

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Приладобудівний факультет
Кафедра автоматизації та систем неруйнівного контролю**

«До захисту допущено»
В. о. завідувача кафедри
_____ Галина БОГДАН

« ____ » _____ 2025 р.

Дипломний проєкт
на здобуття ступеня бакалавра
за освітньо-професійною програмою «Комп'ютерно-інтегровані системи
та технології в приладобудуванні»
спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»
на тему: «Маніпулятор для заміни ТВЕЛів»

Виконав:
студент IV курсу, групи ПК-11
Черненко Матвій Олексійович _____

Керівник:
доцент, к.т.н.
Богдан Галина Анатоліївна _____

Рецензент:
доцент, к.т.н.
Козир Олег Васильович _____

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

Студент _____
(підпис)

Київ – 2025 року

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТУ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	A4	ПК11.13. 1760.00.000 ПЗ	Пояснювальна записка	65	
2	A1	ПК11.13. 1760.00.001 ЕЗ	Схема структурна	1	
3	A1	ПК11.13. 1760.00.002 СК	Складальний кресленик	1	
4	A1	ПК11.13. 1760.00.003 ЕЗ	Схема електрична принципова	1	
5	A1	ПК11.13. 1760.00.004 ЕЗ	Алгоритм	1	

				ДП ПК11.13.1760.00.000		
	ПІБ	Підп.	Дата			
Розробник	Черненко М.О.			Відомість дипломного проекту	Лист	Листів
Керівник	Богдан Г.А.				1	65
Консульт.					КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. АСНК Гр. ПК-11	
Н/контр.						
В. о. Зав кафедри.	Богдан Г.А.					

**Пояснювальна записка
до дипломного проєкту
на тему: «Маніпулятор для заміни ТВЕЛів»**

Київ – 2025 року

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

Кафедра автоматизації та систем неруйнівного контролю

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

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

Освітньо-професійна програма «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні»

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри

_____ Галина БОГДАН

«__» _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проєкт студенту

Черненко Матвій Олексійович

1. Тема роботи «Маніпулятор для заміни ТВЕЛів», керівник роботи Богдан Галина Анатоліївна, кандидат технічних наук, доцент, затверджені наказом по університету від «26» травня 2025 р. №1765-с
2. Термін подання студентом проєкту 1.06.2025
3. Вихідні дані до проєкту: розробка макету маніпулятора для заміни ТВЕЛів.
4. Зміст пояснювальної записки
 1. Вступ
 2. Аналітичний огляд
 3. Розробка
 4. Висновки
 5. Список використаних джерел
5. Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням плакатів, презентацій тощо) 1 креслиник 1 плакати
 - 1 – Схема структурна
 - 2 – Схема електрична принципова
 - 3 – Складальний кресленик

4 – Алгоритмч

6. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Формулювання завдання проекту	12.02.2025	
2	Проведення аналітичного огляду	18.05.2025	
3	Розробка	21.05.2025	
4	Розробка алгоритму роботи	28.05.2025	
5	Розробка креслеників	01.06.2025	

Студент

Матвій ЧЕРНЕНКО

Керівник

Галина БОГДАН

Анотація

У бакалаврському дипломному проєкті сконцентовано увагу на актуальність питання автоматизації технологічного процесу заміни тепловиділяючих елементів (ТВЕЛів) на ядерних енергетичних установках. У зв'язку з підвищеною небезпекою, складністю конструкції та обмеженим доступом до зони обслуговування, виявлено необхідність розробки роботизованого маніпулятора, який забезпечить безпечне, точне та надійне виконання маніпуляцій з ТВЕЛами.

На основі аналітичного огляду поточного стану атомної енергетики, конструкції паливних елементів та методів їх переміщення було сформовано технічне завдання на розробку електромеханічного маніпулятора з механічним захопленням.

В межах проєкту спроектовано тривимірну 3D-модель конструкції та побудовано фізичний прототип пристрою.

Конструкція маніпулятора передбачає модульну побудову з трьома ступенями свободи по координатних осях абсис(X), ординат(Y), апліка(Z) та захватним механізмом типу «схват». Захват оснащено системою регулювання кута відкриття кігтів, що дозволяє адаптацію до геометричних особливостей ТВЕЛів. Для реалізації точного позиціонування використано крокові двигуни 28BYJ-48 з редукторами які керуються мікроконтролером Arduino Mega 2560 Rev3. Електрична схема системи містить стабілізатори напруги, операційні підсилювачі та ключові елементи захисту, що забезпечують стабільну та безпечну роботу всієї системи.

Виконані розрахунки підтвердили відповідність параметрів обраних компонентів механічним навантаженням. Алгоритм роботи системи реалізує повністю автоматизований цикл переміщення ТВЕЛів, з можливістю повторення дій без ручного втручання. Прототип конструкції успішно зібраний та продемонстрував працездатність, точність та стабільність у модельному середовищі.

Запропонована система маніпулятора є технічно обґрунтованою, енергозберігаючою, адаптованою до навчальних та дослідницьких цілей.

Робота складається з вступу, 3 розділів, висновків, 27 рисунків, 5 таблиць, списку використаних джерел із 19 позиції. Загальний обсяг роботи – 53 сторінок, з яких основна частина викладена на 40 сторінках.

Ключові слова: автоматизація, ядерна енергетика, маніпулятор, захват, робототехніка.

Annotation

The bachelor's degree project focuses on the relevance of the issue of automation of the technological process of replacing fuel elements (TVELs) at nuclear power plants. Due to the increased danger, complexity of the design and limited access to the service area, the need was identified to develop a robotic manipulator that will ensure safe, accurate and reliable manipulation of fuel elements.

On the basis of an analytical review of the current state of nuclear energy, the design of fuel cells and methods of their movement, a technical assignment was formed for the development of an electromechanical manipulator with a mechanical grip.

As part of the project, a three-dimensional 3D-model of the structure was designed and a physical prototype of the device was built.

The design of the manipulator involves a modular construction with three degrees of freedom along the coordinate axes of the abscissa (X), ordinate (Y), and applicative (Z) and a gripping mechanism of the "grab" type. The grip is equipped with a claw angle adjustment system, which allows adaptation to the geometric features of fuel elements. To implement accurate positioning, stepper motors 28BYJ-48 with gearboxes controlled by the Arduino Mega 2560 Rev3 microcontroller were used. The electrical circuit of the system contains voltage stabilizers, operational amplifiers and key protection elements that ensure stable and safe operation of the entire system.

The performed calculations confirmed the compliance of the parameters of the selected components with mechanical loads. The system operation algorithm implements a fully automated cycle of fuel elements movement, with the possibility of repeating actions without manual intervention. The prototype design was successfully assembled and demonstrated performance, accuracy and stability in the model environment.

The proposed manipulator system is technically sound, energy-saving, adapted to educational and research purposes.

The work consists of an introduction, 3 sections, conclusions, 27 figures, 5 tables, a list of used sources from 19 positions. The total amount of work is 53 pages, of which the main part is presented on 40 pages.

Keywords: automation, nuclear power, manipulator, capture, robotics.

Зміст

РОЗДІЛ 1 Аналітичний огляд	133
1.1. Актуальність розробки	133
1.2. Огляд існуючих конструкцій маніпуляторів	177
1.2.1. Гідравлічні маніпулятори	177
1.2.2. Електромеханічні маніпулятори	188
1.2.3. Роботизовані маніпулятори з дистанційним керуванням	19
1.2.4. Маніпулятори з магнітним захопленням	221
1.3. Формування завдання на дипломний проект	222
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1	244
РОЗДІЛ 2 ПРОЄКТУВАННЯ, ПІДБІР ЕЛЕМЕНТНОЇ БАЗИ	255
2.1. Структурна схема пристрою	255
2.2. Електрична принципова схема	266
2.3. Алгоритм роботи маніпулятора	278
2.4. Підбір елементної бази	291
2.4.1. Мікроконтролер Arduino Mega 2560 Rev3	291
2.4.2. Кроковий двигун	302
2.4.3. Клавіатура	313
2.5. Розрахунок потужності крокових двигунів	335
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2	40
РОЗДІЛ 3 КОНСТРУКЦІЯ МАНІПУЛЯТОРА	402
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3	51
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	502
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	524

					ПК11.13.1760.00.000ПЗ			
Змн.	Ар	№ до	Підпи	Дата	Маніпулятор для заміни ТВЕЛів			
Розробив	Черненко М.О.							
Перевір.рев	Богдан Г.А.							
Реценз.								
Н. Контр.								
Затверд.	Богдан Г.А.				ПБФ, ПК-11			

ВСТУП

Ядерна енергетика є важливою складовою сучасної енергетичної галузі, оскільки є потужним, екологічно чистим та ефективним джерелом електроенергії. Атомні електростанції (АЕС) є стабільними генераторами з мінімальним впливом на навколишнє середовище і не піддаються впливу погодних умов, на відміну від альтернативних джерел енергії. Актуальність і перспективи досліджень у цій сфері визначаються тим, що атомна енергетика досі залишається одним з основних джерел енергопостачання в Україні.

Ключовим елементом конструкції ядерного реактора є тепловиділяючий елемент (ТВЕЛ), який містить ядерне паливо. Під час експлуатації паливні елементи зазнають значних теплових, механічних та радіаційних навантажень, що вимагає їх періодичної заміни. Процес вилучення та встановлення паливних елементів є складною технічною процедурою, що супроводжується підвищеними вимогами до точності, безпеки та захисту персоналу від іонізуючого випромінювання.

У зв'язку з цим актуальним завданням є впровадження автоматизованих і роботизованих систем, які мінімізують вплив людини, підвищують ефективність обслуговування реакторів, скорочують час їх простою. Існуючі типи маніпуляторів, такі як гідравлічні, електромеханічні, магнітні та дистанційно керовані роботизовані системи, мають як переваги, так і обмеження. Тому для обґрунтування вибору оптимального рішення потрібен детальний техніко-економічний аналіз.

На основі аналізу технічних характеристик та функціональних можливостей різних типів маніпуляторів, у межах даного бакалаврського проєкту сформульовано та реалізовано концепцію електромеханічного маніпулятора з механічним захопленням, керованого на базі мікропроцесорної платформи. Обрана конструкція дозволяє здійснювати точне тривимірне позиціонування механізму захоплення, що дозволяє автоматизувати процес заміни паливних елементів при дотриманні вимог безпеки, точності та надійності.

					ПК11.13.1760.00.000ПЗ	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Метою роботи є проектування, моделювання та прототипування маніпулятора для переміщення паливних елементів, який може бути використаний для навчальних та дослідницьких цілей для розробки алгоритмів управління, тестування механічних рішень та моделювання операційних сценаріїв у безпечних умовах.

					ПК11.13.1760.00.000ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1

АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

1.1. Актуальність розробки

Сучасна енергетична промисловість значною мірою орієнтується на використання атомної енергетики, яка є ключовим компонентом в глобальній системі виробництва електроенергії. Завдяки здатності забезпечувати великі обсяги генерації при мінімальному впливі на навколишнє середовище, атомні електростанції (АЕС) становлять основу енергетичних систем багатьох розвинених країн, в тому числі і в Україні [1].

Основними перевагами ядерної енергетики є висока потужність генеруючих блоків, низький рівень викидів парникових газів в атмосферу порівняно з традиційними тепловими електростанціями, здатність до тривалого, безперервного виробництва електроенергії. Такі характеристики забезпечують її конкурентоспроможність у порівнянні з іншими методами генерації, зокрема з відновлюваними джерелами енергії, на продуктивність яких дуже сильно впливають погодні умови. На рис. 1.1 представлено діаграму, яка ілюструє структуру розподілу світового виробництва електроенергії за видами джерел [6].



Рис 1.1 Діаграма виробництва електроенергії в Україні

В АЕС в якості основного генеруючого електроенергію елемента виступає тепловиділяючий елемент (ТВЕЛ) (рис. 1.2.), який містить ядерне паливо, найчастіше у вигляді таблеток діоксиду урану (UO_2), що укладені в герметичну оболонку (рис. 1.3) [7]. Заміна паливних елементів - один з складних технологічних процесів, що супроводжують роботу ядерних реакторів, оскільки:

- після використання вони мають досить високий радіоактивний фон, який небезпечний для людини;
- робота ТВЕЛів відбувається в надзвичайно складних умовах (температури до 300–400 °С, тиск — 150–160 атмосфер, потужне нейтронне випромінювання), що призводить до втрати ними механічної міцності, появі пошкоджень, що суттєво ускладнює їх вилучення з реактора та транспортування;
- необхідність автоматизації процесу вилучення та заміни ТВЕЛів.



Рис 1.2 ТВЕЛів

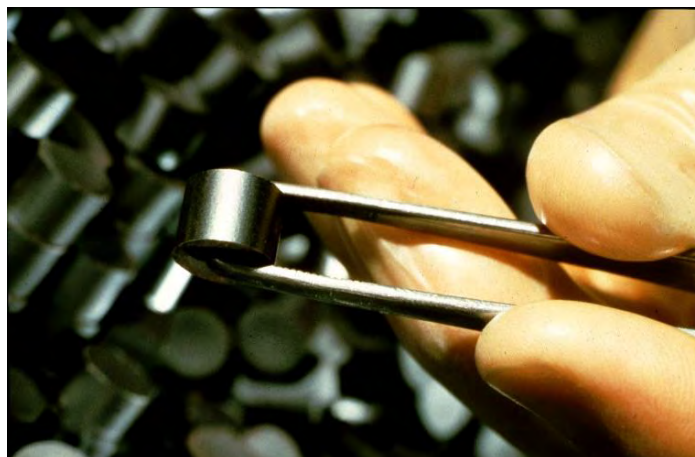


Рис 1.3 Паливний елемент ТВЕЛів

Паливні елементи в паливних збірках зазвичай експлуатуються протягом 2-3-річних паливних кампаній в наступних режимах:

- Стандартний вихід реактора на повну потужність (перехід від холодного до номінального стану шляхом нагрівання теплоносія до 320 °С при тиску 16 МПа);
- Робота на потужності;
- Реактор зупиняється звичайним способом, коли паливний басейн (ПБ) охолоджується до температури навколишнього середовища;
- Реактор зупиняється через надзвичайну ситуацію[18].

Навантаження, що діють на оболонку при номінальних стаціонарних режимах, добре відомі. Стінки ТВЕЛУ складаються з цирконію або інших сплавів, стійких до дії радіації, що забезпечує герметичність і захист від викиду радіоактивних речовин.(рис 1.4)[2]

Робота паливних елементів призводить до зміни фізико-механічних характеристик матеріалів внаслідок радіаційних пошкоджень, механічної втоми, фізико-хімічної взаємодії з теплоносіями та продуктами поділу.

Незважаючи на достатню початкову міцність та пористість паливної гранули, розтріскування відбувається після першого збільшення потужності. Радіальні тріщини відбуваються переважно в зовнішній кільцевій області таблетки, коли відбувається збільшення потужності, тоді як внутрішня область стає більш нагрітою і швидше стає пластичною. Поступове зникнення зазору між оболонкою і ядром буде викликано циклічною зміною потужності, оскільки фрагменти таблеток в оболонці викликані як набряком, так і пластичною деформацією внутрішнього ядра. Чим більше лінійної потужності, тим менше циклів необхідно для усунення зазору.

Під час стаціонарної роботи паливних елементів у зарубіжних реакторах водяного охолодження продукти поділу вивільняються зі швидкістю приблизно 4%, навіть при глибині вигорання до 56 МВт/кг, що мало або майже не впливає на продуктивність паливних елементів.[18]

					ПК11.13.1760.00.000ПЗ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

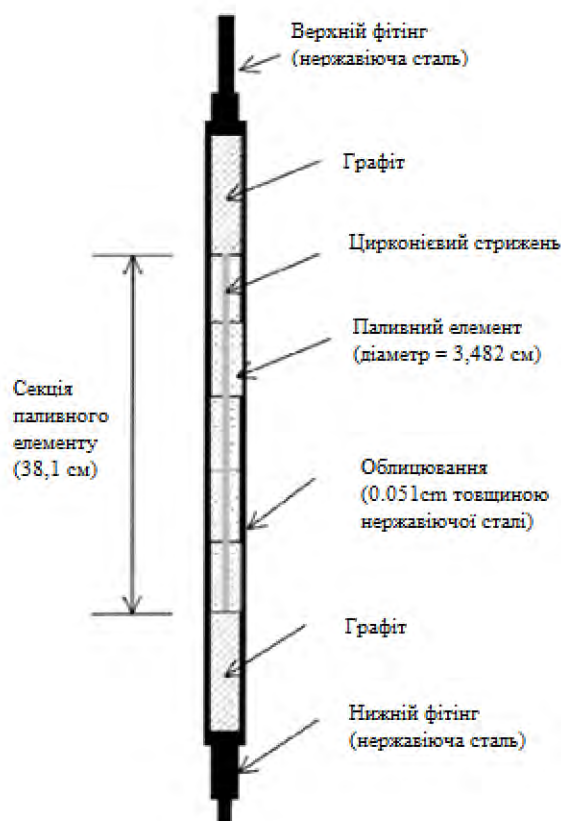


Рис 1.4 Будова ТВЕЛа[9]

Необхідність автоматизації процесу заміни ТВЕЛів.

Оскільки реактор працює постійно, паливо поступово вигорає і втрачає ефективність, що вимагає частої заміни паливних елементів, що є складною і відповідальною процедурою.

Механічні маніпулятори, керовані оператором, використовуються в традиційних методах заміни, але ці процеси мають ряд недоліків:

- Через високий рівень радіації персонал зобов'язаний працювати в зоні з підвищеною радіаційною небезпекою.
- Механічні пошкодження паливних елементів або інших компонентів реактора можуть бути викликані людськими факторами, такими як помилки оператора.
- Можливість неправильної установки або пошкодження паливних елементів при заміні є ризиком виникнення аварійних ситуацій.

- Ручне управління маніпуляторами займає багато часу і вимагає висококваліфікованого персоналу.

Впровадження автоматизованих роботизованих маніпуляторів дозволить мінімізувати вплив людського фактору, підвищити точність та безпеку проведення операцій, і як наслідок скоротити час простою реакторної установки під час технічного обслуговування. [3]

1.2. Огляд існуючих конструкцій маніпуляторів

На сьогоднішній день в атомній енергетиці паливні збірки (ТВЕЛ) працюють з використанням різних типів маніпуляторів.

Основними критеріями вибору цих маніпуляторів є:

- Точний і надійний рух паливних елементів.
- Мінімізація радіаційного впливу на персонал і забезпечення безпеки операцій.
- Здатність довго та безперебійно працювати в умовах високої радіації.

Розглянемо основні типи маніпуляторів, які використовуються для заміни паливних елементів.[4]

1.2.1. Гідравлічні маніпулятори

Гідравлічні маніпулятори функціонують на основі гідравлічного приводу, в якому передача зусилля здійснюється через стиснуту рідину (зазвичай мінеральне масло). Вони використовуються для захоплення, підйому та переміщення різноманітних об'єктів, в тому числі їх можна використовувати для переміщення ТВЕЛів; мають можливість повної автоматизації приводу та дистанційного керування.

Прикладом гідравлічного маніпулятора є ТВС-2М (рис 1.5), який використовується на реакторах типу ВВЕР-1000 для автоматизованого завантаження та вивантаження ТВЕЛів.

					ПК11.13.1760.00.000ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

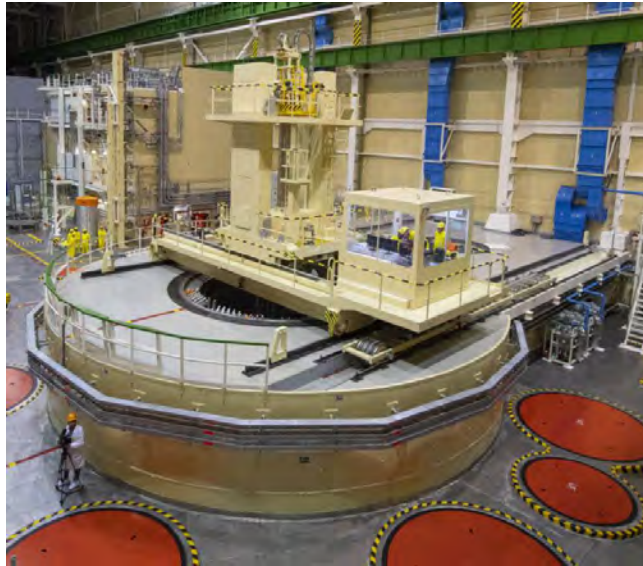


Рис 1.5 Гідравлічний маніпулятор ТВС-2М

Переваги та недоліки даного типу маніпуляторів наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1. – Переваги та недоліки гідравлічних маніпуляторів

Переваги:		Недоліки:	
Простота конструкції	та	Обмежена мобільність	
Висока надійність у роботі		Ризик витоку робочої рідини (гідравлики), що може спричинити аварію	
		Висока інерційність рухів.	

1.2.2. Електромеханічні маніпулятори

Це механічні пристрої, які керуються електричними сигналами та використовуються для виконання різних завдань, пов'язаних з переміщенням об'єктів. В якості рушійної сили кінематичних ланок маніпулятора, зазвичай використовують електродвигуни. Кількість ступенів вільності та напрямки переміщень визначаються поставленим завданням. Система управління найчастіше будується на базі промислових мікроконтролерів.

Прикладом електромеханічного маніпулятора є MRP (Mitsubishi Heavy Industries, Японія)(рис 1.6) [10]

Даний маніпулятор використовує сервоприводи для точної установки паливних збірок у реакторному відсіку. Його конструкція дозволяє виконувати операції з високою точністю і мінімальним впливом на персонал.



Рис 1.6. Електромеханічний маніпулятор MRP

Переваги та недоліки даного типу маніпуляторів наведено в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2. – Переваги та недоліки електромеханічних маніпуляторів

Переваги:	Недоліки:
Висока точність роботи	Вимагає спеціального технічного обслуговування
Мінімізація людського фактора	Висока складність програмування
Наявність вбудованих систем контролю радіаційного рівня	

1.2.3. Роботизовані маніпулятори з дистанційним керуванням

Це механічні пристрої, які імітують рухи людської руки та виконують різні дії за командою оператора. Принцип їхньої роботи базується на

використанні: сенсорів різного типу, що дозволяють точно визначати місцеположення, прикладене зусилля, тощо та приводів із системою керування.

Refueling Machine (Westinghouse Electric Company, США) є типовим представником такого класу маніпуляторів (рис 1.7) [11].

Refueling Machine – це автоматизований маніпулятор, який використовується для перевантаження палива в реакторах типу PWR (Pressurized Water Reactor). Основним завданням цієї системи є вилучення відпрацьованих ТВЕЛів і встановлення нових паливних елементів у визначені позиції активної зони реактора.[12]



Рис 1.7 Refueling Machine

Переваги та недоліки даного типу маніпуляторів наведено в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3. – Переваги та недоліки роботизованих маніпуляторів

Переваги:	Недоліки:
Висока точність заміни ТВЕЛів	Висока вартість
Повна автоматизація процесу	Потребує складної попередньої калібровки
Можливість роботи у складних радіаційних умовах	

1.2.4. Маніпулятори з магнітним захопленням

Маніпулятори з магнітним захопленням — це різновид роботизованих маніпуляторів, які використовують магнітне поле для захоплення та утримання об'єктів. Найчастіше вони працюють з феромагнітними матеріалами (залізо, сталь тощо).

Представником такого типу є маніпулятор MAGS (Magnetically Assisted Grab System)(рис 1.8) [13], розробник: General Electric Hitachi Nuclear Energy.

MAGS – це магнітний маніпулятор, який використовується для маніпулювання компонентами ядерного реактора, зокрема для переміщення ТВЕЛів та інших металевих конструкцій усередині активної зони.



Рис 1.8 MAGS

Переваги та недоліки даного типу маніпуляторів наведено в таблиці 1.4.

Таблиця 1.4. – Переваги та недоліки маніпуляторів з магнітним захопленням

Переваги:	Недоліки:
Безконтактне захоплення	Працюють лише з феромагнітними об'єктами
Зберігають надійність при роботі в забруднених середовищах	Мильні магнітні поля можуть заважати електроніці
Простота конструкції	

В таблиці 1.5 наведено порівняння розглянутих типів захватів автоматизованих систем по переміщенню ТВЕЛів.

Таблиця 1.5. – Порівняльна таблиця типів захватів для переміщення ТВЕЛів

	Гідравлічний	Механічний	Магнітний
Вантажопідйомність	500 – 3000 кг	100 – 1000 кг	200 – 2000 кг
Точність позиціонування	Висока (до ± 0.2 мм)	Висока (до ± 0.2 мм)	Середня (± 1 мм)
Радіаційна стійкість	Висока	Висока	Середня–висока
Енергоспоживання	Високе	Мінімальне	Низьке
Сумісність з ТВЕЛами	Висока	Висока	Часткова (тільки феромагнітні ТВЕЛи)
Особливості конструкції	Жорстка конструкція, надійність у важких умовах	Універсальність, можливість автоматизації	Простота та швидкість спрацювання

Можна зробити висновки, що:

- Найбільш універсальним та надійним захватом є гідравлічний, оскільки він забезпечує високу вантажопідйомність, точність та радіаційну стійкість — критично важливі фактори при переміщенні ТВЕЛів.
- Механічні захвати можуть бути добрим вибором у випадку, якщо потрібна проста конструкція, висока точність і повна незалежність від матеріалу ТВЕЛів.
- З точки зору енергоефективності перевагу мають механічні та магнітні захвати.

1.3. Формування завдання на дипломний проект

На основі проведеного аналізу сформульовано основні вимоги до маніпулятора, який буде розроблений у рамках дипломного проекту.

Мета проекту: розробка роботизованого маніпулятора для автоматизованої заміни ТВЕЛів у ядерному реакторі, який забезпечить високу точність, безпеку та ефективність виконання операцій.

Основні характеристики маніпулятора:

- Тип конструкції: електромеханічний маніпулятор з дистанційним керуванням.
- Тип захоплення: механічний
- Система керування: мікропроцесорна, з можливістю програмування траєкторій руху.

Очікуваний результат:

Розроблений маніпулятор дозволить автоматизувати процес заміни ТВЕЛів, підвищити рівень безпеки та зменшити вплив людського фактора, що сприятиме підвищенню ефективності експлуатації ядерних реакторів.

					ПК11.13.1760.00.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1

У даному розділі було проведено аналіз сучасного стану атомної енергетики, розглянуто основні конструктивні особливості тепловиділяючих елементів (ТВЕЛів), умови їх експлуатації, проблеми, пов'язані з їх вилученням і заміною, а також здійснено порівняльний аналіз типів маніпуляторів та захватів, що застосовуються для автоматизації даних процесів.

Аналіз показав, що атомна енергетика залишається головним елементом енергетичної системи України, а безпечна та ефективна заміна ТВЕЛів є критично важливою умовою для її стабільного функціонування. Через високу радіаційну небезпеку, складність конструкції та екстремальні умови експлуатації паливних елементів, виникає необхідність повної або часткової автоматизації технологічних операцій із заміни ТВЕЛів.

Огляд існуючих типів маніпуляторів вказує на широке використання гідравлічних, електромеханічних та роботизованих систем, кожна з яких має свої переваги й обмеження.

На основі аналізу сформовано технічне завдання на розробку електромеханічного маніпулятора з механічним захопленням, який дозволить досягти балансу між точністю, безпечністю, надійністю та ефективністю автоматизованого процесу заміни ТВЕЛів.

					ПК11.13.1760.00.000ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2

ПРОЄКТУВАННЯ, ПІДБІР ЕЛЕМЕНТНОЇ БАЗИ

2.1. Структурна схема пристрою

На Рис. 2.1. представлена структурна схема маніпулятора призначеного для переміщення ТВЕЛів.

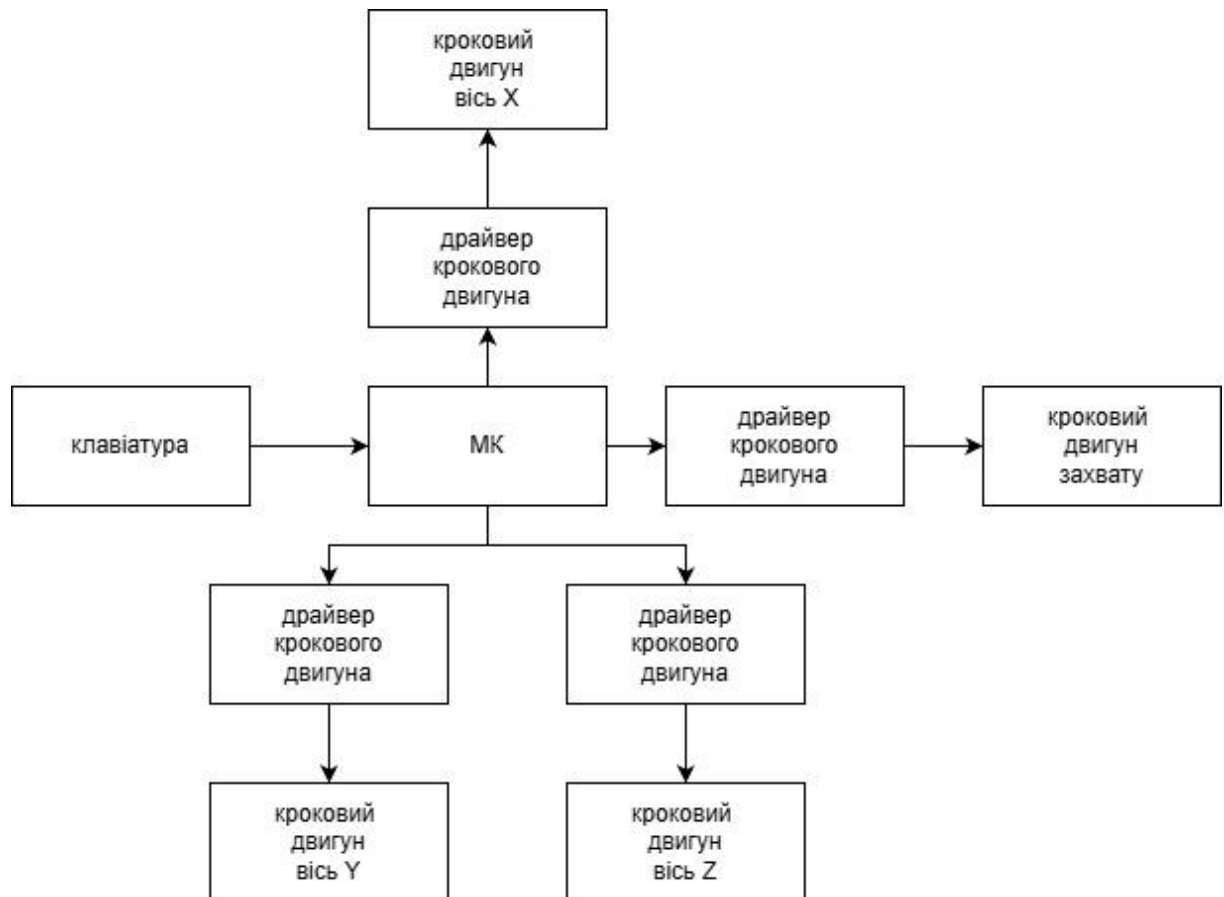


Рис. 2.1. Структурна схема маніпулятора призначеного для переміщення ТВЕЛів

Схема представляє собою роботизовану систему, яка забезпечує кероване переміщення паливних елементів (ТВЕЛів) у тривимірному просторі з використанням крокових двигунів та електромеханічного захвату.

Основні компоненти:

МК (мікроконтролер) — центральний керуючий пристрій, що обробляє сигнали управління з клавіатури та формує сигнали для драйверів крокових двигунів.

Клавіатура — пристрій введення, за допомогою якого оператор задає команди на переміщення та захоплення.

Драйвери крокових двигунів — проміжні пристрої, які приймають логічні сигнали від МК і керують відповідними кроковими двигунами по кожній з осей (X, Y, Z), а також двигуном захвату.

Крокові двигуни (вісь абцис, ординат, аплікат) — виконавчі механізми, що забезпечують переміщення маніпулятора в просторі.

Кроковий двигун захвату — привід, що керує захватним пристроєм, який виконує безпосередню маніпуляцію ТВЕЛами.

Мікроконтролер (МК) здійснює керування роботизованим маніпулятором, призначеним для автоматичної заміни паливних елементів. Координати розташування ТВЕЛів заздалегідь задані у прошивці, що дозволяє уникнути ручного введення параметрів перед кожним робочим циклом.

Після натискання відповідної кнопки на клавіатурі формується керуючий сигнал, який передається до МК, а далі — до драйвера відповідного крокового двигуна. Маніпулятор виконує переміщення у задану позицію, після чого система автоматично переходить у режим очікування до надходження наступної команди.

2.2. Електрична принципова схема

На рис. 2.2 наведено електричну принципову схему маніпулятора.

В основі блоку керування використовується плата Arduino Mega 2560 Rev3, яка побудована на мікроконтролері ATMEGA2560-15AU, який виконує функцію головного обчислювального та керуючого елемента. МК здійснює послідовне керування чотирма кроковими двигунами типу 28BYJ-48 через драйвери ULN2003.

Стабілізація живлення виконується за допомогою лінійного стабілізатора напруги LP2985-33DBVR, який понижує напругу 5 В до стабільного рівня 3.3 В, що необхідний для живлення окремих логічних елементів. Елемент 1870_LD1117S50CTR — стабілізатор з фіксованою вихідною напругою 5 В,

					ПК11.13.1760.00.000ПЗ	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

забезпечує стабільне живлення всієї системи при подачі вхідної напруги через лінію VIN.

PMV48X — N-канальний MOSFET, використовується як ключ для перемикання джерел живлення між USB та зовнішнім живленням, забезпечуючи захист та енергонезалежність системи.

Надається за запитом до авторів

Рис 2.2 Схема електрична принципова

Елемент LMV358IDGKR — двоканальний малошумний операційний підсилювач, призначений для фільтрації аналогових сигналів, усунення шумів та зменшення спотворень. Також використовується в якості компаратора для індикації стабільності напруги за допомогою світлодіодів, змінюючи яскравість в залежності від рівня напруги.

Управління виконавчими механізмами здійснюється за допомогою ULN2003 — драйвер Дарлінгтона, керує кроковими двигунами 28BYJ-48. Приймає логічні сигнали від мікроконтролера і формує відповідні імпульси для збудження обмоток двигуна, забезпечуючи надійну роботу виконавчих механізмів.

В якості інтерфейсу користувача застосовують клавіатурну матрицю (Keypad), яка підключена безпосередньо до мікроконтролера, та використовується для ручного введення команд оператором.

2.3.Алгоритм роботи маніпулятора

На рис.2.3 представлено алгоритм роботи маніпулятора по переміщенню ТВЕЛів. Алгоритм визначає послідовність дій, необхідних для виконання автоматизованого переміщення та маніпуляції об'єктом (ТВЕЛом) за допомогою роботизованого маніпулятора.

Кроки алгоритму:

1. Початок (Блок 1)

					ПК11.13.1760.00.000ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Запуск алгоритму — початкова точка виконання програми.

2. Ініціалізація пінів МК (Блок 2)

На початковому етапі виконується ініціалізація мікроконтролера з налаштуванням пінів, що забезпечують взаємодію з клавіатурним модулем та драйверами крокових двигунів. Та відбувається налаштування виводів мікроконтролера на відповідні режими роботи (вхід/вихід).

3. Встановлення початкових координат (Блок 3)

Маніпулятор переходить у вихідну позицію, яка визначена як нульова точка, тобто здійснюється встановлення початкових положень маніпулятора по осях X, Y, Z та положення захватного механізму.

4. Очікування команди руху (Блок 4)

Програма перебуває в режимі очікування зовнішнього сигналу (наприклад, з клавіатури).

5. Задання координат переміщення (Блок 5)

Перетворення координат у кількість імпульсів/обертів для крокових двигунів.

6. Переміщення до об'єкта (Блок 6)

Переміщення виконується у визначеній послідовності: спочатку уздовж осі X, далі — по осі Y, і на завершення — по осі Z та відкриття схвату.

7. Закриття захвату (Блок 7)

Активація механізму захоплення об'єкта.

8. Задання координат переміщення (Блок 8)

Перетворення координат нової цільової точки у кількість обертів валу двигунів..

9. Переміщення до цільової позиції (Блок 9)

Транспортування об'єкта у нове місце.

10. Відкриття схвату (Блок 10)

У момент коли маніпулятор знаходиться безпосередньо в заданій точці, схват відкривається.

11. Умовна перевірка (Блок 11)

					ПК11.13.1760.00.000ПЗ	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Визначення: чи потрібно продовжити цикл?

12. Якщо ні — завершення роботи (Блок 13).

13. Якщо так — перехід до очікування нової команди (Блок 12).

14. Очікування натискання клавіші (Блок 12)

Програма перебуває в очікуванні нової дії користувача.

15. Кінець (Блок 13)

Завершення роботи алгоритму.

Надається за запитом до авторів

Рис 2.3. Алгоритм роботи маніпулятора по переміщенню ТВЕЛів

2.4. Підбір елементної бази

2.4.1. Мікроконтролер Arduino Mega 2560 Rev3

Основною платформою управління для цього проекту є Arduino Mega 2560 Rev3 (рис. 2.4.), який має багато технічних характеристик, таких як багаті цифрові та аналогові входи/виходи, стабільна підтримка бібліотеки та сумісність з широким спектром периферійних пристроїв[15].

Технічні характеристики:

Arduino Mega 2560 Rev3 побудований на базі мікроконтролера **ATmega2560**, що забезпечує:

- 54 цифрових входи/виходи (15 з них можуть працювати як ШІМ),
- 16 аналогових входів,
- 256 КБ флеш-пам'яті (з яких 8 КБ зайнято завантажувачем),
- 8 КБ SRAM,
- 4 КБ EEPROM,
- тактова частота: 16 МГц,
- живлення: 7–12 В (через VIN або роз'єм DC).

					ПК11.13.1760.00.000ПЗ	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рис 2.4 Arduino Mega 2560 Rev3

2.4.2. Кроковий двигун

Для реалізації переміщення та позиціонування захоплювача в конструкції маніпулятора використовується кроковий двигун з редуктором 28BYJ-48 у комплекті з драйвером ULN2003 (рис. 2.5) [16].

Характеристики двигуна 28BYJ-48:

- Напруга живлення: 5 В
- Тип: 4-фазний кроковий двигун з редуктором
- Крок: $5.625^\circ/64$ (тобто $\approx 0.088^\circ$ на крок після редукції)
- Редукція: 1:64
- Швидкість обертання: ~ 15 об/хв (залежить від частоти імпульсів)
- Струм: до 250 мА

Характеристики плати ULN2003:

- Живлення двигуна до 12 В
- 4 транзисторних ключі для керування фазами
- Світлодіоди для індикації роботи фаз



Рис 2.5 Двигун 28BYJ-48 з ULN2003

Двигун підключений до мікроконтролера Arduino Mega через 4 цифрових контактних роз'єми (рис. 2.6). Управління здійснюється за допомогою бібліотеки Stepper.h, яка дозволяє здійснювати як фіксовані повороти, так і обертання під заданим кутом або положенням.

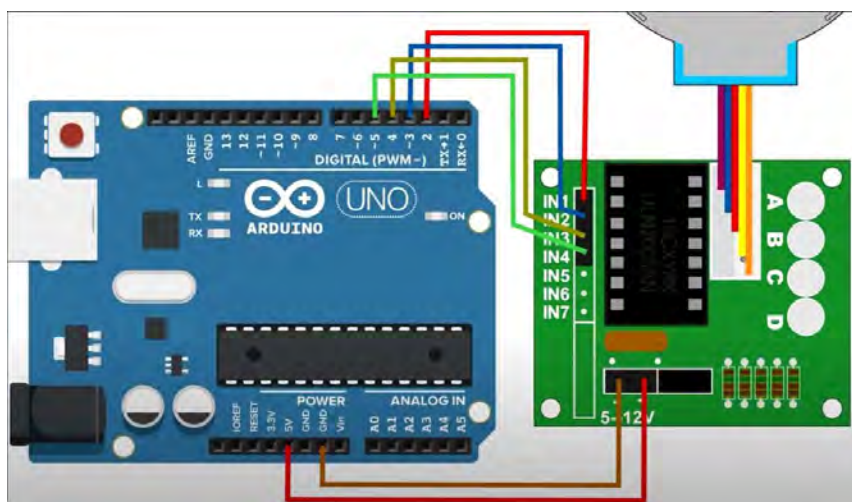


Рис. 2.6 Приклад схеми підключення 1 крокового двигуна до плати

2.4.3. Клавіатура

Для взаємодії з системою в цьому проекті використовується мембранна клавіатура з 16 кнопками (4x4) (рис. 2.7). Клавіатура надає можливість вибору режиму роботи, запуску алгоритму, паузи або збою. Кожна кнопка виконує певну функцію, яка задається в прошивці[17].

Характеристики клавіатури:

- Матриця 4×4 — 16 кнопок
- Гнучка плівкова конструкція
- Живлення: 3.3–5 В
- Підключення: 8 цифрових пінів (4 рядки + 4 стовпці)
- Розміри: 70×77×1 мм

Клавіатура підключається безпосередньо до Arduino Mega. Бібліотека Keypad.h використовується для читання натискань клавіш, що дозволяє легко здійснювати обробку натискань клавіш. Інтерфейс забезпечує просте та інтуїтивне керування процесом, без потреби у дисплеї або сенсорних елементах.



Рис. 2.7 Клавіатура

2.5. Розрахунок потужності крокових двигунів

Розрахунок для 4 крокових двигунів, які працюють за таким принципом:

1. двигун переміщує маніпулятор по вісі абсцис (X)
2. двигун переміщує маніпулятор по вісі ординат (Y)
3. двигун переміщує маніпулятор по вісі аплікату (Z)
4. двигун виконує схват ТВЕЛу

Тепер наведемо вихідні дані для розрахунку:

1. Вісь абсцис являє собою вал у вигляді шпильки різьбової М8 довжиною 270 мм і діаметром 8 мм.
2. Вісь ординат являє собою вал у вигляді шпильки різьбової М8 довжиною 270 мм і діаметром 8 мм.
3. Вісь аплікату являє собою вал у вигляді полого циліндру вистою 70 мм і діаметром 8 мм, товщиною стінки 1 мм, завдяки якому виконується переміщення маніпулятора.
4. Вісь 4 двигуна являє собою вал у вигляді шпильки різьбової М8 довжиною 120 мм і діаметром 8 мм, завдяки якому виконується схват.

Тепер, коли було ознайомлено з умовами системи, визначимося з загальними формулами, які будуть використовуватися під час розрахунків для кожного з двигунів:

1. Формула для визначення об'єму суцільного сталевго валу(3.4.1):

$$V = \pi * \left(\frac{d}{2}\right)^2 * L [\text{м}^3], \text{ де} \quad (3.4.1)$$

d – діаметр [м]

L – довжина [м]

2. Формула для визначення маси суцільного сталевго валу(3.4.2):

					ПК11.13.1760.00.000ПЗ	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$m = \rho * V \text{ [кг]}, \text{ де} \quad (3.4.2)$$

$$\rho - \text{густина сталі} = 7850 \left[\frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right]$$

3. Крутний момент (момент сили)(3.4.3):

$$M = m * g * r \text{ [Н * м]}, \text{ де} \quad (3.4.3)$$

$$g - \text{прискорення вільного падіння} = 9.81 \left[\frac{\text{м}}{\text{с}^2} \right]$$

$$r - \text{плече сили} = \frac{L}{2} \text{ [м]}$$

4. Потужність при обертанні двигуна(3.4.4):

$$P = M * \omega \text{ [Вт]}, \text{ де} \quad (3.4.4)$$

$$\omega - \text{кутова швидкість} \left[\frac{\text{рад}}{\text{с}} \right]$$

5. Кутова швидкість(3.4.5):

$$\omega = 2 * \pi * n \left[\frac{\text{рад}}{\text{с}} \right], \text{ де} \quad (3.4.5)$$

$$n - \text{максимальна швидкість обертання для двигуна 28BYJ - 48} = 0.25 \left[\frac{\text{об}}{\text{с}} \right]$$

Тепер перейдемо до розрахунків потужностей кожного з двигунів:

Двигун 1 (вісь абцис):

$$d = 8 \text{ мм} = 0.008 \text{ м}$$

$$L = 27 \text{ см} = 0.27 \text{ м}$$

Об'єм суцільного сталевго валу:

$$V = \pi * \left(\frac{0.008}{2} \right)^2 * 0.27 = \pi * 0.004^2 * 0.27 \approx 1.35717 * 10^{-5} \text{ [м}^3\text{]}$$

Маса суцільного сталевго валу:

$$m = 7850 * 1.35717 * 10^{-5} \approx 0.106537845 \text{ [кг]}$$

					ПК11.13.1760.00.000ПЗ	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Крутний момент (момент сили):

$$M = 0.106537845 * 9.81 * \frac{0.27}{2} \approx 0.14109339502575 \text{ [Н * м]}$$

Потужність при обертанні двигуна:

$$\omega = 2 * \pi * 0.25 \approx 1.5708 \left[\frac{\text{рад}}{\text{с}} \right]$$

$$P = 0.14109339502575 * 1.5708 \approx 0.2216295049064481 \text{ [Вт]}$$

Двигун 2 (вісь ординат):

$$d = 8 \text{ мм} = 0.008 \text{ м}$$

$$L = 27 \text{ см} = 0.27 \text{ м}$$

Об'єм суцільного сталевого валу:

$$V = \pi * \left(\frac{0.008}{2} \right)^2 * 0.27 = \pi * 0.004^2 * 0.27 \approx 1.35717 * 10^{-5} \text{ [м}^3\text{]}$$

Маса суцільного сталевого валу:

$$m = 7850 * 1.35717 * 10^{-5} \approx 0.106537 \text{ [кг]}$$

Крутний момент (момент сили):

$$M = 0.106537 * 9.81 * \frac{0.27}{2} \approx 0.14109339502 \text{ [Н * м]}$$

Потужність при обертанні двигуна:

$$\omega = 2 * \pi * 0.25 \approx 1.5708 \left[\frac{\text{рад}}{\text{с}} \right]$$

$$P = 0.14109339502 * 1.5708 \approx 0.221629504906 \text{ [Вт]}$$

Двигун 3 (вісь аплікату):

$$d_{\text{зовн}} = 8 \text{ мм} = 0.008 \text{ м}$$

					ПК11.13.1760.00.000ПЗ	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$L = 7 \text{ см} = 0.07 \text{ м}$$

$$t = 1 \text{ мм} = 0.001 \text{ м}$$

$$d_{\text{внутр}} = 0.008 - 2 * 0.001 = 0.006 \text{ м}$$

Об'єм полого циліндру:

$$V_{\text{зовн}} = \pi * \left(\frac{0.008}{2}\right)^2 * 0.07 = \pi * 0.004^2 * 0.07 \approx 3.51858 * 10^{-6} [\text{м}^3]$$

$$V_{\text{внутр}} = \pi * \left(\frac{0.006}{2}\right)^2 * 0.07 = \pi * 0.003^2 * 0.07 \approx 1.9792 * 10^{-6} [\text{м}^3]$$

$$V_{\text{пол}} = V_{\text{зовн}} - V_{\text{внутр}} = 3.51858 * 10^{-6} - 1.9792 * 10^{-6} \approx 1.53938 * 10^{-6} [\text{м}^3]$$

Маса полого циліндру:

$$m = 7850 * 1.53938 * 10^{-6} \approx 0.012084133 [\text{кг}]$$

Крутний момент (момент сили):

$$M = 0.012084133 * 9.81 * \frac{0.07}{2} \approx 0.00414908706555 [\text{Н} * \text{м}]$$

Потужність при обертанні двигуна:

$$\omega = 2 * \pi * 0.25 \approx 1.5708 \left[\frac{\text{рад}}{\text{с}}\right]$$

$$P = 0.00414908706555 * 1.5708 \approx 0.00651738596256594 [\text{Вт}]$$

Двигун 4 (вісь схвату):

$$d = 8 \text{ мм} = 0.008 \text{ м}$$

$$L = 12 \text{ см} = 0.12 \text{ м}$$

Об'єм суцільного сталевого валу:

$$V = \pi * \left(\frac{0.008}{2}\right)^2 * 0.12 = \pi * 0.004^2 * 0.12 \approx 6.03186 * 10^{-6} [\text{м}^3]$$

Маса суцільного сталевого валу:

$$m = 7850 * 6.03186 * 10^{-6} \approx 0.047350101 [\text{кг}]$$

					ПК11.13.1760.00.000ПЗ	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Крутний момент (момент сили):

$$M = 0.047350101 * 9.81 * \frac{0.12}{2} \approx 0.0278702694486 \text{ [Н * м]}$$

Потужність при обертанні двигуна:

$$\omega = 2 * \pi * 0.25 \approx 1.5708 \left[\frac{\text{рад}}{\text{с}} \right]$$

$$P = 0.0278702694486 * 1.5708 \approx 0.04377861924986088 \text{ [Вт]}$$

Розрахунки потужності крокових двигунів показали, що обрані приводи 28BYJ-48 здатні впоратися з передбаченим механічним навантаженням:

Вісь абцис (X): 0.22 Вт

Вісь ординат (Y): 0.22 Вт

Вісь аплікату (Z): 0.0065 Вт

Схват (захоплення): 0.044 Вт

Всі значення потужності знаходяться в межах можливостей крокового двигуна 28BYJ-48, який витримує струм до 250 мА при напрузі 5 В (≈ 1.25 Вт максимальної споживаної потужності). Таким чином, потужності двигунів обрано з достатнім запасом, що гарантує безпечну й ефективну експлуатацію системи.

					ПК11.13.1760.00.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2

Розроблений маніпулятор має модульну структуру, яка дозволяє реалізувати тривимірне переміщення захоплювального механізму (схвату) по координатних осях абцис(X), ордина(Y), аплікат(Z). Для управління системою використовується Arduino Mega 2560 Rev3 з широкими функціональними можливостями, що дозволяє ефективно взаємодіяти з периферійними пристроями та виконувати складні алгоритми автоматизації.

Застосування стабілізаторів напруги (LP2985-33DBVR, LD1117S50CTR) забезпечує надійне живлення логічних та силових компонентів. Використання MOSFET (PMV48X) дозволяє плавно перемикає джерела живлення, захищаючи електроніку від перевантажень. LMV358IDGKR ефективно фільтрує аналогові сигнали, зменшуючи вплив перешкод, а ULN2003 виконує безпечне керування кроковими двигунами.

Завдяки запрограмованим координатам у прошивці, користувач звільнений від необхідності щократного ручного введення параметрів. Алгоритм роботи маніпулятора забезпечує повністю автоматизований цикл переміщення ТВЕЛів з можливістю повторення або зупинки за умовами задачі.

Розрахунки потужності чотирьох крокових двигунів 28BYJ-48 показали, що обрані деталі здатні впоратися з передбаченим механічним навантаженням. Всі значення потужності знаходяться в межах можливостей крокового двигуна 28BYJ-48, який витримує струм до 250 мА при напрузі 5 В (≈ 1.25 Вт максимальної споживаної потужності). Таким чином, потужності двигунів обрано з достатнім запасом, що гарантує безпечну й ефективну експлуатацію системи.

Завдяки використанню енергоощадних компонентів та простих схем керування, конструкція зберігає низький рівень енергоспоживання, що робить її придатною для навчальних лабораторій або малопотужних автономних систем.

Запропонована система маніпулятора для переміщення ТВЕЛів є технічно обґрунтованою, економічно доцільною, конструктивно простою та функціонально завершеною. Вона забезпечує точне, стабільне та безпечне

					ПК11.13.1760.00.000ПЗ	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

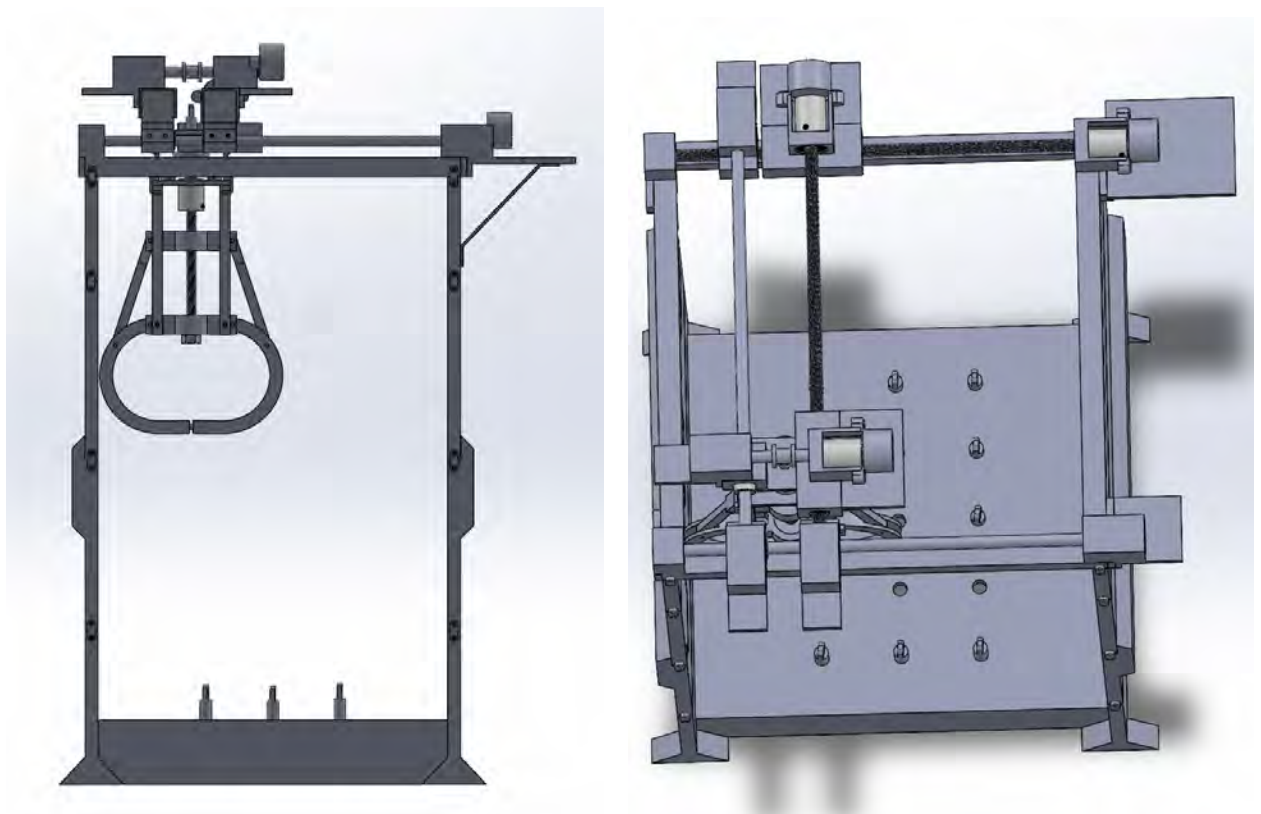
управління виконавчими механізмами і може бути рекомендована для впровадження в навчальні комплекси з моделюванням ядерних технологій.

					ПК11.13.1760.00.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

РОЗДІЛ 3

КОНСТРУКЦІЯ МАНІПУЛЯТОРА

Маніпулятор для переміщення ТВЕЛів представляє собою складну механічну систему з двигунами, призначену для автоматизованого захоплення, підйому, переміщення та встановлення тепловиділяючих елементів (ТВЕЛів) у модельованій структурі реактора. Загальний вигляд 3Д моделі розробленої конструкції приведено на рис. 3.1



а)

б)

Рис. 3.1. 3Д модель маніпулятора по переміщенню ТВЕЛів:

а) фронтальний вид; б) вид згори

Загальна конструкція складається з двох основних функціональних частин:

1. База — містить конструкційну раму, систему переміщення по координатних осях X, Y, Z, а також вузли кріплення до макета реактора.
2. Схват (захватний механізм) — безпосередній виконавчий орган для маніпулювання ТВЕЛами.

					ПК11.13.1760.00.000ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Загальні габаритні розміри маніпулятора становлять 300 x 290 x 520 мм, що дозволяє його компактно розміщувати в лабораторному або навчальному середовищі.

На рис 3.2. зображено схват розробленого маніпулятора.

Надається за запитом до авторів

Рис 3.2 Конструкція схвату для ТВЕЛів

Він складається з наступних елементів:

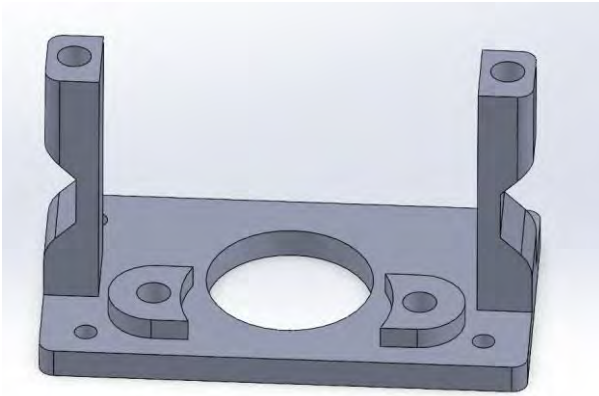
1. кришка з кріпленням для тросу;
2. платформа для кріплення двигуна;
3. кроковий двигун;
4. муфта гнучка;
5. вал, за допомогою якого виконується схват;
6. стійкі, які тримають двигун;
7. кріплення, яке регулює кут між кігтями;
8. важелі для регулювання кута схвату;
9. база для кріплення валу та кігтей;
10. кігті схвату;
11. гайка М8 для фіксації валу;

Кожен із перелічених компонентів має власну 3D-модель із точними розмірами.

Схват закріплений до вертикального валу осі Z і складається з кількох функціональних елементів:

1. Платформа з двигуном — монтажна плита для крокового двигуна (рис. 3.3.)

					ПК11.13.1760.00.000ПЗ	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Надається за запитом до авторів

а)

б)

Рис. 3.3. Модель платформи схвату:

а) 3Д модель; б) кресленик

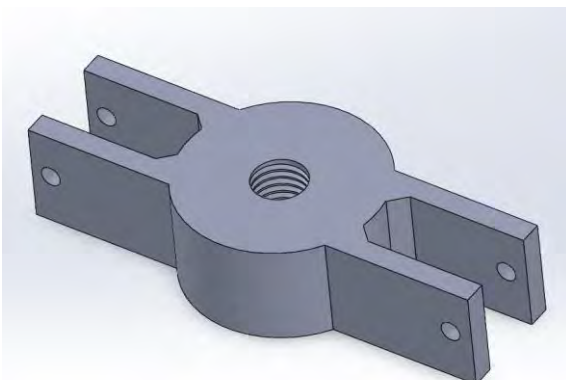
2. Муфта — гнучке з'єднання між двигуном і валом.

3. Вал — передає обертальний рух до елементів захвату.

4. Система важелів і кігтів — механізм для фізичного захоплення ТВЕЛів.

Спеціальна конструкція важелів і фіксацій дозволяє точно змінювати кут розкриття кігтів. Це реалізовано через поворотні втулки і гайки М8, які приводять у дію циліндричні елементи.

На рис 3.4 зображено модель кріплення, яке регулює кут між кігтями. Ця модель являє собою коло діаметром 30 мм та прямокутник розмірами 69.97x15 мм.



Надається за запитом до авторів

а)

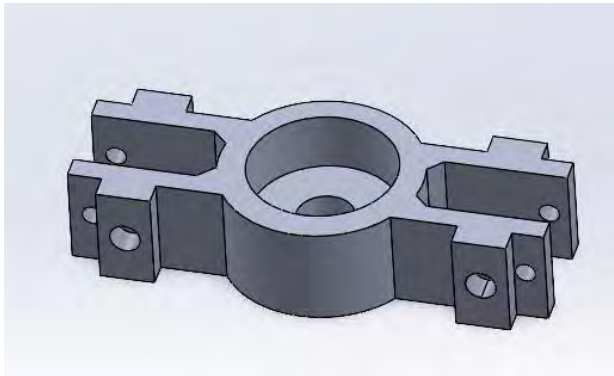
б)

Рис. 3.4. Модель кріплення, яке регулює кут між кігтями:

а) 3Д модель; б) кресленик

					ПК11.13.1760.00.000ПЗ	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

На рис. 3.5 зображено модель бази для кріплення валу та кігтей. База кігтів оснащена підшипником, який дозволяє вільне обертання вала та знижує навантаження на двигун.



Надається за запитом до авторів

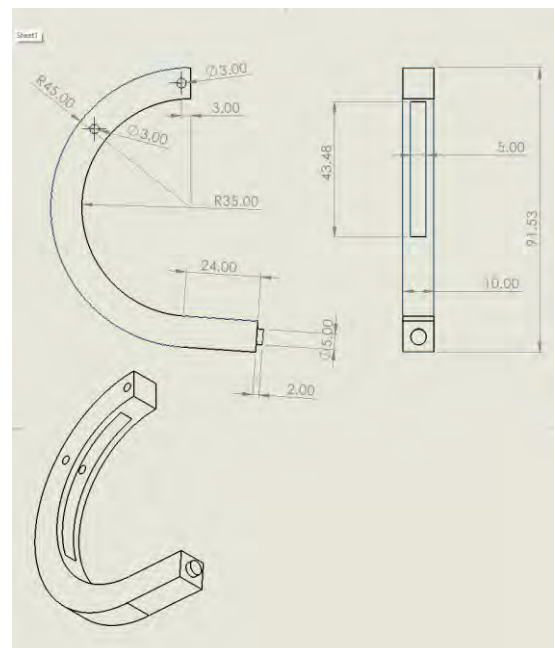
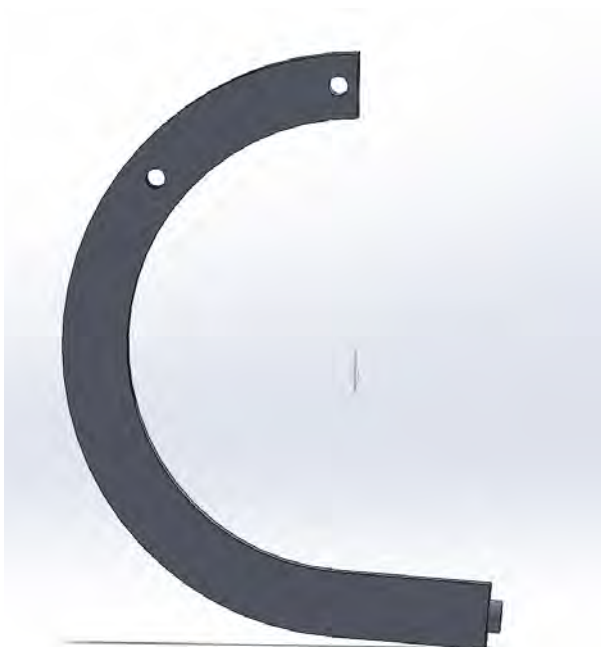
а)

б)

Рис. 3.5. Модель бази для кріплення валу та кігтей:

а) 3Д модель; б) кресленик

Кігті виготовлені у вигляді напівкілець і мають спеціальний виріз, який забезпечує свободу руху при роботі важеля (рис. 3.6.).



а)

б)

Рис. 3.6. Модель кігтя для виконання схвату:

а) 3Д модель; б) кресленик

					ПК11.13.1760.00.000ПЗ	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Базова рама виготовлена з жорсткого профільного металу. Вона складається з чотирьох вертикальних стінок, які об'єднані між собою зі скобами та гвинтовими з'єднаннями. Висота кожної стінки становить 470 мм, ширина — 290 мм. Нижня частина обладнана опорними "ніжками" для забезпечення стійкості на поверхні. 3Д модель бази приведена на рис. 3.7.

У нижній частині бази знаходиться макет ядерного реактора, виконаний у вигляді прямокутного блоку 270x258x50 мм (рис. 3.8). На верхній поверхні розташовано ряд отворів діаметром 9.2 мм з відповідною сіткою, які імітують посадкові місця для ТВЕЛів. Це дозволяє відпрацьовувати точність установки елементів у режимі моделювання. Зі зворотньої сторони ці отвори мають невеликі стінки(рис 3.9).

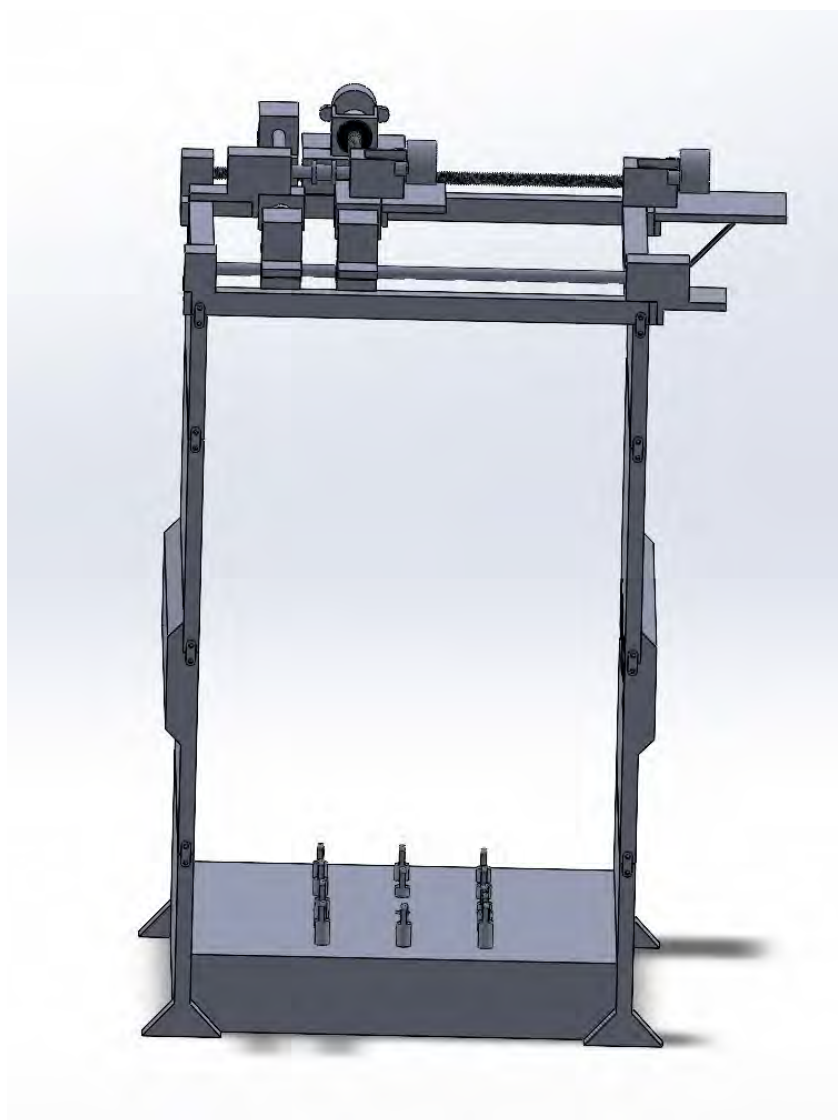


Рис 3.7 3D модель конструкції бази

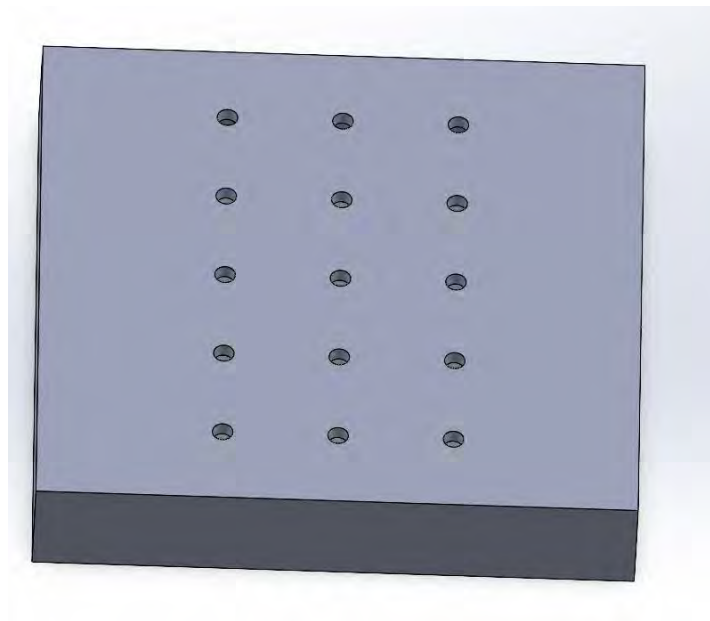


Рис 3.8 3D модель реактора

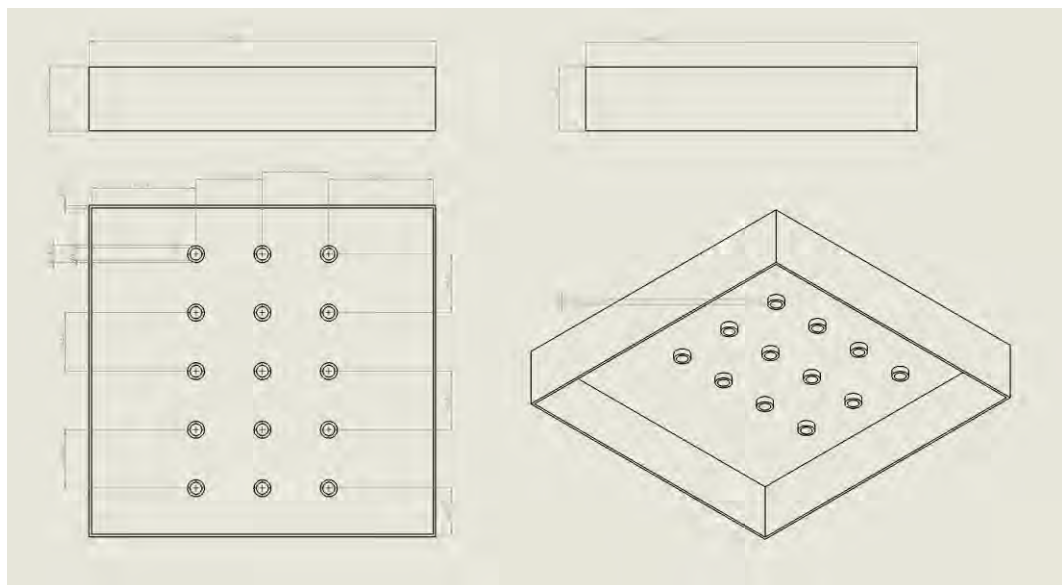


Рис 3.9 Розміри моделі реактора

На верхній частині конструкції змонтовано основну платформу розміром 300x290 мм. Тут розміщені вузли для переміщення схвата:

- Вісь Х (абциса): Кроковий двигун передає обертання через гнучку муфту на шпильку М8 (вал), яка забезпечує лінійний рух платформи.

					ПК11.13.1760.00.000ПЗ	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Вісь Y (ордината): До рухомої частини вісі X прикріплена платформа з другим кроковим двигуном, який через аналогічну систему рухає схват у напрямку осі Y.

- Вісь Z (аплікат): Третій двигун здійснює вертикальне переміщення виконавчого механізму (схвата).

Усі вали додатково стабілізовані допоміжними направляючими з лінійними підшипниками.

На рис 3.10 зображено 3D модель платформи під кроковий двигун для осі абцис. Платформа має розміри 103х65 мм. На платформі знаходиться кріплення для крокового двигуна. Це паралелограм з отворами діаметрами 24 мм та 9 мм. Перший отвір призначений для муфти, другий призначений для валу осі абцис. Вал являє собою шпильку М8 висотою 270 мм та діаметром 8мм. Також попереду розташований отвір для радіального підшипника.

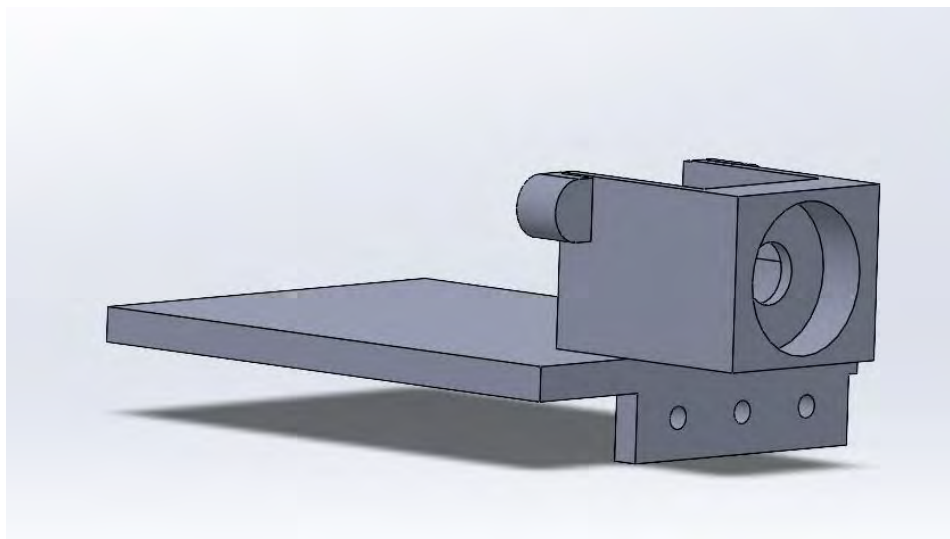


Рис 3.10 3D модель платформи для крокового двигуна осі абцис

Платформа для крокового двигуна по осі ординат аналогічна рис. 3.10.

На вісі ординат розташовано тримач крокового двигуна за допомогою якого виконується переміщення схвату за вісю аплікат.

Цей тримач складається з паралелограма та платформи з двигуном.

На шпильці М8 (вал ординат) розташований паралелограм (рис 3.11), на який кріпиться платформа для кріплення крокового двигуна для переміщення схвата за вісю аплікат.

					ПК11.13.1760.00.000ПЗ	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

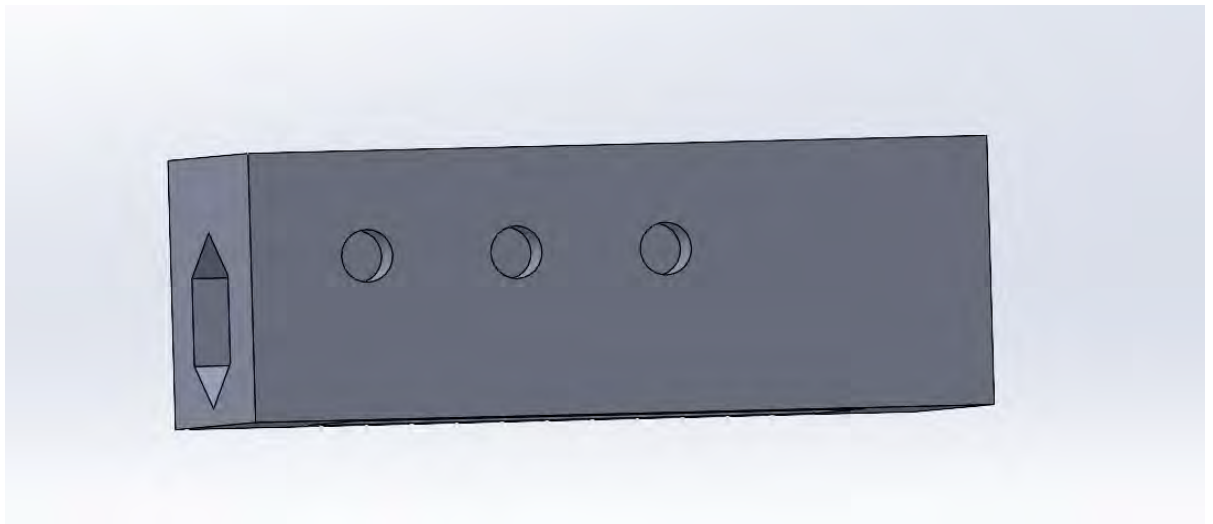


Рис 3.11 3D модель платформи для кріплення крокового двигуна для переміщення схвата за вісю аплікат

Зібраний прототип маніпулятора зображено на рис. 3.12.

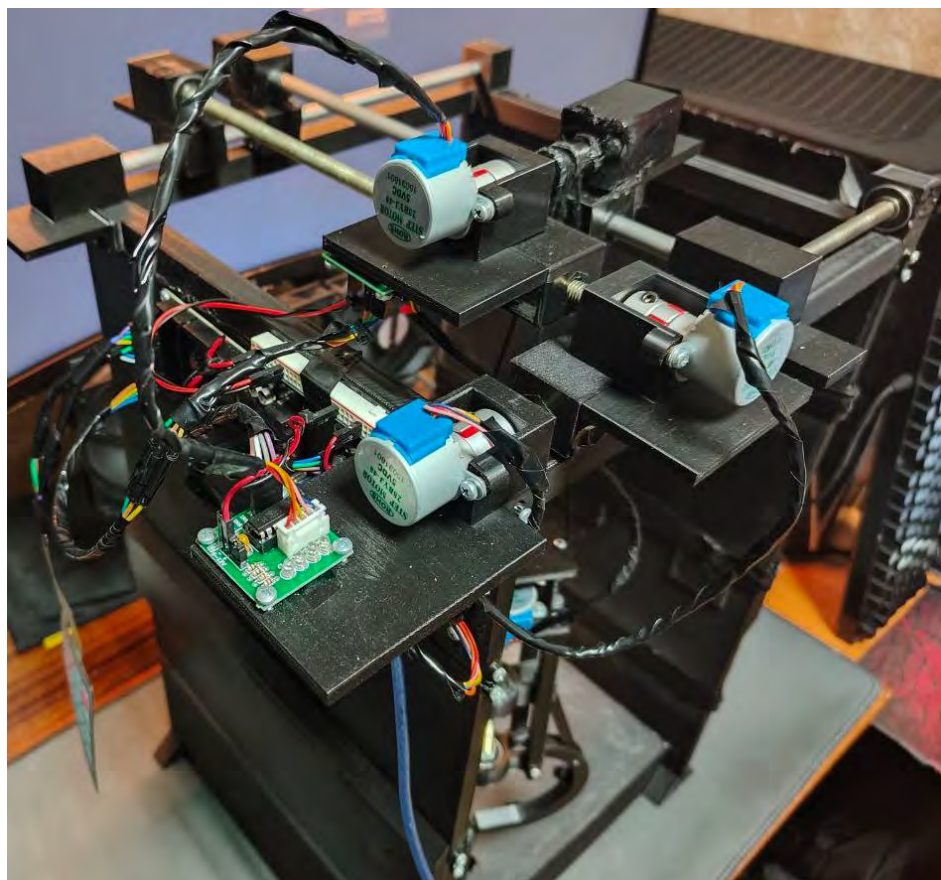


Рис. 3.12. Прототип маніпулятора по переміщенню ТВЕЛів

Розроблений прототип підтверджує відповідність 3D-моделі реальній збірці, що свідчить про коректність проектування та взаємну сумісність усіх компонентів системи.

					ПК11.13.1760.00.000ПЗ	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3

У результаті аналізу конструкції маніпулятора для переміщення тепловиділяючих елементів (ТВЕЛів) можна зробити такі висновки:

1. Конструктивне рішення маніпулятора є раціональним та функціонально обґрунтованим. Система складається з двох основних частин — бази та захватного механізму (схвату), які забезпечують повноцінне тривимірне позиціонування і захоплення ТВЕЛів.
2. Розроблений прототип маніпулятора має компактні габаритні розміри (300×290×520 мм), що дозволяє використовувати його у навчальних та лабораторних умовах без необхідності складних монтажних робіт або спеціального технічного середовища.
3. Захватний механізм має модульну будову з можливістю регулювання кута відкриття кігтів. Це дозволяє адаптувати систему до різних геометричних параметрів об'єктів та забезпечує точність захоплення.

У конструкції використано стандартні машинобудівні компоненти (шпильки М8, муфти, платформи з отворами під підшипники), що спрощує виготовлення, технічне обслуговування і уможливорює швидку заміну або модернізацію окремих вузлів.

Рух по координатних осях абцис(X), ординат(Y) та аплікат(Z) реалізовано за допомогою крокових двигунів із редукторами, що забезпечує достатній рівень точності та керованості при роботі з макетом реактора. Конструкція платформи для кожної осі уніфікована, що зменшує кількість унікальних деталей.

Макет ядерного реактора з посадковими отворами для ТВЕЛів дозволяє відпрацьовувати переміщення та точне встановлення паливних елементів у режимі моделювання, що має високу навчальну та експериментальну цінність.

Розроблений прототип підтверджує відповідність 3D-моделі реальній збірці, що свідчить про коректність проектування та взаємну сумісність усіх компонентів системи.

					ПК11.13.1760.00.000ПЗ	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У межах бакалаврського проєкту було здійснено комплексне дослідження проблематики автоматизованого переміщення тепловиділяючих елементів (ТВЕЛів) у ядерних енергетичних установках. Проведений аналіз сучасного стану атомної енергетики, конструкції ТВЕЛів, умов їх експлуатації та методів заміни вказав на актуальність розробки роботизованих маніпуляційних систем, здатних забезпечити безпечне, точне та надійне виконання технологічних операцій в умовах підвищеної небезпеки.

На основі аналізу існуючих типів маніпуляторів було сформульовано технічне завдання, що передбачає створення електромеханічного маніпулятора з механічним захватом.

У результаті розробки спроектовано конструкцію маніпулятора з модульною будовою, яка забезпечує переміщення виконавчого органу у тривимірному просторі та реалізує захоплення ТВЕЛів за допомогою регульованого схвату.

Система керування побудована на базі Arduino Mega 2560 Rev3, що дозволяє ефективно керувати двигунами та периферійними модулями завдяки попередньо запрограмованим алгоритмам.

Застосування крокових двигунів типу 28BYJ-48 у поєднанні з драйверами ULN2003 та елементною базою (стабілізатори LP2985-33DBVR, LD1117S50CTR, MOSFET PMV48X, LMV358IDGKR) забезпечує стабільність, енергоефективність та функціональну завершеність системи.

Розрахунки підтвердили достатню потужність привідної частини для виконання запланованих механічних дій, а також енергоощадність системи, що робить її придатною для використання у навчальних або малопотужних автономних комплексах.

Конструктивне рішення, засноване на уніфікованих машинобудівних елементах, спрощує виготовлення, ремонт і модернізацію.

Розроблений прототип підтвердив працездатність конструкції, відповідність 3D-моделі реальній збірці та можливість точного позиціонування та захоплення ТВЕЛів у змодельованому середовищі.

					ПК11.13.1760.00.000ПЗ	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Отримані результати можуть бути використані як основа для подальших наукових досліджень та інженерних розробок у сфері автоматизації ядерної енергетики.

					ПК11.13.1760.00.000ПЗ	Арк.
						51
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Бондаренко Б. Д., Орлов В. В., Чудаков В. М. Ядерні реактори: фізика та техніка. – Київ : Наукова думка, 2018. – 432 с.
2. Гончаров В. В. Автоматизація технологічних процесів у ядерній енергетиці. – Харків : ХНЕУ, 2016. – 215 с.
3. Петров С. В., Іванов О. М. Перспективи розвитку роботизованих маніпуляторів для ядерної енергетики // Збірник наукових праць НАН України. – 2021. – № 4. – С. 55–63.
4. Smith J., Anderson R. Automated Fuel Handling Systems in Nuclear Power Plants // Nuclear Engineering Journal. – 2020. – Vol. 34, No. 2. – P. 112–120.
5. Ковальчук О. П., Сидоренко Г. М. Аналіз сучасних методів заміни ТВЕЛів в ядерних реакторах // Праці міжнародної конференції «Енергетика майбутнього». – 2019. – С. 78–82.
6. Reforming Ukraine's energy sector: critical unfinished business [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://carnegieendowment.org/research/2018/02/reforming-ukraines-energy-sector-critical-unfinished-business?center=middle-east&lang=en>
7. Тільки Westinghouse і ТВЕЛ володіють технологією виробництва палива для реакторів ВВЕР – віцепрезидент [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://censor.net/ua/news/3077503/>
8. Ядерне паливо [Електронний ресурс] // Вікіпедія. – Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/Ядерне_паливо
9. Тепловидільний елемент [Електронний ресурс] // Вікіпедія. – Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/Тепловидільний_елемент
10. Fuel element and fuel bundle – ResearchGate [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.researchgate.net/figure/Fuel-element-and-fuel-bundle-as-modeled-in-this-study...>
11. Mitsubishi Nuclear Energy Systems (MNES) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.mhi.com/group/mnes/company>

					ПК11.13.1760.00.000ПЗ	Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

12. Pressurized Water Reactor Fuel – Westinghouse [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://westinghousenuclear.com/nuclear-fuel/pressurized-water-reactor-pwr/>
13. Fuel Handling Equipment – Westinghouse [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://westinghousenuclear.com/data-sheet-library/fuel-handling-equipment/>
14. GE Vernova – Nuclear Fuels [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.gevernova.com/nuclear/fuels>
15. Arduino Mega 2560 Rev3 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://arduino.ua/ru/prod243-arduino-mega-2560-rev3>
16. Двигун кроковий з редуктором 28BYJ-48 і платою ULN2003 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://m-teh.com.ua/ru/dvigun-krokoviy-z-reduktorom-28byj-48-i-platou-uln2003/>
17. 16-кнопкова мембранна клавіатура [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://arduino.ua/ua/prod167-16-ti-knopochnaya-membrannaya-klaviatyra>
18. <https://events.pstu.edu/konkurs-energy/wp-content/uploads/sites/2/2020/02/naukova-robota.docx>
19. Довбиш І. О. Силові установки та джерела енергії сучасних БПЛА / І.О. Довбиш, О.В. Муравйов, Р.М. Галаган, Г.А. Богдан, А.С. Момот // Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки. – 2023. – Том. 34 (73). – № 5. – С. 16-21.
20. Муравйов О. В. Перспективи розвитку технологій та підвищення рівня автономності БПЛА / О.В. Муравйов, І.О. Довбиш, Р.М. Галаган, Г.А. Богдан, А.С. Момот // Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки. – 2023. – Том. 34 (73). – № 2. – С. 199-205.
21. Баженов В.Г. Електроніка. Лабораторний практикум: навчальний посібник / В. Г. Баженов, Є. Ф. Суслів, Ю. Ю. Лисенко, А.С. Момот; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 70 с.
22. Долиненко В.В. Роботизована система неруйнівного вихрострумовеого контролю виробів зі складною геометрією / В.В. Долиненко,

Є.В. Шаповалов, Т.Г. Скуба, В.О. Коляда, Ю.В. Куц, Р.М. Галаган, В.В. Карпінський // Автоматическая сварка. – Київ. – 2017. - № 5-6 (764). – С. 60-67

23. Галаган Р. М. Комп'ютерне проектування електронних схем. Комп'ютерний практикум: навчальний посібник. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 419 с.

24. Спеціальні розділи математики: конспект лекцій : навч. посіб. / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: Ю. В. Куц, Ю. Ю. Лисенко, В. М. Сокурєнко. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. – 192 с.

					ПК11.13.1760.00.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54