

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Навчально-науковий інститут автоматики і електротехніки

Кафедра ЕІС та РК

«Допущений до захисту»
Завідувач кафедри ЕІС та РК

к.т.н., доцент  Д.В. Костенко

“ 12 ” 06 2026 року

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеня вищої освіти **«бакалавр»**

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему: Система керування маніпулятором підводного апарату

Виконав: студент IV курсу, групи 4361
спеціальності

141 «Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка»

(шифр і назва спеціальності)

Шевчик Е. Г. 

(прізвище та ініціали)

Керівник к.т.н., доц. НУК, Бабкін Г. В. 

(прізвище та ініціали)

Рецензент Костенко Д. В. 

(прізвище та ініціали)

м. Миколаїв – 2026 рік

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Навчально-науковий інститут автоматики і електротехніки

Кафедра ЕІС та РК

Освітньо-кваліфікаційний рівень бакалавр

Галузь знань 14 «Електрична інженерія»

(шифр і назва)

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

(шифр і назва)

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Гарант освітньої програми

д.т.н., професор Я.Б. Волянська

“ 22 ” 04 2026 року

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття ступеня вищої освіти

«бакалавр»

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

Студенту Шевчик Едуард Геннадійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Система керування маніпулятором підводного апарату

2. Керівник роботи Бабкін Георгій Володимирович, к.т.н., доцент НУК

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від “22” 04 2026 року № 286-уч

3. Термін подання студентом роботи _____

4. Вихідні дані по роботі 1. Технічне завдання на розробку системи керування підводним апаратом, що є платформою для встановлення додаткового обладнання. 2. Математична модель системи керування глибиною занурення апарату. 3. Прототип телекерованого безлюдного підводного апарату. 4. Структурна, функціональна та система керування підводним апаратом.

5. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1 Огляд систем з маніпулятором. 2 Розробка системи керування маніпуляторами підводного апарату. 3 Розробка прототипу маніпулятора підводного апарату. 4 Охорона праці.

6. Перелік презентаційних матеріалів (з точним зазначенням назв)

7. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
ОП	к.т.н., доцент кафедри ЕІС та РК Бабкін Г.В.		

8. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Призначення та область застосування		
2	Технічні характеристики		
3	Опис та обґрунтування прийнятих технічних рішень		
4	Розрахунки, що підтверджують працездатність		
5	Охорона праці		

Студент Шевчик (підпис) Шевчик Е. Г. (прізвище та ініціали)

Керівник роботи Бабкін (підпис) Бабкін Г.В. (прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Об'єктом дослідження є маніпуляційна система, призначена для транспортування об'ємних вантажів, проведення дрібних та супровідних ремонтних робіт під водою.

Мета роботи – розробка та дослідження моделі системи керування маніпуляторами, виготовлення макету маніпулятора.

У процесі дослідження проведено аналітичний огляд на тему, вивчено існуючі російські та зарубіжні технічні рішення, спроектовано систему керування маніпуляторами підводного апарату. Для кінцевого продукту розроблено алгоритм та написано програмне забезпечення мовою C++.

Результати досліджень дозволять використовувати власну систему маніпулювання, встановлену на апараті. Всі системи, що розробляються, можуть послужити стендовими прототипами для виконання лабораторних робіт студентами молодших курсів.

Областями застосування проекрованої системи у складі комплексу підводного апарату є: екологія, у тому числі дослідження дна водойм, виявлення та підйом об'єктів та їх подальше транспортування; енергетика - обстеження підводних споруд, у тому числі трубопроводів, прокладання та ревізія силових та інформаційних кабелів; картографія - картографія рельєфу дна водойм); геологія - геологія родовищ корисних копалин, у т.ч. нафти та газу.

Ключові слова: МАНІПУЛЯТОР, СИСТЕМА КЕРУВАННЯ, ПІДВОДНИЙ АПАРАТ, АВТОМАТИЗАЦІЯ, ТИПУ, RASPBERRY PI II, AT-MEGA.

ABSTRACT

The object of research is a manipulation system designed for transporting bulky cargo, performing minor and related repair work underwater.

The purpose of the work is to develop and study a model of the manipulator control system, and to manufacture a manipulator model.

In the process of research, an analytical review of the topic was conducted, existing Russian and foreign technical solutions were studied, a control system for the manipulators of the underwater vehicle was designed. For the final product, an algorithm was developed and software was written in the C++ language.

The research results will allow using one's own manipulation system installed on the vehicle. All systems being developed can serve as bench prototypes for laboratory work by junior students.

The areas of application of the designed system as part of the underwater vehicle complex are: ecology, including research of the bottom of reservoirs, detection and lifting of objects and their further transportation; energy - inspection of underwater structures, including pipelines, laying and inspection of power and information cables; cartography - cartography of the bottom relief of water bodies); geology - geology of mineral deposits, including oil and gas.

Keywords: MANIPULATOR, CONTROL SYSTEM, UNDERWATER APPARATUS, AUTOMATION, TYPE, RASPBERRY PI II, AT-MEGA.

ЗМІСТ

Перелік умовних скорочень.....	7
Вступ	8
1 Огляд систем з маніпулятором	10
1.1 Проблемна сфера	11
1.2 Вихідні дані до роботи	13
2 Розробка системи керування маніпуляторами підводного апарату	15
2.1 Розробка структурної схеми проекрованої системи	15
2.2 Розробка функціональної схеми проекрованої системи	16
2.3 Вибір та обґрунтування елементів системи	19
2.4 Діаграма роботи крокового двигуна	27
2.5 Алгоритм роботи системи маніпуляторів	29
3 Розробка прототипу маніпулятора підводного апарату	37
3.1 Опис маніпулятора, що проектується	37
3.2 Характеристики та особливості проектованого маніпулятора	38
3.3 Складання маніпулятора	39
3.4 Програмне забезпечення маніпулятора	44
3.5 Конструкторська документація	50
4 Охорона праці	51
4.1 Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів, характерних для асинхронного приводу промислового робота	51
4.2 Розрахунок захисного заземлення корпусу асинхронного двигуна	55
4.3 Розробка заходів щодо забезпечення безпечної експлуатації електроустановки асинхронного приводу	58
Висновки.....	60
Перелік джерел посилання.....	62

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АНПА – автономний безлюдний підводний апарат

АЦП – аналого-цифровий перетворювач

КД – кроковий двигун

МК – мікроконтролер

ПЗ – програмне забезпечення

СК – система керування

СКМ – система керування маніпуляторами

СП – сервопривід

ТНПА – телекерований безлюдний підводний апарат

ВСТУП

В даний час для дослідження та освоєння Світового океану активно використовуються підводні роботи, оснащені маніпуляторами. З їхньою допомогою вдається виконувати багато складних технологічних операцій на різних глибинах занурення. Наразі спостерігається безперервне розширення сфер застосування підводних робототехнічних систем за рахунок виконання ними нових видів робіт. Якісне виконання підводних маніпуляційних операцій вимагає створення нових систем керування як підводними апаратами, а й маніпуляторами як його складовими частинами. У зв'язку з цим перед багатьма провідними світовими науково-дослідними центрами стоїть завдання розробки систем керування маніпуляторами, у тому числі універсальних, орієнтованих на певні класи підводних роботів.

Вчинення маніпуляційних операцій, виконуваних підводним роботом необхідно як для того, щоб проводити захоплення вантажів з морського дна, але й виконання низки ремонтних робіт. Як приклад, це зварювання підводних трубопроводів, перекриття засувки у разі відмови обладнання тощо. Варто сказати про те, що людство заклало на дно світового океану величезну кількість трубопроводів, серед яких за своєю протяжністю та розгалуженістю можна виділити підводні трубопровідні системи, що знаходяться на дні Північного моря, Балтиці та ін. За міжнародними правилами проводити інспекцію таких підводних об'єктів потрібно щонайменше 2 рази на рік. Проблема полягає в тому, що на морському дні потужні підводні течії, ґрунт, на який кладуть трубу, згодом вимивається, утворюючи провиси. Труби починають провисати, зазнаючи поперечного тиску стовпа рідини. [1]

Мета цієї роботи складається у розробці маніпуляційної системи для телекерованого підводного апарату. Об'єктами дослідження є сам маніпулятор та система взаємодії між маніпуляторами. Проектована маніпуляційна система призначена для захоплення габаритних об'єктів та

їхнього подальшого транспортування під водою, а також супроводження ремонтних робіт водолазів на підводних трубопроводах.

У ході виконання роботи було розроблено основні типи схем (структурна, функціональна, електрична принципова), алгоритми роботи СКМ з поясненнями, програмний код для роботи одного маніпулятора. У ході роботи для демонстрації майбутнього пристрою був виготовлений прототип триланкового маніпулятора, який повною мірою відповідає роботі реального. Показано програмні рішення для трьох різних режимів роботи маніпулятора та його керування. Завдяки алгоритмам роботи СКМ з'являється можливість проводити захоплення та транспортування вантажів апаратом без залучення людини – за командою з операторського пульта. На основі спроектованого та зібраного маніпулятора зроблено висновки та розпочато підготовку конструкторської документації для маніпуляційної системи.

Наукова новизна роботи полягає у самій концепції СКМ та алгоритмах, що мають дворівневу систему, а також застосуванні вже існуючих методик для вирішення поставлених завдань.

1 ОГЛЯД СИСТЕМ З МАНІПУЛЯТОРОМ

Маніпулятор підводного апарату – механічна система з гідравлічним або електричним приводом, що дозволяє оператору, що знаходиться в міцному корпусі підводного апарату, що мешкає, або на судні-носії, проводити за допомогою виконавчих пристроїв цієї системи різні роботи з об'єктами, що знаходяться у воді. Маніпулятор підводного апарату складається з органів керування (що задають органів), що розташовуються на робочому місці оператора, виконавчих пристроїв, що знаходяться у воді поза міцним корпусом підводного апарату або на безлюдному прив'язному апараті, та системи керування. Виконавчі пристрої є багатоланковим просторовим механізмом з вбудованими елементами гідравлічної або електричної системи, за допомогою якої маніпулятор приводиться в рух. Конструктивне виконання їх по-різному, але кінематика схем, як правило, близька до кінематики руки людини. Вони мають ланки, звані "плечем", "передпліччям" і "пензлем", а також "плечовий", "ліктьовий" і "кистовий" шарніри і закінчуються схватом – плоскопаралельним захопленням з 2 губками. Часто виконавчі пристрої маніпулятора називають "руками" через їхню функціональну і кінематичну схожість. Маніпулятор може мати 1 або 2 руки, які забезпечують зворотно-поступальний та обертальний рухи в різних площинах, захоплення предметів або інструменту та роботу з ними. Органи керування найпростіших маніпуляторів є невеликим пультом для включення і вимкнення приводів, що забезпечує виконання елементарних роздільних рухів ланок руки (поворот "плеча", стиснення схвата, його обертання і т. д.). У більш досконалих маніпуляторах керування проводиться пристроями, що задають, виконаними у вигляді складної, багатоланкової мнемонічної рукоятки (або 2 рукояток, якщо маніпулятор має 2 руки). У цьому випадку, командою для виконання є безпосередньо поступальний або обертальний рух кисті руки (або рук) оператора разом з рукояткою, що копіюється виконавчим пристроєм, тобто рух вперед і назад руки оператора призводить

до руху вперед і назад "руки" маніпулятора, обертальний рух кисті руки оператора викликає обертання "кисті" маніпулятора і т. д. За допомогою датчиків, розташованих на схваті, оператор відчуває момент зіткнення губок схвата з об'єктом робіт, а також зміна сили тиску схвата на об'єкт. Оператор підводного апарату, що мешкає, веде спостереження за роботою виконавчих пристроїв маніпулятора через ілюмінатор або спеціальну зорову трубу, а оператор безлюдного підводного апарату - за допомогою монітора. При цьому місце та об'єкт робіт висвітлюються забортними світильниками. Багато маніпуляторів мають набір спеціального інструменту, що дистанційно замінюється. Зазвичай маніпулятор забезпечує роботу в радіусі 1-3 м та підйом вантажу масою до 50-70 кг власними руками. В аварійних ситуаціях маніпулятор для безпеки від'єднують від підводного апарату [2].

1.1 Проблемна сфера

Світовий досвід застосування підводної техніки доводить, що без неї неможливо уявити розвиток нафто- і газодобувної галузі в шельфовій зоні, проведення обстежувальних робіт, здійснення рятувальних і пошукових операцій, гідрографічних і біологічних досліджень. Так, згідно з попередніми розрахунками, проведеними британською нафтовидобувною компанією «Shell» [3], використання підводних апаратів для проведення глибоководних обстежень та виробничих завдань, а саме обстеження районів для буріння свердловин, маршрутів прокладання трубопроводів, збору океанографічних даних, проб з ділянок місцевості дозволить заощадити до 772 млн доларів на рік.

Існуючі підводні апарати, оснащені багатоланковими маніпуляторами, необхідні заміни важкої і небезпечної праці водолазів і дайверів. При цьому вони здатні виконувати широкий спектр технологічних операцій протягом тривалого часу на глибинах, недосяжних для людини, навіть у спеціалізованому водолазному спорядженні. У багатьох російських та

зарубіжних роботах [4-18, 21] зазначається, що обладнані маніпуляторами підводні роботи використовуються для виконання низки завдань, серед яких такі є найважливішими:

- в галузі гідрогеологічних, геофізичних та гідрохімічних досліджень виконується селективний відбір проб ґрунту та зразків геологічних порід; механічне відділення та буріння цих порід із монолітів; збирання окремих видів біоорганізмів; встановлення та обслуговування різних приладів; визначення складу та щільності ґрунту за допомогою спеціальних щупів та бурів; взяття проб опадів ґрунтовими трубками, що герметично закриваються; вимірювання параметрів за допомогою термісторних датчиків у різних шарах осадового ґрунту;

- підводні апарати з маніпуляторами виконують технологічні підводні операції з очищення дна акваторій від каміння та сміття; із встановлення та зняття гідроакустичних маяків; з проведення зварювальних робіт, закріплення тросів, кабелів та іншої апаратури на підводних об'єктах; з прокладання підводних кабелів, монтажу та демонтажу різного підводного обладнання; з огляду підводних частин суден, гідропоруд тощо;

- в галузі нафто- та газовидобутку підводні апарати, оснащені маніпулятором (-ами) використовуються для надання допомоги при повторному введенні бура в свердловину; взяття проб нафти та газу; монтажу та ремонту гідрокомунікацій; закручування вентилів; очищення сталевих конструкцій від обростання; різання тросів, кабелів та ін. При виконанні аварійно-рятувальних операцій за допомогою маніпулятора здійснюється звільнення гвинто-кермової групи суден від намотаних мереж та тросів; зрізання болтів; відкриття люків; різання металевих обшивок та ін;

- у військових цілях здійснюється постановка та зняття мін; створення проходів у мережевих загородженнях; встановлення вибухових пристроїв.

Для якісного виконання зазначених складних технологічних операцій закріплені на підводному апараті маніпулятори повинні мати не менше трьох ступенів рухливості, що дозволяють їх робочим інструментам переміщатися

з будь-якою просторовою орієнтацією в будь-яку точку зони маніпулювання. При цьому підводний апарат і маніпулятор повинні мати необхідні запаси за потужністю і вантажопідйомністю. Понад те, системи керування повинні мати у своєму складі наявність контуру регулювання для стабілізації роботи як робота, і його окремих систем.

Основними видами робіт, для яких призначена створювана маніпуляційна система - транспортування габаритних об'єктів загальною масою до 10 кг та розмірами 650x450x150 мм (макс.)/150x45x45 мм (хв.). Також використання цієї СКМ передбачається для прокладання кабелів та проведення супровідних робіт на гідропорудах.

1.2 Вихідні дані до роботи

а) Остаточний варіант першого прототипу підводного робота представлений рис. 1.1.

б) Математична модель системи керування глибиною занурення. Ця модель є основною для проектування та обліку спільної роботи апарату та його маніпуляційної системи (рис. 1.2).

в) Базові компоненти, які вже враховані під час проектування першого прототипу підводного апарату (одноплатний комп'ютер) Raspberry Pi II B - як головний керуючий комп'ютер, мікроконтролери Atmega 8A - як пристрої для прийому сигналів головного комп'ютера та керування положеннями двигунів).

Повний опис роботи системи занурення, і навіть особливостей проектування самого апарату, описано у роботі [19].



Рисунок 1.1 – Прототип підводного робота

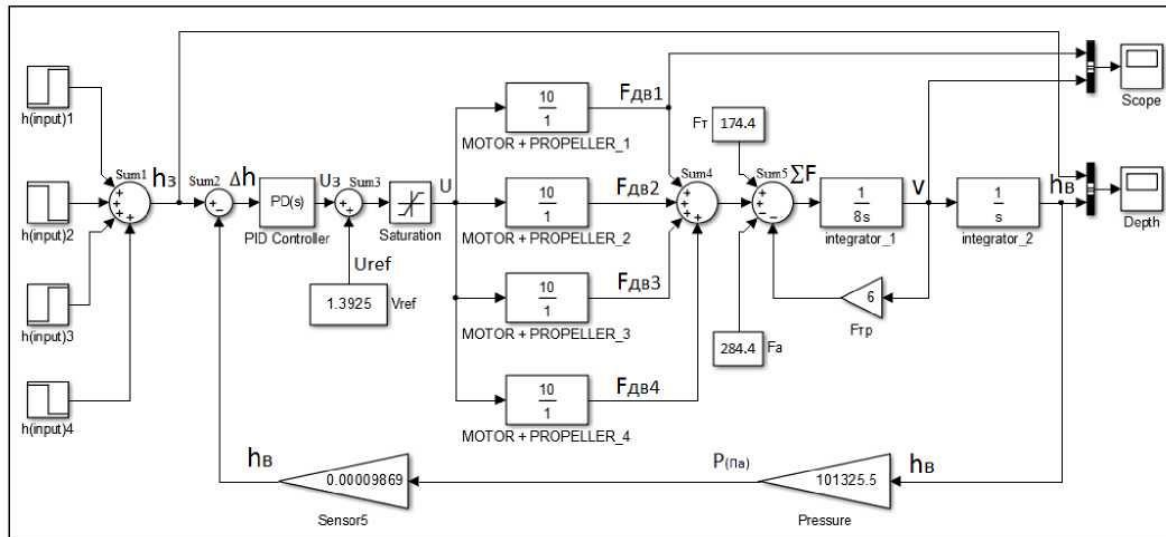


Рисунок 1.2 – Математична модель системи керування глибиною занурення робота

2 РОЗРОБКА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ МАНІПУЛЯТОРАМИ ПІДВОДНОГО АПАРАТУ

2.1 Розробка структурної схеми проектованої системи

На підставі технічного завдання та огляду рішень складемо структурну схему маніпуляційної системи, що розробляється. Ця схема повинна відображати всі взаємозв'язки між елементами та на її основі проводиться наступний вибір елементів, розробка електричної принципової схеми.

Структурна схема маніпуляційної системи включає наступні блоки, необхідні для функціонування системи: пристрій прийому та обробки команд як головний комп'ютер, що управляє апаратом; пристрій передачі команд на виконавчі механізми (дублюючі пристрої передачі сигналів керування для розвантаження операцій основного комп'ютера); виконавчі органи реалізації поставлених завдань; пристрої зчитування (датчики, аналізатори тощо. реалізації зворотного зв'язку). Для забезпечення всіх пристроїв системи електричним живленням шляхом перетворення енергії інших джерел живлення необхідно використовувати джерело вторинного електроживлення. Загальна структура маніпуляційної системи представлена рис. 2.1.



Рисунок 2.1 – Структурна схема маніпуляційної системи

Оператор зі свого робочого місця задає координати об'єкта, що захоплюється/виготовляє захоплення об'єкта самостійно (автоматичний і ручний режим відповідно). Основний принцип роботи СК для автоматичного режиму полягає в тому, що координати об'єкта, що захоплюється, передані на пристрій прийому/обробки/передачі інформації, перераховуються відповідно до поставленого алгоритму в необхідні сигнали керування, які транслуються на пристрої керування виконавчими органами. Така організація зв'язку дозволяє розвантажувати канал керування та зменшувати шину передачі інформації, і навіть сприяє відсутності виникнення колізій чи перешкод під час роботи головного комп'ютера апарату. Пристрої передачі команд на виконавчі органи необхідні здійснення зв'язку з виконавчим механізмом по всіх каналах зв'язку, а також зчитування сигналів про виконання поставлених завдань з датчиків.

2.2 Розробка функціональної схеми проектованої системи

Складемо функціональну схему маніпуляційної системи, що розробляється. Дана схема є матеріалом, що пояснює окремих видів процесів, що протікають в ланцюгах пристрою.

Функціональна схема, представлена рис. 2.2, відбиває роботу всієї системи керування одним маніпулятором. На схемі відзначені типи сигналів, що передаються, і кількість комутованих каналів зв'язку між окремими блоками пристроїв.

керування рухом, зануренням і стабілізацією). Мікроконтролери Atmega 8A використовуються як пристрої, що приймають вихідний кодовий сигнал в аналоговій формі і формують необхідні імпульси для подачі їх на драйвери керування двигунами. Драйвери здійснюють комутування обмоток двигуна, у результаті проводиться поворот на заданий кут (статутунку). У ланцюзі зворотного зв'язку є датчики положення, що фіксують зміни положення валу ротора в даний момент з попереднім і видають сформований сигнал неузгодженості на МК Atmega 8A для усунення помилки регулювання. Після виконання завдання з МК надходить сигнал на одноплатний комп'ютер про виконання свого поставленого завдання.

Робота протоколу I²C

Передача даних на шині розпочинається з сигналу START (ST). Подія START визначено як перехід лінії SDA від стану HIGH до стану LOW (під HIGH і LOW маються на увазі стани лог. 1 та лог. 0 відповідно), коли SCL знаходиться в HIGH. Після того як START був ініційований майстром шини, шина вважається зайнятою. Наступний байт даних передається після події START, і він містить адресу підлеглого пристрою в перших 7 бітах, і 8 біт каже, майстер отримуватиме дані від підлеглого пристрою або дані будуть передаватися в підлеглий пристрій. Коли адреса передана, кожен пристрій, підключений до цієї шини в системі, порівнює перші 7 біт після події START зі своєю власною адресою. Якщо адреси збіглися, пристрій визначає, що саме з ним працюватиме майстер (таким чином, на одній шині I²C може бути підключено декілька пристроїв із різною адресою).

Адреса підлеглого пристрою (slave address, SAD), пов'язаний с L3G4200D, дорівнює 110100xb. Лінія SDO може використовуватися для того, щоб встановити останній LSB біт (який позначений x) адреси пристрою. Якщо на SDO лог. 1, то біт LSB адреси 1 і адреса буде 1101001b. І навпаки, якщо на SDO подано лог. 0, то LSB дорівнюватиме 0, адреса буде 1101000b. Цей метод дозволяє підключити одну шину I2C два різні гіроскопи L3G4200D.

Передача даних шиною I²C потребує обов'язкового підтвердження (acknowledge). Для цього передавач має звільнити лінію SDA під час імпульсу acknowledge. Приймач має перекласти SDA у стан LOW, і утримувати її в такому стані під час HIGH стан імпульсу такту для біта acknowledge. Приймач, адресований, повинен обов'язково видавати таке підтвердження після кожного прийнятого байта даних [22].

Приклад схемотехніки з головним мікроконтролером (цC Master) і трьома підлеглими (slave) пристроями (ADC – аналого-цифровий перетворювач DAC – цифро-аналоговий перетворювач та другий (підлеглий) мікроконтролер (цC Slave), підтягуючими резисторами R_p (рис. 2.3).

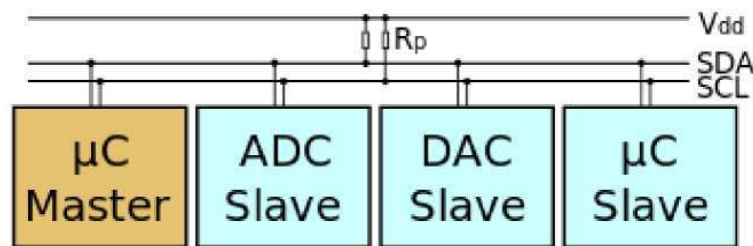


Рисунок 2.3 – Протокол прийому передачі даних I²C

2.3 Вибір та обґрунтування елементів системи

Як було згадано раніше в розділі «Вихідні дані», як головний комп'ютер системи виступає одноплатний комп'ютер Raspberry Pi II B, а як пристрої передачі команд на виконавчі органи - мікроконтролери Atmega 8A. Варто зазначити, що все керування можна організувати з використанням одного МК та одного драйвера двигунів, але в цьому випадку підвищується рівень відмови роботи виконавчого органу у разі виходу з ладу МК. Так як необхідно точне позиціонування (відповідно до технічного завдання ± 5 мм), то доцільно як ІО використовувати крокові двигуни. Для цього типу двигунів використовують мікросхеми L297 і L298N (L293) як керуючі. Керування даними мікросхемами здійснюється лише завданням тактової частоти (частота повторення кроків) та статичного сигналу для спрямування руху.

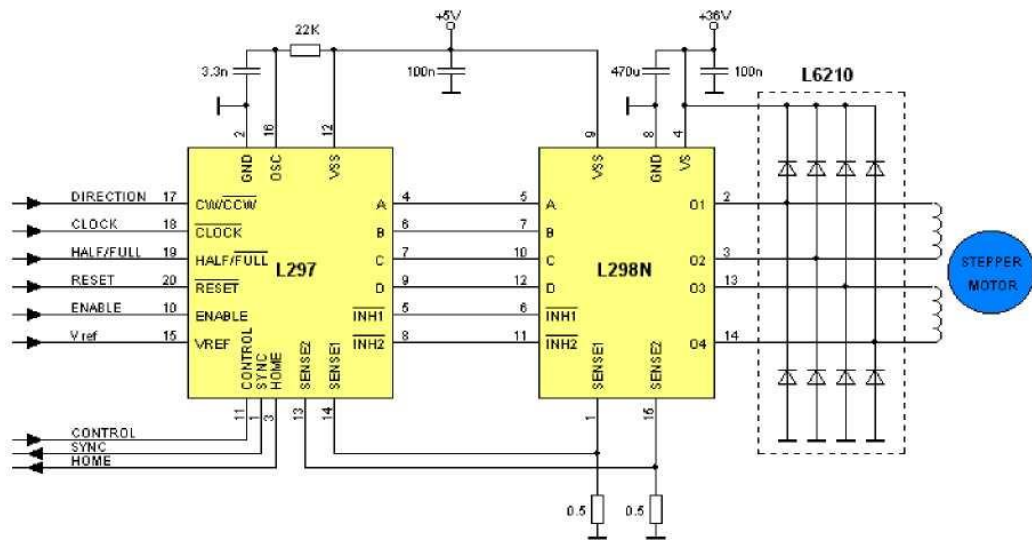


Рисунок 2.4 – Типова схема включення мікросхем L297 і L298N

Мікросхема L297 сильно розвантажує керуючий мікроконтролер, тому що від нього потрібна лише тактова частота CLOCK (частота повторення кроків) та кілька статичних сигналів: DIRECTION – напрямок (сигнал внутрішньо синхронізований, перемикає будь-якої миті), HALF/FULL – півкроковий/повнокроковий режим RESET - встановлює фази у вихідний стан (ABCD = 0101) ENABLE – дозвіл роботи мікросхеми, Vref- опорна напруга, яка задає пікову величину струму при ШІМ-регулюванні. Крім того, є кілька додаткових сигналів. Сигнал CONTROL визначає режим роботи ШІМ-регулятора. За його низького рівня ШІМ-регулювання відбувається по виходах INH1, INH2, а за високого – з виходів ABCD. SYNC – вихід внутрішнього тактового генератора ШІМ. Він служить для синхронізації кількох мікросхем. Також можна використовувати як вхід при тактуванні від зовнішнього генератора. HOME – сигнал початкового положення (ABCD = 0101). Він використовується для синхронізації перемикачів режимів HALF/FULL. Залежно від моменту переходу в півнокроковий режим мікросхема може працювати в режимі з однією увімкненою фазою або двома включеними фазами [23].

Останнім елементом для системи, що проектується, є сам кроковий

двигун. Згідно з технічним завданням, один маніпулятор повинен піднімати та транспортувати вантаж масою до 3,5 кг. Також необхідно враховувати масу всіх ланок самого маніпулятора та масу самих двигунів. Максимальна довжина розкриття маніпулятора становить 300 мм, що відповідає висоті корпусу підводного апарату Odyssey. Підбір двигунів необхідно здійснювати з двигуна для самого схвату, так як з подальшим віддаленням від схвату проводиться облік маси ланок і вантажу, що утримується.

Для захоплення та утримання вантажу із заданими параметрами підходить кроковий двигун Nema 23, що є гібридним КД. Параметри даного двигуна наведено у табл. 2.1, а креслення рис. 2.5. Цей двигун має не тільки порівняно невеликі розміри (60) x 60 x 112 мм), але й високі показники вантажопідйомності при заданих параметрах. При цьому вага двигуна становить 1 кг. За отриманими даними, маса захоплення становитиме 2,5–3 кг. Для подальших розрахунків керуватимемося верхнім значенням даного параметра, проектуючи «із запасом».

Таблиця 2.1

Параметр	Значення
Кутовий крок, град	1.8
Похибка кутового кроку, град	±5% (повний крок без
Робоча температура	-20 ^o C ~ +50 ^o C
Опір ізоляції	>100 M Q, 500 VDC
Максимальне допустиме радіальне навантаження на вал	75 Н
Максимальне допустиме осьове навантаження на вал	15 н
Максимальне нагрівання двигуна	80 ^o C (при номінальному струмі, 2 фази)
Крутний момент кг-см	3.9 ~ 18.0
Струм фази КД, А	1.0~3.0

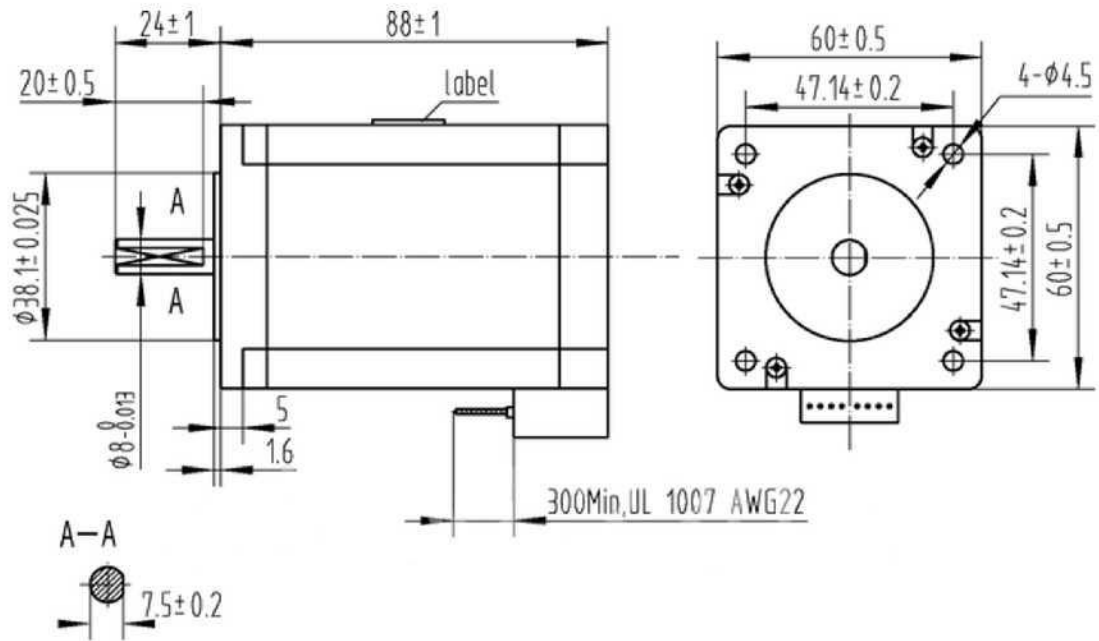


Рисунок 2.5 – Креслення гібридного крокового двигуна Nema 23

Наступний двигун повинен здійснювати обертання першої кистьової тяги маніпулятора. Так як маніпулятор має два основних плечі, за рахунок яких відбувається переміщення до точки призначення, ці плечі рівні, отже, довжина такого плеча становить 150 мм. За отриманими даними, маса самого маніпулятора (без встановлених двигунів та вантажу) складе 13 кг, то покладемо вагу першої тяги рівним 5 кг. Таким чином, необхідно підібрати кроковий двигун, що утримує тягу (5 кг), схват маніпулятора (3 кг), вантаж, що захоплюється (3,5 кг) і двигун схвата (1 кг). Зважаючи на факт, що тяга є плечем з характеристиками, близькими до ідеальних, підберемо двигун, що утримує 7,5 кг на відстані 150 мм, і 5 кг на відстані 75 мм. Знаючи, що це характеристики тяги подібних двигунів вказуються у розмірності кг-см, необхідне значення тяги вдасться знайти, вирішивши такі пропорції:

$$\frac{15(\text{см})}{1(\text{см})} = \frac{x_1(\text{кг})}{7,5(\text{кг})}, \quad \frac{7,5(\text{см})}{1(\text{см})} = \frac{x_2(\text{кг})}{5(\text{кг})}, \quad x = x_1 + x_2$$

де x – шукане значення тяги крокового двигуна.

Отримуємо $x_1 = 112,5$ кг см, $x_2 = 37,5$ кг см, $x = 112,5 + 37,5 = 150$ кг-см

Таким чином, крутний момент двигуна, що підбирається, повинен бути не менше ніж 150 кг-см. Найближчим до цього порога за показником тяги є гібридний КД FL110STH150-6504 (Nema) 42), параметри якого представлені табл. 2.2, а креслення – рис. 2.6. Розміри даного двигуна більші (110 x 110 x 150 мм), ніж у його аналога, тому при проектуванні кінцевого варіанта маніпулятора необхідно це врахувати.

Наступний двигун, що вибирається, повинен здійснювати обертання другої кистьової тяги маніпулятора. Довжина другого плеча, як першого, становить 150 мм. Вага, яку необхідно утримувати і переміщати двигуну на даному плечі дорівнює вазі двох двигунів (8,4 кг і 1 кг), вазі першої тяги (5 кг), схвата (3 кг) і вантажу, що транспортується (3,5 кг), що становить 20,9 кг.

Таблиця 2.2

Параметр	Значення
Кутовий крок, град	1.8
Похибка кутового кроку, град	$\pm 5\%$ (повний крок без
Робоча температура	$-20^{\circ}\text{C} \sim +50^{\circ}\text{C}$
Опір ізоляції	$>100 \text{ M Q}, 500 \text{ VDC}$
Максимальне допустиме радіальне навантаження на вал	220 Н
Максимальне допустиме осьове навантаження на вал	60 Н
Максимальне нагрівання двигуна	80°C (при номінальному струмі, 2 фази)
Крутний момент кг	31 ~ 214
Струм фази КД, А	2.8 ~ 6.2

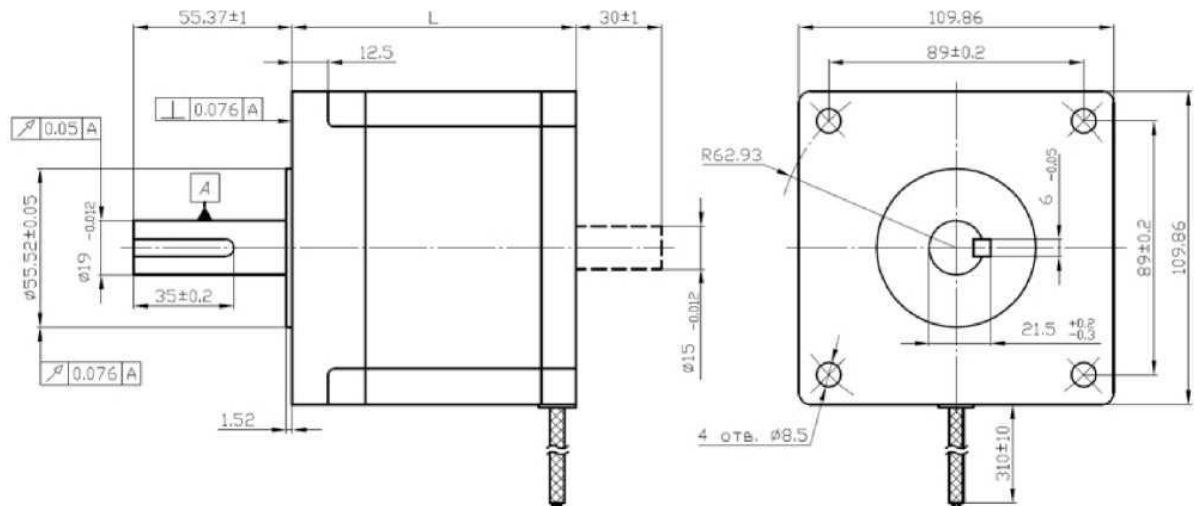


Рисунок 2.6 – Креслення гібридного крокового двигуна Nema 42

Як і в попередньому випадку, візьмемо до уваги факт, що тяга є плечем із характеристиками, близькими до ідеальних. Відповідно, необхідно підібрати двигун, що утримує 20,9 кг на відстані 150 мм, і 5 кг на відстані 75 мм. Вирішуємо такі пропорції:

$$\frac{15(\text{см})}{1(\text{см})} = \frac{y_1(\text{кг})}{20,9(\text{кг})}, \quad \frac{7,5(\text{см})}{1(\text{см})} = \frac{y_2(\text{кг})}{5(\text{кг})}, \quad y = y_1 + y_2$$

де y – шукане значення тяги крокового двигуна.

Отримуємо $y_1 = 313,5$ кг см, $y_2 = 37,5$ кг см, $y = 313,5 + 37,5 = 351$ кг-см.

Таким чином, крутний момент двигуна, що підбирається, повинен бути не менше ніж 351 кг-см. Найближчим до цього порога є гібридний КД FL130BYG2503-2502 (Nema) 51), параметри якого представлені у табл. 2.3, а креслення – рис. 2.7. Розміри даного двигуна є найбільшими з усіх раніше підібраних двигунів (133 x 133 x 315), тому при проектуванні кінцевого варіанта маніпулятора необхідно передбачити. Ще одним варіантом для маніпуляцій є використання редуктора, що дозволяє, по-перше, скоротити загальну масу маніпулятора, а по-друге, зменшити його лінійні розміри. У цій роботі це питання не розглядається докладніше, отже, поки обраний двигун є необхідним для проектування системи варіантом.

Для двигуна в основі необхідно проводити облік лише відстані від ротора до місця кріплення двигуна на корпусі та всієї маси маніпулятора з двигунами. Таким чином, знаючи загальну масу, яка становить 45,9 кг, і вибравши значення відстані від центру валу до центру кріплення двигуна становить 25-35 мм, тяга двигуна повинна знаходитися в межах від 114,75 до 160,65 кг-см. Цим умовам задовольняє вибраний раніше двигун Nema 42, максимальний момент якого дорівнює 285 кг см, а відстані від центру осі двигуна до центру кріплення становить 45 мм, а це говорить про те, що величина крутного моменту повинна бути не менше 206,55 кг см.

Таблиця 2.3

Параметр	Значення
Кутовий крок, град	1.8
Похибка кутового кроку, град	$\pm 5\%$ (повний крок без
Робоча температура	$-20^{\circ}\text{C} \sim +50^{\circ}\text{C}$
Опір ізоляції	$>100 \text{ M } \Omega, 500 \text{ VDC}$
Максимальне допустиме радіальне навантаження на вал	220 Н
Максимальне допустиме осьове навантаження на вал	60 Н
Максимальне нагрівання двигуна	80°C (при номінальному струмі, 2 фази)
Крутний момент кг	509
Струм фази КД, А	7

Вибраний раніше при проектуванні підводного апарату мікроконтролер Atmega 8 А відповідає необхідним технічним вимогам. Також для прошивки мікроконтролера Atmega8A [27] не потрібно складного спеціалізованого обладнання: це завдання вирішується програматорами JTAG, завдяки яким можна записати/вважати інформацію в постійний пристрій МК. Налагодження роботи МК зручніше проводити за допомогою спеціальної плати Pinboard II [28], що використовується багатьма радіоаматорами та

професіоналами.

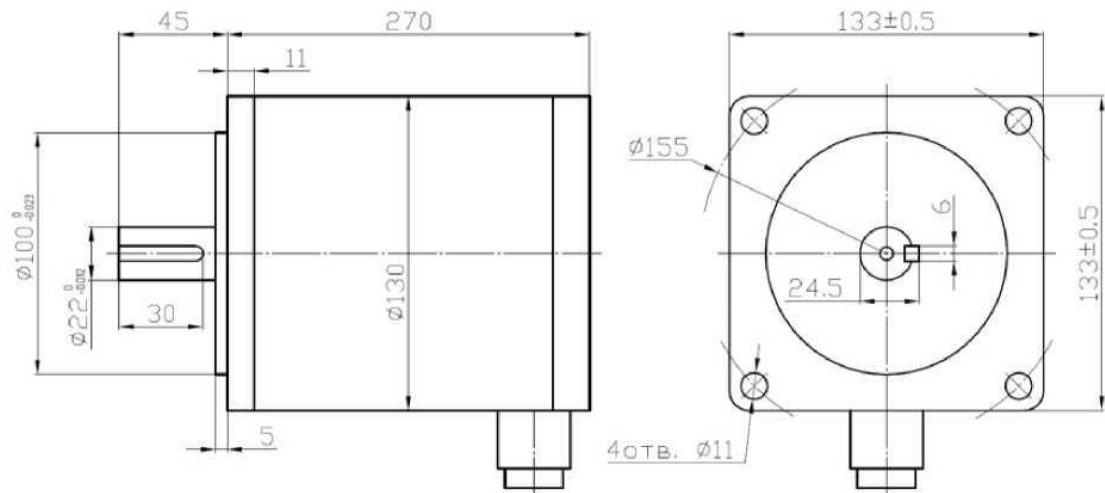


Рисунок 2.7 – Креслення гібридного крокового двигуна Nema51

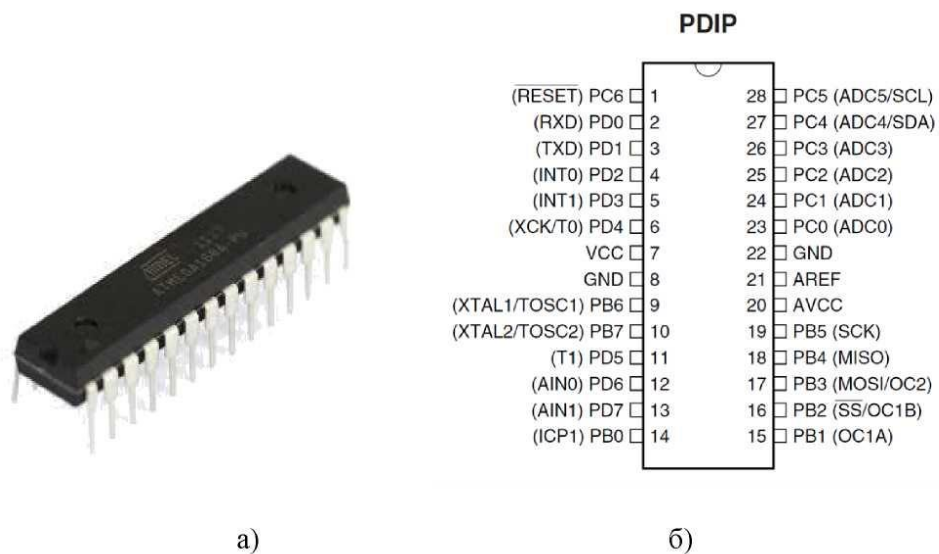


Рисунок 2.8 – а) Мікроконтролер Atmega8A, б) Схема розташування висновків мікроконтролера Atmega 8A у корпусі PDIP

Для обраної схеми необхідне джерело живлення з виходами напруга величинами 5В для роботи мікроконтролера, потенціометрів, схеми L297 драйвера крокового двигуна та в 12 В, необхідного для роботи схеми L298N драйвера крокового двигуна та його запуску. Будь-який комп'ютерний блок живлення забезпечить необхідну напругу.

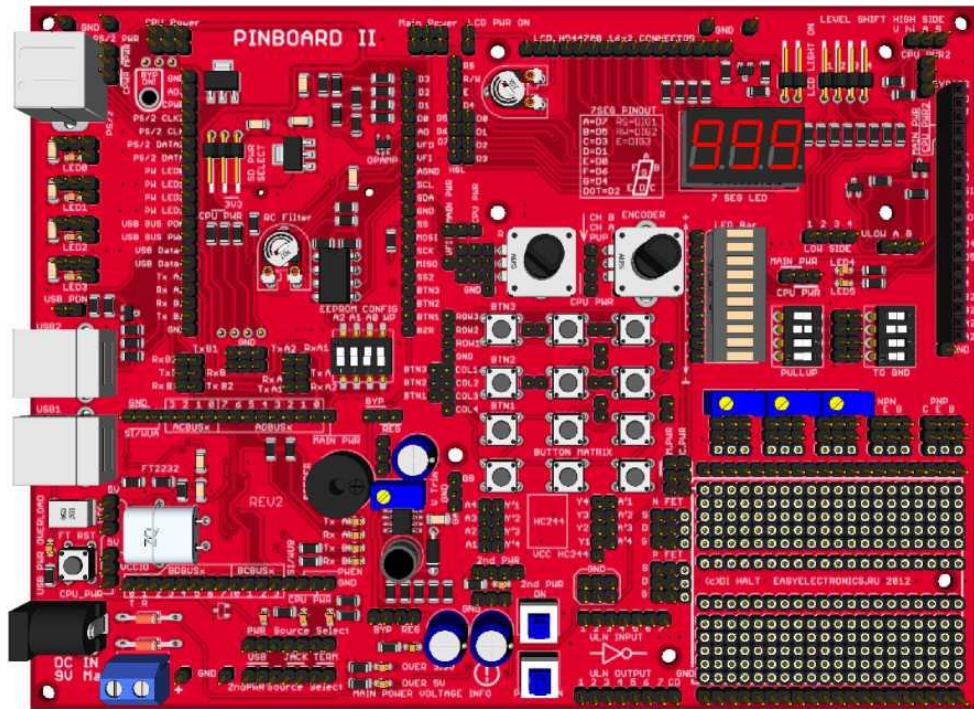


Рисунок 2.9 – Налагоджувальна плата Pinboard II



Рисунок 2.10 – Зовнішній вигляд комп'ютерного блоку живлення

2.4 Діаграма роботи крокового двигуна

На основі документів [29] та [30] складемо діаграми роботи, які будуть необхідні для подачі імпульсів на схеми L297 з мікроконтролера Atmega 8A для керування кроковими двигунами.

Використовуючи як драйвер схеми L297 і L298N, можна отримати такі режими роботи двигуна, півкроковий режим роботи (рис. 2.11):

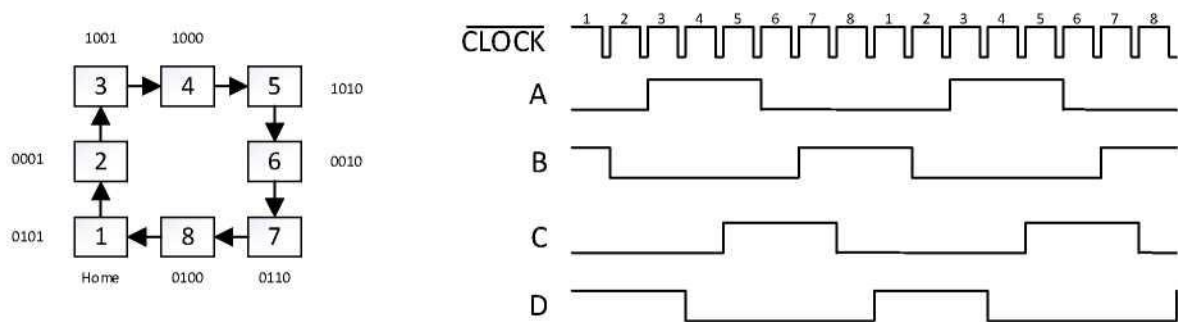


Рисунок 2.11 – Півкроковий режим роботи крокового двигуна

Півкроковий режим роботи двигуна виходить шляхом подачі на вхід HALF/FULL сигналу високого рівня, тобто одиниці, повнокроковий (нормальний) режим роботи (рис. 2.12):

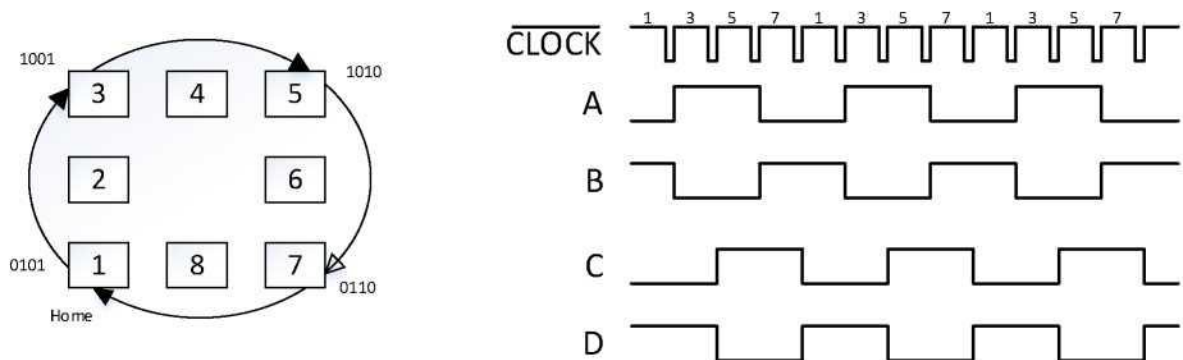


Рисунок 2.12 – Повнокроковий режим роботи крокового двигуна

Повнокроковий режим роботи двигуна виходить шляхом подачі на вхід HALF/FULL сигналу низького рівня, тобто хвильовий (коливальний) режим роботи (рис. 2.13):

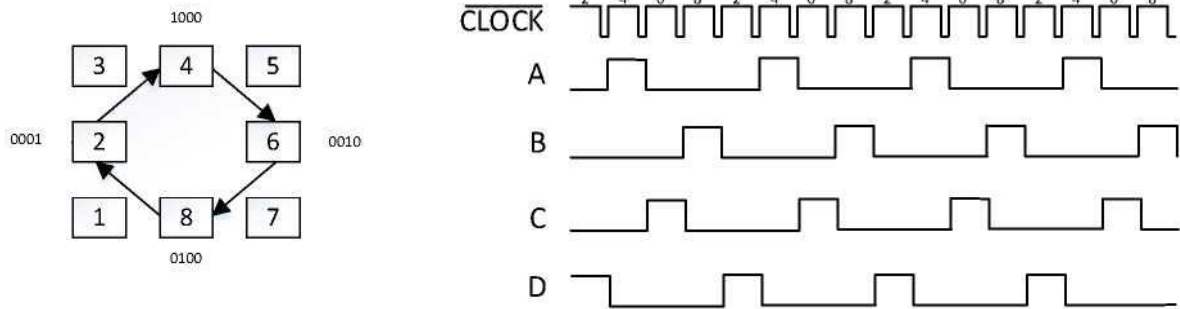


Рисунок 2.13 – Хвильовий (коливальний) режим роботи крокового двигуна

Хвильовий (коливальний) режим роботи двигуна виходить шляхом подачі на вхід HALF/FULL сигналу низького рівня, тобто. 0, коли перетворювач перебуває у парних станах (тобто. 2, 4, 6 чи 8).

У проектованій системі для досягнення високої точності використовуються повнокроковий та півкроковий режими роботи крокових двигунів.

2.5 Алгоритм роботи системи маніпуляторів

Алгоритм роботи системи керування маніпуляторами, як і було сказано, є дворівневою структурою. Розглянемо у наступних двох пунктах цю структуру докладніше.

2.5.1 Алгоритм роботи мікроконтролера Atmega 8A

Алгоритм роботи мікроконтролера Atmega 8A подано на рис. 2.14. Основним завданням виконання цього алгоритму є прийом керуючих сигналів зі значеннями кутів із одноплатного комп'ютера Raspberry Pi II B, їх перерахунок і подача таких сигналів, які, враховуючи поточне положення двигуна, переведуть його в те, що задається. Також контролер надсилає сигнал виконання завдання на одноплатний комп'ютер.

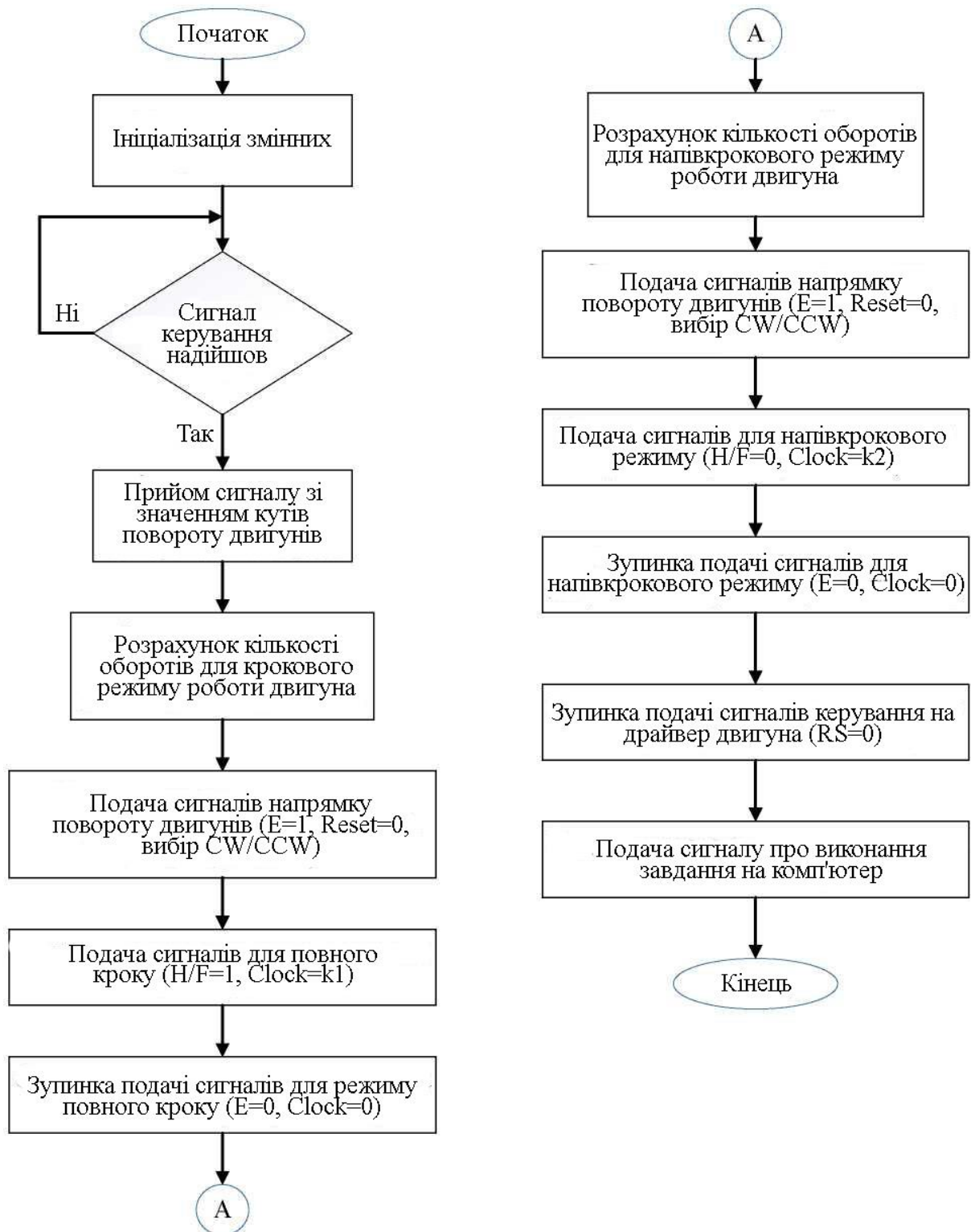


Рисунок 2.14 – Алгоритм роботи мікроконтролера Atmega 8A

Пояснення до алгоритму роботи МК Atmega (рис. 2.14):

Припустимо, що фздатчика – кут, який необхідно повернути вал двигуна, кут повороту валу двигуна у півнокровому режимі - кут повороту валу двигуна у півкроковому режимі – кількість кроків двигуна у

півнокроковому режимі k_2 – кількість кроків двигуна у півнокроковому режимі
 n – змінна, знак якої визначає напрямок обертання валу.

Тоді:

$$n = \text{sign}(\varphi_{\text{здатчика}})$$

если $n = +1$, то $CW/CCW = 1$;

если $n = -1$, то $CW/CCW = 0$.

$$k_1 = \text{modf}(\varphi_{\text{здатчика}} / \varphi_{\text{полн}}) (1^*)$$

$$k_2 = \text{modf}((\varphi_{\text{здатчика}} - k_1) / \varphi_{\text{полу}}) (2^*)$$

2.5.2 Алгоритм роботи системи керування маніпулятором

Алгоритм роботи системи керування маніпулятором представлена на малюнках 16-18. Основним завданням виконання даного алгоритму є прийом керуючих сигналів від оператора з АРМ, звернення до оброблених даних із системи відеоспостереження, робота з математичною моделлю маніпулятора, подача сигналів на контролери, що управляють двигунами, а також зчитування сигналів з датчиків положення і струму, встановлених у зворотному зв'язку. Результатом виконання алгоритму є переміщення маніпулятора з поточного положення задане, а також здійснення операцій захоплення і подальшого транспортування об'єкта.

Також нижче наведено пояснення до певних блоків алгоритму, що дозволяють відобразити всі підзавдання, які виконуються в тому чи іншому блоці.

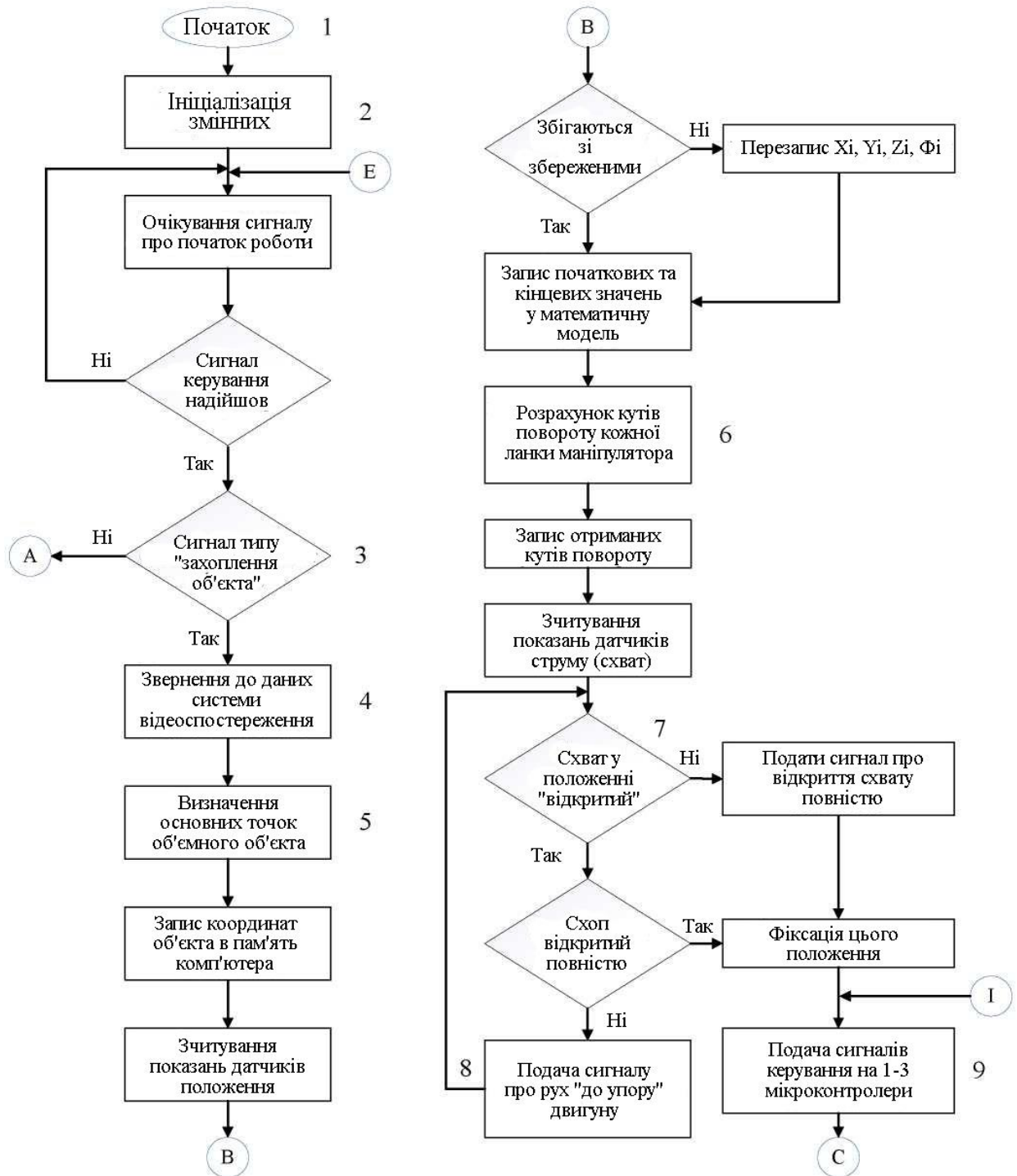


Рисунок 2.15 – Алгоритм роботи системи керування маніпулятором
(початок)

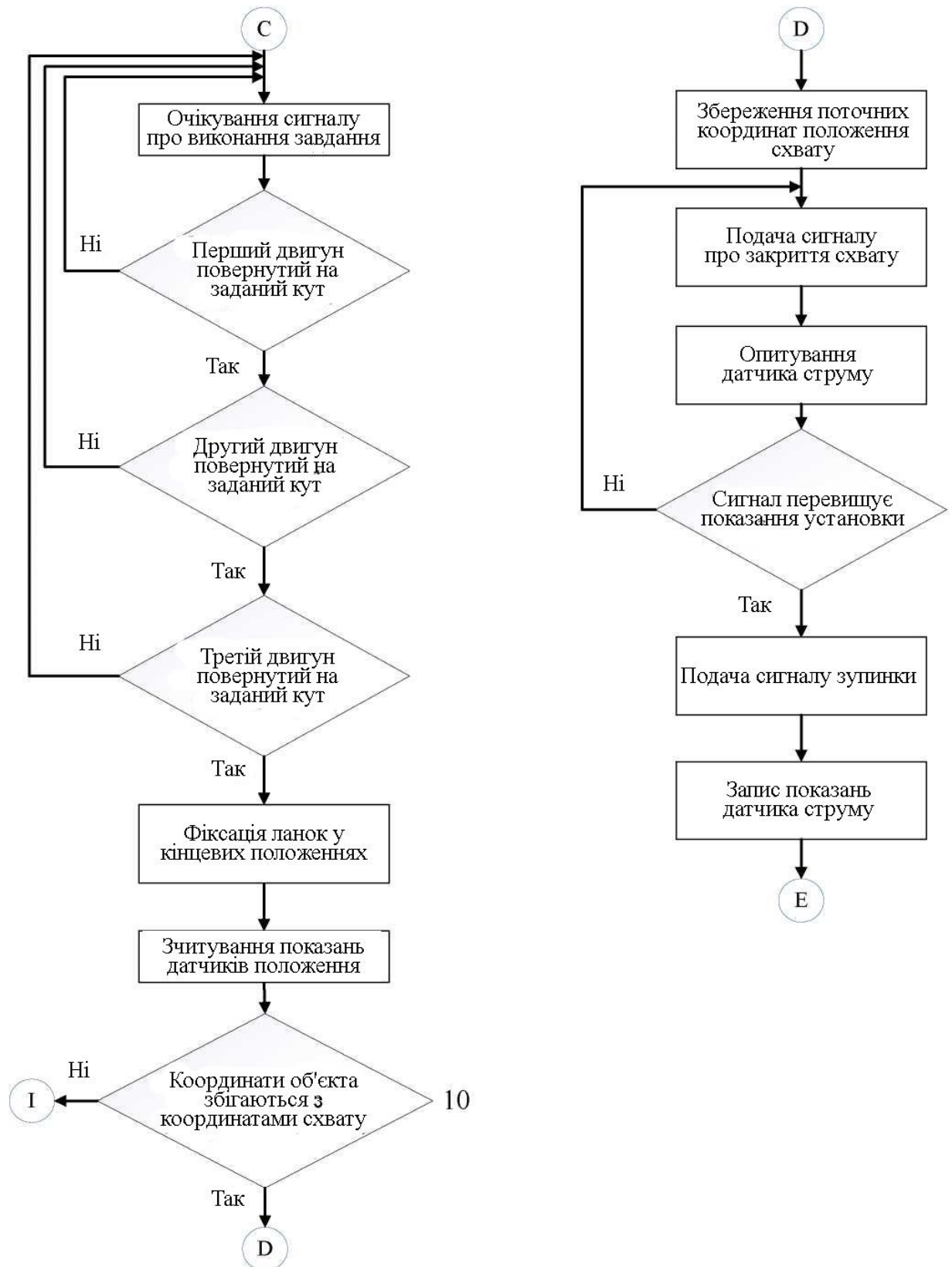


Рисунок 2.15 – Алгоритм роботи системи керування (продовження)

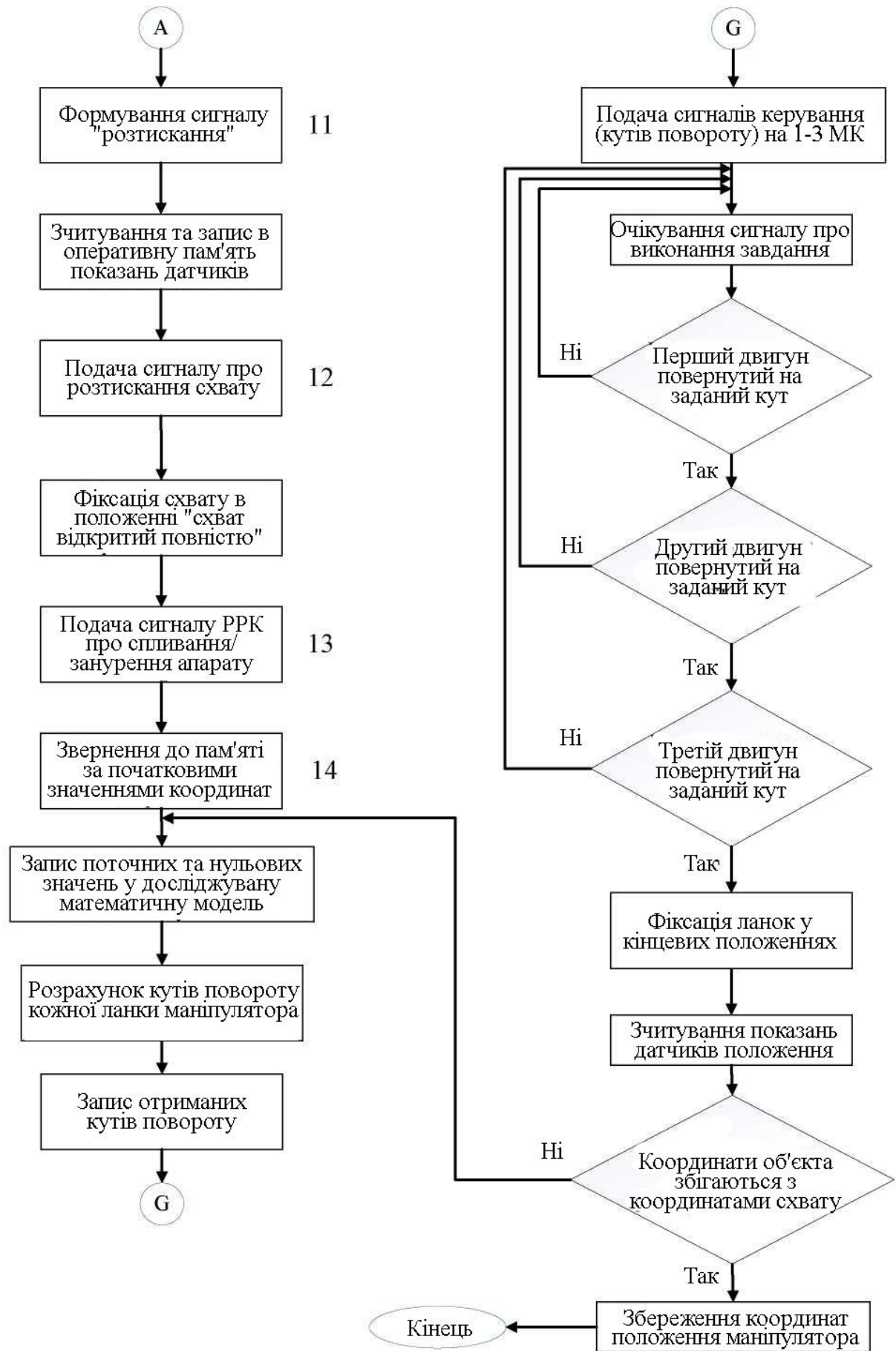


Рисунок 2.15 – Алгоритм роботи системи керування (кінець)

Пояснення до алгоритму роботи СК маніпулятором (рис. 2.15):

- 1) Увімкнення системи живлення одноплатного комп'ютера (OK).
- 2) Завантаження в оперативну пам'ять тимчасових змінних до роботи: довжини ланок l_i останні збережені положення ланок: x_i, y_i, z_i, ϕ_i .
- 3) Перевірка сигналу: сигналу типу «захопити об'єкт» (лог. 1) або сигнал типу «відпустити об'єкт» (лог. 0).
- 4) Комп'ютер посилає сигнал на систему відеоспостереження, яка визначає кінцеві точки захоплюючого вантажу.
- 5) Визначення координат x^o_i, y^o_i, z^o_i .
- 6) Знаходження кутів для матриці, запис встановлених значень (метод Денавіта-Хартенберга).
- 7) Перевірка положення схвату. Можливі три стани: схват повністю відкритий, схват відкритий частково, схват повністю закритий.
- 8) Подача довільного сигналу, після чого схват або повністю розкривається, і, проходячи перевірку умов, фіксується в даному положенні, або спочатку закривається, проходить перевірку умов і розтискається, фіксуючись в положенні «відкритий повністю».
- 9) Збережені розраховані кути поворотів із комп'ютера Raspberry Pi II подаються по шині на мікроконтролери, що управляють ланками.
- 10) Перевірка координат схвата, отриманих внаслідок переміщення маніпулятора (кінцева точка) у порівнянні з розрахованими координатами. У разі невідповідності - перехід до блоку «Подача сигналів на 1-3 МК».
- 11) Сигнал «розтискання» формується для того, щоб об'єкт, транспортований, був поставлений в кінцевій точці.
- 12) Відкриття схвата: переведення в положення «схват відкрито повністю».

13) Щоб уникнути ситуації, що робот зачепить дно та/або інший підводний об'єкт, рушійно-кермовому комплексу подається сигнал про спливання апарата.

14) Зчитування даних - «похідне положення» маніпуляційної системи для пересування апарата під водою.

2.5.3 Алгоритм роботи системи керування маніпуляторами

Алгоритм роботи системи керування маніпуляторами представлений рис 19. Основним завданням виконання даного алгоритму є прийом сигналів, що управляють від оператора з АРМ, розподіл сигналів керування між маніпуляторами, перевірка виконання завдання. Результатом виконання алгоритму є переміщення всіх маніпуляторів з поточних положень до заданих, а також здійснення операцій захоплення та подальшого транспортування габаритного об'єкта.

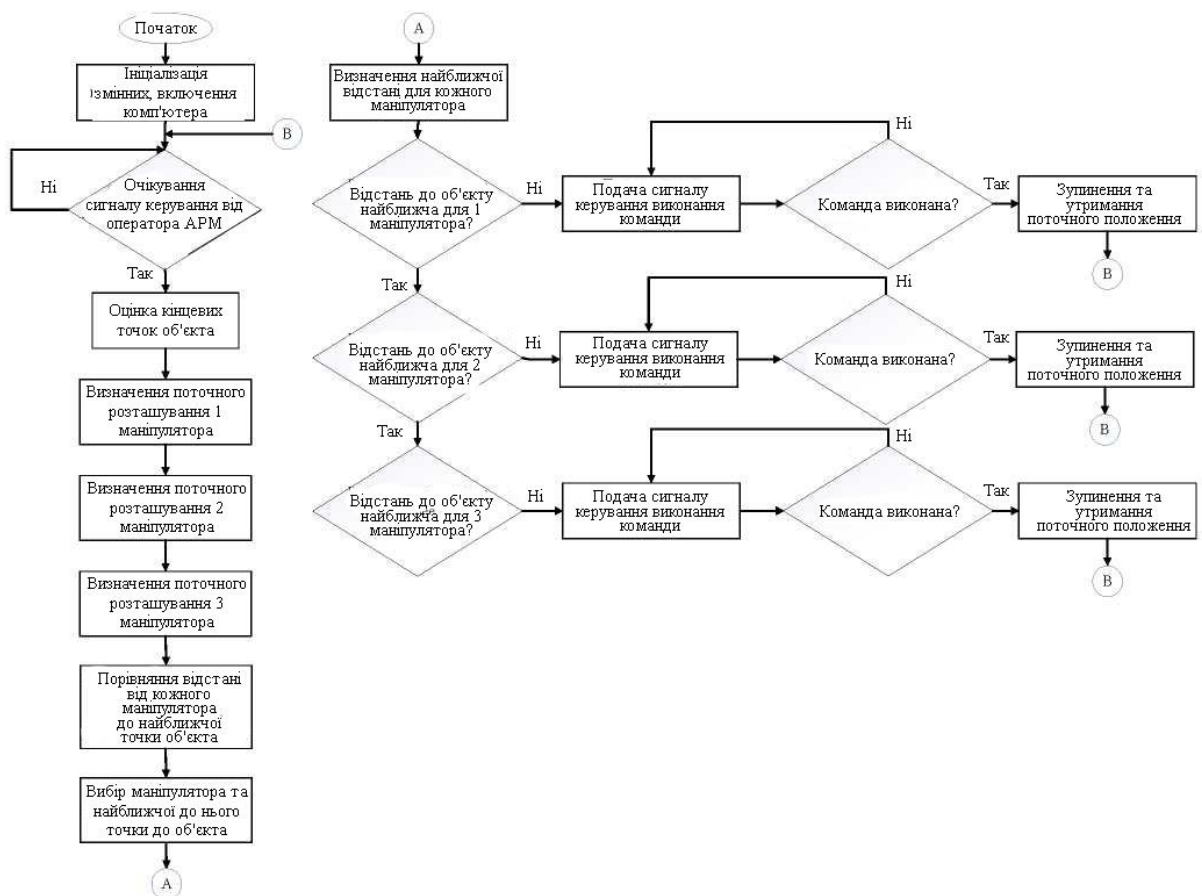


Рисунок 2.16 – Алгоритм роботи системи керування маніпуляторами

3 РОЗРОБКА ПРОТОТИПУ МАНІПУЛЯТОРА ПІДВОДНОГО АПАРАТУ

3.1 Опис маніпулятора, що проектується

На етапі проектування за основу було взято маніпулятор, колись представлений на платформі Kickstarter, але досі не реалізований. Даний маніпулятор був обраний на основі того, що здебільшого існуючі маніпулятори (як і проєктований) припускають розташування двигунів безпосередньо в суглобах. При виготовленні подібні маніпулятори простіше реалізуються, але водночас їх кінцеві двигуни повинні піднімати як корисне навантаження, а й інші двигуни. Проєкт uArm [32] позбавлений цього недоліку, а всі зусилля передаються через тяги та основні двигуни розташовуються в основі, і, більше того, є майданчик для розміщення інструменту, розташований паралельно робочій поверхні.



Рисунок 3.1 – Маніпулятор uArm

Грунтуючись на всіх цих перевагах, цей конструктив був обраний для прототипування та перевірки працездатності даної конструкції маніпулятора для підводного апарату. Так як маніпулятор має три сервоприводи (три ступені свободи) в основі, то відповідно його переміщення відбувається по всіх трьох осях.

Таким чином, у процесі роботи були спроектовані його окремі вузли, надалі виготовлені з оргскла, закуплені всі необхідні компоненти кріплення, а також написані програмні коди для роботи маніпулятора в ручному режимі.

3.2 Характеристики та особливості проектного маніпулятора

Оскільки маніпулятор проектувався під конкретний підводний апарат, необхідно дотриматися всіх габаритних розмірів. Характеристики проектного маніпулятора, що тирується, наступні:

Висота: 300 мм.

Робоча зона: від 140 мм до 300 мм навколо основи.

Максимальна вантажопідйомність при витягнутій руці: 200 г.

Споживаний струм, макс: 4А.

Параметр вантажопідйомності буде вищим у 2-3 рази при встановленні на нижню частину підводного апарату і, по суті, буде величиною, пропорційною моменту утримання обраного та встановленого двигуна.

Відмінною особливістю проектного маніпулятора є наявність підшипників у всіх рухомих частинах (у всьому маніпуляторі використано 11 підшипників, 10 з яких вал 3мм і 1 на вал 30 мм).

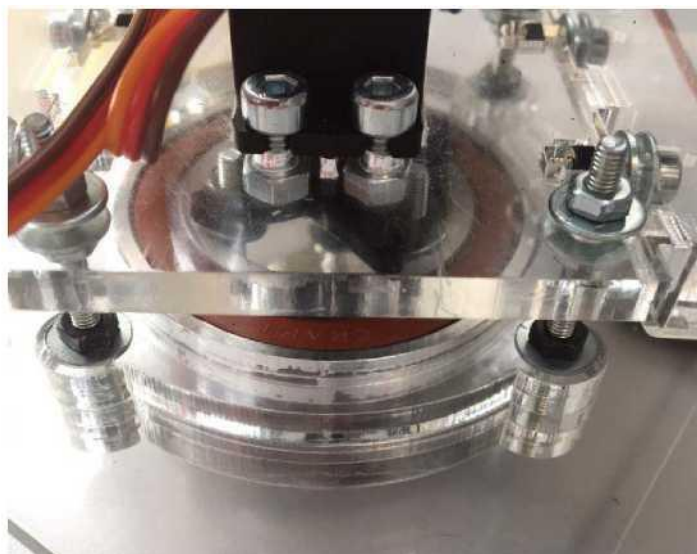


Рисунок 3.2 – Підшипник на вал 30 мм в основі

Крім цього, всі потужні сервоприводи, як і було раніше сказано, знаходяться в основі, а положення маніпулятора змінюється на кут 90 градусів, чого достатньо для виконання необхідних операцій. Більш того, використання паралельних шарнірів дозволяє інструменту залишатися завжди паралельним/перпендикулярним поверхні основи.

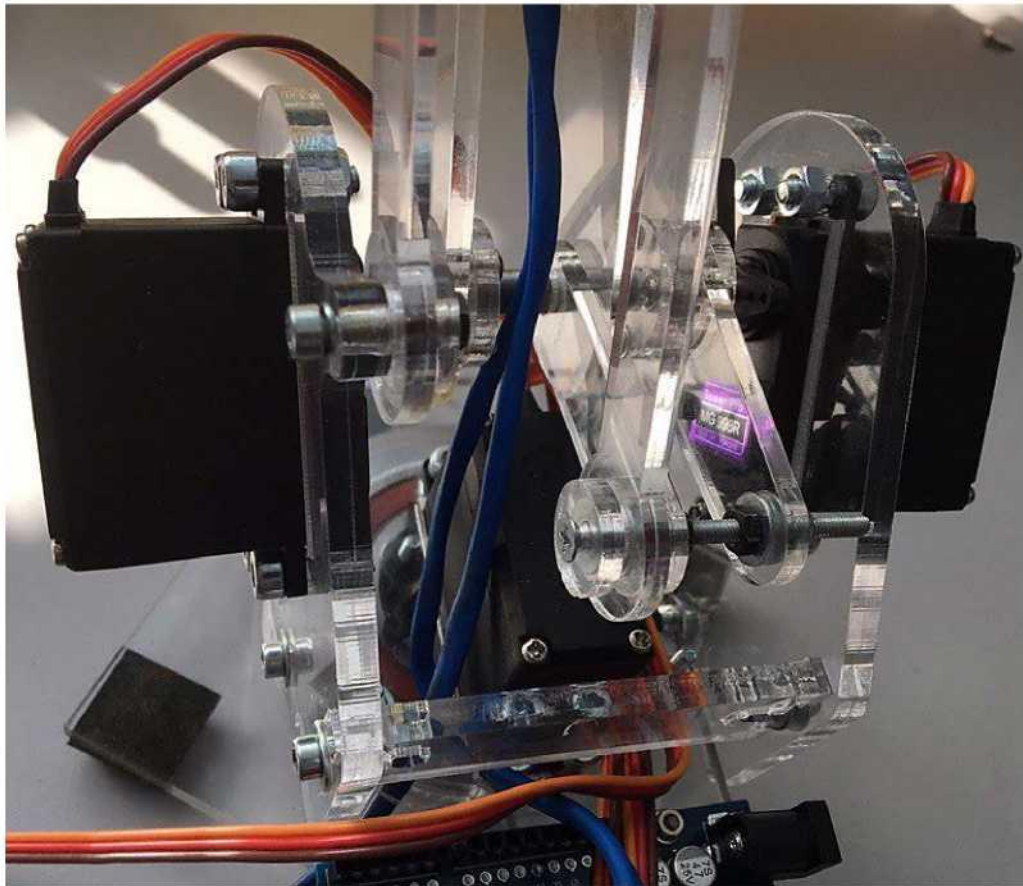


Рисунок 3.3 – Встановлення сервоприводів на підставі

3.3 Складання маніпулятора

Пробний робочий прототип маніпулятора був зібраний з оргскла, оскільки даний матеріал легкий в обробці та його неважко дістати. Різання деталей проводилося на лазерному верстаті. Для виготовлення маніпулятора використовувалося оргскло з товщиною 3мм і 5мм.



Рисунок 3.4 – Деталі з оргскла

Спочатку необхідно встановити правий та лівий сервопривід та диски на них. Установку сервоприводів необхідно здійснювати таким чином, щоб вихідний вал ротора був у частині, близькій до заокруглення бічної грані (рис. 3.5). Після встановлення сервоприводів необхідно з'єднати їх із гойдалками.

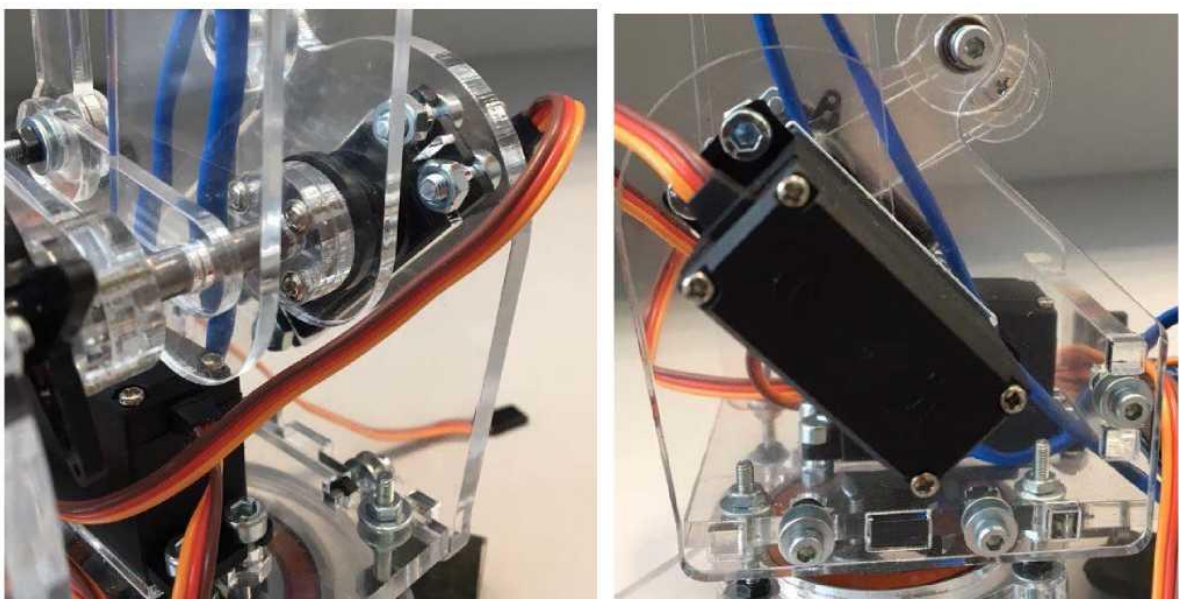


Рисунок 3.5 – Установка лівого та правого серводвигунів

Після встановлення сервоприводів проводиться складання основи. Як і для складання бічних частин, знадобиться потужний сервопривід (для

прикладу, що розглядається – це MG996). У квадратну основу вставляються гвинти, на них одягаються шайби та встановлюється підшипник із валом на 30 мм. Після цього проводиться установка трьох зовнішніх кілець, причому замкнуті кільця є зовнішніми. Після цього рекомендується відразу ж поставити гвинти M3x35 у пази кілець та одягнути їх на підшипник. У отвір незамкнутого кільця, що залишився, вставити гайку M3 і закрутити гвинтом M3x20. Після цього проводиться з'єднання основи з серводвигуном і закручування останнього встановлену на внутрішньому діаметрі підшипника насадку (рис. 3.6). Після цього необхідно встановити шайби та закрутити гайки на гвинтах M3x35.

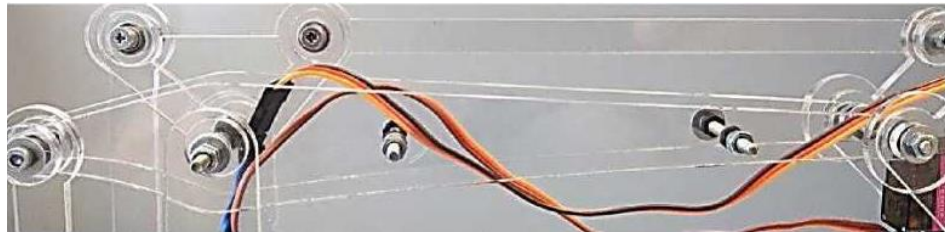


Рисунок 3.6 – Складання основи

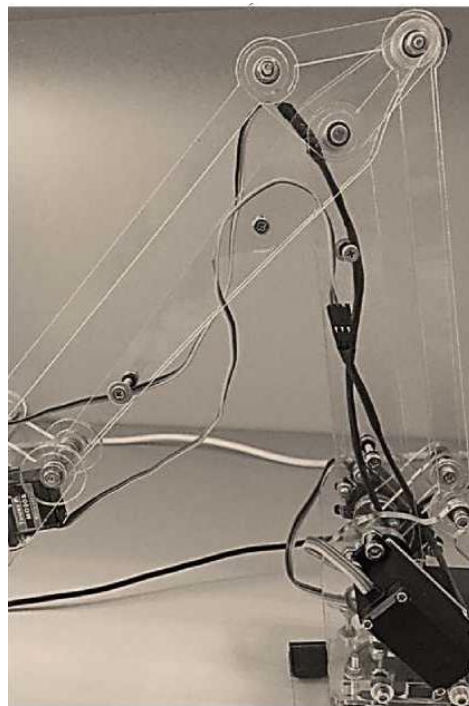
Після складання всієї основи необхідно з'єднати з ним раніше зібрані ребра жорсткості із серводвигунами.

Наступним етапом є складання плечей. При складанні плечей необхідно використовувати 4 підшипники з валом на 3 мм і зовнішнім діаметром 8 мм (рис.3.7, а). Також необхідно встановити диски сервоприводів, встановити шайби з оргскла. Після цього проводиться установка першої та другої ліктьових тяг, і трикутника, який їх утримуватиме

(рис. 3.7, б).



а)



б)

Рисунок 3.7 – а) Складання плеча, б) Установка першої та другої ліктьової тяги

Після складання плечей і тяг необхідно з'єднати всі разом, встановити штифт 6х30 диски сервоприводів.

Остаточним етапом є складання та встановлення самого схвату. Для самого схвату знадобиться один сервопривід MG90S, а другий сервопривід використовуватиметься для поворотної платформи. Необхідно зробити встановлення двигунів у пази деталей, як показано рис. 2.8. Після цього з'єднання сервоприводів з дисками. Сама «кисть» встановлюється наступним чином: закрутити за допомогою гайки з нейлоною вставкою (йде в

комплекті із сервоприводами) таким чином, щоб «палець» міг рухатися вільно і люфт був мінімальним. Другий «палець» необхідно прикрутити до диску серводвигуна так, щоб його пази стали в перший «палець», а при раскритті/закритті були задіяні всі зубці. Після цього проводиться складання схвата з кистьовою тягою та другим плечем.

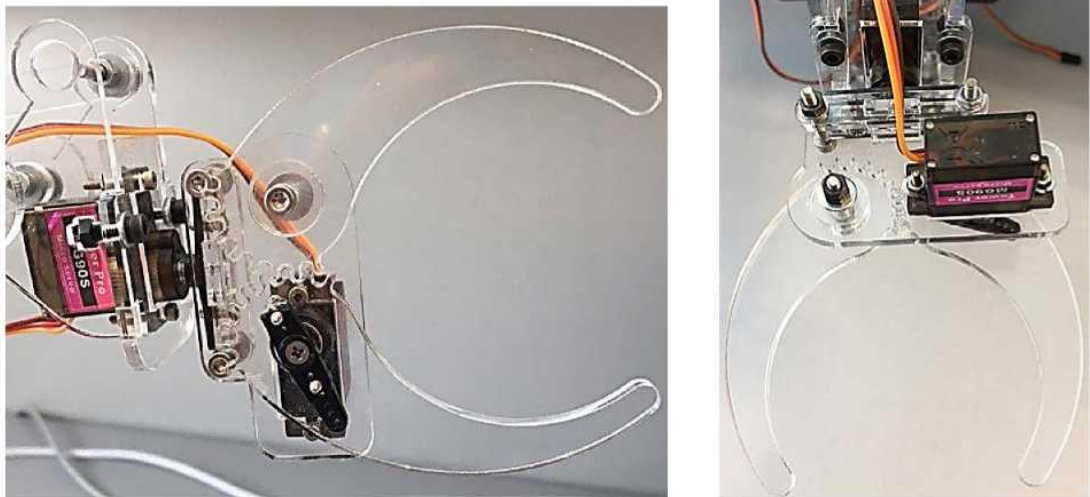


Рисунок 3.8 – Складання схвату

Після встановлення всіх частин маніпулятора необхідно лише зробити складання плати керування. Сам маніпулятор представлений рис. 3.9.

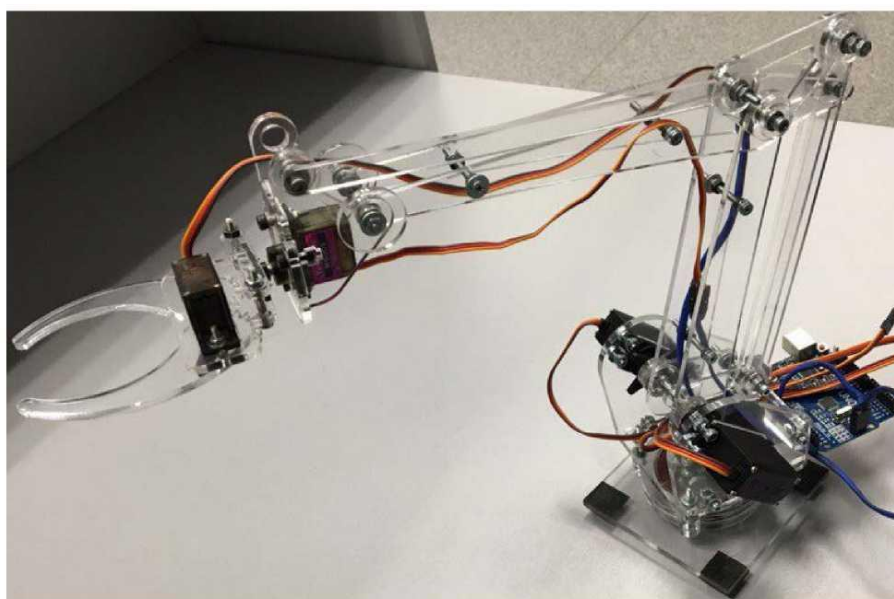


Рисунок 3.9 – Зібраний маніпулятор

3.4 Програмне забезпечення маніпулятора

Початкова налагодження роботи системи проводилася платі Arduino Uno після цього код було реалізовано на МК Atmega 8 A. На даний момент реалізовано три програми для трьох різних ручних режимів роботи маніпулятора: демо-режим роботи маніпулятора, керування маніпулятором за допомогою потенціометрів та кнопок, керування маніпулятором за допомогою миші. Лістинг коду для третього режиму представлений нижче.

```
#include <Arduino.h> // Підключення бібліотеки Arduino.h для роботи зі
стандартними функціями та операціями
#include <Servo.h> // Підключення бібліотеки Servo.h для роботи із
серводвигунами

void readSerial(void); //оголошення функції читання параметрів, що надходять
із серводвигунів
void dataToNormal(void);

    int data[9];
    int value[4];

// Оголошення змінних типу Servo
Servo Stretch; //Створення змінної, зміна значень якої відповідають
втягуванню маніпулятора
Servo Rotation; //Створення змінної, зміна значень якої відповідають
повороту маніпулятора навколо осі Z
Servo Height; //Створення змінної, зміна значень якої відповідають зміні
висоти маніпулятора
Servo HandRot; //Створення змінної, зміна значень якої відповідають зміні
```

положення платформи схвата

Servo Grip; //Створення змінної, зміна значень якої відповідають змиканню-
нню/розмикання схвата

//Установка мінімальних, максимальних та нормальних значень для
втягування маніпулятора

const int stretchMin = 80;

const int stretchMax = 150;

const int stretchNormal = 146;

//Установка мінімальних, максимальних та нормальних значень для повороту
маніпулятора

const int rotationMin = 16;

const int rotationMax = 170;

const int rotationNormal = 80;

//Установка мінімальних, максимальних та нормальних значень для зміни
висоти маніпулятора

const int heightMin = 35;

const int heightMax = 90;

const int heightNormal = 70;

//Установка мінімальних, максимальних та нормальних значень для
поворотної платформи схвата

const int handrotMin = 20;

const int handrotMax = 160;

const int handrotNormal = 116;

//Установка мінімальних, максимальних та нормальних значень для
положення схвата

```

const int gripMin = 115;
const int gripMax = 157;
const int gripNormal = 140;

int grip = gripNormal;

// Підключення змінних типу Servo до певних пін МК
void setup(){
    Stretch.attach(8);
    Rotation.attach(9);
    Height.attach(10);
    HandRot.attach(11);
    Grip.attach(12);

    Grip.write(gripNormal);
    Serial.begin(9600);
}

//Створення циклу читання змінних положення сервоприводів
void loop(){
    readSerial();
    dataToNormal();

    if ( (value[0] <= stretchMax) & (value[0] >= stretchMin) ){
Stretch.write(value[0]);
    }

    if ( (value[1] <= rotationMax) & (value[1] >= rotationMin) ){
Rotation.write(value[1]);
    }

    if ( (value[2] <= heightMax) & (value[2] >= heightMin) ){
Height.write(value[2]);

```

```

    }
    if ( (value[3] <= handrotMax) & (value[3] >= handrotMin) ){
HandRot.write(value[3]);
    }
    if ( (data[8] == 0x01)& (grip <= gripMax) {
Grip.write(grip++);
    data[8] = 0;
    }
    if ( (data[8] == 0x10)& (grip >= gripMin){
Grip.write(grip--);
    data[8] = 0;
    }
}

//Цикл читання змінних про поточні значення положення серводвигунів
void readSerial(){
    if (Serial.available() == 11)    // Надсилання пакета, що складається з
11 біт
        if (Serial.read() == 0xFF)    // Перший незмінний біт 0xFF
            if (Serial.read() == 0xAA){    // Другий незмінний біт 0xAA
                data[0] = Serial.read();    // Встановлення прапор
повороту: (Rotation): 0x00 або 0xFF
                data[1] = Serial.read();    // Поворот
                data[2] = Serial.read();
                data[3] = Serial.read();    // Витягування маніпулятора
                data[4] = Serial.read();    // Встановлення прапор зміна висоти:
(Height): 0x00 0xFF
                data[5] = Serial.read();    // Зміна висоти
                data[6] = Serial.read();    // Встановлення прапор
повороту платформи схвату (HandRot)
                data[7] = Serial.read();    // Поворот схвата

```



```

        data[8] = Serial.read(); // Здійснення стиснення схвату
        data[9] = Serial.read(); // Здійснення розтискання
схвата
    }
}
//Створення циклу для подачі сигналів на серводвигуни та здійснення
маніпуляцій
void dataToNormal(){

    // Витягування схвату
    value[0] = stretchNormal - data[3];

    // Поворот маніпулятора
    value[1] = data[0] - data[1] + rotationNormal;

    // Зміна висоти маніпулятора
    value[2] = data[4] - data[5] + heightNormal;

    // Поворот платформи схвата маніпулятора
    value[3] = data[6] - data[7] + handrotNormal;
}

```

Ця програма працює разом із терміальною програмою від компанії uFactory [33], що займається створенням промислових маніпуляторів. Програма-термінал знаходиться на офіційному сайті uFactory у відкритому доступі. Суть програми, представленої вище, полягає в тому, щоб подавати необхідні сигнали на відповідні приводи та змінювати положення маніпулятора, а терміальна програма приймає та обробляє сигнали з комп'ютерної мишки. Таким чином, рухаючи мишу поверхнею, змінюється положення маніпулятора в площині XY; обертання коліщатка вперед-назад

призводить до зміни висоти, а натискання лівої/правої кнопки миші дозволяє стискати або розтискати схват відповідно. При натисканні правої кнопки миші та коліщатка відбувається поворот схвата маніпулятора. Термінальна програма відправляє до COM-порту 11 байт, де перший завжди 0xFF, другий 0xAA, а ті, що залишилися, служать сигналами для сервоприводів.

Зібрана та спаяна плата представлена на рис. 3.10. На платі є потенціометри, необхідні регулювання положення маніпулятора при одному з ручних режимів роботи, кнопки, необхідні для здійснення захоплення об'єкта схватом, сам мікроконтролер Atmega 8A, PLSpоз'єми для приєднання двигунів, два порти USB-B для забезпечення живлення контролера, та двигунів, кварцовий резонатор на 16 MHz, а також конденсатори та резистори, що служать для правильної роботи МК та світлодіоди, що сигналізують про виконання тієї чи іншої операції.

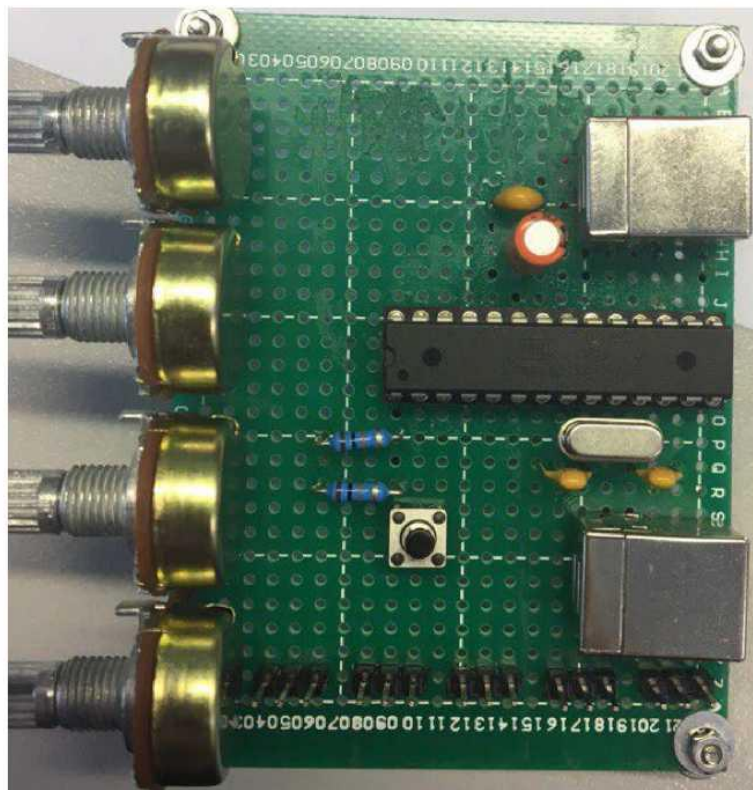


Рисунок 3.10 – Спаяна плата керування маніпулятором

3.5 Конструкторська документація

На принциповій схемі зображено мікроконтролера Atmega 8A, потенціометри, світлодіоди (для сигналізації про виконання тих чи інших команд), сервоприводи, кварцовий резонатор та кнопки для подачі сигналів керування на схват.

На мікроконтролер, потенціометри та кнопки подається постійна напруга 5В, 2А, для роботи п'яти серводвигунів використовується живлення в 5В і 4А.

До контролера живлення підключається через висновки із позначкою VCC і AVCC (напруга живлення для АЦП), висновки з позначкою GND заземлюються. Порт D задіяний для підключення частини периферійних пристроїв, зокрема кнопок для подачі сигналу на стиск/розтискання схвата (PD0) і PD1 відповідно). Висновки PD5 і PD6 необхідні подачі керуючого сигналу на поворотну платформу схвата і сам схват відповідно. Висновки порту В з позначками XTAL1 і XTAL2 необхідні підключення кварцового резонатора з тактовою частотою 16 МГц. Висновки PB1-PB3 використовуються для подачі ШІМ-сигналу керування на двигуни в основі. Висновки порту є аналоговими входами і налаштовані на прийом сигналів з потенціометрів для подальшої їх подачі на сервоприводи. Пін PC6 є піном перезавантаження МК і до нього підключена кнопка, що дозволяє робити цю операцію.

На схемі також представлено роз'єм XP1 із зазначенням заземлень та висновків живлення, необхідних для коректної роботи схеми.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

Під охороною праці розуміється система правових, соціально - економічних, організаційно - технічних, санітарно - гігієнічних та лікувально - профілактичних заходів та засобів, спрямованих на збереження здоров'я та працездатності людини в процесі праці.

Завданнями охорони праці є безпека праці, попередження травматизму та професійних захворювань та отруєнь, пожеж та вибухів на виробництві, правової охорони праці, інженерної психології та організації праці. Робота людини повинна проходити в умовах, що сприяють розвитку всіх її можливостей і забезпечують високу продуктивність праці. Зведення до мінімуму ймовірності захворювань працюючого з одночасним забезпеченням комфорту при максимальній ефективності праці є першочерговим завданням охорони праці.

Закон України “Про охорону праці”, дія якого поширюється на всі підприємства, незалежно від форм власності та принципів господарювання, закріплює право громадян на охорону праці та здоров'я. У законодавстві відображено правила організації охорони праці на підприємствах, сказано про планування та фінансування заходів з охорони праці; правила техніки безпеки та виробничої санітарії; правила та норми щодо спеціальної охорони праці жінок, молоді та людей зі зниженою працездатністю; правила, які регулюють діяльність державного нагляду та цивільного контролю у сфері охорони праці, а також правові норми, в яких передбачається відповідальність за порушення законодавства “Про охорону праці”.

4.1 Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів, характерних для асинхронного приводу промислового робота

Під небезпечним виробничим фактором розуміють такий виробничий фактор, вплив якого на працюючого в певних умовах призводить до травми

або іншого раптового різкого погіршення здоров'я.

Під шкідливим виробничим фактором розуміють фактор, який призводить до захворювання чи зниження працездатності.

До небезпечних та шкідливих виробничих факторів, характерних для встановлення асинхронного приводу, відносяться:

- небезпека ураження електричним струмом;
- небезпека виникнення пожежі;
- дія шуму на організм людини.

Електричний струм, проходячи через тіло людини, надає термічний, електролітичний і біологічний вплив. До основних причин ураження електричним струмом відносяться такі, як випадковий дотик або наближення на небезпечну відстань до струмоведучих частин, що знаходяться під напругою; поява напруги на конструктивних металевих частинах обладнання (корпусі, кожусі) у результаті пошкодження ізоляції та інших причин; поява напруги на відключених струмопровідних частинах, на яких працюють люди, внаслідок помилкового включення установки; виникнення крокової напруги на поверхні землі внаслідок замикання дроту на землю.

Перелічені ознаки є загальними всім електроустановкам. Для електроустановок трифазного асинхронного електроприводу характерний додатковий набір небезпечних та шкідливих факторів. Насамперед, до них відносяться наявність двох видів напруги: фазного (220 В), що діє між фазою і нейтральним проводом (землею), і лінійного (380 В), що діє між фазами. У разі обриву нульового дроту, що з'єднує нейтраль електроприводу із землею, можлива поява нейтральної напруги, яка посилюється зі збільшенням перекосу фаз при нерівномірному їх навантаженні. Вказана напруга може досягати небезпечного для життя рівня.

У системах управління електроприводом, в яких відсутня гальванічна розв'язка, можлива поява лінійного потенціалу. Цей потенціал тим вищий, чим більше віддалені один від одного привід та пульт керування. Як правило, лінійний потенціал не є небезпечним для життя, проте його величина є

суттєвою і у разі поразки може призвести до тимчасової втрати працездатності.

Основні заходи захисту від ураження струмом визначено у низці нормативних документів, серед яких Правила влаштування електроустановок (ПВЕ), Правила технічної експлуатації (ПТЕ) та Правила безпечної експлуатації (ПБЕ) електрообладнання. На кораблях ВМС основним нормативним документом є Правила експлуатації електрообладнання кораблів (ПЕК). Відповідно до них є необхідним забезпечення недоступності струмовідних частин, що знаходяться під напругою, для випадкового дотику; захисний поділ мережі; усунення небезпеки ураження при появі напруги на корпусі, кожусі та інших частинах електрообладнання, що досягається застосуванням малих напруг, застосуванням подвійної ізоляції, вирівнюванням потенціалу, обов'язковим зануленням і захисним заземленням, захисним відключенням та ін; застосування захисних засобів; організація безпечної експлуатації електроустановок. У процесі експлуатації електроустановок нерідко виникають умови, за яких навіть найдосконаліше їх виконання не забезпечує безпеки працюючого і потрібно застосування спеціальних захисних засобів - переносних приладів і пристроїв, [10].

До захисних засобів відносяться:

- ізолюючі захисні засоби: діелектричні гумові рукавички, інструмент з ізольованими рукоятками, струмошукачі, діелектричні калоші, килимки, ізолюючі підставки;
- захисні засоби, що захищають: щити, огорожі-клітини, ізолюючі накладки, тимчасові захисні заземлення;
- запобіжні засоби: захисні окуляри, спеціальні рукавиці.

Пожежі на промислових підприємствах становлять велику небезпеку для працюючих і можуть заподіяти величезний матеріальний збиток. Причини пожеж від електричних машин, апаратів і мереж відбуваються в результаті прояву теплової та іскрової дії електричного струму в умовах, сприятливих для займання горючих матеріалів електроустановок, до яких

належать тверді та рідкі ізоляційні матеріали. Основними причинами пожеж в електроустановках є перевантаження проводів, коротке замикання, великі перехідні опори в електричних мережах, електрична дуга або іскріння.

Заходи запобігання виникненню займання також визначені у зазначених вище документах. До заходів запобігання виникнення пожеж відносяться застосування плавких запобіжників, автоматичних вимикачів, що здійснюють захисне відключення, а також правильний монтаж мереж, машин та апаратів відповідно до вимог ПВЕ.

Шум на виробництві завдає великої шкоди, шкідливо діючи на організм людини та знижуючи продуктивність праці. Втома робітників і операторів через сильний шум збільшує кількість помилок при роботі, сприяє виникненню травм. Поява та розвиток втоми пов'язане зі змінами, що виникають під час роботи в центральній нервовій системі, з гальмівними процесами в корі головного мозку. Дуже небезпечним є шум на інфранізких частотах (1-16 Гц), що викликає почуття пригніченості та сильного страху. Небезпечним є той факт, що ці частоти являють собою резонансні частоти життєво важливих органів і при достатньому рівні шуму можливі їх пошкодження. Під впливом шуму, що перевищує на середніх частотах 85-90 дБ, в першу чергу знижується слухова чутливість на високих частотах. Але дію шуму на організм людини не можна оцінювати тільки за станом слуху, так як перш за все ранні порушення спостерігаються в нервовій системі і у внутрішніх органах. Під впливом сильного шуму (90-100 дБ) при-тупляється гострота зору, з'являються головний біль і запаморочення, підвищується кров'яний тиск, порушується процес травлення. Впливаючи на кору головного мозку, шум чинить також подразнюючу дію, прискорює процес втоми, послаблює увагу і уповільнює психічні реакції. З цих причин сильний шум в умовах виробництва може сприяти виникненню травматизму [10].

Джерелом шуму в асинхронному приводі є тертя в підшипниках погано змащених та підігнаних механізмів. Шум може бути також викликаний струмами, що проходять через магнітопровід машини змінного струму, що

розшарувався, дерен-гом контактів і т. п.

Для зниження шуму можуть бути застосовані такі методи:

- зменшення шуму в джерелі шляхом вдосконалення технологічних процесів та обладнання;
- зміна спрямованості випромінювання;
- раціональне планування підприємств та цехів;
- акустична обробка приміщень при застосуванні звукопоглинаючих матеріалів;
- зменшення шуму на шляху його поширення, використовуючи звукоізолюючі матеріали.

4.2 Розрахунок захисного заземлення корпусу асинхронного двигуна

Захисним заземленням називають навмисне електричне з'єднання із землею або її еквівалентом металевих нетоковедущих частин, які можуть опинитися під напругою. Захисне заземлення використовується для зниження до безпечних значень напруг дотику і кроку. Зробимо розрахунок захисного заземлення корпусу асинхронного електродвигуна.

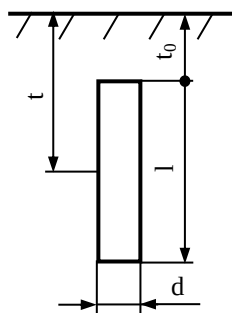


Рисунок 4.1

Найбільший допустимий опір захисного заземлювального пристрою в електроустановках напругою до 1000 В мережі з ізольованою нейтраллю при

потужності генератора або трансформатора понад 100 кВ·А становить $R_{\text{доп}} = 4 \text{ Ом}$, [6].

Питомий опір глини становить $\rho = 40 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ на підставу табл.1.18 [6].

Вибираємо стрижневий, круглий переріз (трубчастий) сталевий заземлювач.

Розташування заземлювача землі представлено на рис. 4.1.

Довжина заземлювача дорівнює $l = 1,5 \text{ м}$, зовнішній діаметр - $d = 0,06 \text{ м}$, глибина закладення труби від поверхні землі $t_0 = 1 \text{ м}$, глибина закладення, що дорівнює відстані від поверхні землі до середини труби, становить $t = t_0 + l/2 = 1 + 1,5/2 = 1,75 \text{ м}$.

Визначимо опір розтікання заземлювача R_1

$$R_1 = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot l} \cdot \left(\ln \frac{2 \cdot l}{d} + \frac{1}{2} \cdot \ln \frac{4 \cdot t + l}{4 \cdot t - l} \right) = \frac{40}{2 \cdot \pi \cdot 1,5} \cdot \left(\ln \frac{2 \cdot 1,5}{0,06} + \frac{1}{2} \cdot \ln \frac{4 \cdot 1,75 + 1,5}{4 \cdot 1,75 - 1,5} \right) = 17,5 \text{ Ом} \quad (4.1)$$

Опір одиничного заземлювача перевищує величину допустимого опору $R_1 > R_{\text{доп}} = 4 \text{ Ом}$, отже, необхідно застосувати кілька штучних заземлювачів, з'єднаних паралельно.

Визначимо необхідну кількість паралельно з'єднаних заземлювачів

$$n' = \frac{R_1}{\eta_{\text{в}} \cdot R_{\text{доп}}} = \frac{17,5}{1 \cdot 4} = 4,3, \quad (4.2)$$

де $\eta_{\text{в}} = 1$ – коефіцієнт використання заземлювача, що враховує їх взаємне розташування, який спочатку приймається рівним одиниці.

Отримане число заземлювачів округляємо до $n = 4$ і за таблицею 1.22, [6], знаходимо фактичний коефіцієнт використання $\eta_{\text{ф}} = 0,78$ вертикальних електродів групового заземлювача без урахування впливу смуги зв'язку при відношенні відстані між електродами до їх довжини, що дорівнює 2.

Фактичний опір вертикальних заземлювачів дорівнює

$$R_{\phi} = \frac{R_1}{\eta_{\phi} \cdot n} = \frac{17,5}{0,78 \cdot 4} = 5,6 \text{ Ом} \quad (4.3)$$

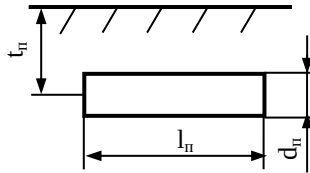


Рисунок 4.2

Для зв'язку вертикальних заземлювачів застосовують сполучну смугу, опір розтікання якої визначають як опір розтікання протяжного смугового заземлювача, розташованого в ґрунті.

Сполучна смуга представлена на рис.4.2, де позначено

$l_{\text{п}} = 1,05 \cdot a \cdot n = 1,05 \cdot 3 \cdot 4 = 12,6 \text{ м}$ – довжина смуги;

$a = 2 \cdot l = 2 \cdot 1,5 = 3 \text{ м}$ – відстань між заземлювачами;

$d_{\text{п}} = 0,03 \text{ м}$ – діаметр смуги;

$t_{\text{п}} = 1,2 \text{ м}$ – глибина закладення смуги.

Опір розтікання смуги дорівнює

$$R_{1n} = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot l_n} \cdot \ln \frac{l_n^2}{d_n \cdot t_n} = \frac{40}{2 \cdot \pi \cdot 12,6} \cdot \ln \frac{12,6^2}{0,03 \cdot 1,2} = 4,24 \text{ Ом}. \quad (4.4)$$

Опір смуги:

$$R_n = \frac{R_{1n}}{\eta_z} = \frac{4,24}{0,55} = 7,7 \text{ Ом}, \quad (4.5)$$

де $\eta_r = 0,55$ – коефіцієнт використання горизонтального смугового електрода, що з'єднує вертикальні електроди групового заземлювача згідно табл.1.23, [6], при цьому вертикальні електроди розміщені по контуру.

Фактичний опір заземлювального пристрою, що складається з вертикальних заземлювачів та сполучної смуги, визначається як еквівалентний опір при паралельному з'єднанні

$$R_3 = \frac{R_{\text{вф}} \cdot R_n}{R_{\text{вф}} + R_n} = \frac{5,51 \cdot 7,7}{5,51 + 7,7} = 3,24 \text{ Ом.} \quad (4.6)$$

Отримали, що $R_3 < R_{\text{доп}}$ ($3,24 < 4 \text{ Ом}$), отже, заземлювач забезпечує якісне заземлення корпусу електродвигуна.

4.3 Розробка заходів щодо забезпечення безпечної експлуатації електроустановки асинхронного приводу

Досвід показує, що для забезпечення безпечної, безаварійної та високопродуктивної роботи електроустановок необхідно поряд з досконалим виконанням їх та оснащенням захисними засобами так організувати їхню експлуатацію, щоб виключити будь-яку можливість помилок з боку обслуговуючого персоналу.

Основою організації безпечної експлуатації електроустановок є висока технічна грамотність і свідомі дисципліна обслуговуючого персоналу, який зобов'язаний суворо дотримуватись організаційних та технічних заходів, а також прийоми та черговість виконання експлуатаційних операцій відповідно до Правил технічної експлуатації електроустановок споживачів та Правилами техніки безпеки при експлуатації електроустановок споживачів.

Особи, що обслуговують електроустановки, не повинні мати каліцтв і хвороб, що заважають виробничій роботі. Для персоналу, що бере безпосередню участь в оперативних перемиканнях і ремонтних роботах в електро-установках, стан здоров'я встановлюється медичним оглядом при прийнятті на роботу, а потім періодично один раз на два роки.

Кожен працівник до призначення його на самостійну роботу з обслуговування електроустановок або під час перекладу на іншу ділянку роботи зобов'язаний пройти навчання безпечним методам роботи на робочому місці та перевірку знань. Навчання на робочому місці новий працівник проходить під керівництвом досвідченого працівника, який відповідає за якість такої підготовки. Одночасно він зобов'язаний вивчити правила техніки безпеки, правила надання першої допомоги тощо в об'ємі, що відповідає вимогам його робочого місця. Перевірка знань Правил техніки безпеки проводиться кваліфікованою комісією після навчання на робочому місці.

Усі роботи з експлуатації діючої установки проводяться при обов'язковому дотриманні наступних умов:

- на роботу має бути видано дозвіл уповноваженою на це особою;
- робота повинна виконуватися, як правило, не менше ніж двома особами;
- повинні бути виконані організаційні та технологічні заходи, що забезпечують безпеку персоналу.

ВИСНОВКИ

У ході виконання кваліфікаційної роботи було досягнуто результатів, наведених нижче.

- проведено аналітичний огляд літератури щодо існуючих маніпуляційних систем підводних апаратів;
- розроблено структурну, функціональну та електричну принципову схеми маніпуляційної системи підводного апарату;
- на основі аналізу існуючих технічних рішень та технічного завдання проведено вибір елементів системи;
- складено алгоритм роботи одноплатного комп'ютера Raspberry Pi II В, мікроконтролера Atmega 8А.

Розроблено та виготовлено електричну частину пристрою у вигляді плати з МК Atmega 8А, створено експериментальний зразок маніпулятора з ВD-моделі, що дозволяє вирішувати такі завдання:

- захоплення та утримання об'єктів маніпулювання масою до 200г на витягнутому маніпуляторі;
- здійснюється комп'ютерне керування маніпулятором, що є імітацією реального оператора АРМ;
- маніпулювання у робочій зоні від 140мм до 300мм навколо основи.

Спроектований маніпулятор також має деякі переваги перед існуючими аналогами, які представлені нині на російському та зарубіжному ринках:

- 1) наявність підшипників у всіх рухомих частинах маніпулятора;
- 2) простота складання при врахуванні її послідовності;
- 3) розташування двигунів в основі маніпулятора, що дозволило зменшити їхню потужність і масу;
- 4) зміна положення маніпулятора відбувається за трьома осями і всі двигуни забезпечують поворот не менше ніж на 90 градусів;
- 5) схват завжди залишається паралельним, або перпендикулярним підставі за рахунок дотримання паралельності тяг і плечей, а також

паралельних шарнірів.

У перспективі планується виготовити маніпуляційну систему на основі високоміцних легких матеріалів, зробити експерименти в реальних умовах на борту безлюдного телекерованого підводного апарату, а також використовувати готову маніпуляційну систему як лабораторний стенд.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Ян Куммінс, Джон Бізант. Shell шокує світ. [Електронний ресурс].
 Режим доступу вільний. URL:
http://www.dolit.net/author/8583/ebook/31390/kummins_van/Shell_shokiruet_mir/read/13. Назва з екрану.
2. **Блінцов, В. С.** Програма «Підводні апарати НУК – на службу Миколаївщині» – перші результати та перспективи [Текст] / В. С. Блінцов, М. Г. Грицаєнко // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці : Матеріали 3-ї міжнар. наук.-техн. конф. – Миколаїв : НУК, 2012. – С. 499–502.
3. **Блінцов, В. С.** Підводна діяльність держави: сучасний стан і завдання на перспективу [Текст] / В. С. Блінцов, М. Г. Грицаєнко // Підводна техніка і технологія: Матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю. – Миколаїв : НУК, 2014. – С. 8–11.
4. **Блінцов, В. С.** Телекеровані підводні апарати на службі морегосподарської діяльності Миколаївщини [Текст] : в 2 ч. Ч.1 / В. С. Блінцов, М. Г. Грицаєнко // Підводна техніка і технологія (ПТТ-2014): Матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю. – Миколаїв : НУК. – 2014. – С. 76–86.
5. **Блінцов, В. С.** Морські роботизовані військові системи міжсферного застосування [Текст] : в 2 ч. Ч.2 / В. С. Блінцов, С. В. Блінцов, О. Г. Жолоб, О. В. Красних, С. В. Якім'як // Підводна техніка і технологія (ПТТ-2014): Матеріали всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю. – Миколаїв : НУК. – 2014. – С. 3–8.
6. **Блинцов, В. С.** Проектирование самоходных привязных подводных систем [Текст] / В. С. Блинцов, В. Э. Магула. – К. : Наукова думка, 1997. – 140 с.
7. **Блинцов, В. С.** Привязные подводные системы [Текст] / В. С. Блинцов. – К. : Наукова думка, 1998. – 232 с.

8. **Блінцов, В. С.** Створення та застосування засобів морської робототехніки для знешкодження підводних потенційно небезпечних об'єктів [Текст]: Наукова монографія / В. С. Блінцов, О. В. Блінцов, Г. В. Бабкін, М. Г. Грицаєнко. – За загальною редакцією проф. В. С. Блінцова. – Миколаїв : Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, 2016. – 367 с.

9. Управління успішними проектами створення складної техніки. Наукова монографія / Г. В. Бабкін, В. С. Блінцов, Є. А. Дружинін, С. Г. Кійко, Н. Р. Книрик, К. В. Кошкін, Д. М. Крицький, С. С. Рижков, С. О. Слободян // Миколаїв : Видавництво Торубари В. В., 2017. – 336 с.

10. Bessa WM, Dutra MS, and Kreuzer E. Depth control of remotely operated underwater vehicles using an adaptive fuzzy sliding mode controller, Robot Automation Systems, vol. 56, 2008, pp. 670–677.

11. Chyba M., Cazzaro D., Invenizzi L., Andonian M. Trajectory Design for Autonomous Underwater Vehicles for Basin Exploration. 9th International Conference on Computer and IT Applications in Marine Industries. 2010. Pp. 139–151.

12. Eustice R., Pizzaro O. Hanuman Singh Visually augmented navigation for autonomous underwater vehicles // IEEE Journal oceanic engineering. 2009. 1–18 p.

13. Filaretov VF, Konoplin A. Yu., Konoplin N. Yu. Method of synthesis of Automatic Correction Systems of Underwater Vehicles Linear Displacements //25th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation. Vienna. 26 November 2014.

14. McLain TW, Rock SM, Lee MJ Experiments in coordinated control of an underwater arm/vehicle system. Autonomous Robots, vol. 3, 1996. #2–3, pp. 213–232.

15. Smith RN, Chyba M., Wilkens GR, Catone CA Geometrical Approach to the Motion Planning Problem for Submerged Rigid Body. Int. J. of Control. 2009. 82/9, pp.1641–1656

16. Soyly S., Buckham BJ, Podhorodeski RP Dynamics and control of tethered underwater-manipulator systems, OCEANS 2010, pp. 1–8.
17. Zhang M. and Chu Z. Adaptive sliding mode control based on local recurrent neural networks for underwater robot. Ocean. Eng., vol. 45, 2012, pp. 56–62.
18. Datasheet L297 та L298N (293E). [Електронний ресурс] Режим доступу: вільний. URL: <http://html.alldatasheet.com/html-pdf/22436/STMICROELECTRONICS/L297/1618/1/L297.html>. – Загл. з екрану.
19. Atmel Corporation. Atmega 8 Datasheet [Електронний ресурс]. Режим доступу: вільний. URL: http://www.atmel.com/images/atmel-2486-8-bit-avr-microcontroller-atmega8_1_datasheet.pdf – Загл. з екрану. – Мова англ.
20. Pin Board II [Електронний ресурс]. Режим доступу: вільний. URL: <http://shop.easyelectronics.ru/index.php?categoryID=102>. – Загл. з екрану.
21. L297 STEPPER MOTOR CONTROLLERS Datasheet / Printed in Italy, STMicroelectronics GROUP OF COMPANIES, 2001.
22. L298N DUAL FULL-BRIDGE DRIVER Datasheet / Printed in Italy, STMicroelectronics GROUP OF COMPANIES, 2000.
23. uArm: Put a Miniature Industrial Robot Arm on Your Desk. [Електронний ресурс]. Режим доступу: вільний. URL: <https://www.kickstarter.com/projects/ufactory/uarm-put-a-miniature-industrial-robot-arm-on-vour/>. – Загл. з екрану. – Мова англ.
24. uArm Metal. Robotics Open Source. [Електронний ресурс]. Режим доступу: вільний. URL: <http://ufactory.cc/#/en/>. – Загл. з екрану. – Мова англ.