.15 – Коефіцієнт запасу міцності деталі «Кронштейн» під статичним навантаженням

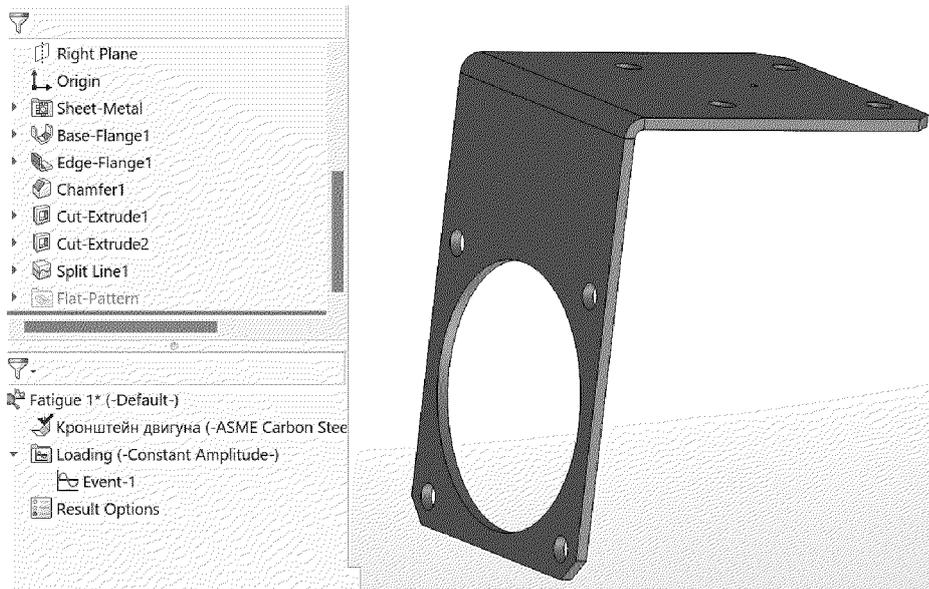


Рисунок 2.16 – Інтерфейс функції «Fatigue» модуль SOLIDWORKS Simulation

Перед налаштуванням функції Fatigue важливо виконати попередній аналіз статичних напружень, для яких потрібно враховувати циклічний характер роботи. Однією з особливостей функції Fatigue є можливість врахування залежності модуля пружності від циклічності навантаження. Графік цієї залежності наведено на рисунку 2.17.

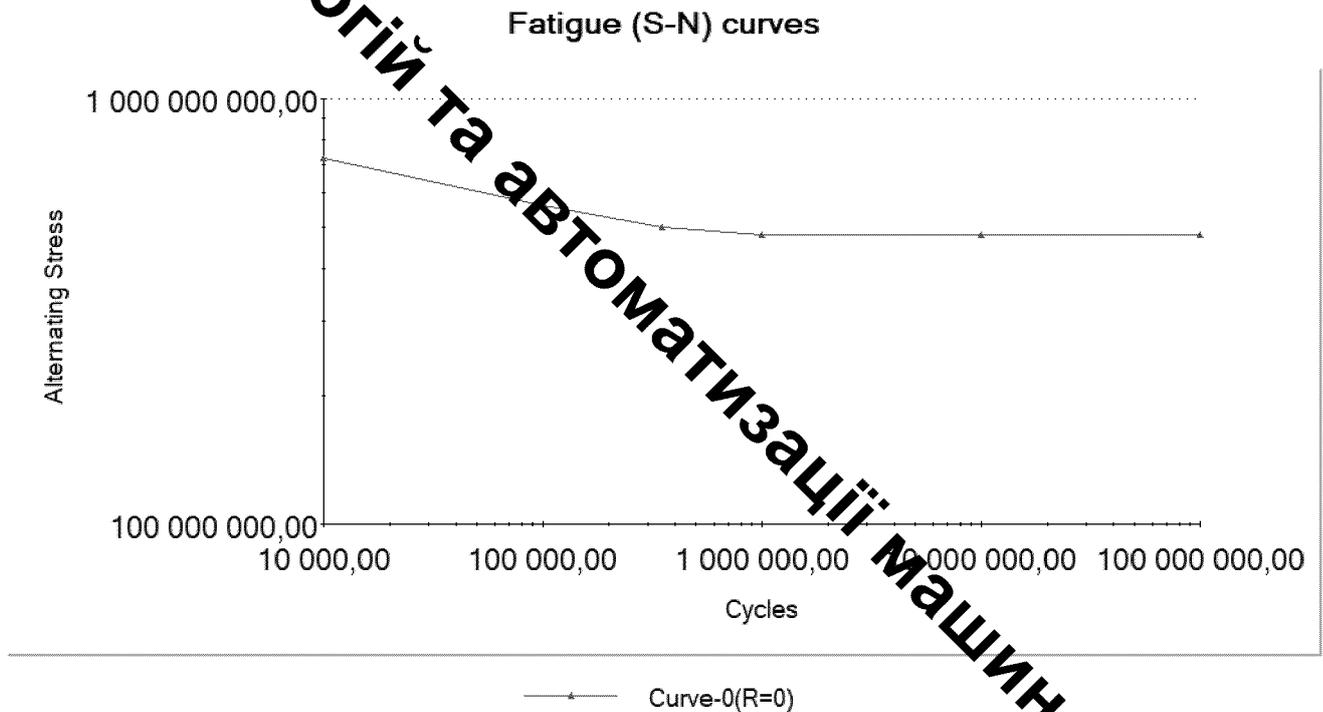


Рисунок 2.17 – Крива S-N для сталі на основі кривих ASME згідно рекомендацій SOLIDWORKS

Концепція математичної моделі втомного руйнування в SOLIDWORKS Simulation базується на використанні S-N кривої, отриманої з експериментальних даних для конкретного матеріалу. Для аналізу процесів втомного руйнування застосовано метод скінченних елементів (FEM), який використовує результати попереднього статичного аналізу для визначення напружено-деформованого стану конструкції. У випадку аналізу із постійною амплітудою дії напружень (Constant Amplitude) запроваджується простий підхід із використанням правила лінійного сумування пошкоджень.

На наступному етапі було змодельовано задану кількість циклів навантаження. У рамках дослідження передбачено виконання 1 мільйона циклів із

застосуванням обраного режиму «Fully Reversed (LR=-1)», за якого знак навантаження періодично змінюється, що створює розхитуючий ефект для системи.

У процесі розрахунків було виявлено ділянку на деталі «Кронштейн», яка піддається значним навантаженням і має підвищений ризик руйнування. Згідно з отриманими даними (див. рисунок 2.17), зона згину листової деталі піддається пошкодженню на рівні 905%.

Оскільки мінімальне пошкодження становить 100%, це свідчить про перевищення критичного рівня ще на 805%. Внаслідок втомних руйнувань термін експлуатації деталі скорочується у 9,05 рази (див. рисунок 2.18). У місці максимального пошкодження, яке становить 905%, тривалість служби деталі зменшується до $1,105 \cdot 10^5$ циклів.

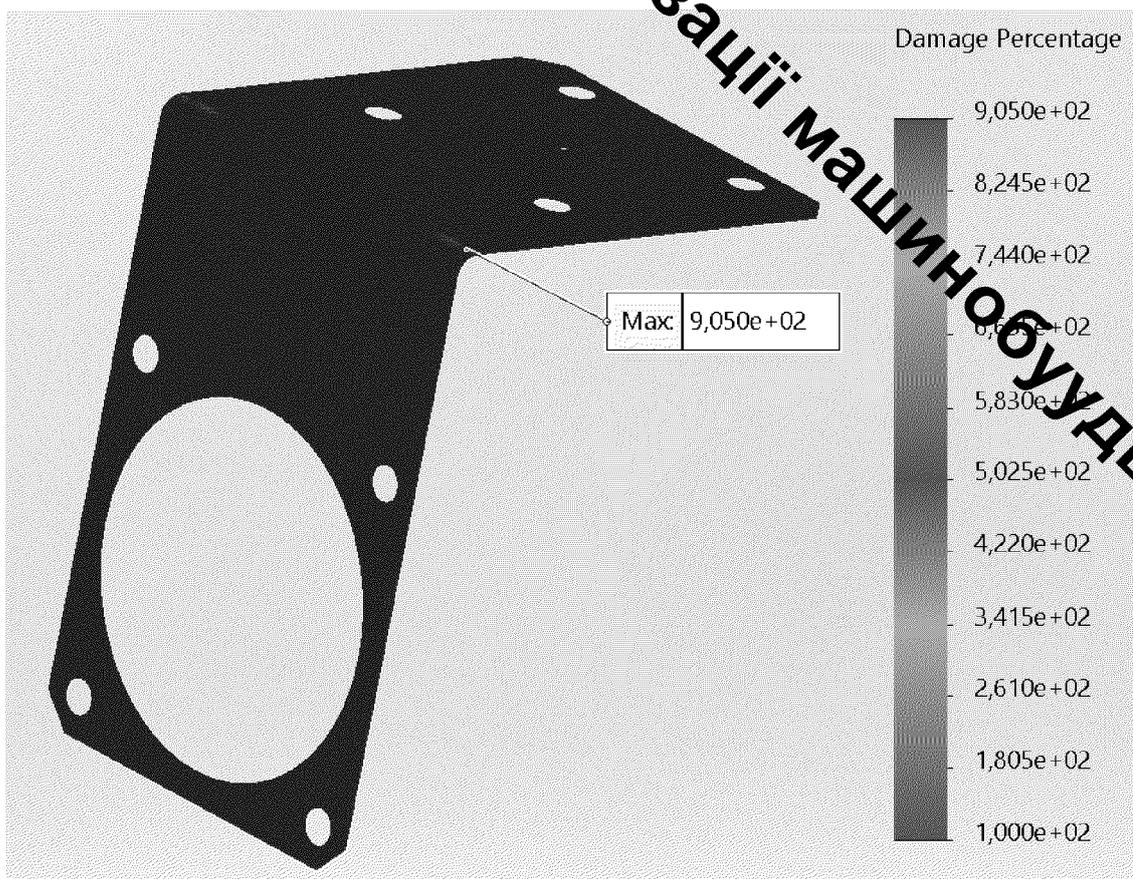


Рисунок 2.18 – Результат розрахунку пошкодження при дії втомних руйнувань

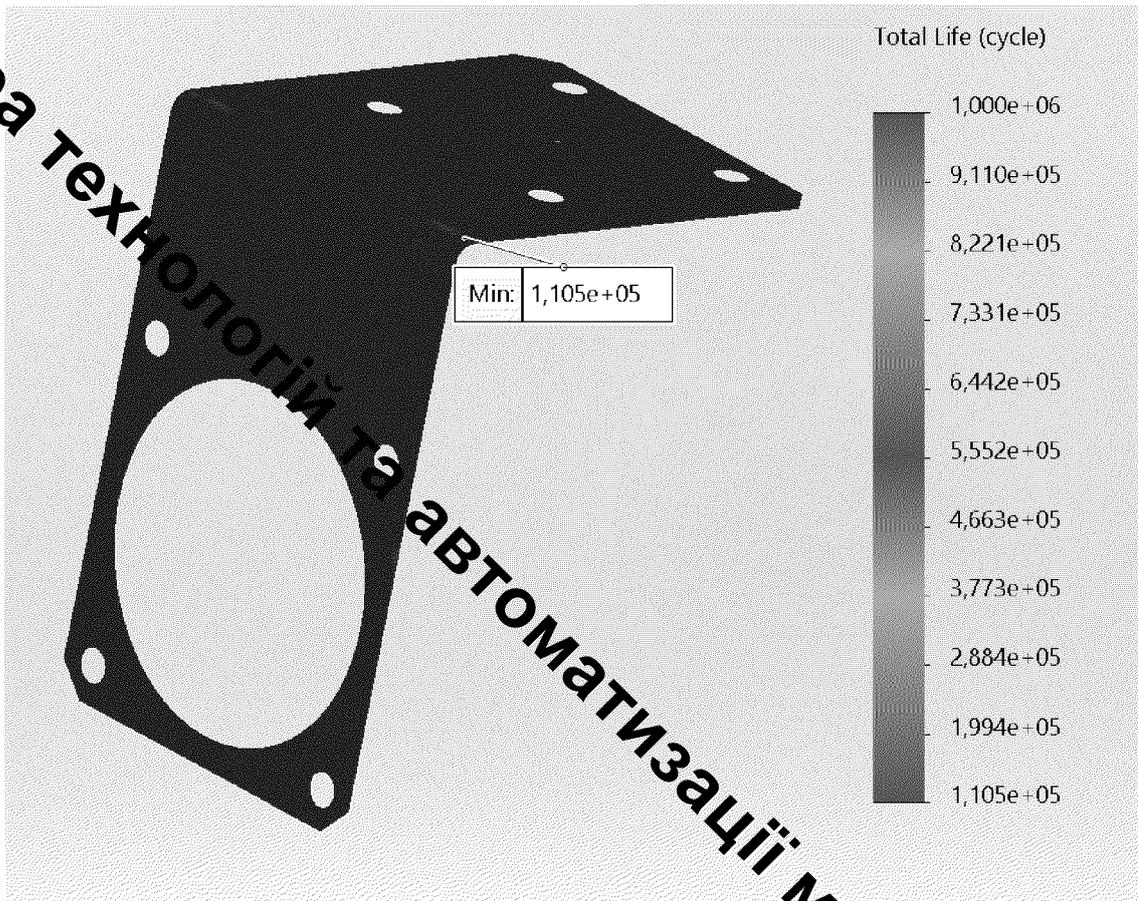


Рисунок 2.19 – Результат розрахунку терміну служби при дії втомних руйнувань

На рисунку 2.20 показано залежність пошкоджень деталі «Кронштейн» від її товщини. Отримана залежність показує значний стрибок пошкоджень від циклічного навантаження при зменшенні товщини деталі від 2,8 мм. Інші показники залишаються в межах 10% при значеннях більше 2,8 мм. Аналіз терміну служби деталі (рисунок 2.21) показує суттєві проблеми.

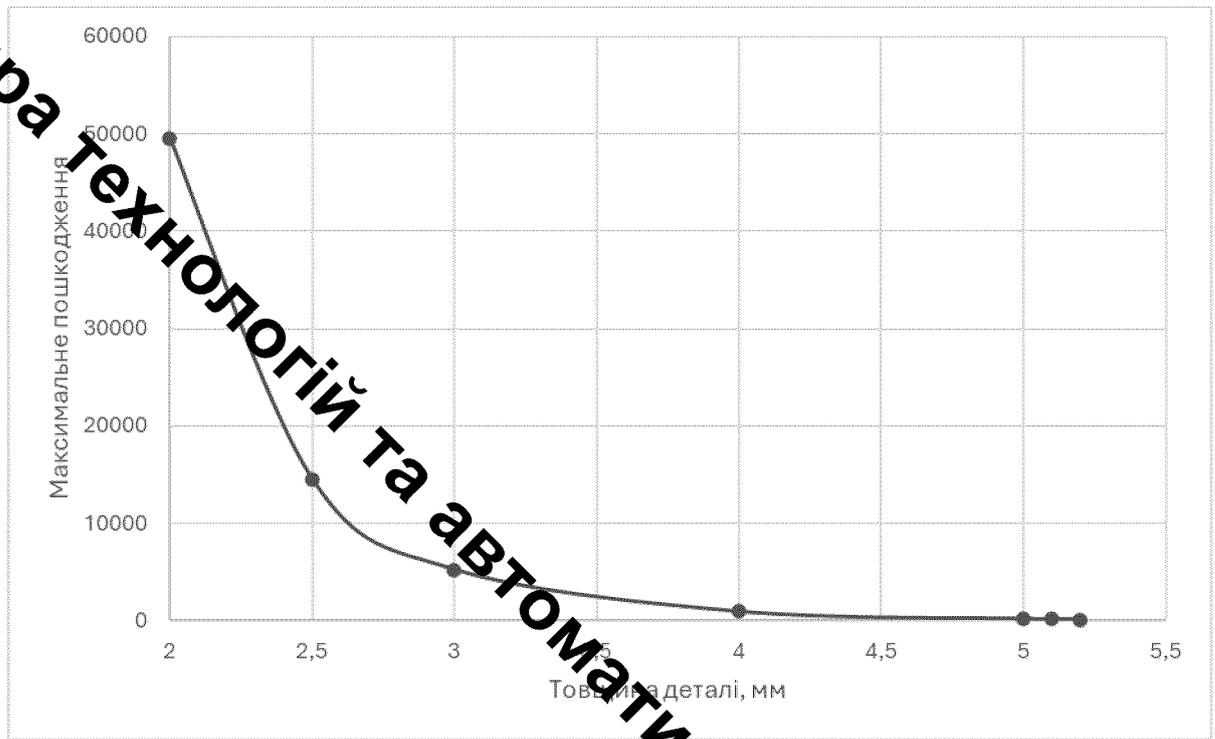


Рисунок 2.20 – Залежність пошкодження деталі від її товщини

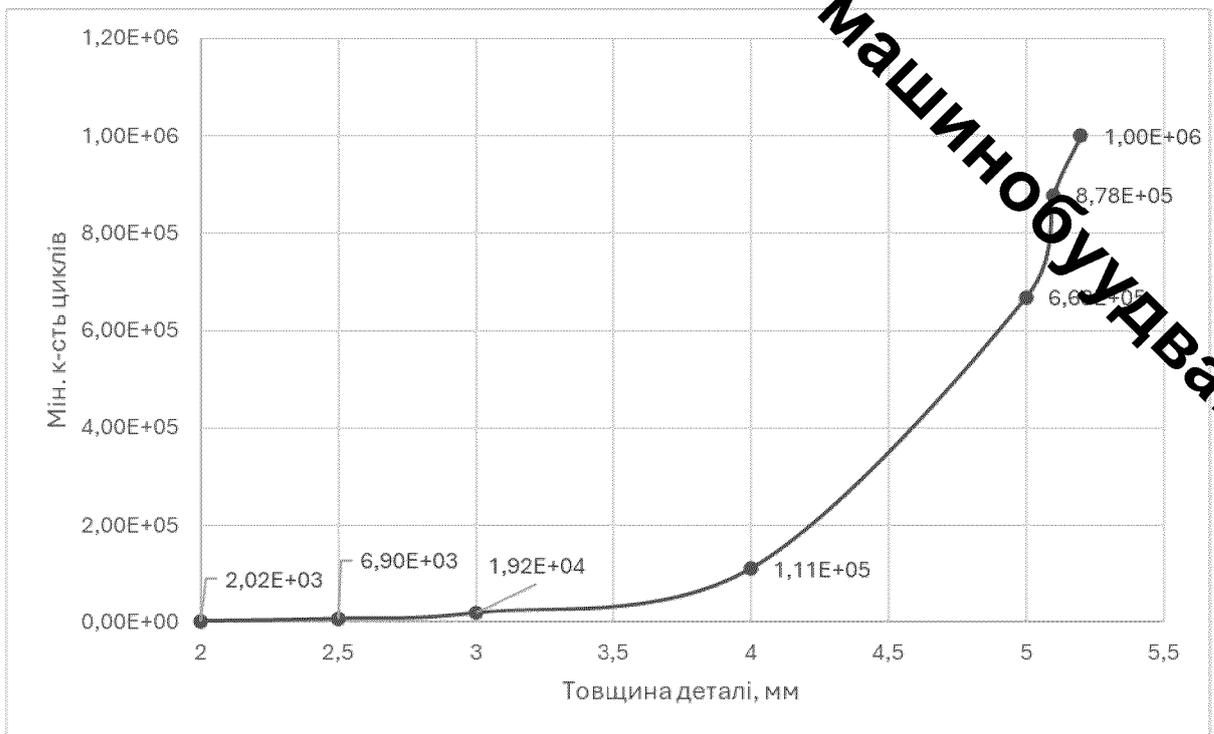


Рисунок 2.21 – Залежність мінімальної кількості циклів роботи деталі від її товщини

З аналізу залежності мінімальної кількості циклів роботи деталі від її товщини видно, що оптимальним значенням для цієї деталі є товщини становить від 6 мм, при цьому термін служби деталі не зменшується. Водночас значення

товщини деталі 5,1 мм забезпечує достатній показник циклічності з відхиленням у межах $\pm 10\%$. Таким чином, рекомендовано вибирати радіус скруглення для даної деталі не менше 5,1 мм.

2.4 Вибір зварювального робота та його компонентів для роботи

В якості основного обладнання для виконання зварювальних операцій обрано 6-осьовий промисловий робот Fanuc Arc Mate 120iD, який спеціально спроектований для дугового зварювання. Його головна конструктивна особливість – це повністю інтегрована кабельна розводка.

На відміну від старих роботів, де зварювальний рукав (шланговий пакет) висів збоку як "гірлянда" і часто чіплявся за деталі, у 120iD він проходить всередині самої руки (через 1-шу вісь, 3-тю вісь і порожнистий з'єднаний блок 6-ї осі). Основні технічні характеристик показані в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Технічні характеристики робота Fanuc Arc Mate 120iD

Параметр	Значення	Примітка
Кількість осей	6	Стандарт для повної свободи в 3D.
Вантажопідйомність	12 кг	Дозволяє вішати важкі пальники з водяним охолодженням, 3D-сканери шва та механізми подачі
Максимальний виліт	1831 мм	Ідеально для зварювання автомобільних кузовів або рам с/г техніки без переміщення самого робота.
Повторюваність	± 0.03 мм	Один з найточніших показників у класі
Вага механічної частини	230 кг	Відносно легкий, можна монтувати на стелю або стіну.
Клас захисту	IP67	Повністю захищений від вологи, пилу та металевих бризок. Його можна мити водою.
Контролер	R-30iB Plus	Найсучасніший контролер з підтримкою штучного інтелекту та добре підходить для цього робота

Корисними особливостями промислового робота Fanuc Arc Mate 120iD (рисунок 2.22) варто відзначити такі як: технологія Hollow Wrist, жорсткість конструкції та швидкість функція «J1 Flip».

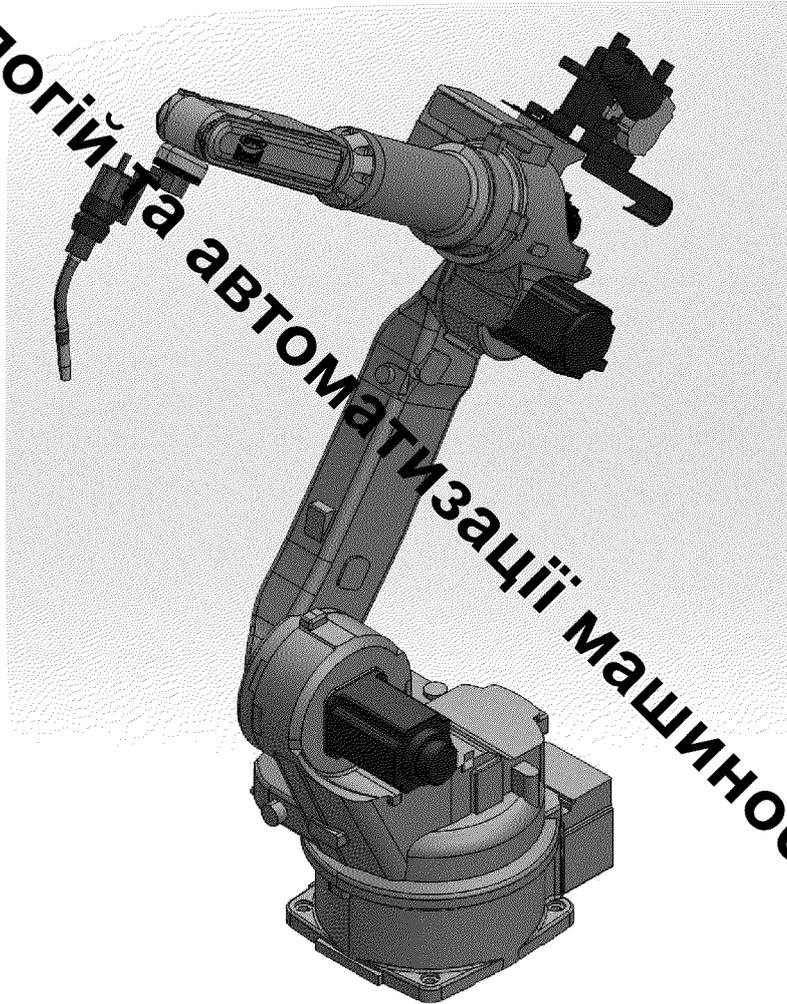


Рисунок 2.22 – Тривимірний модель промислового робота Fanuc Arc Mate 120iD з пальником Abicor Binzel ABIROB W500

Технологія Hollow Wrist дозволяє розмістити кабель всередині. Це робить можливість залізи «рукою» у вузький люк і крутити пальником на 360°, не переймаючись за дроти. Це також суттєво полегшує офлайн-програмування (симуляцію), бо поведінка кабелю передбачувана.

Чим вища жорсткість руки, тим менше її "трусить" при різкій зупинці. Це означає, що робот може швидше переїхати в нову точку і миттєво почати варити.

Функція «J1 Flip» дозволяє роботу перекинутися через себе назад. Це збільшує його робочу зону майже в 2 рази без необхідності поворотної платформи. Це дозволяє обслуговувати два столи: поки він варить на столі А, оператор завантажує стіл Б (ззаду робота).

Для роботи з порожнистим валом не підійде звичайний «гусак». Потрібна система, що проходить крізь центр 6-ї осі. Світовий лідер тут – німецька компанія Abicor Binzel. Модель зварювального пальника обрана Abicor Binzel ABIROB W500. Він комплектується шланговим пакетом, має змінний «гусак» (зазвичай кут 22° або 45°), та датчики зіткнення (якщо робот випадково вдарить пальником об деталь, цей датчик миттєво спрацює і зупинить робота, щоб не погнути «гусак»).

При цьому використано спеціальну станцію очищення пальника. Робот не може сам почистити сопло від бризок металу. Для цього він періодично під'їжджає до станції обслуговування: Abicor Binzel BRS-01. Там проводить обрізка дроту, механічне очищення сопла спеціальною фрезою, виперскування спеціальної рідини (керамічний спрей), щоб бризки під час зварювання менше прилипали.

В якості джерела зварювального струму найкращим варіантом для інтеграції з Fanuc є австрійське обладнання Fronius серії TPS/i. Це «інтелектуальна» платформа, яка спілкується з роботом по цифровому протоколу. Модель джерела зварювального струму обрана Fronius TPS 500i (рисунок 2.23).

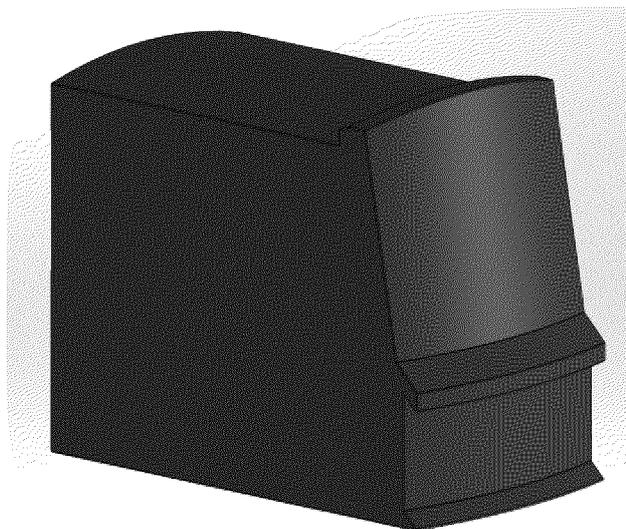


Рисунок 2.23 – Тривимірна модель джерела зварювального струму Fronius TPS 500i

Запропонована модель Fronius TPS 500i передбачає спеціальні функції: Pulse Multi Control, Low Spatter Control та SpeedNet. Pulse Multi Control – це режим імпульсного зварювання, який дає ідеальний шов без бризок (економить час на зачистку). Low Spatter Control забезпечує стабілізація дуги при короткому замиканні. SpeedNet – це швидкісний інтерфейс зв'язку з роботом.

Оскільки робот Fanuc Arc Mate 120iD має порожнисту руку, механізм подачі кріпиться на верхньому плечі робота (на 3-й вісі), щоб мінімізувати довжину каналу до пальника. Для подачі дроту використовують механізм моделі Fronius WF 25i Robacta Drive. Це компактний, легкий подаючий пристрій, розроблений спеціально для роботів. Він має 4 ролики для стабільної подачі дроту.

Для дроту використовують спеціальний буфер дроту (рисунок 2.24). При цьому дріт подається з Marathon Pac на платформі.

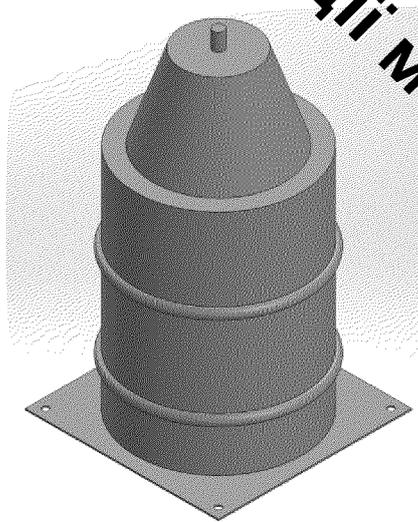


Рисунок 2.24 – Буфер дроту Marathon Pac

Увесь цей набір дозволяє реалізувати MIG/MAG зварювання з прецизійною точністю. Вони ефективно інтегрувати один з одним в процесі плазмового різання, проводять лазерне оцінювання позиціонування та автоматизований контроль, що робить інвестицію в таке обладнання гнучкою та захищеною від зміни технологічних задач.

РОЗДІЛ 3 КОНСТРУКТИВНІ РОЗРАХУНКИ ТА ПРОЄКТУВАННЯ ІНШИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПРИВОДУ

3.1 Розрахунок параметрів зубчасто-рейкової передачі

Розрахунок зубчасто-рейкової передачі [10] здійснюється відповідно до алгоритму, розробленого в табличному процесорі Microsoft Excel. Схематичне зображення зубчасто-рейкової передачі разом із основними параметрами, необхідними для виконання розрахунків, представлено на рисунку 3.1.

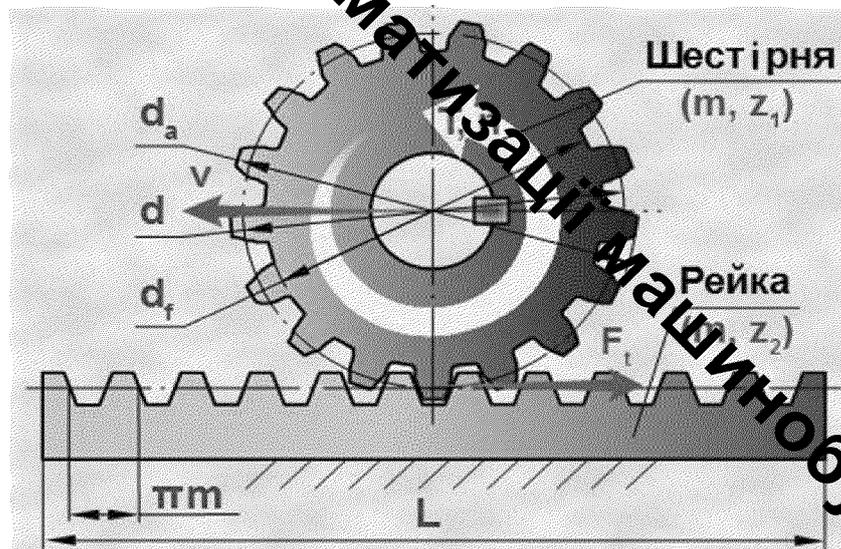


Рисунок 3.1 – Конструктивні параметри зубчасто-рейкової передачі

Значення модуля пружності матеріалу (для сталі $E=215000$ МПа), коефіцієнт Пуассона (для сталі $\mu=0,3$) та твердість поверхні зубів за шкалою Роквелла HRC (залежно від режиму термообробки сталі HRC варіюється від 17 до 65, а для сталі 40X відповідно до ДСТУ 7806:2015 встановлюється HRC 30) є вихідними параметрами для проєктування зубчасто-рейкової передачі. На наступному етапі здійснюється вибір безрозмірного коефіцієнта ширини зубів зубчастого вінця шестірни ψ_{bd} , який перебуває в діапазоні $0,6 \dots 0,4$. При цьому:

$$\psi_{bd} = b_2/d, \quad (3.1)$$

де b_2 – ширина шестірни,

d – дільний діаметр шестірни.

Кут нахилу зубів у зубчасто-рейковій передачі приймаємо рівним $\beta=0$, оскільки передача є прямозубою. Значення крутного моменту T_r на валу шестерні та швидкість v шестерні відносно рейки визначаємо відповідно до проведених попередніх розрахунків і заносимо в таблицю Microsoft Excel.

Під час розрахунків допустиме контактне напруження обчислюється за відповідними формулами, які залежать від твердості поверхні зубів, якщо $HRC < 38$:

$$[\sigma_H] = 2 \cdot 10^5 \cdot 57 \cdot e^{(0,0266 \cdot HRC) + 70} \quad (3.2)$$

Розрахунковий дільний діаметр визначаємо за формулою (3.3):

$$d_p \geq (4000 \cdot T \cdot E / (\pi \cdot (1 - \mu^2) \cdot [\sigma_H]^2 \cdot \psi \cdot \sin(2 \cdot \alpha)))^{(1/3)} \text{ [мм]}, \quad (3.3)$$

де α – значення нахилу профіля зуба, приймаємо $\alpha = 0,35$ рад, що еквівалентно $\alpha = 20^\circ$.

Розрахунковий модуль m_p зачеплення визначаємо за формулою (3.4):

$$m_p = d_p / (17 \cdot (\cos(\beta))^3) \text{ [мм]}.$$

Розрахунок відповідної величини модуля m здійснюється шляхом вибору значення, яке найближче відповідає розрахунковому модулю m_p , з установленого стандартного ряду: 1,0; 1,25; 1,5; 2; 2,5; 3; 4; 5; 6; 8; 10 мм. На основі обраного значення проводиться визначення мінімальної розрахункової кількості зубців шестірни z_{1p} розраховуємо за формулою (3.5). Такий підхід забезпечує дотримання вимог технічної точності та стандартів при проектуванні зубчастих передач:

$$z_{1p} = 17 \cdot (\cos(\beta))^3 \quad (3.5)$$

Після введення вибраного значення мінімальної кількості зубів шестерні z_1 будуть визначені наступні параметри зубчасто-рейкової передачі:

- ділильний діаметр на шестірні d :

$$d = m \cdot z_1 / \cos(\beta) \text{ [мм];} \quad (3.6)$$

- діаметр вершин зубів на шестірні d_a :

$$d_a = d + 2 \cdot m \text{ [мм];} \quad (3.7)$$

- діаметр западин зубів на шестірні d_f :

$$d_f = d - 2,5 \cdot m \text{ [мм];} \quad (3.8)$$

- приблизна ширина зубчастого вінця шестірні b_1 :

$$b_1 \approx b_2 + 0,6 \cdot b_2^{(1/2)} \text{ [мм];} \quad (3.9)$$

- розрахункова ширина зубів рейки b_2 :

$$b_2 \approx d \cdot \psi_{bd} \text{ [мм];} \quad (3.10)$$

- колова сила для шестірні F_t :

$$F_t = 2 \cdot T / d \text{ [Н];} \quad (3.11)$$

- потужність на валу з шестірнею P :

$$P = F_t \cdot v \text{ [Вт];} \quad (3.12)$$

Частота обертання валу шестірни n :

$$n = 60 \cdot v / (\pi \cdot d) \text{ [об/хв]}. \quad (3.13)$$

Рейкова передача може перетворювати обертальний рух шестерні у поступальний рух рейки або самого валу шестерні, а також використовуватись для зворотного процесу – перетворення поступального руху рейки в обертальний рух зубчастого колеса. Її розрахунок фактично ідентичний розрахунку зубчастої циліндричної передачі. З математичної точки зору рейка є зубчастим колесом із радіусом, що дорівнює нескінченності.

Результати обробки вихідних даних за допомогою алгоритму розрахунків табличного процесора Microsoft Excel наведені у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Вихідні дані для попереднього зубчато-рейкової передачі

Вихідні дані:		Позначення	значення	Од. вим.
1	Модуль пружності	$E =$	215 000	МПа
2	Коефіцієнт Пуассона	$\mu =$	0,30	-
3	Твердість поверхні зубу	$HRC =$	30	-
4	К-т ширини зубчастого вінця шестірни	$\psi_{bd} =$	0,60	-
5	Кут нахилу зубів	$\beta =$	0,0000	°
6	Крутний момент на валу шестірни	$T =$	7	Н*м
7	Швидкість шестірни відносно рейки	$v =$	0,4	м/с

Розраховані геометричні та силові параметри зубчато-рейкової передачі наведено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Результати розрахунку зубчасто-рейкової передачі

Результати розрахунку та вибору параметрів:		Позначення	Значення	Од. вим.
1	Допустимі контактні напруження	$[\sigma_H]=$	636,7	МПа
2	Розрахунковий ділительний діаметр шестірні	$d_p \geq$	51,3	мм
3	Розрахунковий модуль зачеплення	$m_p \approx$	3,02	мм
4	Назначаємо модуль зубчастої передачі	$m =$	3,00	мм
5	Розрахункове число зубів шестірні	$z_{1p} \geq$	17,0	шт
6	Призначаємо число зубів шестірні	$z_1 =$	25	шт
7	Ділительний діаметр шестірні	$d =$	75,000	мм
8	Діаметр вершин зубів шестірні	$d_a =$	81,000	мм
9	Діаметр впадин шестірні (довідково)	$d_f =$	67,500	мм
10	Ширина зубчастого вінця шестірні	$b \approx$	49,0	мм
11	Ширина зубів рейки	$b_2 \approx$	45,0	мм
12	Колова сила на шестірні (сила на рейці)	$F_t =$	1 867	Н
13	Потужність на валу шестірні	$P =$	15	Вт
14	Частота обертання валу шестірні	$n =$	101,859	об/хв

Отримані результати були перевірені за допомогою сайту для генерування зубчастих передач [11], а також підтверджені попередніми розрахунками, виконаними для обґрунтування конструкції рами приводу та вибору серводвигуна.

3.2 Проектування елементів зубчасто-рейкової передачі

Проектування шестірні та рейки виконано в середовищі CAD-системи SolidWorks [12] із використанням підпрограми Toolbox. На рис. 3.2 та 3.3 показано процес конфігурування параметрів для шестірні та рейки, відповідно. При чому

довжину рейки приймаємо 3,2 м, що на 0,2 м більше ніж хід модуля переміщення 3,0 м в автоматизованому приводі.

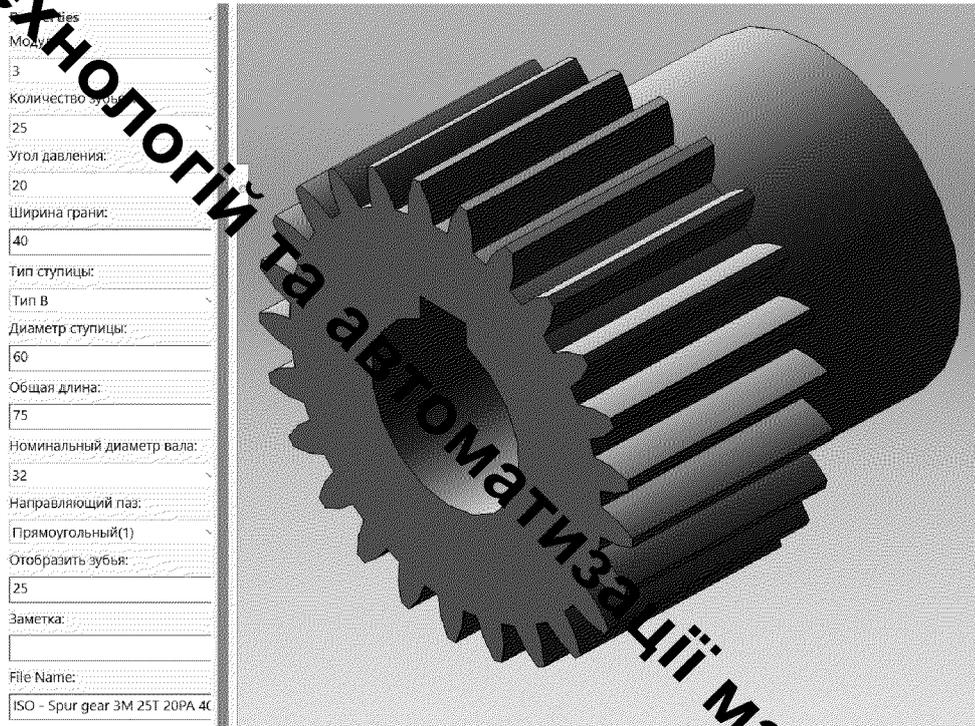


Рисунок 3.2 – Вибір параметрів для проектування шестірні

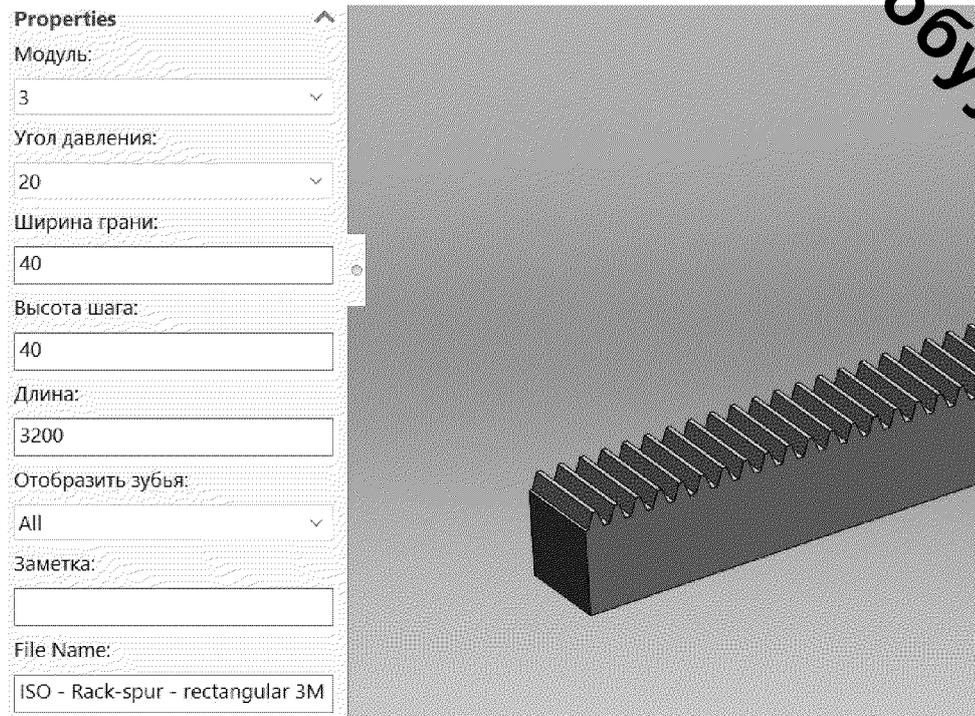


Рисунок 3.3 – Вибір параметрів для проектування рейки

Шестірня розміщується одразу на валу крокового двигуна, тому діаметр отвору посадочного діаметру прийнято рівний діаметру крокового двигуна.

3.3 Підтримання лінійних підшипників

Для вибору типу напрямної необхідно врахувати навантаження (реакції в опорах), які впливають на напрямну під час статичного навантаження каретки. Припускаючи, що ці навантаження діють у поперечній площині, розрахункову схему можна описати як статично визначену балку (див. рис. 3.4).

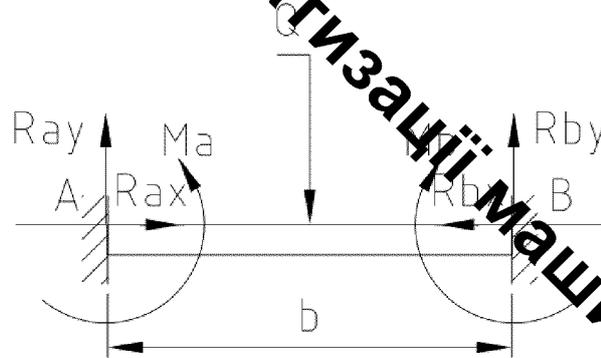


Рисунок 3.4 – Реакції в напрямних в поперечній площині каретки

Дійсні значення реакцій R_{ax} і R_{ay} , R_{bx} і R_{by} та моментів M_a , M_b визначаємо за умови прикладення зусилля Q в центральній точці каретки [13]:

$$R_{ay} = R_{by} = \frac{Q}{2} \text{ [H]}; \quad (3.14)$$

$$R_{ay} = R_{by} = \frac{6475}{2} = 3237,5 \text{ (H)};$$

$$M_a = M_b = \frac{Q \times b}{8} \text{ [Hm]}; \quad (3.15)$$

$$M_a = M_b = \frac{6475 \cdot 0,9}{8} = 728,4(\text{Нм})$$

$$R_{ax} = R_{bx} = 0.$$

З кожного боку передбачено застосування однієї напрямної. Реакції, отримані в опорах, слугують основними даними для вибору відповідного типу напрямної. Найпоширенішими є кулькові й роликові напрямні рейкового типу, а також простіші циліндричні кулькові напрямні.

Вибір рейкових напрямних здійснюється на основі каталогу компанії Schaeffler [13], використовуючи програму конфігурації Linear Konfigurator. Цей інструмент дозволяє поетапно підібрати оптимальний тип напрямних, генерує креслення, 3D-модель та надає повну технічну інформацію про обрані компоненти.

Проводиться уточнення геометричних параметрів рейки, включаючи її довжину та кількість верхніх кареток, розташованих на одній рейці. Після внесення цих уточнень система надає можливість завантажити тривимірну модель напрямних (див. рис. 3.5).

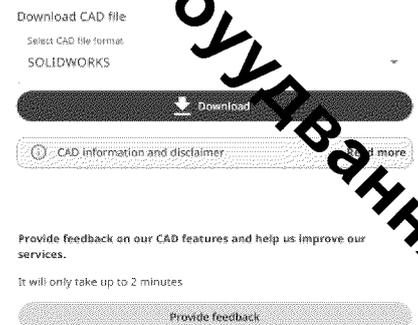
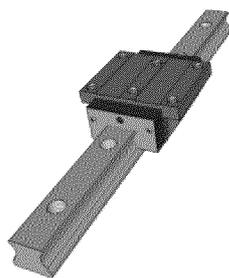


Рисунок 3.5 – Скачування тривимірної моделі напрямних

Визначення оптимального типу підшипника з напрямними здійснюється з урахуванням відповідних параметрів та умов експлуатації [15]. Такий вибір базується на глибокому аналізі технічних вимог, а також застосуванні методів

розрахунку і моделювання, які забезпечують точність і надійність функціонування підшипникової системи.

Вибраний тип напрямної KUVE35-B потрібно перевірити за відповідними характеристиками, які повинні бути відповідати нерівності (див. рис. 3.6) за формулою (3.16).

$$C > R_{ay}, M_{0x} > M_a \quad (3.16)$$

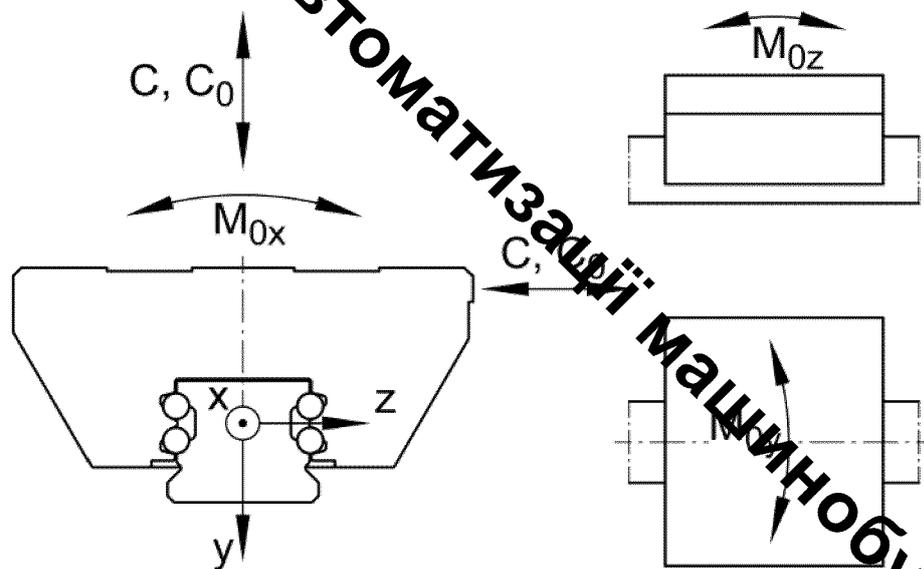


Рисунок 3.6 – Напрямки дії динамічних навантажень на підшипник

Таким чином перевіряємо технічні дані напрямної KUVE35-B (див. табл. 3.3).

Таблиця 3.3 – Технічні характеристики напрямної типу KUVE15-B-EC

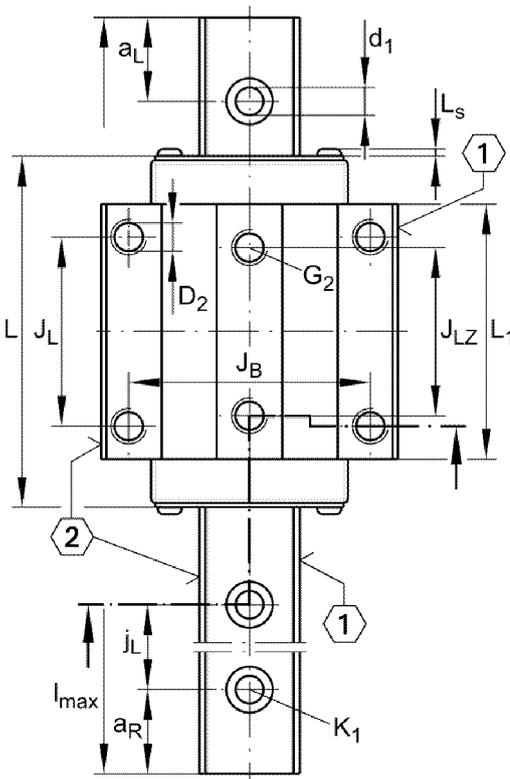
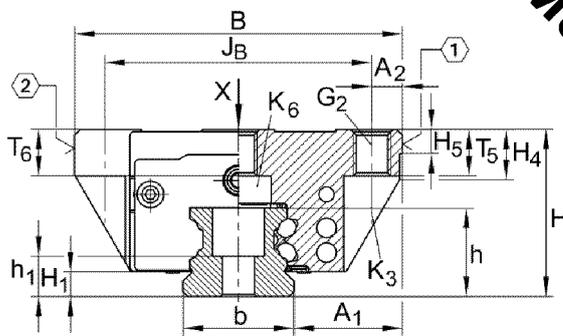
Вид характеристики	Позначення	Значення
Динамічне навантаження ²	C	38000 Н
Статична навантаження ²	C ₀	72000 Н
Статичний момент відносно осі X	M _{0x}	1465 Нм
Статичний момент відносно осі Y	M _{0y}	1020 Нм
Статичний момент відносно осі Z	M _{0z}	1020 Нм

Визначаємо, що умови сприйняття навантаження забезпечені згідно виконання вимог у формулі (3.16):

$$C=38 \text{ (кН)} > R_{ay}=3,2375 \text{ (кН)}$$

$$M_{0x} = 1465 \text{ (Нм)} > M_a = 728,4 \text{ (Нм)}$$

Таким чином, вибрані напрямні KUVЕ35-В мають запас по вертикальному зусиллю понад 11,7 разів, а також має запас по статичному моменту в 2 рази. Кресленик лінійних підшипників цього розміри показано на рисунку 3.7.



A_1	33 mm
J_B	82 mm
A_2	34 mm
Tol_a	-0,005 mm
Tol_b	-0,03 mm
A_2	9 mm
L_1	80 mm
L_s	1,65 mm
J_L	62 mm
J_{LZ}	52 mm
j_L	80 mm
$a_{L \text{ min}}$	20 mm
$a_{L \text{ max}}$	71 mm
$a_{R \text{ min}}$	20 mm
$a_{R \text{ max}}$	71 mm
H_1	6,7 mm
H_4	14,3 mm
H_5	6,75 mm
T_5	13 mm
T_6	12,3 mm
h	27 mm
h_1	14,5 mm
G_2	M10

Рисунок 3.7 – Лінійний підшипник з напрямною KUVЕ35-В і його розмірами

3.4 Особливості обслуговування приводу

Забезпечення якісного змащення рухомих механічних компонентів, таких як зубчасті передачі та лінійні підшипники, є визначальним фактором для їх ефективності функціонування та продовження експлуатаційного терміну служби. Зокрема, змащування зубчастих передач виконує кілька важливих функцій, серед яких зменшення тертя, запобігання корозійним процесам та забезпечення безперебійного і плавного руху. У випадку з лінійними підшипниками мастильні матеріали відіграють подібно значущу роль у зниженні тертя, видаленні сторонніх часток та створенні захисного бар'єру від агресивних впливів довкілля.

Вибір відповідного мастильного матеріалу, регламентація інтервалів його заміни та методи нанесення вимагають ретельного технічного обґрунтування. Це включає врахування робочих умов експлуатації, рівня навантажень, стандартів надійності та тривалості служби конкретного механізму. Крім того, своєчасне технічне обслуговування, яке передбачає регулярний контроль якості мастильного шару, заміну мастила та діагностику механізмів, є фундаментальним інструментом для підтримання оптимальної роботи частин і зменшення ризику аварій.

Регламент обслуговування рекомендується виконувати після завершення кожної зміни. Основні етапи робіт включають:

- очищення лінійних направляючих від пилу, бруду та інших забруднень із використанням професійних мийних засобів або м'яких тканин.
- проведення перевірки площинності й прямолінійності напрямних за допомогою відповідних контрольно-вимірювальних інструментів для своєчасного виявлення імовірних деформацій.
- ідентифікація механічних пошкоджень під час візуальної інспекції; їх усунення через ремонт деформованих елементів, заміну дефектних частин або налаштування механізму.
- нанесення мастильного матеріалу на напрямні з метою профілактики зносу та забезпечення плавності руху. Мастильний агент обирається залежно від технічних характеристик напрямних і умов експлуатації.

Змазування лінійних напрямних здійснюється через спеціально вмонтовані ніпельні каретки. Виробники рекомендують для цих компонентів мастила наступних типів: LOAD150 (мінеральна олива) з робочим температурним діапазоном від $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+140\text{ }^{\circ}\text{C}$ та CLEAN-M (ефірна олива) для експлуатації при температурах від $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+180\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Обслуговування зубчато-рейкових передач проводиться із застосуванням аналогічного технологічного алгоритму, як і для лінійних напрямних. Найбільш ефективними мастильними матеріалами для цих систем є літєві мастила, такі як Літол-24 та Фіоле. Для експлуатації в умовах низьких температур, зокрема у районах із сильними морозами, добре зарекомендував себе Северол. До складу вказаних мастил входять спеціальні присадки, що покращують вологостійкість, зносостійкість, стійкість до окислення і забезпечують консерваційні властивості.

Для додаткового полегшення процесу змащення зубчато-рейкових передач у ході їх експлуатації варто використовувати професійне обладнання з функцією мастильної шестірні (див. рис. 3.8).

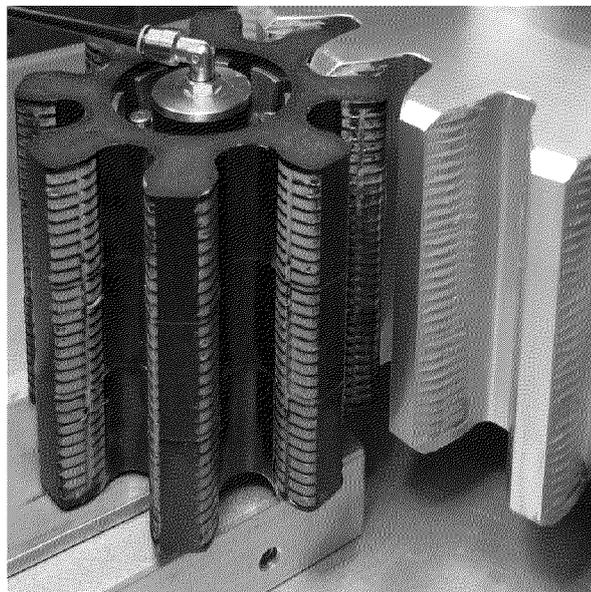


Рисунок 3.8 – Шестерня для мащення рейки

У перспективі мастильну шестерню можна буде інтегрувати із системою керування приводом, що дозволить автоматично регулювати об'єм мастила відповідно до режимів роботи.

РОЗДІЛ 4 ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ РОЗРОБКИ

4.1 Проведення наукового аудиту науково-дослідної роботи

Метою проведення технологічного аудиту є оцінювання *комерційного потенціалу розробки*, створеної в результаті науково-технічної діяльності. В результаті оцінювання робиться висновок щодо напрямів організації подальшого її впровадження з врахуванням встановленого рейтингу.

Оцінювання комерційного потенціалу розробки здійснюється за 12-ма критеріями [16]. Результати оцінювання комерційного потенціалу розробки зводимо в таблицю 4.1.

Таблиця 4.1 – Результати оцінювання комерційного потенціалу розробки

Критерії	Лозінський Д.О.	Козлов Л.Г.	Сердюк О.В.
1	2	3	4
1. Технічна здійсненність концепції	3	3	3
2. Ринкові переваги (наявність аналогів)	3	3	
3. Ринкові переваги (ціна продукту)	3	2	2
4. Ринкові переваги (технічні властивості)	4	2	3
5. Ринкові переваги (експлуатаційні витрати)	3	3	3
6. Ринкові перспективи (розмір ринку)	2	2	3
7. Ринкові перспективи (конкуренція)	3	3	2
8. Практична здійсненність (наявність фахівців)	2	4	3

Продовження таблиці 4.1

1	2	3	4
9. Практична здійсненність (наявність фінансів)	2	3	3
10. Практична здійсненність (необхідність нових матеріалів)	2	3	2
11. Практична здійсненність (термін реалізації)	3	4	3
12. Практична здійсненність (розробка документів)	3	3	4
Сума балів	СБ ₁ =33	СБ ₂ =35	СБ ₃ =34
Середньоарифметична сума балів $\overline{СБ}$	$\overline{СБ} = \frac{\sum_{i=1}^3 СБ_i}{3} = \frac{33+35+34}{3} = 34$		

$$\overline{СБ} = \frac{\sum_{i=1}^3 СБ_i}{3} \quad (4.1)$$

Згідно результатів оцінювання можна охарактеризувати рівень комерційного потенціалу розробки «вище середнього» ($\overline{СБ}=34$), а також розкрити такі аспекти:

- розробка може бути реалізована на таких підприємствах як ТОВ «Техносмар груп», ПрАТ «Калинівський машинобудівний завод», ООО «Вінницький інструментальний завод»;

- загальна якість розробки має високі показники: коефіцієнт запасу міцності складає 10,78, точність обробки поверхонь забезпечує точність позиціонування та виконання функціональних обов'язків;

- за рахунок удосконалення автоматизованого приводу модуля лінійних переміщень забезпечується підвищення продуктивності випуску продукції та економія енергетичних ресурсів, що дозволяє покращити співвідношення ціна-якість;

- ринками збуту продукції можуть бути підприємства України, що займаються виготовлення різного обладнання для сільського-господарства за допомогою зварювання;

- автоматизований привод модуля лінійних переміщень є досить перспективний проєкт, а потенційними покупцями цього товару можуть бути дрібні та великі машинобудівна підприємства

- оскільки загальний ресурс роботи автоматизованого приводу модуля лінійних переміщень є досить великим, тому будемо вважати, що його покупка підприємством буде разовою. Також оцінивши новизну, та техніко економічні показники можна припустити, що пристрій буде зберігати свою актуальність протягом 15 років.

4.2 Прогнозування витрат на виконання науково-дослідної роботи

Основна заробітна плата кожного із розробників (дослідників) Z_o , якщо вони працюють в наукових установах бюджетної сфери:

$$Z_o = \frac{M}{T_p} \cdot t \text{ [грн.]}, \quad (4.2)$$

де M – місячний посадовий оклад конкретного розробника (інженера, дослідника, науковця тощо), грн. У 2025 році величини окладів рекомендується брати до 15372 грн. за місяць для працівників професійної, наукової та технічної діяльності;

T_p – число робочих днів в місяці; приблизно $T_p = (21 \dots 23)$ дні, Приймаємо 22 робочих дні;

t – число робочих днів роботи розробника (дослідника).

Таблиця 4.2 – Розрахунки основної заробітної плати розробників

Найменування посади виконавця	Місячний посадовий оклад, грн.	Оплата за робочий день, грн.	Число днів роботи	Витрати на оплату праці, грн.
Керівник проектувальник	5372	698,72	10	6987,2
Інженер-конструктор 1-ї категорії	11556	525,27	10	5252,7
Технік 1-ї категорії	8172	371,45	8	2971,6
Всього				15211,5

Основна заробітна плата робітників Z_p , якщо вони беруть участь у виконанні даного етапу роботи і виконують роботи за робочими професіями, у випадку, коли вони працюють в наукових установах бюджетної сфери, розраховується за формулою:

$$Z_p = \sum_1^n t_i \cdot C_i \text{ [грн.]}, \quad (5.3)$$

де t_i – норма часу (трудомісткість) на виконання конкретної роботи, годин;

n – число робіт по видах та розрядах;

C_i – погодинна тарифна ставка робітника відповідного розряду, який виконує дану роботу. C_i визначається за формулою:

$$C_i = \frac{M_m \cdot K_{MKC} \cdot K_c}{T_p \cdot T_{зм}} \text{ [грн./год]}, \quad (4.4)$$

M_m – розмір мінімальної місячної заробітної плати,
 $M_m=8000$ грн./міс.;

$K_{\text{мкс}}$ – коефіцієнт міжкваліфікаційного співвідношення для встановлення тарифної ставки робітнику відповідного розряду: 1,35 – 3 розр.; 1,7 – 5 розр.; 2 – 6 розр.;

K_c – мінімальний коефіцієнт співвідношень місячних тарифних ставок робітників першого розряду нормальними умовами праці виробничих об'єднань і підприємств до законодавчо встановленого розміру мінімальної заробітної плати: приймаємо 1,8.

T_p – число робочих днів в місяці; Приймаємо $T_p = 22$ дні;

$T_{\text{зм}}$ – тривалість зміни, год.

Тоді

$$C_3 = \frac{8000 \cdot 1,35 \cdot 1,8}{22 \cdot 8} = 110,45 \text{ (грн/год);}$$

$$C_5 = \frac{8000 \cdot 1,7 \cdot 1,8}{22 \cdot 8} = 139,09 \text{ (грн/год);}$$

$$C_6 = \frac{8000 \cdot 2 \cdot 1,8}{22 \cdot 8} = 163,64 \text{ (грн/год).}$$

Таблиця 4.3 – Величина витрат на основну заробітну плату робітників

Найменування робіт	Тривалість операції, год.	Розряд роботи	Погодинна тарифна ставка, грн.	Величина оплати на робітника грн.
Свердлильна операція	0,03	6	163,64	4,9
Токарна з ЧПК	0,615	6	163,64	100,6
Зварювальна операція	0,17	5	139,09	23,6
Фарбувальна операція	0,22	5	139,09	30,6
Обслуговування промислового робота	0,03	5	139,09	4,17
Слюсарна операція	0,5	3	110,45	55,2
Миюча операція	0,25	3	110,45	27,6
Всього				246,7

Додаткову заробітну плату розраховуємо як 10,12% від суми основної заробітної плати розробників та робітників за формулою:

$$Z_{\text{дод}} = H_{\text{дод}}(Z_o + Z_p) \text{ [грн.]}, \quad (4.5)$$

$$Z_{\text{дод}} = 0,11(15211,5 + 246,7) = 1700,4 \text{ (грн.)}.$$

Відрахування на соціальні заходи. До статті «Відрахування на соціальні заходи» належать відрахування внеску на загальнообов'язкове державне соціальне страхування та для здійснення заходів щодо соціального захисту населення (ЄСВ — єдиний соціальний внесок). Розраховуються за формулою:

$$Z_n = (Z_o + Z_p + Z_d) \cdot \frac{H_{\text{зн}}}{100\%} \text{ [грн.]}, \quad (4.6)$$

де Z_o – основна заробітна плата розробників, грн.;

Z_p – основна заробітна плата робітників, грн.;

Z_d – додаткова заробітна плата всіх розробників та робітників, грн.;

$H_{zn}=22\%$ – норма нарахування на заробітну плату.

$$Z_n = (15211,5 + 246,7 + 1700,4) \cdot \frac{22}{100} = 3775 \text{ (грн).}$$

Сировина та матеріали. Витрати на матеріали M , що були використані під час виконання даного етапу роботи, розраховуються по кожному виду матеріалів за формулою:

$$M = \sum_1^n H_i \cdot \Pi_i \cdot K_i - \sum_1^n B_i \cdot \Pi_v \text{ [грн.],} \quad (4.7)$$

- де H_i – витрати матеріалу i -го найменування, кг;
 Π_i – вартість матеріалу i -го найменування, грн./кг;
 K_i – коефіцієнт транспортних витрат, $K_i = (1,1 \dots 1,15)$ приймаємо 1,1;
 B_i – маса відходів матеріалу i -го найменування, кг;
 Π_v – ціна відходів матеріалу i -го найменування, грн/кг;
 n – кількість видів матеріалів.

Таблиця 4.4 - Витрати на матеріали

Найменування матеріалу, марка, тип, сорт	Ціна за 1 кг, грн.	Норма витрат, кг	Величина відходів, кг	Ціна відходів, грн./кг	Вартість витраченого матеріалу, грн.
Прокат 50x70	20	250	5,0	7,2	5464
Всього:					5464

Розрахунок витрати на комплектуючі K_e , що були використані під час виконання даного етапу роботи, розраховуються за формулою:

$$K_g = \sum_1^n H_j \cdot C_j \cdot K_j \text{ [грн.],} \quad (4.8)$$

де H_j – кількість комплектуючих i -го виду, шт.;

C_j – ціна комплектуючих i -го виду, грн.;

K_j – коефіцієнт транспортних витрат, $K_i = (1,1 \dots 1,15)$ приймаємо 1,1;

n – кількість видів комплектуючих.

Всі необхідні данні для розрахунку витрат на комплектуючі вироби зведемо в таблицю 4.5

Таблиця 4.5 - Витрати на комплектуючі

Найменування комплектуючих	Кількість шт.	Ціна за штуку, грн.	Сума, грн.
Зварювальний робот з обладнанням	1	74000	814000
Серводвигун	1	63000	69300
Редуктор	1	20000	22000
Інші дрібні комплектуючі редуктора	100	60	6600
Всього			911900

Спецустаткування для наукових робіт. Проектування та удосконалення деталі конічно-циліндричного мотор-редуктора виконувалася на ноутбуці ASUS VivoBook X571GT-BQ073 Star Black. Балансова вартість спецустаткування розраховується за формулою:

$$B_{\text{спец}} = \sum_1^k C_i \cdot C_{\text{пр.}j} \cdot K_j \text{ [грн.],} \quad (4.9)$$

де C_i – ціна придбання одиниці спецустаткування даного виду, марки, грн.;

$C_{пр.і}$ – кількість одиниць устаткування відповідного найменування, які придані для проведення досліджень, шт.;

K_i – коефіцієнт, що враховує доставку, монтаж, налагодження устаткування тощо, ($K_i = 1, 0 \dots 1, 12$) приймаємо 1,1;

k – кількість найменувань устаткування;

$$B_{\text{внец}} = 23999 \cdot 1 \cdot 1,1 = 26398,9 \text{ (грн).}$$

Програмне забезпечення для наукових робіт

При виконанні МКР використовуються програми, які є у вільному доступі та на підприємстві.

Амортизація обладнання, комп'ютерів та приміщень, які використовувались під час (чи для) виконання даного етапу роботи.

Дані відрахування розраховують по кожному виду обладнання, приміщенням тощо.

У спрощеному вигляді амортизаційні відрахування A цілому бути розраховані за формулою:

$$A_{\text{обл}} = \frac{Ц_{б}}{T_{в}} \cdot \frac{t_{\text{вик}}}{12} \text{ [грн]},$$

де $Ц_{б}$ – балансова вартість обладнання, програмних засобів, приміщень тощо, які використовувались для проведення досліджень, грн;

$t_{\text{вик}}$ – термін використання обладнання, програмних засобів, приміщень під час досліджень, місяців;

$T_{в}$ – строк корисного використання обладнання, програмних засобів, приміщень тощо, років.

Проведені розрахунки зводимо до таблиці 4.6.

Таблиця 4.6 - Амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання

Найменування обладнання	Балансова вартість, грн.	Строк корисного використання, років	Термін використання обладнання, місяців	Амортизаційні відрахування, грн.
Оф. приміщення	90000	20	1	375
Вир. прим.	150000	20	1	625
Ноутбук	20000	5	1	400
Свердлильна операція	200000	15	1	1111,1
Токарна з ЧПК	400000	15	1	2222,2
Фарбувальна операція	300000	15	1	1666,7
Зварювальна операція	200000	15	1	1111,1
Інше обладнання	10000	5		166,7
Всього				7677,8

Паливо та енергія для науково-виробничих цілей. Витрати на силову електроенергію розраховуються за формулою:

$$B_e = \sum_{i=1}^n \frac{W_{yi} t_i \zeta_e K_{eni}}{\eta_i} \text{ [грн]}, \quad (4.11)$$

W_{yi} - встановлена потужність обладнання на певному етапі розробки, кВт;

t_i - тривалість роботи обладнання на етапі дослідження, год;

ζ_e - вартість 1 кВт-години електроенергії, грн; (вартість електроенергії визначається за даними енергопостачальної компанії);

K_{eni} - коефіцієнт, що враховує використання потужності, приймаємо 0,75;

η_i - коефіцієнт корисної дії обладнання, приймаємо 0,8.

При цьому вартість електроенергії розраховується:

$$C_e = (C_{opt} + C_{розп} + C_{пост})(1 + \frac{ПДВ}{100\%}) \quad (4.12)$$

C_{opt} - середня оптова ціна електроенергії, яка визначається оператором ринку, грн за 1кВт·год [18]

$C_{розп}$ - вартість розподілу електроенергії окремою енергорозподільчою компанією (без ПДВ) для ПАТ «Вінницяобленерго», грн за 1кВт·год [19];

$C_{пост}$ - вартість постачання електроенергії від енергорозподільчої компанії до конкретного споживача (без ПДВ), грн за 1кВт·год [20].

$$C_e = (5621,52 + 344,82 + 28,57) \cdot (1 + 0,2) / 10^3 = 7,79 \text{ грн}$$

Таблиця 4.7 – Таблиця витрат на силову електроенергію

Найменування обладнання	Встановлена потужність, кВт	Тривалість роботи, год	Сума, грн
Ноутбук	0,3	160	350,6
Свердлильна операція	3	0,03	0,3
Токарна з ЧПК	6,3	0,615	28,5
Зварювальна операція	6,3	0,17	7,8
Фарбувальна операція	3,5	0,22	5,6
Інше обладнання	2	10	146,1
Всього			539,1

Службові відрядження Витрати за статтею «Службові відрядження» розраховуються як 20...25% (приймаємо 22%) від суми основної заробітної плати дослідників та робітників:

$$B_{cv} = \frac{H_{cv}}{100\%} (Z_o + Z_p) \text{ [грн.]}, \quad (5.13)$$

$$B_{cv} = 0,22(15211,5 + 246,7) = 3400,8 \text{ (грн).}$$

Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації. До статті «Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації» належать витрати на проведення досліджень, що не можуть бути виконані штатними працівниками або наявним обладнанням організації, а виконуються на договірній основі іншими підприємствами, установами і організаціями незалежно від форм власності та позаштатними працівниками.

Таких робіт не передбачено під час виготовлення зразка. Адже всі дослідження проведено на нашому підприємстві. Тому витрати на цю статтю дорівнюють 0.

Інші витрати. До статті «Інші витрати» належать витрати, які не знайшли відображення у зазначених статтях витрат і можуть бути віднесені безпосередньо на собівартість досліджень за прямими ознаками.

Витрати за статтею «Інші витрати» розраховують як 50...100% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників:

$$I_{\epsilon} = \frac{H_{i\epsilon}}{100\%} (Z_o + Z_p) \text{ [грн.]}, \quad (4.14)$$

$$I_{\epsilon} = 0,5(15211,5 + 246,7) = 7729,1 \text{ (грн.)}.$$

Накладні (загальновиробничі) витрати. До статті «Накладні (загальновиробничі) витрати» належать: витрати, пов'язані з управлінням організацією; витрати на винахідництво та раціоналізацію; витрати на підготовку (перепідготовку) та навчання кадрів; витрати, пов'язані з набором робочої сили; витрати на оплату послуг банків; витрати, пов'язані з освоєнням виробництва продукції; витрати на науково-технічну інформацію та рекламу та ін.

$$B_{H36} = \frac{H_{H36}}{100\%} (Z_o + Z_p) \text{ [грн.]}, \quad (4.15)$$

$$H_{изв} = 1,25(15211,5 + 246,7) = 19322,8 \text{ (грн)}.$$

Витрати на проведення науково-дослідної роботи. Цей показник розраховують як сума всіх попередніх статей витрат:

$$B_{заг} = 15211,5 + 246,7 + 1700,4 + 3775 + 5464 + 911900 + 26398,9 + 0 + 7677,8 + 339,1 + 3400,8 + 0 + 7729,1 + 19322,8 = 1003366,1 \text{ (грн)}$$

Загальні витрати ЗВ на завершення науково—дослідної (науково— технічної) роботи та оформлення її результатів, з врахуванням того розробка знаходиться на стадії розробки впровадження зразка:

$$ЗВ = 1003366,1 / 0,9 = 1114851 \text{ (грн)}.$$

4.3 Розрахунок економічної ефективності науково-технічної розробки за її можливої комерціалізації потенційним інвестором

Оскільки у нас удосконалення автоматизованого приводу модуля лінійних переміщень, то майбутній економічний ефект буде формуватися на основі таких даних: збільшення кількості споживачів автоматизованих приводів модуля лінійних переміщень, в аналізовані періоди часу, від покращення його певних характеристик – (50 шт за 2026 рік, 30 шт за 2027 рік, 20 штук за 2028 рік та 10 шт за 2029 рік); кількість споживачів, які використовували аналогічний пристрій у році до впровадження результатів нової науково-технічної розробки – 50 шт; вартість пристрою (машини, механізму) у році до впровадження результатів розробки – 300000 грн; зміна вартості пристрою (зростання чи зниження) від впровадження результатів науковотехнічної розробки в аналізовані періоди часу 200000 грн.

За нашими розрахунками, результати нашої розробки можуть бути впроваджені з 1 січня 2026 року, а її результати будуть виявлятися протягом 2026-го, 2027-го, 2028-го та 2029-го років.

З 2029 року ми не плануємо отримання прибутків для потенційних інвесторів, оскільки високою є ймовірність, що з'являться нові, більш якісні розробки.

Розрахуємо очікуване збільшення прибутку Π_i , що його можна отримати потенційний інвестор від впровадження результатів нашої розробки, для кожного із років, починаючи з першого року впровадження:

$$\Delta\Pi_i = \sum_{j=1}^n (\Delta\Pi_o \cdot N + \Pi_o \cdot \Delta N)_i \cdot \lambda \cdot \rho \cdot (1 - \mathcal{G}/100) \text{ [грн]}, \quad (4.16)$$

де $\Delta\Pi_o$ – покращення основного оціночного показника від впровадження результатів розробки у даному році. Зазначай таким показником є збільшення ціни нової розробки, грн.;

N – основний кількісний показник, який визначає обсяг діяльності у даному році до впровадження результатів наукової розробки;

ΔN – покращення основного кількісного показника від впровадження результатів розробки;

Π_o – основний оціночний показник, який визначає обсяг діяльності у даному році після впровадження результатів розробки, грн.;

n – кількість років, протягом яких очікується отримання позитивних результатів від впровадження розробки;

λ – коефіцієнт, який враховує сплату податку на додану вартість
коефіцієнт $\lambda = 0,8333$;

ρ – коефіцієнт, який враховує рентабельність продукту. Рекомендується приймати $\rho = 0,2 \dots 0,3$; візьмемо $\rho = 0,25$;

\mathcal{G} – ставка податку на прибуток. $\mathcal{G} = 18\%$.

Тоді, збільшення чистого прибутку для потенційного інвестора Π_i протягом першого року від реалізації нашої розробки (2026 р.) складе:

$$\Delta\Pi_1 = (50 \cdot 300000 + 200000 \cdot 50) \cdot 0,8333 \cdot 0,25 \cdot (1 - 18/100) = 4270663 \text{ (грн)};$$

$$\Delta\Pi_2 = (30 \cdot 300000 + 200000 \cdot 80) \cdot 0,8333 \cdot 0,25 \cdot (1 - 18/100) = 5295622 \text{ (грн)};$$

$$\Delta\Pi_3 = (50 \cdot 300000 + 200000 \cdot 100) \cdot 0,8333 \cdot 0,25 \cdot (1 - 18/100) = 5978928 \text{ (грн)};$$

$$\Delta\Pi_5 = (50 \cdot 300000 + 200000 \cdot 110) \cdot 0,8333 \cdot 0,25 \cdot (1 - 18/100) = 6320581 \text{ (грн.)}.$$

У свою чергу, приведена вартість всіх чистих прибутків ПП розраховується за формулою:

$$ПП = \sum_1^m \frac{\Delta\Pi_i}{(1 + \tau)^t} \text{ [грн]}, \quad (4.16)$$

де $\Delta\Pi_i$ – збільшення чистого прибутку у кожному із років, протягом яких виявляються результати виконаної та впровадженої роботи, грн;

t – період часу, протягом якого виявляються результати впровадженої роботи, роки;

τ – ставка дисконтування, за яку можна взяти щорічний прогнозований рівень інфляції в країні; для України цей показник знаходиться на рівні 0,1;

t – період часу (в роках) від моменту початку впровадження науково-технічної розробки до моменту отримання потенційним інвестором додаткових чистих прибутків у цьому році.

Тоді приведена вартість всіх можливих чистих прибутків ПП, що їх може отримати потенційний інвестор від реалізації результатів нашої розробки, складе:

$$ПП = \frac{4270663}{(1+0,1)^2} + \frac{5295622}{(1+0,1)^3} + \frac{5978928}{(1+0,1)^4} + \frac{6320581}{(1+0,1)^5} = 15516423 \text{ (грн)}.$$

Далі розраховують величину початкових інвестицій PV , які потенційний інвестор має вкласти для впровадження і комерціалізації науково-технічної розробки. Для цього можна використати формулу:

$$PV = k_{инв} \cdot ЗВ \text{ [грн]}, \quad (4.17)$$

де k_{inv} – коефіцієнт, що враховує витрати інвестора на впровадження науково-технічної розробки та її комерціалізацію. Це можуть бути витрати на підготовку приміщень, розробку технологій, навчання персоналу, маркетингові заходи тощо; зазвичай $k_{inv} = 2 \dots 3$, приймаємо 2.

$$PV = 2 \cdot 1114851 = 2229702 \text{ (грн.)}$$

Абсолютна ефективність наукової розробки (при прогнозованому ринку збуту) складе:

$$E_{abc} = (ПП - PV) \text{ [грн]}, \quad (4.18)$$

де ПП – приведена вартість всіх чистих прибутків, що їх отримає підприємство (організація) від реалізації результатів наукової розробки, грн;

Якщо $E_{abc} \leq 0$, то результат від проведення наукових досліджень та їх впровадження буде збитковим і вкладати кошти в проведення цих досліджень ніхто не буде.

Якщо $E_{abc} > 0$, то результат від проведення наукових досліджень та їх впровадження принесе прибуток, але це також ще не свідчить про те, що інвестор буде зацікавлений у фінансуванні даного проекту (роботи).

Тоді

$$E_{abc} = (15516423 - 2229702) = 13286721 \text{ (грн.)}$$

Оскільки $E_{abc} > 0$, то вкладання коштів на виконання та впровадження результатів роботи може бути доцільним.

Але це ще не свідчить про те, що інвестор буде зацікавлене у фінансуванні даного проекту. Він буде зацікавлений це роботи тільки тоді, коли ефективність вкладених інвестицій буде перевищувати певний критичний рівень.

Розраховуємо відносну (щорічну) ефективність вкладених в наукову розробку інвестицій E_v . Для цього користуються формулою:

$$E_g = \tau_{ж} \sqrt{1 + \frac{E_{abc}}{PV}} - 1 \quad (4.19)$$

де E_{abc} – абсолютна ефективність вкладених інвестицій, грн;

$T_{ж}$ – життєвий цикл наукової розробки, роки.

$$E_g = 5 \sqrt{1 + \frac{17386721}{2234792}} - 1 = 0,474 = 47,4\% .$$

Далі, розрахована величина E_v порівнюється з мінімальною (бар'єрною) ставкою дисконтування $\tau_{мін}$, яка визначає ту мінімальну дохідність, нижче за яку інвестиції вкладатися не будуть. У загальному вигляді мінімальна (бар'єрна) ставка дисконтування $\tau_{мін}$ визначається за формулою:

$$\tau = d + f, \quad (4.20)$$

де d – середньозважена ставка за депозитними операціями в комерційних банках; в 2025 році в Україні $d = (0,16...0,22)$;

f – показник, що характеризує ризикованість вкладень; зазвичай, величина f $(0,05...0,2)$, але може бути і значно більше.

Якщо величина $E_v > \tau_{мін}$, то інвестор може бути зацікавлений у фінансуванні даної наукової розробки. В іншому випадку фінансування наукової розробки здійснюватися не буде.

Спочатку спрогнозуємо величину $\tau_{мін}$. Припустимо, що за даних умов:

$$\tau_{мін} = 0,22 + 0,1 = 0,33 = 33\% .$$

Оскільки $E_v = 47,4\% > \tau_{\text{мін}} = 23\%$, то інвестора може бути зацікавлений у вкладенні грошей в дану наукову розробку.

Термін окупності вкладених у реалізацію наукового проекту інвестицій $T_{\text{ок}}$ можна розрахувати за формулою:

$$T_{\text{ок}} = \frac{1}{E_v} \text{ [років]}. \quad (4.21)$$

Якщо $T_{\text{ок}} < 3 \dots 5$ -ти років, то фінансування даної наукової розробки в принципі є доцільним. В інших випадках потрібні додаткові розрахунки та обґрунтування.

$$T_{\text{ок}} = \frac{1}{0,474} = 2,11 \text{ (років)}.$$

Це свідчить про можливу доцільність фінансування даної наукової розробки. При оцінці економічної ефективності наукового дослідження було визначено та розраховано кошторис капітальних витрат на розробку нового технічного рішення, на його виробництво та впровадження, а також оцінено економічну ефективність інноваційного рішення.

Визначення капітальних витрат на розробку нового технічного рішення включало витрати на основну і додаткову заробітну плату розробників та робітників, амортизацію обладнання, витрати на електроенергію, матеріали і таке інше. В розрахунку економічної ефективності було виконано прогнозування загальних витрат на виконання та впровадження результатів наукової роботи, спрогнозовано комерційний ефект від реалізації результатів розробки та ефективність вкладених інвестицій і періоду їх окупності. За результатами всіх розрахунків було виявлено доцільність проведення даної наукової роботи оскільки вона є економічно виправданою. Термін окупності вкладених коштів у реалізацію наукового проекту становить $T_{\text{ок}}=2,11$ роки. Крім того відносна ефективність

вкладень $E_B=47,4\%$ є більшою за мінімальну ставку дисконтування $\tau_{\min}=23\%$, що може зацікавити у фінансуванні даної наукової розробки. Приведена вартість прибутків становить $ПП=15516423$ грн.

Кафедра технологій та автоматизації машинобудування

ВИСНОВКИ

В результаті виконання магістерської кваліфікаційної роботи було удосконалено автоматизований привод модуля лінійних переміщень для зварювального робота вантажопід'ємністю 400 кг. Модуль лінійних переміщень забезпечує виконання зварювальних робіт. Під час досягнення мети було пройдено наступні етапи:

✓ на основі отриманого завдання описано службове призначення виробу та виконати аналіз кінематичної схеми, розраховано розрахункове навантаження в 6475Н та прийнято потужність приводу в 750Вт;

✓ розроблено конструкцію рами з труб прямокутного профілю 70x40мм товщиною стінки 5,0мм, а також пластин товщиною 5,0мм для підсилення місць їх з'єднання. Забезпечено коефіцієнт запасу міцності 1,078;

✓ досліджено вплив товщини деталі «Кронштейн» на втому матеріалу під циклічними навантаженнями;

✓ підібрано серводвигун Fanuc βiS 12/3000 та редуктор AF100 для забезпечення крутного моменту 7Нм та швидкості обертання 1022 об/хв;

✓ запрограмовано промисловий контролер Fanuc R-30iB Plus;

✓ розраховано зубчасто-рейкову передачу та вибрано підшипники KUV35-B із запасом по вертикальному зусиллю понад 11,7 разів, а також має запас по статичному моменту в 2 рази;

✓ обґрунтовано вибір іншого обладнання для зварювання та обслуговування рухомих елементів виробу;

✓ проаналізовано економічний ефект в розмірі 13,3 млн. грн від впровадження автоматизованого приводу модуля лінійних переміщень. Термін окупності становить 2,11 роки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Веб-сайт фірми «НАВКО-ТЕХ». Робототехнічний комплекс РК759. URL: <https://www.nauko-teh.kiev.ua/produksiia/roboty-uk/rk759> (Дата звернення 05.09.2025)
2. Веб-сайт фірми «Deuma». Types of Deuma Tank Clamping and Welding Machines. URL: <http://www.deuma.co/tank-clamping-and-welding-machines> (Дата звернення 05.09.2025)
3. Веб-сайт фірми «Corimpex». HFI – Horizontal Fully Integrated. URL: <https://www.corimpexgroup.com/en/prodotti/hfi/> (Дата звернення 05.09.2025)
4. Веб-сайт фірми «Valk Welding». Welding automation. URL: <https://valkwelding.com/en/welding-automation> (Дата звернення 08.09.2025)
5. Каталог фірми Filling Motor на сайті українських експортерів. URL: <https://cnc-market.in.ua/> (Дата звернення 11.09.2025)
6. Ковальов Ю. А., Кошель С. О., Манойленко О. П. Проектування промислових роботів та маніпуляторів: навч. посіб. Київ: Центр навчальної літератури, 2019. 256 с.
7. Каталог японської фірми FANUC. URL: [https://www.fanuc.co.jp/en/product/catalog/pdf/servo/Servo_alpha\(E\)-220.pdf](https://www.fanuc.co.jp/en/product/catalog/pdf/servo/Servo_alpha(E)-220.pdf) (Дата звернення 11.09.2025)
8. Веб-сайт фірми «APEX DYNAMICS». PLANETARY GEARBOX AF AFR Series. URL: <https://www.apexdyna.com/download/catalog/AFAFR-Eng.pdf> (Дата звернення 12.09.2025)
9. Introduction to Finite Element Analysis Using SolidWorks Simulation 2021 / Randy H. Shih. USA : SDC Publications, 2021. 551 p.
10. Малащенко В. О., Янків В. В. Деталі машин. Курсове проектування: навч. посіб. Львів: Новий Світ, 2004. 232 с..
11. Веб-сайт для генерації зубчастих передач. URL: <https://evolventdesign.com/pages/spur-gear-generator> (Дата звернення 12.09.2025)
12. SolidWorks 2022 Step-By-Step Guide: Part, Assembly, Drawings, Sheet Metal, & Surfacing, 5th Edition / Amit Bhatt, Mark Wiley. India : CADFolks, 2022. 438 p.

13. Каталог фірми Schaeffler на сайті [Електронний ресурс] URL: <https://medias.schaeffler.com/medias/lin/dimension.do> (Дата звернення 15.09.2025)
14. Веб-сайт для уточнення параметрів лінійних напрямних. URL: <https://bearinonline-easy-linear.schaeffler.com/> (Дата звернення 15.09.2025)
15. Рекомендації по вибору мастила для лінійних напрямних. URL: <https://medias.schaeffler.de/en/greaseselection> (Дата звернення 16.09.2025)
16. Методичні вказівки до виконання економічної частини магістерських кваліфікаційних робіт / Уклад.: В. О. Козловський, О. Й. Лесько, В. В. Кавецький. Вінниця : ВНТУ, 2021. 42 с.
17. Погодинні ціни купівлі-продажу електроенергії. URL: <https://index.minfin.com.ua/ua/tariff/electric/com/market/> (Дата звернення 05.11.2025)
18. Тарифи на електроенергію для підприємств. URL: <https://index.minfin.com.ua/ua/tariff/electric/prom/> (Дата звернення 05.11.2025)
19. Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг. URL: <https://www.nerc.gov.ua/sferi-diyalnosti/elektroenergiya/promislovist/tarifi-na-elektroenergiyu-dlya-nepobutovih-spozhivachiv/tarifi-na-poslugi-z-rozpodilu-elektrichnoyi-energiyi> (Дата звернення 05.11.2025)
20. Тарифи на постачання електричної енергії. URL: <https://www.nerc.gov.ua/sferi-diyalnosti/elektroenergiya/promislovist/tarifi-na-elektroenergiyu-dlya-nepobutovih-spozhivachiv/tarifi-na-poslugi-postachalnikov-universalnih-poslug/tarifi-na-poslugi-postachalnikov-universalnih-poslug-shcho-prodovzhuyut-diyati-z-01042023> (Дата звернення 05.11.2025)
21. Побережець В. Я., Ящук Д. А., Рижих О. В., Піонткевич О. В. Розробка прикладних програм мовою програмування C# для автоматизованого проектування металорізного інструменту. Матеріали ЛІІІ науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ, Вінниця, 20-22 березня 2024 р. Електрон. текст. дані. 2024. 4 с. URI: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fmt/all-fmt-2024/paper/view/20531>
22. Соколовський М. Є. Проектування автоматизованого приводу модуля лінійних переміщень з використанням CAD/CAE-систем. Бакалаврська дипломна

робота зі спеціальності 131 – Прикладна механіка, освітня програма – Комп'ютеризовані технології та механотронні системи в машинобудуванні, Вінниця: ВНТУ, 2024. 80 с.

23. Піонткевич О. В. Проекція результатів вивчення CAD/CAE систем на виконання випускних робіт спеціальності «Прикладна механіка». Матеріали XVI Міжнародної науково-методичної конференції «Сучасна освіта – доступність, якість, визнання», 13–14 листопада 2024 р. Краматорськ-Вінниця-Тернопіль, Краматорськ : ДДМА, 2024. С. 242-246.

24. Соколовський М. Є., Голубачов А. С., Піонткевич О. В. Проектування та використання промислових роботів. Матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції "Перспективи розвитку машинобудування та транспорту-2025", 03-05 червень 2025 : Збірник тез доповідей. Вінниця: ВНТУ. 2025. С. 3. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/prmt/pmrt2025/paper/view/25050>.

25. Піонткевич О. В., Лозінський Д. О., Сердюк О. В., Савуляк В. В. Забезпечення результатів вивчення CAD/CAE/CAM систем для підготовки фахівців із спеціальності «Прикладна механіка». Матеріали XVI Міжнародної науково-методичної конференції «Сучасна освіта - доступність, якість, визнання», 13–14 листопада 2024 р. Краматорськ-Вінниця-Тернопіль, Краматорськ : ДДМА, 2024. С. 247-252.

Кафедра технологій та автоматизації машинобудування

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А – ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Назва роботи: «УДОСКОНАЛЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРИВОДУ
МОДУЛІ ЛІНІЙНИХ ПЕРЕМІЩЕНЬ З ВИКОРИСТАННЯМ САД/САЕ-СИСТЕМ»

Тип роботи: магістерська кваліфікаційна робота

Підрозділ: кафедра ТАМ

Коефіцієнт подібності текстових запозичень, виявлених у роботі
системою StrikePlagiarism (КПІ) 17,04%

Висновок щодо перевірки кваліфікаційної роботи (відмітити потрібне)

Запозичення, виявлені у роботі, оформлені коректно і не містять ознак академічного плагіату, фабрикації, фальсифікації. Роботу прийняти до захисту.

У роботі не виявлено ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації, але надмірна кількість текстових запозичень та/або наявність типових розрахунків не дозволяють прийняти рішення про оригінальність та самостійність її виконання. Роботу направити на доопрацювання.

У роботі виявлено ознаки академічного плагіату та/або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень. Робота до захисту не приймається.

Експертна комісія:

Ольга СЕРДЮК, к.т.н., доц. кафедри ТАМ

(прізвище, ініціали, посада)

(підпис) _____

Леонід КОЗЛОВ, д.т.н., проф., зав. кафедри ТАМ

(прізвище, ініціали, посада)

(підпис) _____

Особа, відповідальна за перевірку _____

(підпис)

Ольга СЕРДЮК

(прізвище, ініціали)

З висновком експертної комісії ознайомлений(-на)

Керівник _____

(підпис)

Олег ПІОНТКЕВИЧ, к.т.н., доц., доц. кафедри ТАМ

(прізвище, ініціали, посада)

Здобувач _____

(підпис)

Максим СОКОЛОВСЬКИЙ

(прізвище, ініціали)

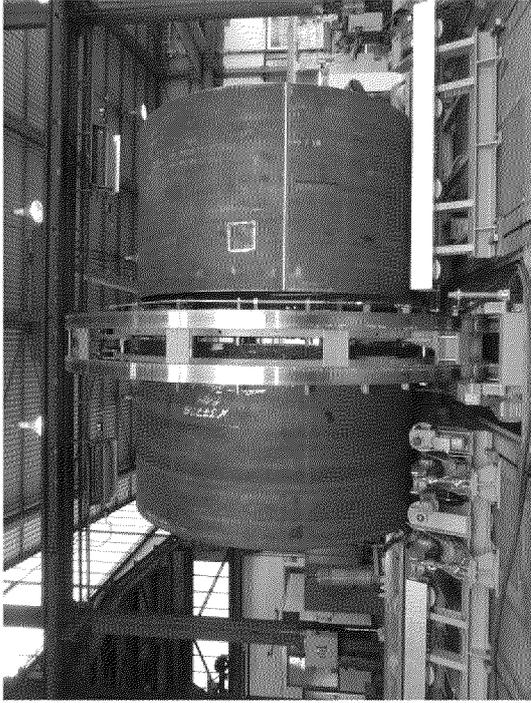
ДОДАТОК Б

ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА

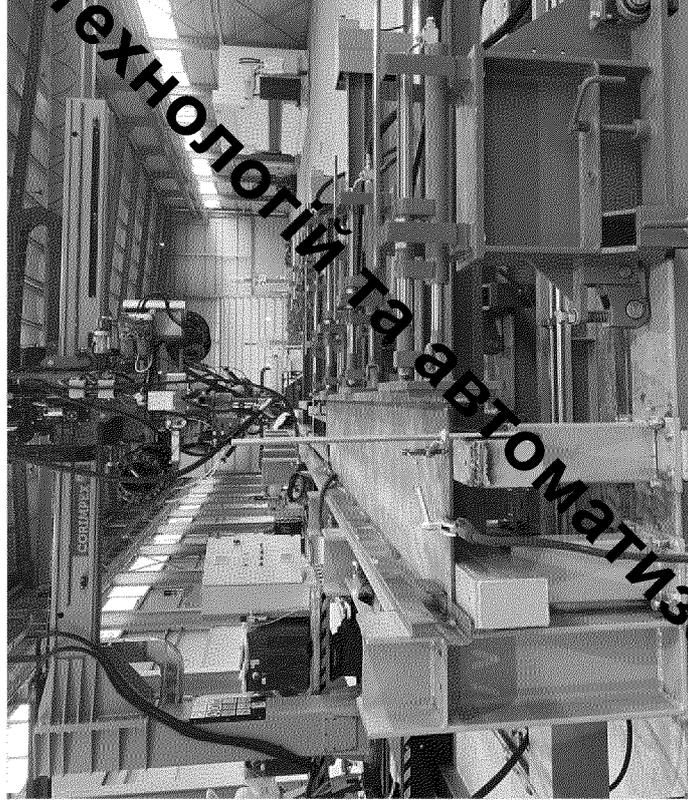
Удосконалення автоматизованого приводу модуль лінійних переміщень з використанням CAD/CAE-систем

Кафедра технологій та автоматизації машинобудування

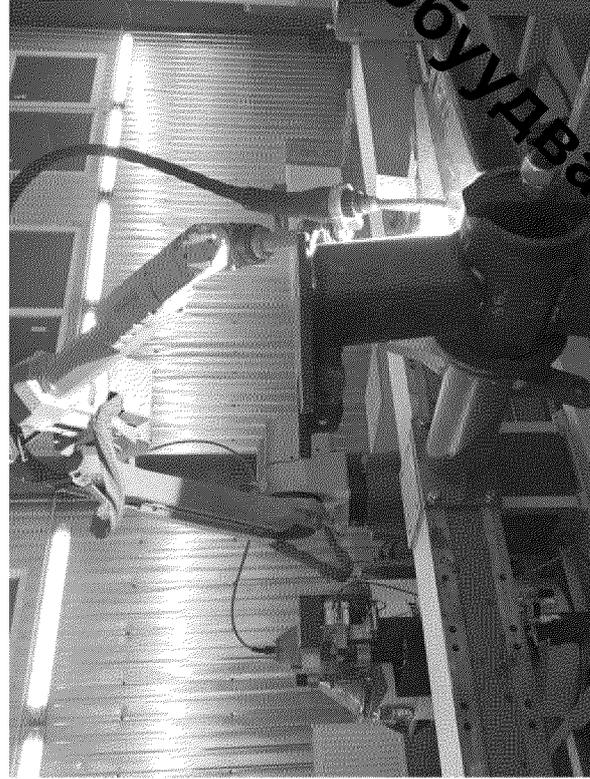
ОГЛЯД АВТОМАТИЗОВАНИХ ПРИВОДІВ ДЛЯ ЗВАРЮВАЛЬНИХ РОБІТ



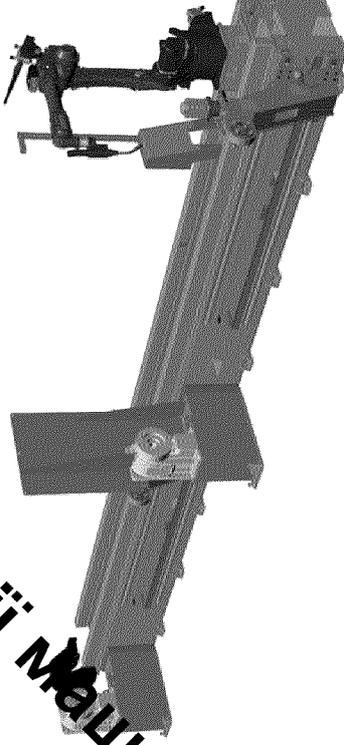
Зовнішній вигляд портальної рами установки Gantry Welding Unit [2]



Зовнішній вигляд портальної рами установки Sotripex Builder [3]



Зовнішній вигляд зварювального комплексу [1]



Зовнішній вигляд зварювального комплексу фірми Valk Welding [4]

ПОРІВНЯННЯ ТЕХНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТА РЕЗУЛЬТАТИ АНАЛІЗУ УСТАНОВОК

Параметри	GWU (Portal)	B Corimpex (Builder)	Valk Welding (Robotic Cell)	PK759 (Robotic Cell)
Тип процесу	SAW / MIG/MAG	SAW (під флюсом)	MIG/MAG (дугове)	MIG/MAG (дугове)
Основне застосування	Цистерни, мости, вагони	Двогаврові балки	Складні просторові конструкції	Складні просторові конструкції
Гнучкість	Середня (тільки довгі шви)	Низька (тільки балки)	Дуже висока (будь-яка геометрія)	Дуже висока (будь-яка геометрія)
Точність (похибка)	±1.0 мм	±1.0 мм	±0.5 мм	±0.05 мм
Продуктивність	Висока швидким наплавленням	Висока парцельною плавкою	Середня/Висока	Середня/Висока
Орієнтовна вартість	від €120,000	від €300,000	від €180,000	від €80,000

СЕРВОДВИГУН ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРИВОДУ

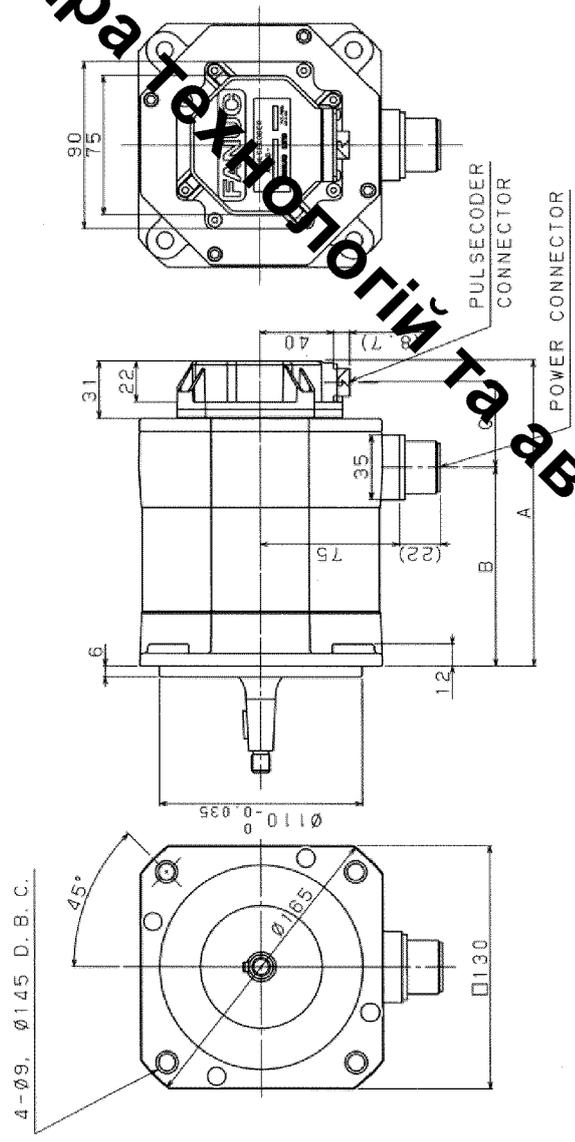
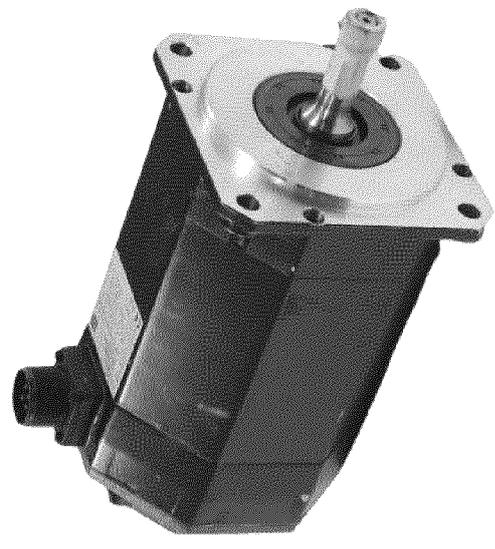


Рисунок 1 – Серводвигун
Fanuc βiS 12/3000

Рисунок 2 – Конструктивні розміри серводвигуна
Fanuc βiS 12/3000

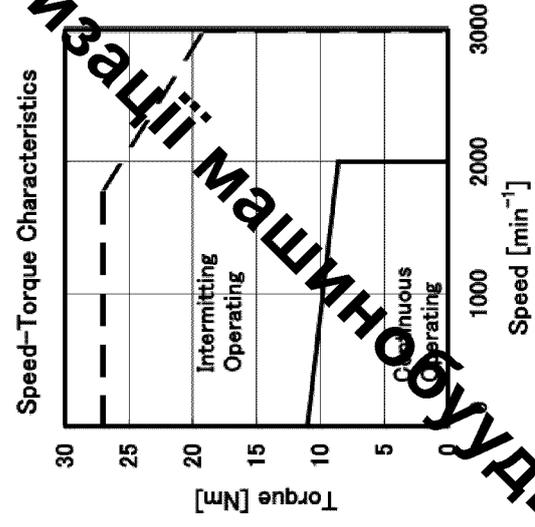


Рисунок 3 – Паспортні дані відповідності крутного моменту до частоти обертання валу серводвигуна

РЕДУКТОР ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРИВОДУ

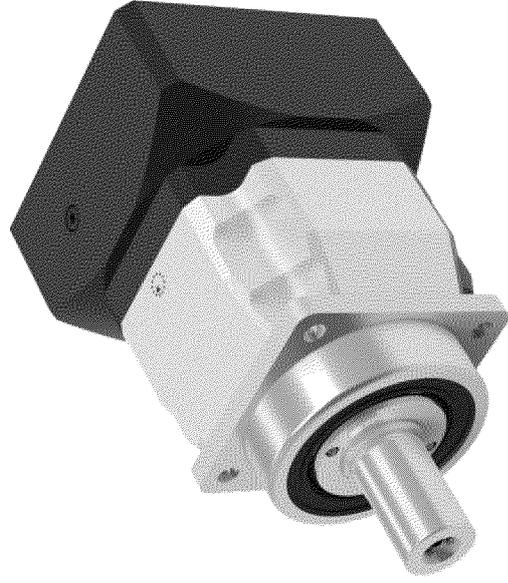


Рисунок 1 – Редуктор AF100

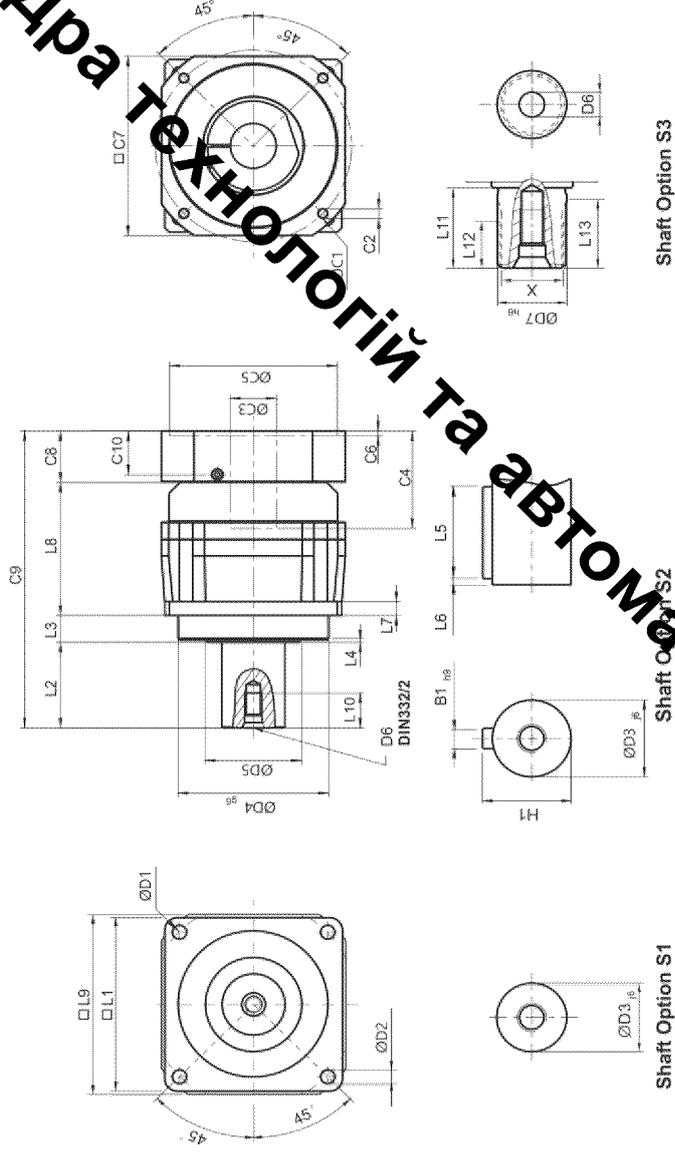


Рисунок 2 – Вресленик редуктора AF100

Model	D1	D2	D3 j6	D4 g6	D6	D7 h6	L1
AF100	120	9	32	80	M12 x 1.75P	32	105
L2	L3	L4	L5	L7	L8	L9	L10
58	30	2	4	5	10	89.5	115
L11	L12	L13	C1	C2	C3	C4	C5
26	15	23	130	M8 x 1.25P	≤32	50	110
C7	C8	C9	C10	B1 h9	H1	X (DIN5480)	
115	19.5	13	10	35	W32 x 1.25 x 30 x 24 x 6m		



Рисунок 1 – Зовнішній вигляд контролера Fanuc R-30iC Plus

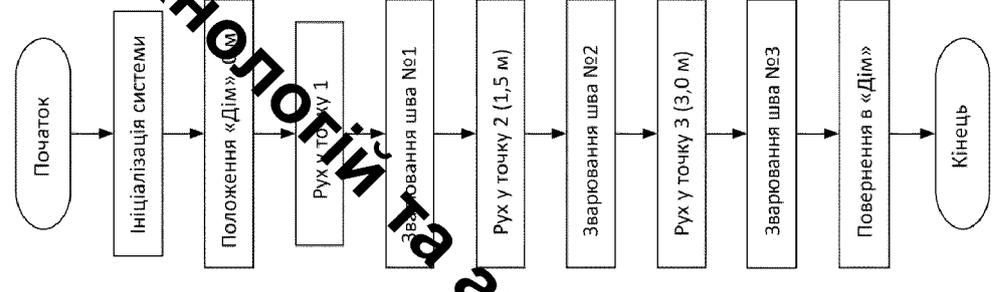


Рисунок 2 – Алгоритм роботи автоматизованого приводу

ЛІСТИНГ 1. «ПРИКЛАД КЕРУЮЧОЇ ПРОГРАМИ ЗВАРЮВАЛЬНОГО ЦИКЛУ»

Програму керування під час зварювання

```
/PROG WELDING_MAIN
/ATTR
OWNER = MNEDITOR;
COMMENT = "Weld 3 Points on Track";
/MN
! --- ПОЧАТКОВА ІНЦІАЛІЗАЦІЯ ---;
1: UFRAME_NUM=1; ! Вибір
системи координат заготовки
2: UTOOL_NUM=1; ! Вибір
інструменту (пальник)
! --- ВИХІД У ДОМАШНЮ ПОЗИЦІЮ ---;
! Перевірка, що каретка (E1) стоїть в 0 мм;
3: J P[1:HOME] 100% FINE ! Всі осі в
безпечну позицію
E1=0.000 mm; ! Каретка на початку
треку
! --- ПЕРЕЇЗД ДО ЗОНИ 1 (ПОЧАТОК) ---;
! Рух платформи на 100 мм і підхід робота
до шва;
4: J P[2:Appr_Zone1] 50% CNT100
E1=100.000 mm;
! --- ЗВАРЮВАННЯ ШВА №1 (ЗА
ТРИМКА) ---;
5: L P[3:WeldStart_1] 1000mm/sec FINE; !
Підхід у точку початку шва
6: Arc Start [1]; ! Запалити дугу
(Режим 1)
7: L P[4:WeldEnd_1] 10.0mm/sec FINE; !
Рух зварювання (довжина шва 50мм)
8: Arc End [1]; ! Погасити
дугу
9: WAIT 1.00 (sec); ! Затримка
для охолодження кратера
! Відхід безпечно вгору;
10: L P[5:Retract_1] 500mm/sec CNT50;
! Синхронний рух: робот міняє позу
платформа іде на 1500 мм;
11: J P[6:Appr_Zone2] 50% CNT100
E1=1500.000 mm;
! --- ЗВАРЮВАННЯ ШВА №2 ---;
12: L P[7:WeldStart_2] 1000mm/sec FINE;
13: Arc Start [1];
14: L P[8:WeldEnd_2] 10.0mm/sec FINE;
15: Arc End [1];
16: WAIT 1.00 (sec);
! --- ЗВАРЮВАННЯ ШВА №3 (ЗА
ТРИМКА) ---;
17: L P[9:Retract_2] 500mm/sec CNT50;
! --- ПЕРЕЇЗД ДО ЗОНИ 3 (КІНЕЦЬ) ---;
! Платформа іде майже в нуль (2900 мм);
18: J P[10:Appr_Zone3] 100% CNT100
E1=2900.000 mm;
! --- ЗВАРЮВАННЯ ШВА №3 ---;
19: L P[11:WeldStart_3] 1000mm/sec FINE;
20: Arc Start [1];
21: L P[12:WeldEnd_3] 10.0mm/sec FINE;
22: Arc End [1];
23: WAIT 1.00 (sec);
! --- ЗАВЕРШЕННЯ І ПОВЕРНЕННЯ ---;
24: L P[13:Safe_Up] 500mm/sec FINE; !
Підняти пальник високо
! Повернення каретки назад на 3 метри у
вихідне положення;
25: J P[1:HOME] 100% CNT10; !
Швидкість 100% (максимальна)
E1=0.000 mm;
/POS
! Тут зберігаються координати точок
(X,Y,Z,W,P,R,E1)
/END
```

ОБҐРУНТУВАННЯ КОНСТРУКЦІЇ РАМИ ПРИВОДУ

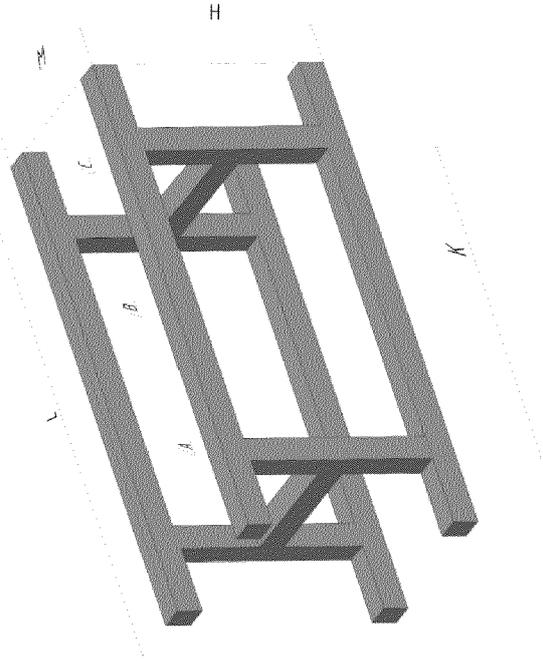


Рисунок 1 – Конструктивне рішення рами приводу

Вихідними даними для розробки несучої конструкції виробу є наступні параметри згідно рисунку 1:

- $K=1025$ мм,
- $M=900$ мм,
- $H=250$ мм,
- $L=4500$ мм.

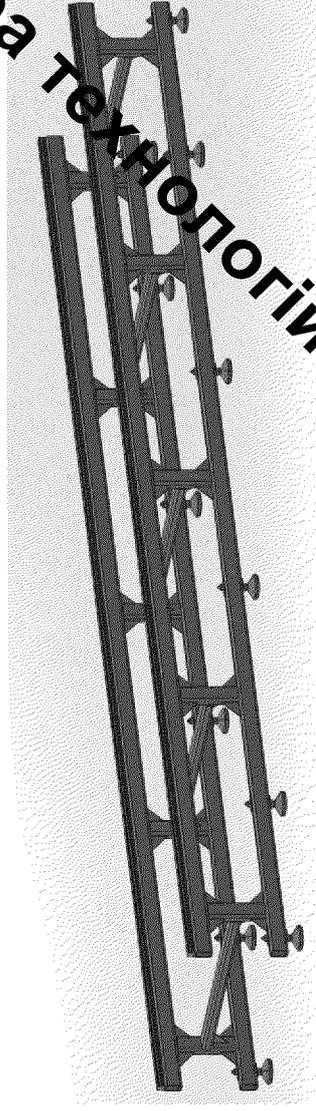


Рисунок 2 – Прототип конструкції рами приводу

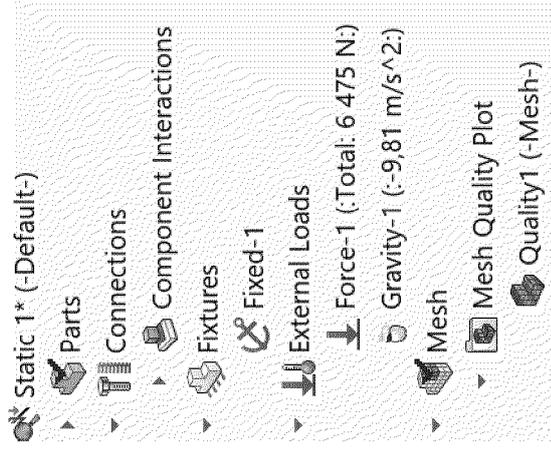
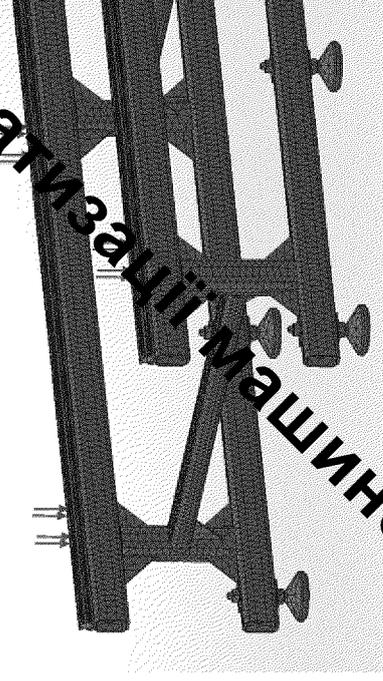


Рисунок 3 – Налаштування для імітаційного моделювання рами

ОБҐРУНТУВАННЯ КОНСТРУКЦІЇ РАМИ ПРИВОДУ

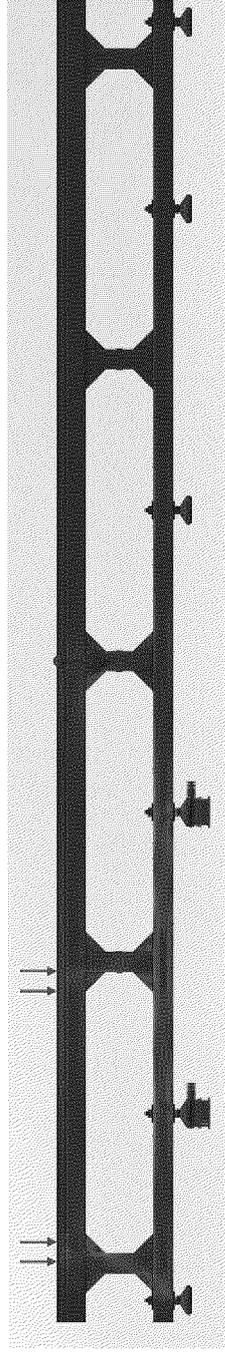


Рисунок 1 – Схема навантаження в лівій позиції рами

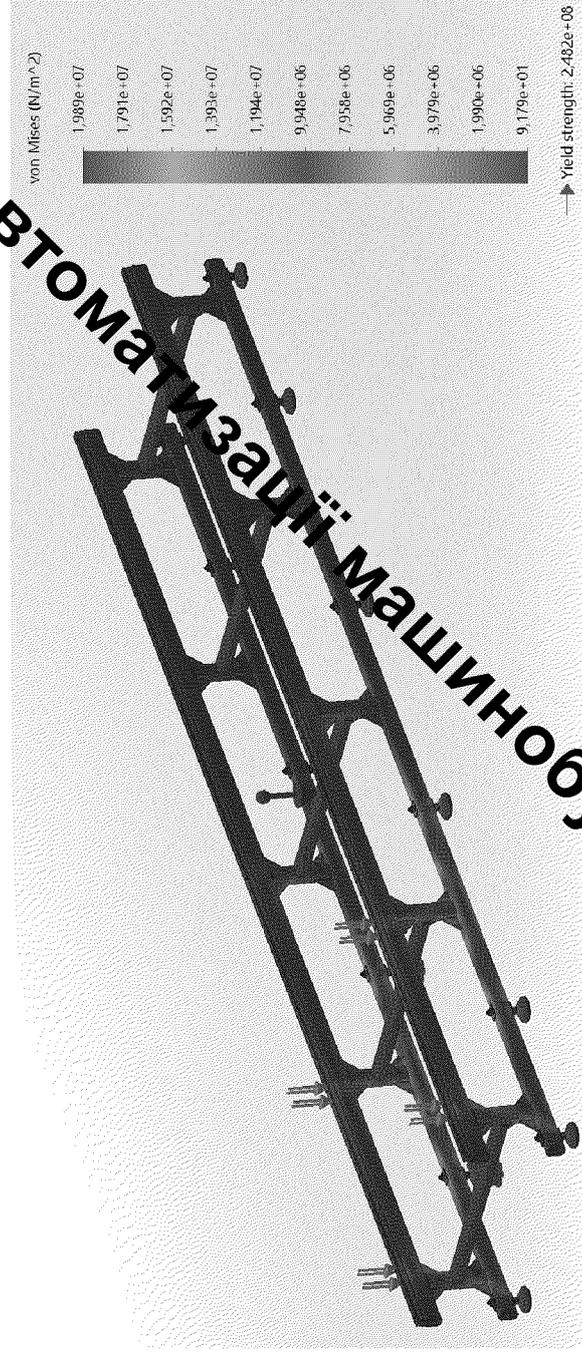


Рисунок 2 – Навантаження, що виникають в конструкції рами

ОБҐРУНТУВАННЯ КОНСТРУКЦІЇ РАМИ ПРИВОДУ

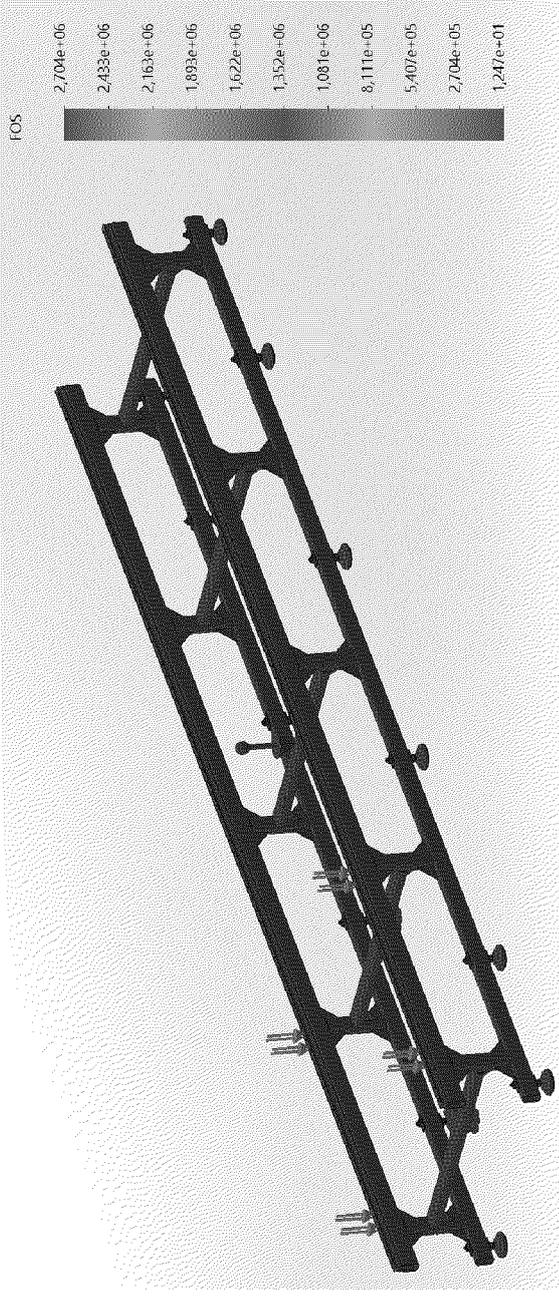


Рисунок 1 – Розрахований коефіцієнт запасу міцності

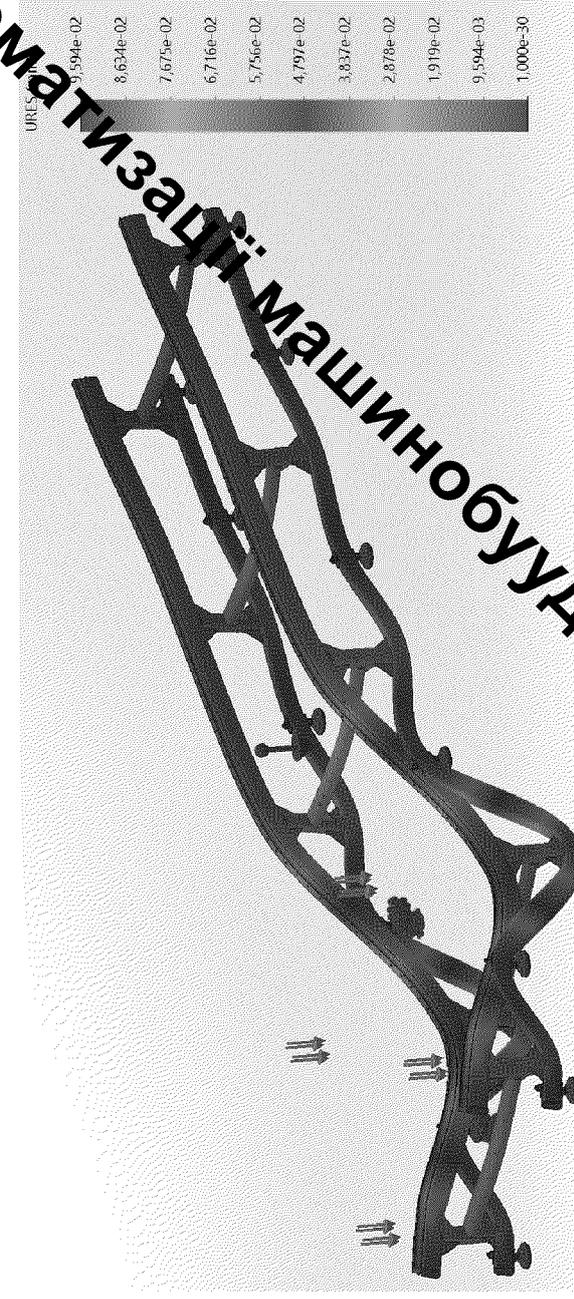


Рисунок 2 – Максимальна деформація, що виникає в конструкції рами

Виходячи отриманих результатів побачити, що при застосуванні труб прямокутного профілю 70x40 мм з товщиною стінки 5,0 мм, а також пластин товщиною 5,0 мм для підсилення жорсткості їх з'єднання, досягається мінімальний запас міцності який виходить більшим за 10,78.

РОЗРАХУНОК ТОЧНОСТІ ПРИВОДУ

Вихідними даними для розрахунку є:

- паспорт для зварювального робота Fanuc Arc Mate 120iD – точність ± 0.03 мм;
- рейкова передача має модуль зуба 3 мм, кількість зубів 25 та ділительний діаметр 75 мм;
- кутовий люфт редуктора 3 кутові хвилини;
- клас точності рейки приймаємо Q6 за ISO 1328 при якому накопичена похибка кроку $\Delta_{\text{track}} = 0.03$ мм на 1000 мм довжини.

Похибка від люфту в редукторі

$$\Delta_{\text{trans}} = \pi \cdot D \cdot \alpha / (360 \cdot 60) \text{ [мм]} \quad (1)$$

Похибка виготовлення рейки

$$\Delta_{\text{geom}} = \Delta_{\text{track}} \cdot 3 \text{ [мм]}, \quad (2)$$

Сумарна похибка лінійного модуля

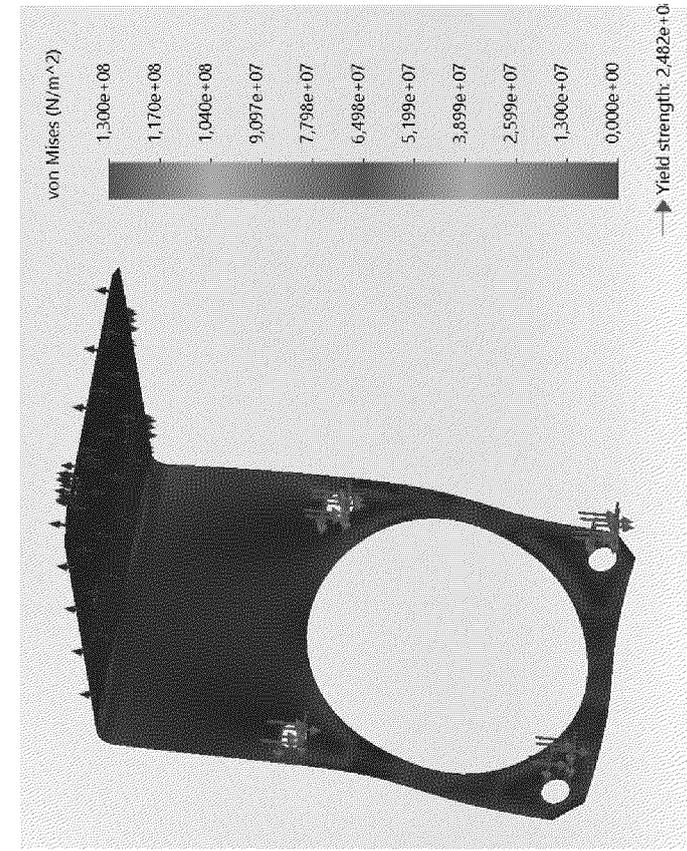
$$\Delta_{\text{axis}} = \sqrt{\Delta_{\text{trans}}^2 + \Delta_{\text{geom}}^2} \text{ [мм]}, \quad (3)$$

Повна точність позиціонування зварювального пальника

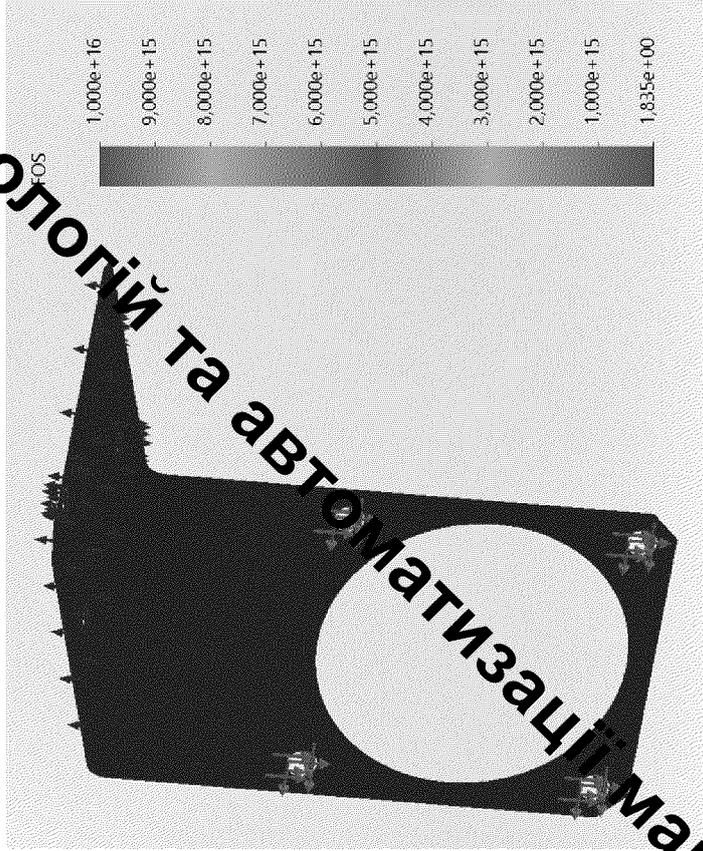
$$\Delta_{\Sigma} = \sqrt{\Delta_{\text{axis}}^2 + \Delta_{\text{robot}}^2} \text{ [мм]}, \quad (4)$$

Отримане значення похибки $\Delta_{\Sigma} = 0,113$ мм досить точний показники. Маючи допуск дугового зварювання (MIG/MAG) на відхиленням пальника ± 0.5 мм (половина діаметра зварювального дроту 1 мм) встановлюємо, що отримана похибка дозволяє в 9 разів краще забезпечити необхідний параметр позиціонування.

ДОСЛІДЖЕННЯ КРОНШТЕЙНУ СЕРВОДИВГУНА НА ВТОМУ МАТЕРІАЛУ



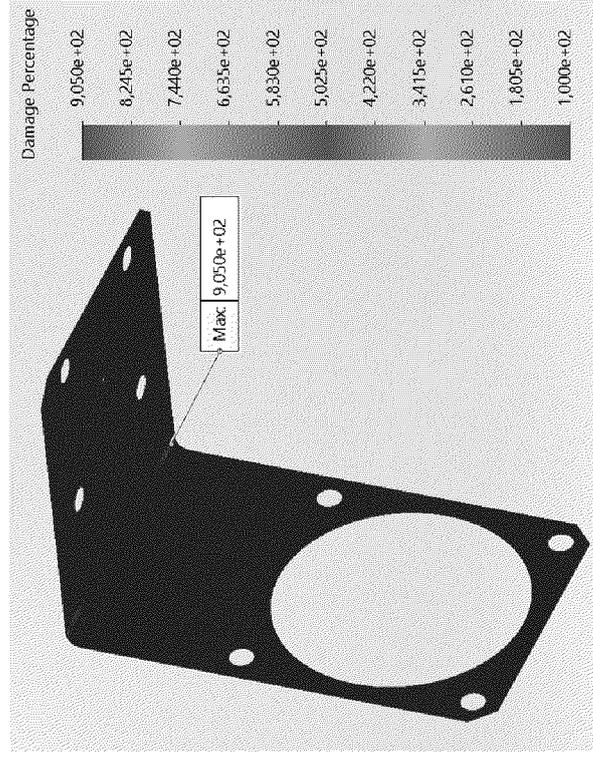
Міцність деталі «Кронштейн» по Мізесу



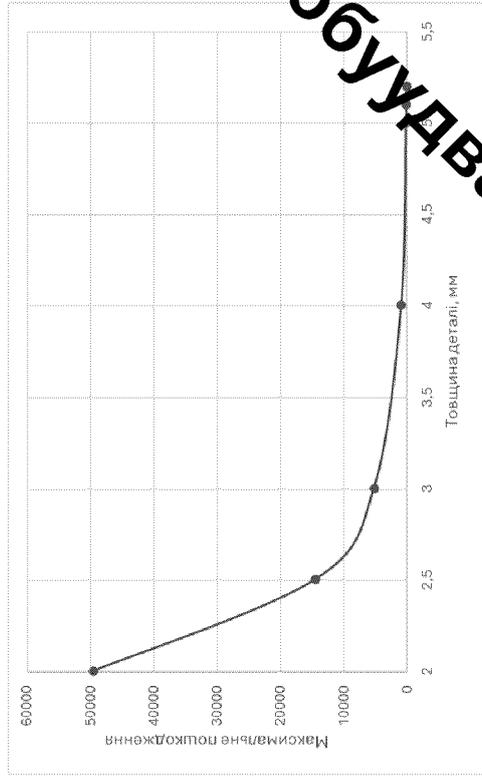
Коефіцієнт запасу міцності деталі «Кронштейн» під статичним навантаженням

ДОСЛІДЖЕННЯ КРОНШТЕЙНУ СЕРВОДИВГУНА НА ВТОМУ МАТЕРІАЛУ

Кафедра технологій та автоматизації машинобудування



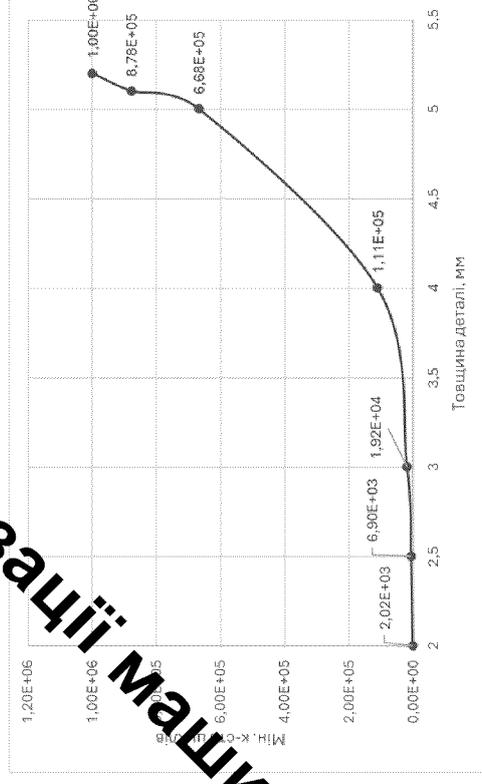
Результат розрахунку пошкодження при дії втомних руйнувань



Залежність пошкодження деталі від її товщини



Результат розрахунку терміну служби при дії втомних руйнувань



Залежність мінімальної кількості циклів роботи деталі від її товщини

РОЗРАХУНОК ТА ПРОЄКТУВАННЯ ІНШИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПРИВОДУ

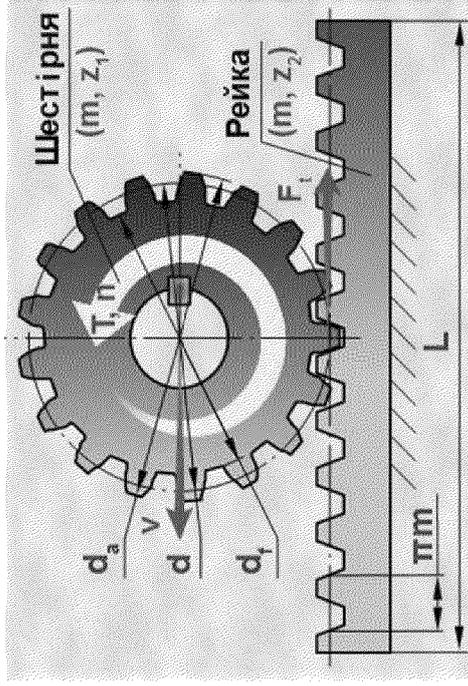


Рисунок 1 – Схема зубчато-рейкової передачі

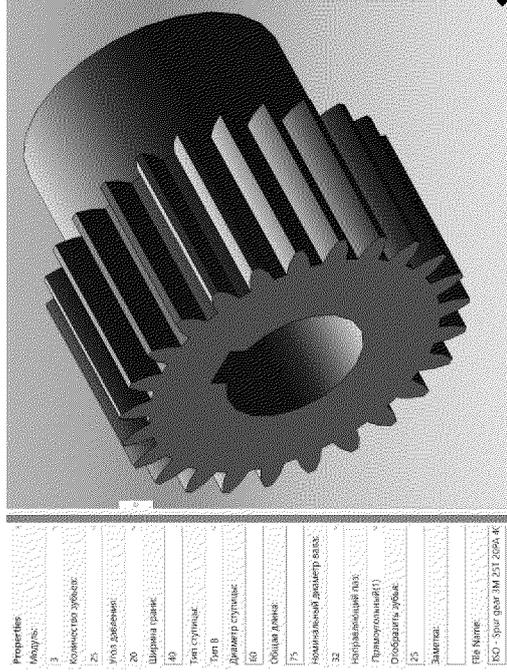


Рисунок 2 – Вибір параметрів для проєктування шестерні

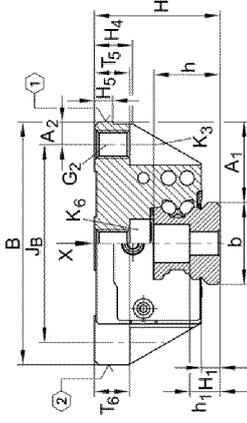
Таблиця 1 – Результати розрахунку зубчато-рейкової передачі

№	Результати розрахунку та вибору параметрів:	Позначення	Значення	Од. вим.
1	Допустимі контактні напруження	$[\sigma_H]$	636,7	МПа
2	Розрахунковий ділительний діаметр шестерні	$d \geq$	51,3	мм
3	Розрахунковий модуль зачеплення	$m \approx$	3,02	мм
4	Назначаємо модуль зубчатої передачі	$m =$	3,00	мм
5	Розрахункове число зубів шестерні	$z_1 \geq$	17,0	шт
6	Призначаємо число зубів шестерні	$z_1 =$	25	шт
7	Ділительний діаметр шестерні	$d =$	75,000	мм
8	Діаметр верхніх зубів шестерні	$d_a =$	81,000	мм
9	Діаметр впадіння шестерні (довідково)	$d_f =$	67,500	мм
10	Ширина зубчастого вінця шестерні	$b_1 \approx$	49,0	мм
11	Ширина зубів рейки	$b_2 \approx$	45,0	мм
12	Діюча сила на шестерні (сила на рейці)	$F_t =$	1 867	Н
13	Потужність на валу шестерні	$P =$	747	Вт
14	Частота обертання валу шестерні	$n =$	101,859	об/хв

РОЗРАХУНОК ТА ПРОЄКТУВАННЯ ІНШИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПРИВОДУ

Вибраний тип напрямних

KUVE35-B



A1	33 mm
Jb	82 mm
b	34 mm
Tolb	-0,005 mm
Tolb	-0,03 mm
A2	9 mm
L1	80 mm
L5	1,65 mm
JL	62 mm
JLZ	52 mm
JL	80 mm
a1,min	20 mm
a1,max	71 mm
a2,min	20 mm
a2,max	71 mm
H1	6,7 mm
H4	14,3 mm
H5	6,75 mm
T5	13 mm
T6	12,3 mm
h	27 mm
H1	14,5 mm
G2	M10

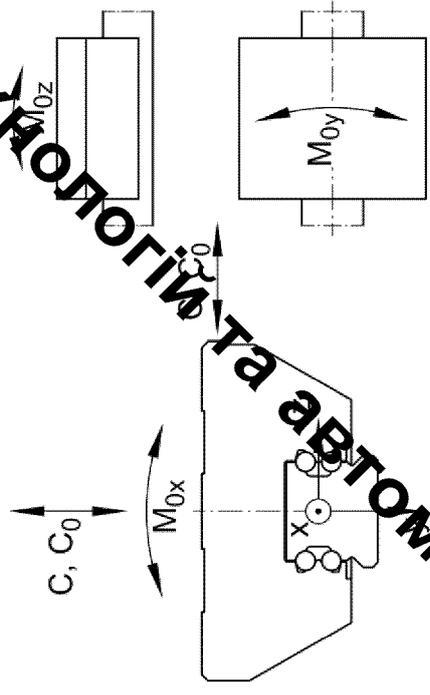
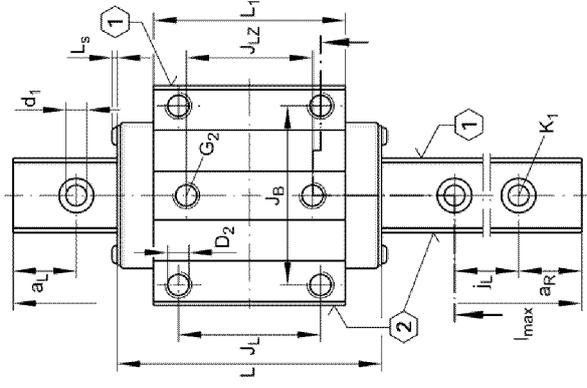


Рисунок 2 – Напрямки дії статичних навантажень на підшипник

Умови сприйняття навантаження $C > R_{ay}, M_{0x} > M_a$ (1)

Рисунок 1 – Обираємо схемне з'єднання по лінійних підшипниках та напрямних

Вибрані напрямні KUVE35-B мають запас по вертикальному зусиллю понад 11,7 разів, а також має запас по статичному моменту в 2 рази.

ВИБІР ЗВАРЮВАЛЬНОГО РОБОТА ТА ЙОГО КОМПОНЕНТІВ ДЛЯ РОБОТИ

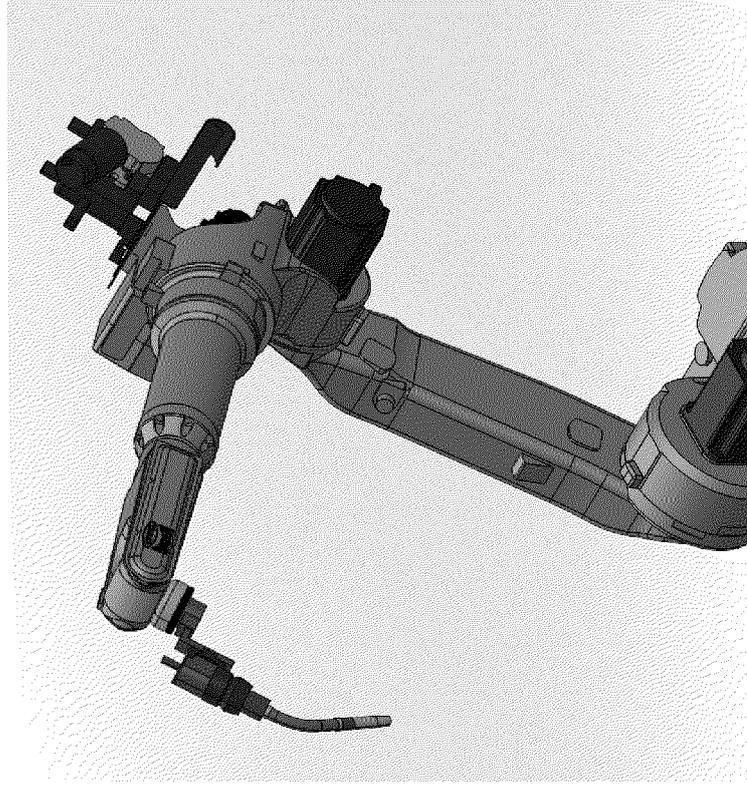


Рисунок 1 – Робот Fanuc Arc Mate 20iD 3
пальником Abicor Binzel ABIGOR W500

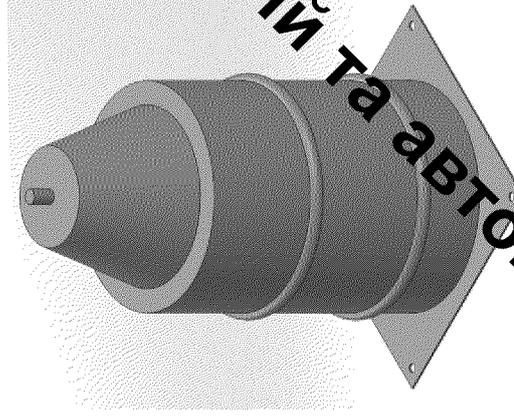


Рисунок 2 – Торшер дроту Marathon Race

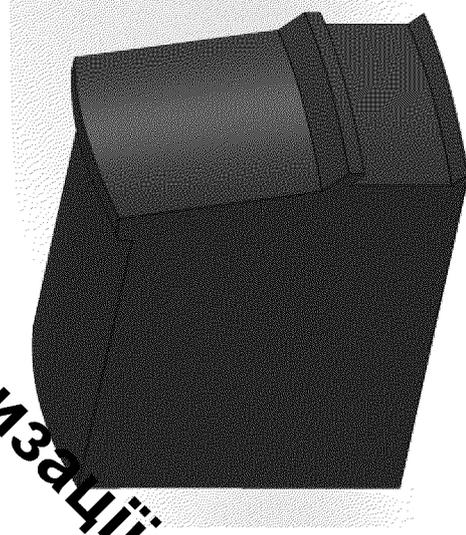
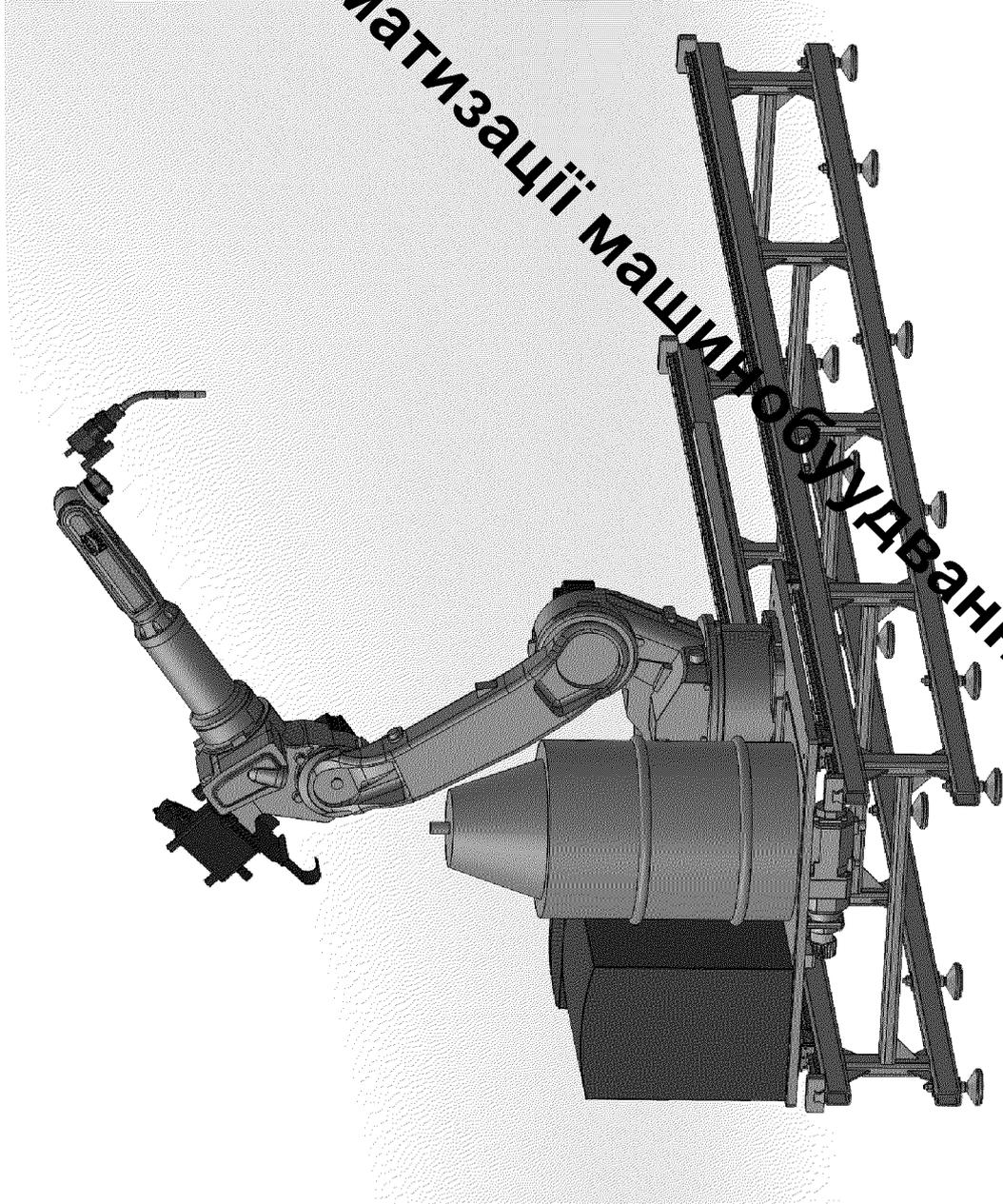


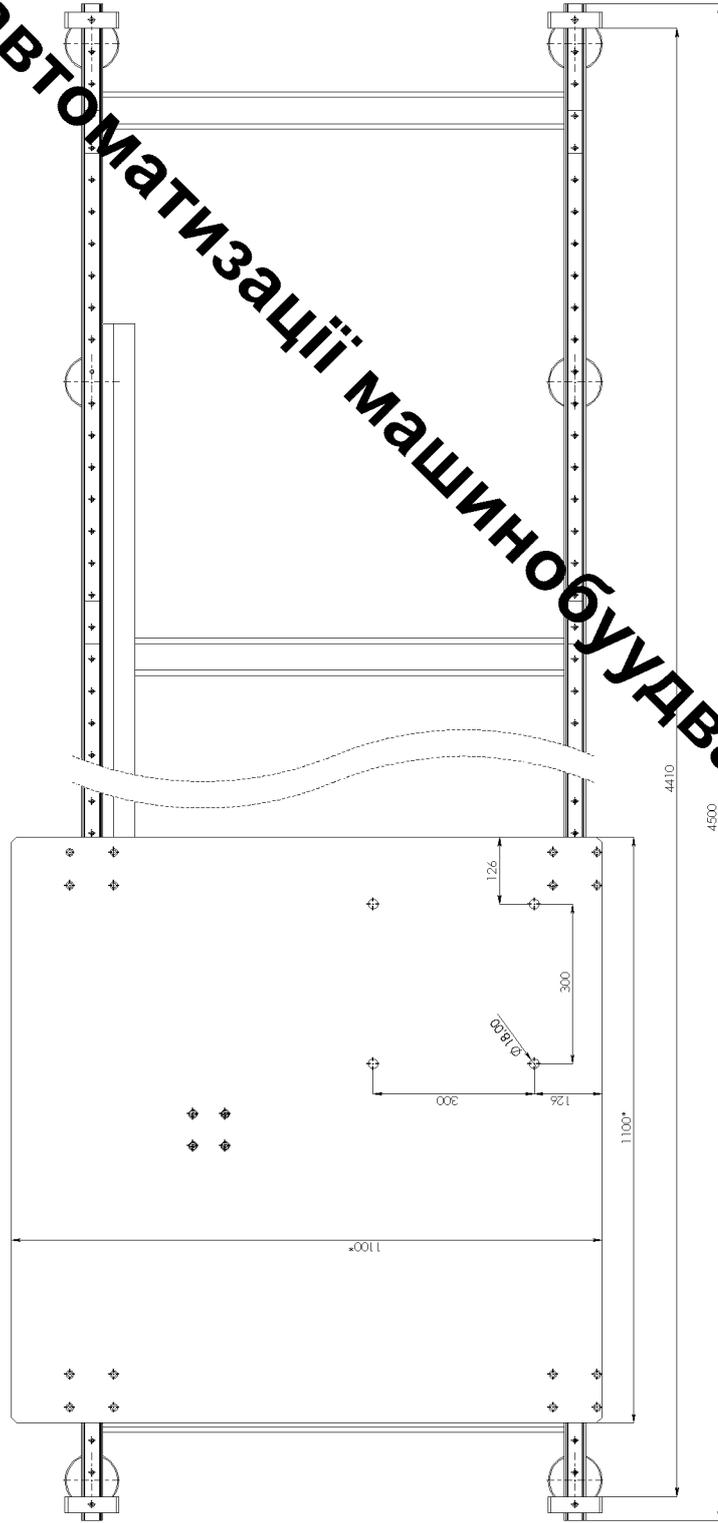
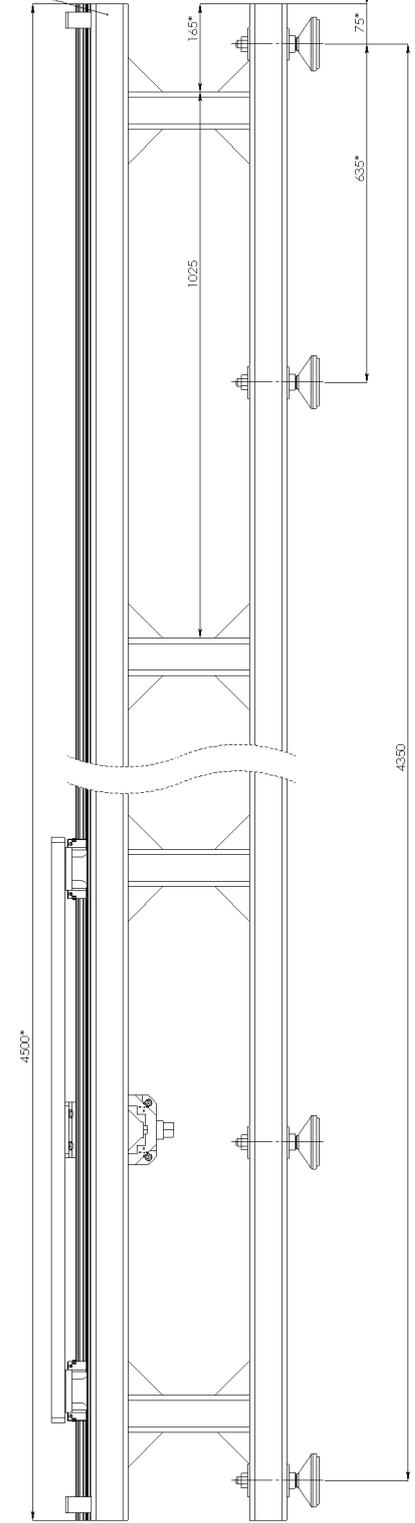
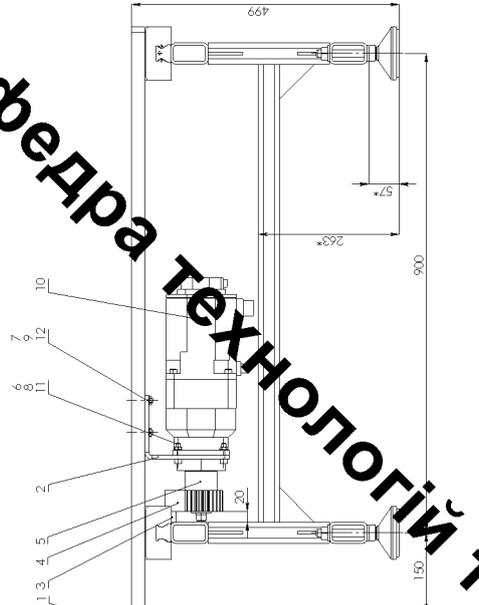
Рисунок 3 – Джерело зварювального
струму Fronius TPS 500i

УДОСКОНАЛЕНИЙ АВТОМАТИЗОВАНИЙ ПРИВОД МОДУЛЯ ЛІНІЙНИХ ПЕРЕМІЩЕНЬ ДЛЯ ВПРОВАДЖЕННЯ У ВИРОБНИЦТВО НА ТОВ «ТЕХНОСМАРТ ГРУП»



- Технічні характеристики модульного переміщення:
- габаритні розміри каретки (в плані) – 1100x1100 мм;
 - вантажопідйомність – 400 кг;
 - макс. швидкість переміщення – 0,4 м/с;
 - робоча швидкість переміщення – 0,02 м/с
 - хід каретки – 3,0 м.
 - максимальна споживана потужність – 0,75 кВт.

Кафедра технологій та автоматизації машинобудування



Технічні характеристики

1. Габаритні розміри каретки, мм 1100x1100
2. Вантажопідйомність, кг 400
3. Максимальна швидкість, м/с 0,4
4. Робоча швидкість переміщення, м/с 0,02
5. Хід каретки, м 3

Технічні вимоги

- 1 * Розміри для довідок
- 2 Машиння напрямних виконуємо через ніпель, що розміщені на підшипниках.
3. Машиння зубасто-рейкової передачі виконуємо мастилами на літасевій основі.

08-64 МКР 26.00.000 СК	
Лист	Масштаб
Модель лінійки переміщень	5/6
Складовий креслення	75
Автори: Т. Мажура Т.	
ВНТУ	
ст. впр. 2/14-2/4	
Котляков	

Код	Зона	Позиція	Позначення	Найменування	Кіл-ть	Примітка
				<u>Документація</u>		
A1			08-64.МКР.26.00.000 СК	Складальне креслення	1	
				<u>Комплекси</u>		
	1		08-64.МКР.26.01.000 СК	Серводвигуна Fapac 6iS 12/3000	1	
				<u>Складальні одиниці</u>		
	2		08-64.МКР.26.02.000 СК	Рама з кареткою	1	
				<u>Деталі</u>		
A3	3		08-64.МКР.26.00.001	Кронштейн	1	
	4		08-64.МКР.26.00.002	Полова	1	
	5		08-64.МКР.26.00.003	Рейка	1	
	6		08-64.МКР.26.00.004	Шестерня	1	
				<u>Стандартні вироби</u>		
				Болт ДСТУ 7798:2008		
	7			M6x25.58	4	
	8			M8x25.58	4	
				Гайка ГОСТ 5916-70		
	9			M6-7H5	4	
	10			M8-7H5	4	
				Шайба ГОСТ 6402-70		
	11			6 65Г	4	
	12			8 65Г	4	

08-64.МКР.26.00.000 СП

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Виконав		Соколовський			Модуль лінійних переміщень	Літ.	Аркуш	Аркушів
Перев.		Піонткевич				Н	1	1
Н.контр.		Сердюк				ВНТУ, гр. 2ПМ-24м		
Затв.		Козлов						

ДОБАТОК В - ЛІСТИНГ 1. «ПРИКЛАД КЕРУЮЧОЇ ПРОГРАМИ
ЗВАРЮВАЛЬНОГО ЦИКЛУ»

```
/PROG WELDING_MAIN
/ATTR
OWNER = WEDITOR;
COMMENT = "Weld 3, Points on Track";
/MN

! --- ПОЧАТКОВА ІНІЦІАЛІЗАЦІЯ --- ;
1: UFRAME_NUM=1 ; ! Вибір системи координат заготовки
2: UTOOL_NUM=1 ; ! Вибір інструменту (пальник)

! --- ВИХІД У ДОМАШНЮ ПОЗИЦІЮ ---
! Перевірка, що каретка (E1) стоїть в 0 мм;
3:J P[1:HOME] 100% FINE ! Всі осі в безпечну позицію
E1=0.000 mm ; ! Каретка на початку треку

! --- ПЕРЕЇЗД ДО ЗОНИ 1 (ПОЧАТОК) --- ;
! Рух платформи на 100 мм і підхід робота до шва;
4:J P[2:Appr_Zone1] 50% CNT100
E1=100.000 mm ;

! --- ЗВАРЮВАННЯ ШВА №1 (ЗА ТРИМКА) --- ;
5:L P[3:WeldStart_1] 1000mm/sec FINE ; ! Підхід у точку початку шва
6: Arc Start [1] ; ! Запалити дугу (Режим 1)
7:L P[4:WeldEnd_1] 10.0mm/sec FINE ; ! Рух зварювання (довжина шва 50мм)
8: Arc End [1] ; ! Погасити дугу
9: WAIT 1.00 (sec) ; ! Затримка для охолодження кратера

! Відхід безпечно вгору;
10:L P[5:Retract_1] 500mm/sec CNT50 ;

! --- ПЕРЕЇЗД ДО ЗОНИ 2 (СЕРЕДИНА) --- ;
! Синхронний рух: робот міняє позу, платформа їде на 1500 мм;
11:J P[6:Appr_Zone2] 50% CNT100
E1=1500.000 mm ;
```

Кафедра технологій та автоматизації машинобудування

! --- ЗВАРЮВАННЯ ШВА №2 --- ;
12:L P[7:WeldStart_2] 1000mm/sec FINE ;
13: Arc Start [1] ;
14: P[8:WeldEnd_2] 10.0mm/sec FINE ;
15: Arc End [1] ;
16: WAIT 1.00 (sec) ;

17:L P[9:Retract_2] 500mm/sec CNT50 ;

! --- ПЕРЕЇЗД ДО ЗОНИ 3 (КІНЕЦЬ) --- ;
! Платформа їде майже в кінець (2900 мм);
18:J P[10:Appr_Zone3] 50% CNT100
E1=2900.000 mm ;

! --- ЗВАРЮВАННЯ ШВА №3 --- ;
19:L P[11:WeldStart_3] 1000mm/sec FINE ;
20: Arc Start [1] ;
21:L P[12:WeldEnd_3] 10.0mm/sec FINE ;
22: Arc End [1] ;
23: WAIT 1.00 (sec) ;

! --- ЗАВЕРШЕННЯ І ПОВЕРНЕННЯ --- ;
24:L P[13:Safe_Up] 500mm/sec FINE ; ! Підняти пальник високо

! Повернення каретки назад на 3 метри у вихідне положення;
25:J P[1:HOME] 100% CNT10 ; ! Швидкість 100% (максимальна)
E1=0.000 mm ;

/POS

! Тут зберігаються координати точок (X,Y,Z,W,P,R,E1)

/END