

Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

Навчально-науковий інститут автоматики і електротехніки
Кафедра ЕІС та РК

Допущено до захисту

зав. кафедри ЕІС та РК
(скорочена назва кафедри)

(підпис) Костенко Д.В.
(прізвище та ініціали)
" 16 " 12 2025 р.

Кваліфікаційна робота

на здобуття ступеня вищої освіти

магістр

на тему: Розробка сервопривода сортувального порталу вантажопідйомністю 50 кг

Виконав: студент групи 6363м

Спеціальності

141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

спеціалізації «Експлуатація суднових автоматизованих систем»

Студент

Фрунзе М.Й.
(прізвище та ініціали)

Керівник

к.т.н., доцент Войтасик А.М.
(прізвище та ініціали)

Рецензент

к.т.н., доцент Клочков О.П.
(прізвище та ініціали)


(підпис)


(підпис)


(підпис)

м. Миколаїв – 2025 року

Міністерство освіти і науки України
Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

Інститут, факультет	Навчально-науковий інститут автоматики та електротехніки
Кафедра	Електричної інженерії суднових та роботизованих комплексів
Рівень вищої освіти	магістр
Галузь знань	14 «Електрична інженерія»
Спеціальність	141 «Електроенергетика, електротехніка електромеханіка»
Освітня програма	Експлуатація суднових автоматизованих систем

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Гарант освітньої програми


(підпис)

Обсянничов В.М.
(прізвище та ініціали)

" 01 " 10 2025 р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу магістра
на здобуття ступеня вищої освіти **магістр**

Студенту Фрунзе Михайлу Йосиповичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка сервопривода сортувального порталу вантажопідйомністю 50 кг

Керівник роботи к.т.н., доцент кафедри ЕІС та РК Войтасик А.М.
затверджені наказом вищого навчального закладу від "___" _____ 20__ р. № ____

2. Термін подання студентом роботи _____

3. Вихідні дані по роботі вхідна напруга живлення електропривода трифазна 380 В з частотою мережі 50 Гц, для живлення виконавчих електродвигунів застосувати постійну напругу 500 В, тип двигунів – синхронний з постійними магнітами, швидкість переміщення вантажу 0,42 м/с, швидкість підйому/спуску 0,22 м/с, вантажопідйомність сортувального порталу 50 кг, висота підняття вантажу 1,12 м, відстань переміщення вантажу 5,4 м, захватний пристрій – механічний, рейковий

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1 Загальна характеристика та умови застосування сервопривода сортувального порталу вантажопідйомністю 50 кг. 2 Технічні характеристики сервопривода сортувального порталу вантажопідйомністю 50 кг. 3 Опис та обґрунтування прийнятих технічних рішень при розробці сервопривода сортувального порталу вантажопідйомністю 50 кг. 4 Розрахунки, що підтверджують працездатність розробки сервопривода сортувального порталу вантажопідйомністю 50 кг. 5 Охорона праці

5. Перелік презентаційних матеріалів (з точним зазначенням назв)

1 Презентаційний матеріал до кваліфікаційної роботи на здобуття ступеня вищої освіти «магістр». 2 Мета та задачі роботи. 3 Різновиди вантажозахоплювальних пристроїв (ВЗП). 4 Загальна характеристика розробки. 5 Розрахунок механізму підйому/спуску вантажу. 6 Розрахунок механізму повздовжнього переміщення. 7 Розрахунок механізму поперечного переміщення. 8 Структурна схема регулювання роботою сервопривода. 9 Електрична принципова схема керування сервоприводом механізму підйому/спуску вантажу сортувального порталу. 10 Основні технічні характеристики розробки. 11 Висновки

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
ОП	к.т.н., доцент кафедри ЕІС та РК Войтасик А.М.	21.11.2025 	22.11.2025 

7. Дата видачі завдання 16.10.2025р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Загальна характеристика та умови застосування	24.10.2025	виконано
2	Технічні характеристики	31.10.2025	виконано
3	Опис та обґрунтування прийнятих технічних рішень	14.11.2025	виконано
4	Розрахунки, що підтверджують працездатність	21.11.2025	виконано
5	Охорона праці	28.11.2025	виконано

Студент


 (підпис)

Фрунзе М.Й.
 (прізвище та ініціали)
Керівник кваліфікаційної
роботи

 (підпис)

Войтасик А.М.
 (прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота на тему “Розробка сервопривода сортувального порталу вантажопідйомністю 50 кг” відповідає спеціальності «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» та виконано на 90 сторінках.

Тема кваліфікаційної роботи актуальна і пов’язана з розробкою сервопривода сортувального порталу вантажопідйомністю 50 кг для обробки вантажів за допомогою рейкового захватного пристрою.

В кваліфікаційній роботі виконано огляд та аналіз вантажозахоплювальних пристроїв відповідно до їх існуючих різновидів. Наведено загальну характеристику та вимоги до сервопривода сортувального порталу. Визначено потужності виконавчих електродвигунів та вибрано відповідні їм редукторні механізми. Представлені розрахунки пускових та гальмівних моментів. Виконано вибір необхідного комплектного обладнання сервопривода сортувального порталу. Проведені перевірки роботи сервопривода на відповідність поставленим вимогам роботи. Розроблено 3D модель конструкції сортувального порталу вантажопідйомністю 50 кг. Представлено електричну принципову схему керування сервоприводом механізму підйому/спуску вантажу сортувального порталу та описано принцип її роботи.

Ключові слова: сервопривод, сортувальний портал, вантажозахоплювальний пристрій, електромеханічна система, система керування.

ABSTRACT

The qualification work «Development of a servo drive for a sorting gantry with a load capacity of 50 kg» corresponds to the direction of specialty «Electricity, electrical and electromechanical» and holds 90 pages.

The topic of the qualification work is relevant and is related to the development of a sorting gantry servo drive with a load capacity of 50 kg for handling cargo using a rail gripping device.

The qualification work provides a review and analysis of cargo gripping devices according to their existing varieties. The general characteristics and requirements for the sorting gantry servo drive are given. The powers of the executive electric motors are determined and the corresponding gear mechanisms are selected. Calculations of starting and braking torques are presented. The necessary complete equipment for the sorting gantry servo drive is selected. The servo drive operation is checked for compliance with the set requirements of the work. A 3D model of the sorting gantry design with a load capacity of 50 kg is developed. An electrical schematic diagram of the servo drive control of the sorting gantry cargo lifting/lowering mechanism is presented and the principle of its operation is described.

Keywords: servo drive, sorting gantry, cargo gripping device, electromechanical system, control system.

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень, символів, одиниць, скорочень і термінів	4
Вступ	5
1 Загальна характеристика та умови застосування сервопривода сортувального порталу вантажопідйомністю 50 кг	8
1.1 Огляд різновидів вантажозахоплювальних пристроїв	8
1.2 Загальна характеристика сортувального порталу	12
1.3 Вимоги до сервопривода сортувального порталу	14
1.4 Висновок по розділу	15
2 Технічні характеристики сервопривода сортувального порталу вантажопідйомністю 50 кг	16
2.1 Основні технічні характеристики сортувального порталу	16
2.2 Основні технічні характеристики виконавчих електродвигунів	17
2.3 Основні технічні характеристики редукторів	18
2.4 Основні технічні характеристики гальмівного резистора	19
2.5 Основні технічні характеристики мережевого дроселя	20
2.6 Основні технічні характеристики силового модуля	20
2.7 Основні технічні характеристики координатного модуля	21
2.8 Основні технічні характеристики радіатора	22
2.9 Основні технічні характеристики захватного пристрою	22
2.10 Висновок по розділу	23
3 Опис та обґрунтування прийнятих технічних рішень при розробці сервопривода сортувального порталу вантажопідйомністю 50 кг.....	24
3.1 Розробка 3D моделі конструкції сервопривода сортувального порталу вантажопідйомністю 50 кг.....	24
3.2 Функції резольвера у системах керування електроприводом	30
3.3 Організація регулювання і режими роботи електричного сервопривода	35

3.4 Електрична принципова схема керування сервоприводом механізму підйому/спуску вантажу сортувального порталу	38
3.5 Висновок по розділу	40
4 Розрахунки, що підтверджують працездатність розробки сервопривода сортувального порталу вантажопідйомністю 50 кг	41
4.1 Розрахунок діаграми робочого циклу електропривода	41
4.2 Розрахунок потужностей	45
4.3 Розрахунок параметрів редукторних механізмів	51
4.4 Вибір електродвигунів	53
4.5 Вибір привідної електроніки	58
4.6 Розрахунок механізму захвату вантажу	63
4.7 Вибір радіатора охолодження	69
4.8 Висновок по розділу	74
5 Охорона праці	75
5.1 Аналіз потенційно небезпечних і шкідливих факторів, що впливають на організм людини в процесі експлуатації сортувального порталу	72
5.2 Правила Регістру судноплавства України з улаштування та розподілу електричної енергії	75
5.3 Вимоги Конвенції СОЛАС-74 до систем автоматичного виявлення пожеж	77
5.4 Правила техніки безпеки в процесі експлуатації сортувального порталу	82
5.5 Висновок по розділу	86
Висновки	87
Перелік посилань	88

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

ВЗП – вантажозахоплювальний пристрій;
ГКН – генератор керований напругою;
Д – дросель;
ДАВ – датчик абсолютного відліку;
ДЖ – джерело живлення;
КЗ – коротке замикання;
ККД – коефіцієнт корисної дії;
КН – контактор;
М – мотор-редуктор;
МФ – мережевий фільтр;
ПІ – пропорційно-інтегральний;
ПК – пульт керування;
ПУЕ – Правила улаштування електроустановок;
Р – резольвер;
СП – сервопідсилювач;
ТВ – тривалість включення;
ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач;
ШИМ – широтно-імпульсний модулятор;
ККД – коефіцієнт корисної дії

ВСТУП

Огляд наукової літератури та визначення актуальності дослідження. Для автоматизації виробничих процесів і підвищення ефективності переміщення вантажів застосовується широкий спектр вантажопідіймального та сортувального обладнання [1 – 3]. Кожен із цих механізмів має власні технічні особливості, які слід враховувати при його виборі, проектуванні та об'єднанні у виробничу лінію. Існують різні інженерні рішення, що дозволяють виконувати операції з транспортування, сортування та обробки виробів [4, 5]. Як робочі органи таких систем зазвичай використовують різні конструкції захватних пристроїв, які забезпечують надійне утримання та переміщення виробів під час роботи [6, 7]. Особливої уваги потребують спеціалізовані сортувальні портали, призначені для обробки вантажів різних габаритних розмірів, яким важлива висока точність маніпуляцій та ощадне захоплення [8, 9]. Сучасним завданням є розробка сервоприводного сортувального порталу, облаштованого механізмом для захоплення подібних елементів. Такий портал забезпечить швидке, точне та безпечне виконання операцій з перевантаження і сортування [10, 11].

Об'єктом дослідження є технологічні процеси проведення сортувальних операцій, які необхідно реалізовувати з застосуванням сервопривода.

Предметом дослідження є моделі та методи аналізу для запровадження роботи порталу з застосуванням сервоприводних механізмів руху для сортування вантажів різного типу.

Мета кваліфікаційної роботи – розробка сервопривода сортувального порталу вантажопідйомністю 50 кг.

Завдання кваліфікаційної роботи, які потрібно вирішити для досягнення поставленої мети:

- виконано огляд та аналіз вантажозахоплювальних пристроїв відповідно до їх існуючих різновидів;
- навести загальну характеристику сервопривода сортувального порталу;
- виконати розрахунки механізмів переміщення та підйому/спуску вантажу;

- виконати розробку 3D моделі конструкції сервопривода сортувального порталу вантажопідйомністю 50 кг;
- розрахувати та побудувати графічні характеристики роботи сервопривода;
- виконати вибір складового обладнання сервопривода виробу;
- представити структуру регулювання сервопривода;
- навести електричну принципову схему керування сервоприводом механізму підйому/спуску вантажу;
- навести основні технічні характеристики розробки.

Методи дослідження. Для розв'язку поставлених у кваліфікаційній роботі завдань використано наступні методи дослідження:

- метод системного аналізу (для визначення взаємозв'язків між елементами сервопривода та визначення способу його реалізації);
- метод графічного комп'ютерного моделювання (для створення 3D моделей складових елементів електромеханічного обладнання привода);
- метод аналітичного рішення алгебраїчних рівнянь (для проведення розрахунків сервопривода).

Кваліфікаційна робота складається зі вступу, 5 розділів, висновків та переліку посилань. Робота містить 90 сторінок, у тому числі 14 таблиць, 14 рисунків, 24 найменування використаних посилань.

Практичне значення одержаних результатів. Застосування сервопривода сортувального порталу вантажопідйомністю 50 кг дозволить автоматизувати процес обробки сортаменту, виготовленого у вигляді прямокутних об'єктів, з можливістю його подальшого переміщення декількома контейнерами.

Апробація результатів дослідження не проводилася у зв'язку з військовим станом у країні та відсутністю технічної можливості.

Положення, що їх винесено на захист:

- виконано розрахунок сервопривода сортувального порталу вантажопідйомністю 50 кг, а саме механізму повздовжнього / поперечного переміщення вантажу зі швидкістю 0,42 м/с та підйому/спуску вантажу зі швидкістю 0,22 м/с;

– розроблено 3D модель конструкції сервопривода сортувального порталу вантажопідйомністю 50 кг;

– виконано вибір необхідного складового обладнання сервопривода сортувального порталу з застосуванням індивідуального переліку елементів, необхідних для реалізації розробки.

1 ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ТА УМОВИ ЗАСТОСУВАННЯ СЕРВОПРИВОДА СОРТУВАЛЬНОГО ПОРТАЛУ ВАНТАЖОПІДЙОМНІСТЮ 50 КГ

1.1 Огляд різновидів вантажозахоплювальних пристроїв

Вантажозахоплювальні пристрої (ВЗП) є елементами вантажопідіймальних і транспортних машин, призначеними для утримання, підйому, переміщення та орієнтації вантажів у просторі [12]. Вони безпосередньо взаємодіють із предметом захоплення, тому від їхньої конструкції, принципу дії та точності залежить ефективність і безпека роботи всього механізму. Вибір типу вантажозахоплювального пристрою визначається формою, масою, фізико-механічними властивостями вантажу, умовами експлуатації, а також рівнем автоматизації процесу.

Нижче наведено основні типи вантажозахоплювальних пристроїв, що використовуються у сучасних системах механізації та робототехніки.

1.1.1 Кліщові (затискні) пристрої

Кліщові захвати (а, рис. 1.1) є найпоширенішими завдяки простоті конструкції та універсальності. Їхня дія базується на створенні притискного зусилля між двома або кількома губками, які охоплюють вантаж із протилежних сторін. Рух губок забезпечується за допомогою важелів, пневмоциліндрів або сервоприводів.

Такі пристрої застосовуються для утримання деталей з різними геометричними формами – від плоских листових матеріалів до циліндричних корпусів. Основними вимогами до них є достатня сила затиску, надійне фіксування без пошкодження поверхні та можливість регулювання зусилля.

1.1.2 Вилочні (лапчасті) пристрої

Вилочні захвати мають дві або більше лап, які підводяться під вантаж і підтримують його знизу. Принцип роботи ґрунтується на створенні опори, подібної до дії вилкового навантажувача. Такі пристрої широко застосовуються для роботи з

ящиками, контейнерами, палетами, плитними або пакувальними вантажами.

Основна перевага – мінімальний ризик деформації предметів, оскільки сила діє не стискально, а опорним способом. Недоліком є потреба у вільному доступі під вантаж.



а)



б)



в)



г)

Рисунок 1.1 – Різновиди ВЗП

1.1.3 Ексцентрикові пристрої

Ексцентрикові захвати (б, рис. 1.1) використовують принцип самозатискування: при підйомі вантажу обертання ексцентрика створює притискну силу, пропорційну масі предмета. Такі пристрої компактні, не потребують зовнішнього джерела енергії для утримання, і часто застосовуються при роботі з листовими або плоскими деталями, зокрема в металообробній промисловості.

Головна перевага – автоматичне регулювання сили затиску залежно від маси, що підвищує безпеку при підйомі.

1.1.4 Гвинтові (струбцинні) пристрої

Гвинтові захвати фіксують вантаж за рахунок обертання гвинта, який створює регульовану затискну силу. Такі пристрої прості у виготовленні, надійні, але мають невисоку швидкодію. Вони найчастіше застосовуються у випадках, коли потрібно міцно зафіксувати деталь на тривалий час, наприклад, під час монтажу або зварювальних робіт.

Перевагою є висока точність регулювання зусилля, а недоліком – повільний цикл затиску.

1.1.5 Штирові-стропові пристрої

Штирові-стропові пристрої використовуються для підвішування вантажів, що мають спеціальні отвори, вушка або петлі. Захоплення здійснюється за допомогою металевих штирів, гаків або строп, які входять у зчеплення з вантажем.

Такі системи є універсальними, мають високу вантажопідйомність і простоту конструкції. Основним недоліком є потреба у ручному навішуванні стропа, що обмежує їх використання в автоматизованих системах.

1.1.6 Коромислові пристрої

Коромислові захвати діють за принципом важеля, де підйом однієї частини конструкції автоматично створює затискне зусилля на іншій. Такі пристрої широко застосовуються у кранових підвісках і системах для підйому великих або довгомірних вантажів (труб, балок, контейнерів).

Вони відзначаються простотою, високою надійністю та здатністю рівномірно розподіляти навантаження між точками захоплення.

1.1.7 Клинові пристрої

Клинові захвати (в, рис. 1.1) створюють фіксацію за рахунок поступального переміщення клина, який розсуває або притискає губки до поверхні вантажу. Такий тип механізму дозволяє отримати значні затискні сили при невеликому ході виконавчого елемента. Клинові системи часто використовуються в робототехнічних і гідравлічних захватах, де важлива компактність і висока силова ефективність.

Недоліком є необхідність точного налаштування кута клина та контролю тертя для уникнення самовідпускання.

1.1.8 Магнітні та електромагнітні пристрої

Магнітні захвати застосовуються для підйому феромагнітних матеріалів – сталевих листів, заготовок, деталей [13]. Постійні магніти забезпечують енергонезалежність, а електромагніти дозволяють вмикати та вимикати магнітне поле у потрібний момент, що зручно для автоматизованих систем.

Основними перевагами є швидкодія, відсутність механічних контактів і рівномірний розподіл силового поля. Недоліки – непридатність для немагнітних матеріалів і потреба у джерелі живлення для електромагнітних варіантів.

1.1.9 Вакуумні пристрої

Вакуумні захвати (г, рис. 1.1) працюють за принципом створення розрідження між поверхнею присоски та поверхнею вантажу. Вони незамінні для роботи з гладкими, герметичними матеріалами – склом, пластиком, листовим металом, пакувальними коробами.

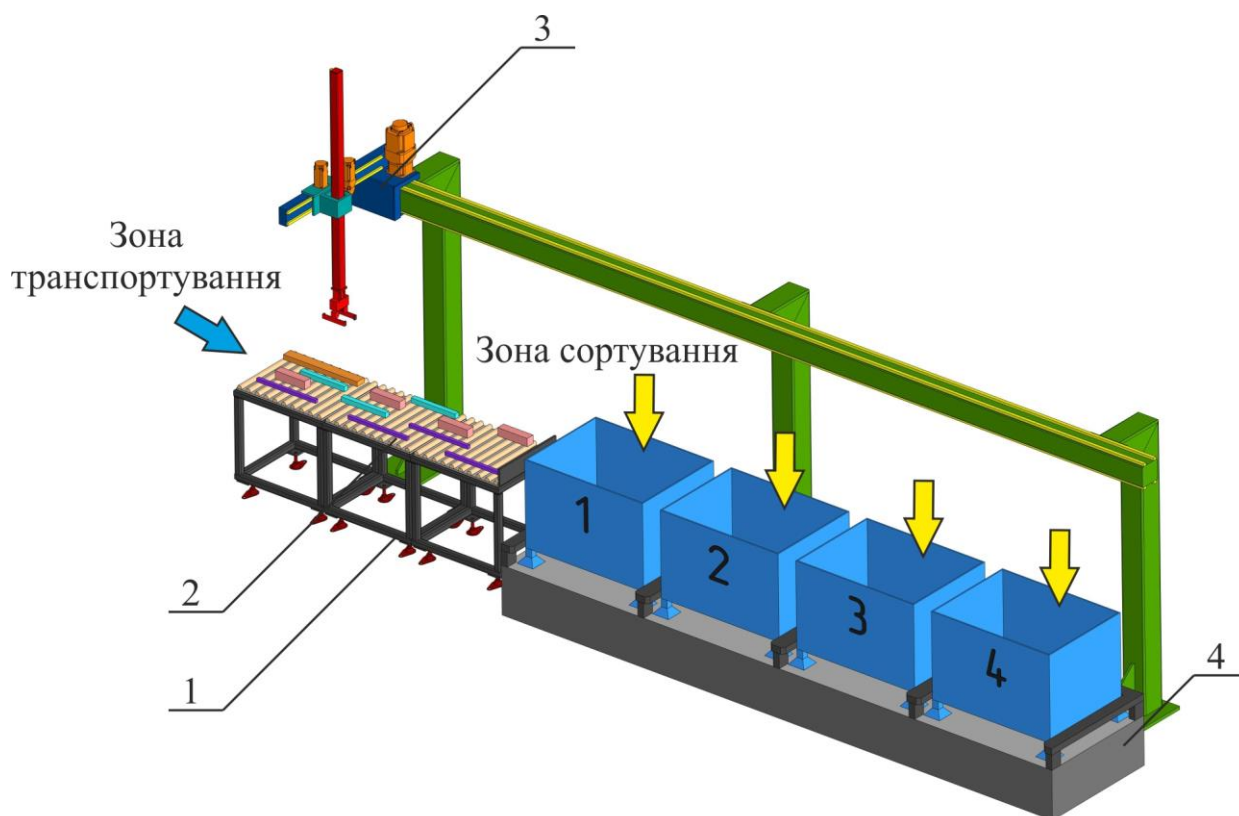
Система вакуумного захвату складається з присосок, вакуумного насоса, резервуара та електромагнітного клапана керування. Переваги – м'яке доторкання до поверхні, відсутність механічного тиску, можливість роботи з крихкими предметами [14]. Недоліком є обмежена ефективність при наявності пор або нерівностей на поверхні вантажу.

Кожен тип вантажозахоплювального пристрою має свої конструктивні особливості, сферу застосування та вимоги до умов експлуатації. У сучасних автоматизованих системах найчастіше використовуються комбіновані схеми, що поєднують властивості декількох типів – наприклад, вакуумно-механічні або

електромагнітно-кліщові захвати. Подібні рішення дозволяють забезпечити універсальність, адаптивність до різних форм вантажів та високу надійність роботи в комплексах з сервоприводним керуванням.

1.2 Загальна характеристика сортувального порталу

На рис. 1.10 зображено узагальнену 3D модель роботи сортувального комплексу, що складається з двох основних зон – зони транспортування та зони сортування, між якими функціонує сортувальний портал з сервоприводною системою керування. Конструкція призначена для автоматизованого розподілення вантажів масою до 50 кг у відповідні контейнери за заданими критеріями.



- 1) – конвеєрна лінія; 2) – вантаж; 3) – сортувальний портал;
4) – платформа відвантаження

Рисунок 1.10 – Зовнішній вигляд сортувального порталу
(вид спереду, праворуч)

Конвеєрна лінія (1, рис. 1.10) виконує функцію подачі вантажів у зону сортування. Вона складається з роликів секцій, які забезпечують безперервне транспортування об'єктів із зони завантаження. Привід конвеєра реалізує рух за допомогою асинхронного електродвигуна з редуктором, який працює у сталому режимі та підтримує швидкість руху вантажів, узгоджену з циклом роботи сортувального порталу [15]. Уздовж лінії встановлені оптичні датчики для визначення наявності вантажу, які передають сигнали у систему керування порталом для синхронізації операцій сортування.

Вантаж (2, рис. 1.10) представлений у вигляді окремих виробів, які надходять на конвеєр з різними габаритами, що підлягають сортуванню [16]. Положення кожного вантажу на конвеєрі фіксується сенсорними елементами, після чого система визначає необхідний контейнер для його відправлення. Для підйому вантажу використовується механічний захват, облаштований у робочий орган порталу, який забезпечує безпечне маніпулювання предметами масою до 50 кг.

Конструкція сортувального порталу складається з трьох координатних механізмів (повздовжнього, поперечного та вертикального), що приводяться у дію трьома незалежними сервоприводами постійного струму напругою 500 В. Портал забезпечує точне позиціонування захватного пристрою над конвеєром і над контейнерами у зоні сортування. Для забезпечення плавності руху та високої динамічної точності використовуються енкодери і система керування з замкненими контурами зворотного зв'язку. Кожен цикл роботи порталу включає: підхід до вантажу, захоплення, переміщення у відповідний контейнер і відпускання вантажу. Конструкція порталу дозволяє забезпечити високу продуктивність при компактних габаритах та мінімальних енерговитратах.

Платформа відвантаження (4, рис. 1.10) виготовлена зі зварної сталеві конструкції з підсилюючими елементами, що забезпечують необхідну жорсткість та стійкість під час роботи. Кожен контейнер встановлюється у спеціальні напрямні, які фіксують його положення відносно порталу. Поверхня платформи має протиковзке покриття для запобігання зсуву контейнерів під час навантаження. У разі повного заповнення контейнерів до платформи під'їжджає пневмоколісний

вилковий перевантажувач, який забирає відсортований матеріал для подальшого транспортування. Цей процес здійснюється без зупинки сортувального циклу – нові контейнери встановлюються паралельно під час роботи порталу, що підвищує загальну ефективність комплексу.

1.3 Вимоги до сервопривода сортувального порталу

Електротехнічне оснащення сервопривода сортувального порталу повинне відповідати чинним нормам та вимогам, які встановлено для механізмів, що експлуатуються у приміщеннях закритого типу.

Розроблена конструкція порталу не підлягає обов'язковій реєстрації у Держнагляді охорони праці, оскільки його вантажопідйомність не перевищує 1 т. Водночас для забезпечення безпечної експлуатації обладнання необхідно підготувати повний пакет технічної документації, який має включати:

- специфікацію виробу з наведенням основних технічних параметрів (вантажопідйомність, габарити робочої зони, швидкості підйому / спуску та переміщення вантажу);
- комплект технічних документів щодо електрообладнання, перелік застосованих електронних і механічних компонентів;
- принципову електричну схему системи керування сервоприводом порталу;
- програму випробувань дослідного зразка;
- інструкцію з монтажу, експлуатації, технічного обслуговування та креслення вузлів для правильного складання та розбирання конструкції.

Система керування сервоприводом порталу, робота якої може створювати потенційну небезпеку для персоналу, повинна бути обладнана аварійними вимикачами або кнопками екстреного відключення електроживлення. Такі елементи безпеки необхідно конструктивно захищати від випадкового натискання чи механічного пошкодження.

Розміщення аварійних вимикачів повинно бути виконане таким чином, щоб оператор мав до них швидкий доступ – поблизу постів керування або у зонах, де

можливе виникнення небезпечних ситуацій. У приводі передбачаються кінцеві вимикачі, які забезпечують надійне зупинення рухомих частин після досягнення граничних положень.

Комутаційні пристрої, що використовуються в електричних колах сервопривода (зокрема у механізмі захвату), повинні витримувати короточасний струм короткого замикання (КЗ), який може виникнути в місці їх встановлення, до моменту спрацювання системи захисту.

Пускорегулювальна апаратура має забезпечувати запуск електропривода лише з нульового положення керування, виключаючи можливість самовільного вмикання. Якщо така апаратура розташована на головному чи допоміжному розподільному щиті у межах видимості привода, допускається використання безпосередньо щитового вимикача для ініціювання пуску.

У випадках, коли вимоги до розташування пускорегулювального обладнання не можуть бути дотримані, необхідно передбачити блокуючий вимикач, який забезпечує відключення системи у положенні «вимкнено», або встановити додатковий вимикач у безпосередній близькості до сервопривода.

1.4 Висновок по розділу

В розділі виконано огляд та аналіз вантажозахоплювальних пристроїв відповідно до їх існуючих різновидів. Визначено напрямок для задачі дослідження, який полягає в розробці сервопривода сортувального порталу вантажопідйомністю 50 кг. Наведено загальну характеристику та вимоги до сервопривода сортувального порталу.

2 ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СЕРВОПРИВОДА СОРТУВАЛЬНОГО ПОРТАЛУ ВАНТАЖОПІДЙОМНІСТЮ 50 КГ

2.1 Основні технічні характеристики сортувального порталу

Основні технічні характеристики сортувального порталу наведені у вигляді табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Основні технічні характеристики сортувального порталу

Найменування параметра	Значення
Вантажопідйомність, кг	50
Висота підняття вантажу, м	1,12
Швидкість підйому/спуску вантажу, м/с	0,22
Відстань переміщення вантажу повздовжня / поперечна, м	5,4 / 0,9
Швидкість переміщення вантажу, м/с	0,42
Виконавчий мотор-редуктор механізму захвату	80B4
Час захвату вантажу, с	< 5
Вхідна напруга живлення електропривода, В	3×380
Частота мережі, Гц	50
Виконавчий сервопривод	DR160 – 1 шт., DR71 – 2 шт.
Планетарний редуктор	PSF522, PSF222, PSF322
Гальмівний резистор	BW147 – 3 шт.
Мережевий фільтр	ND045-013
Силовий модуль	MPB51A011
Координатний модуль	MAS51A005 – 3 шт.
Радіатор охолодження	DKF07

Найменування параметра	Значення
Перетворювач частоти	<i>MDX61B0015</i> – 3 шт.
Габаритні розміри сортувального порталу, мм	5,4×1,21×2,7
Загальна маса спорядженого порталу, т	0,742

2.2 Основні технічні характеристики виконавчих електродвигунів

В якості виконавчих електродвигунів для механізмів переміщення та підйому/спуску вибираємо серію *DR* виробництва компанії *SEW*. Основні технічні характеристики виконавчих електродвигунів представлені у вигляді табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Основні технічні характеристики виконавчих електродвигунів

МЕХАНІЗМ ПЕРЕМІЩЕННЯ		
Найменування параметра	Повздовжній	Поперечний
Модель	<i>DR160</i>	<i>DR71</i>
Ступінь захисту	<i>IP65</i>	<i>IP65</i>
Напруга постійного живлення, В	540	540
Номінальний струм, А	2,7	1,85
Номінальний момент, Н·м	2,5	1,83
Максимальний пусковий момент, Н·м	5,5	4
Критичний момент, Н·м	106,7	22
Номінальна швидкість обертання, об/хв	3000	3000
Момент інерції, кг·м ²	0,000689	0,000546
Маса, кг	60	32

МЕХАНІЗМ ПІДЙОМУ/СПУСКУ	
Найменування параметра	Значення
Модель	<i>DR71</i>
Ступінь захисту	<i>IP65</i>
Напруга постійного живлення, В	540
Номинальний струм, А	1,85
Номинальний момент, Н·м	1,83
Максимальний пусковий момент, Н·м	4
Критичний момент, Н·м	22
Номинальна швидкість обертання, об/хв	3000
Момент інерції, кг·м ²	0,000546
Маса, кг	32

2.3 Основні технічні характеристики редукторів

В електроприводі сортувального порталу вантажопідйомністю 50 кг для механізмів переміщення та підйому/спуску вибираємо серію *PSF* виробництва компанії *SEW*. Основні технічні характеристики редукторів *PSF* представлені у вигляді табл. 2.3.

Таблиця 2.3 – Основні технічні характеристики редукторів *PSF*

МЕХАНІЗМ ПЕРЕМІЩЕННЯ		
Найменування параметра	Повздовжній	Поперечний
Модель	<i>PSF522</i>	<i>PSF222</i>
Тип редуктора	планетарний	планетарний
Кількість ступенів передачі, шт.	2	2
Передатне відношення редуктора	56	16
ККД	0,94	0,94

Найменування параметра	Повздовжній	Поперечний
Момент на тихохідному валу, Н·м	250	160
Маса, кг	74	36
МЕХАНІЗМ ПІДЙОМУ/СПУСКУ		
Найменування параметра	Значення	
Модель	PSF322	
Тип редуктора	конічно-планетарний	
Кількість ступенів передачі, шт.	2	
Передатне відношення редуктора	70	
ККД	0,94	
Момент на тихохідному валу, Н·м	180	
Маса, кг	65	

2.4 Основні технічні характеристики гальмівного резистора

Для гальмування електропривода сортувального порталу вантажопідйомністю 50 кг застосовуємо два гальмівні резистори серії BW. Основні технічні характеристики вибраних гальмівних резистори BW147 представлені у вигляді табл. 2.4.

Таблиця 2.4 – Основні технічні характеристики гальмівних резисторів

Найменування параметра	Значення
Модель	BW147
Максимальна потужність привода, кВт	до 0,12
Термостат	вбудований
Ступінь захисту	IP20
Тип охолодження	самоохолодження
Клеми підключення, мм ²	2,5

Найменування параметра	Значення
Значення опору, Ом	47
Струм відключення, А	3,5
Робоча температура, градусів Цельсія	від -20 до +40
Габаритні розміри, мм	465×120×185
Маса, кг	4,3

2.5 Основні технічні характеристики мережевого дроселя

Для ефективного захисту пристроїв електрообладнання від перенапруження в живлячій мережі застосовуємо мережевий дросель серії *ND*. Основні технічні характеристики мережевого дроселя представлені у вигляді табл. 2.5.

Таблиця 2.5 – Основні технічні характеристики мережевого дроселя

Найменування параметра	Значення
Модель	<i>ND045-013</i>
Напруга змінного живлення, В	3×380
Частота мережі, Гц	50
Номінальний струм, А	45
Втрати потужності, Вт	15
Індуктивність, мГн	0,1
Робоча температура, градусів Цельсія	від -25 до +45
Габаритні розміри, мм	125×95×170
Маса, кг	2,5

2.6 Основні технічні характеристики силового модуля

Для сервоприводних механізмів повздовжнього / поперечного переміщення та підйому/спуску вантажу обираємо один спільний силовий модуль серії *MPB*.

Основні технічні характеристики вибраного силового модуля *MPB* представлені у вигляді табл. 2.6.

Таблиця 2.6 – Основні технічні характеристики силового модуля

Найменування параметра	Значення
Модель	<i>MPB51A011</i>
Вхідна напруга змінного струму, В	380
Частота мережі, Гц	50
Вихідна напруга постійного струму, В	500
Внутрішнє джерело живлення, В	24
Потужність постійного джерела живлення, кВт	0,24
Максимальний струм, А	20
Габаритні розміри, мм	105×380×250
Маса, кг	5,5

2.7 Основні технічні характеристики координатного модуля

Для механізму переміщення та підйому/спуску вантажу обираємо однакові координатні модулі серії *MAS*. Основні технічні характеристики вибраних координатних модулів *MAS* представлені у вигляді табл. 2.7.

Таблиця 2.7 – Основні технічні характеристики координатних модулів

Найменування параметра	Значення
Модель	<i>MAS51A005</i>
Напруга постійного струму, В	500
Номінальний струм, А	5
Максимальний струм, А	7,5
Габаритні розміри, мм	70×380×250
Маса, кг	3,5

2.8 Основні технічні характеристики радіатора

Для ефективного захисту пристроїв електрообладнання від перегріву під час експлуатації застосовуємо радіатор охолодження серії *DKF*. Основні технічні характеристики вибраного радіатора охолодження *DKF* представлені у вигляді табл. 2.8.

Таблиця 2.8 – Основні технічні характеристики вибраного радіатора

Найменування параметра	Значення
Модель	<i>DKF07</i>
Матеріал корпусу	алюміній
Конструктивне охолодження	ребра охолодження
Штучне охолодження	вентиляторне
Кількість допустимих вентиляторів, шт..	3
Напруга живлення вентиляторів, В	24
Габаритні розміри, мм	340×220
Маса, кг	0,52

2.9 Основні технічні характеристики захватного пристрою

В якості захватного пристрою для обробки вантажів розроблено конструкцію механізму захвату. Технічні характеристики пристрою наведено у табл. 2.9.

Таблиця 2.9 – Технічні характеристики захватного пристрою

Вантажопідйомність, кг	50
Тип захватного пристрою	механічний, рейковий
Габарит захопленого вантажу, мм	1000×100×100
Матеріал конструкції	сталь ГОСТ 380-94
Габаритні розміри захватного пристрою, мм	1500×110×150
Маса конструкції без мотор-редуктора, кг	12

2.10 Висновок по розділу

В розділі представлені основні технічні характеристики сервопривода сортувального порталу з висотою підняття вантажу 1,12 м, а саме механізмів: повздовжнього / поперечного переміщення вантажу зі швидкістю 0,42 м/с, підйому / спуску вантажу зі швидкістю 0,22 м/с, захвату вантажу масою до 50 кг, а також технічні характеристики його основних комплектуючих елементів електрообладнання, вибраних в результаті виконаних розрахунків.

3 ОПИС ТА ОБГРУНТУВАННЯ ПРИЙНЯТИХ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ ПРИ РОЗРОБЦІ СЕРВОПРИВОДА СОРТУВАЛЬНОГО ПОРТАЛУ ВАНТАЖОПІДЙОМНІСТЮ 50 КГ

3.1 Розробка 3D моделі конструкції сервопривода сортувального порталу вантажопідйомністю 50 кг

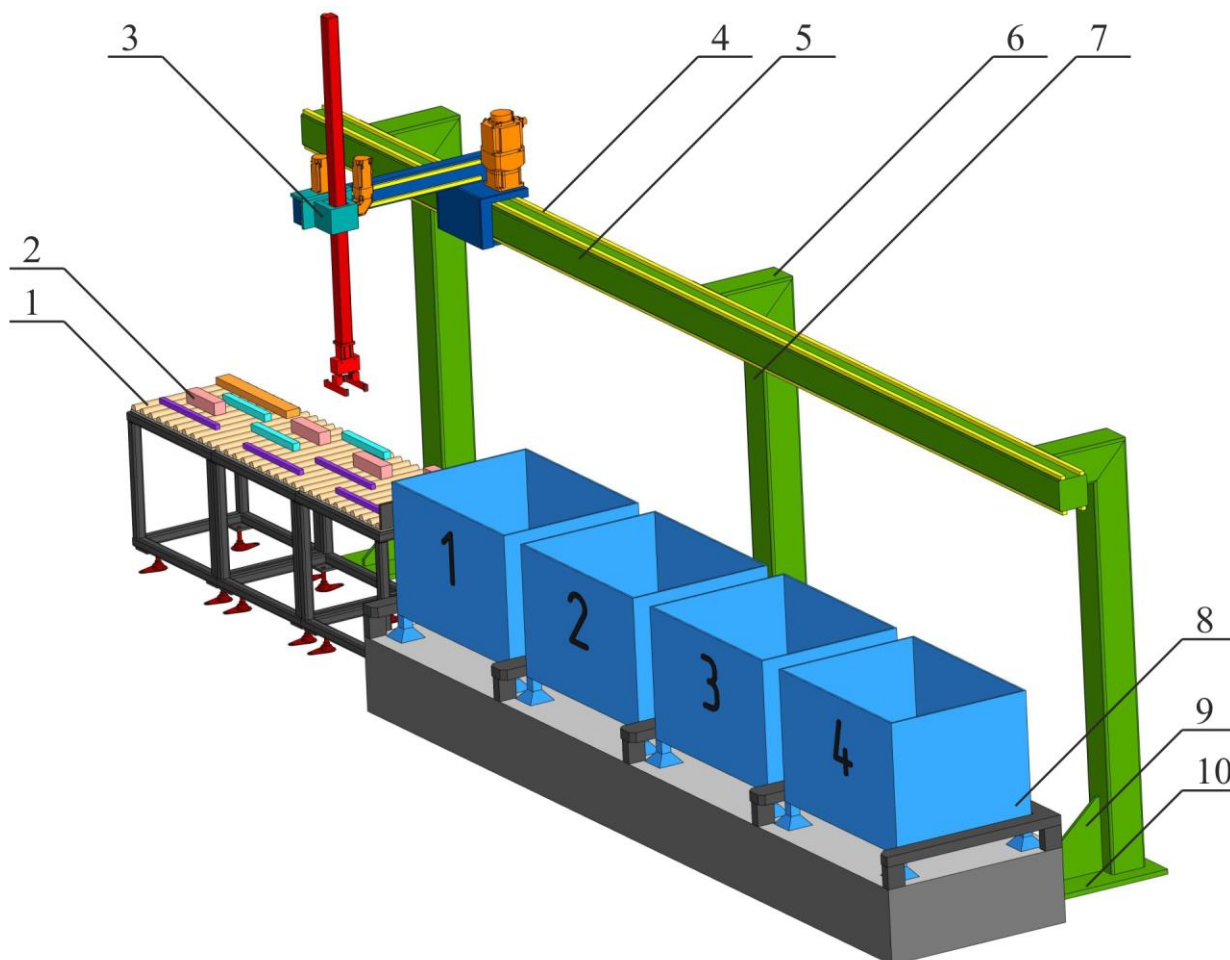
Розроблена конструкція сервопривода сортувального порталу вантажопідйомністю 50 кг виготовляється у вигляді металевої рамної конструкції (рис. 3.1).

Конвеєрна лінія (1, рис. 3.1) слугує підсистемою подачі вантажів до зони дії сортувального порталу [17]. Вона забезпечує рівномірне переміщення виробів із заданою швидкістю, узгодженою з частотою циклів сервопривода. Привід конвеєра обладнано датчиками положення, які синхронізуються із системою керування порталом, дозволяючи координувати момент захоплення. Конструктивно лінія виконана на сталевій рамі з роликowymi опорами.

Вантаж (2, рис. 3.1) являє собою типовий об'єкт транспортування, який надходить із конвеєрної лінії в зону сортування. Геометричні параметри та маса вантажу визначають вимоги до динамічних характеристик сервопривода, зокрема моменту на валу, часу розгону та гальмування. При моделюванні системи враховуються характеристики центру мас і форма об'єкта, що дозволяє уникнути коливань при різких прискореннях. У складі експериментального зразка передбачається можливість регулювання сили захоплення для безпечного транспортування вантажів різного типу.

Сортувальний пристрій (3, рис. 3.1) виконує функції захоплення, переміщення та точного розміщення вантажів у визначених координатах контейнерів. Центральним елементом цього вузла є сервопривод, який реалізує закритий контур керування за положенням, швидкістю та моментом. Завдяки застосуванню енкодера високої роздільної здатності система забезпечує точність позиціонування до $\pm 0,1$ мм.

Конструкція сортувального пристрою передбачає можливість зміни робочих насадок (захоплювачів) залежно від типу вантажу. Сервопривод розміщено на рухомій платформі з компенсаційним амортизатором, що зменшує вплив вібрацій на точність позиціонування.



- 1) – конвеєрна лінія; 2) – вантаж; 3) – сортувальний пристрій; 4) – рейка;
 5) – портал; 6) – горизонтальна балка; 7) – вертикальна стійка; 8) – контейнер;
 9) – посилення; 10) – опора

Рисунок 3.1 – 3D модель рамної конструкції сервопривода сортувального порталу
 (вид спереду, праворуч)

Рейка (4, рис. 3.1) слугує напрямною для руху сортувального пристрою по осі X. Вона виконана з шліфованої конструкційної сталі з високою жорсткістю і мінімальними відхиленнями по прямолінійності. По рейці переміщується каретка із сервоприводом, передаючи зусилля через зубчасту передачу. Для зменшення зносу

та шуму використовується лінійне підшипникове ковзання. На рейці розташовані кінцеві датчики положення, які забезпечують безпечне гальмування і повернення системи у нульову координату після завершення робочого циклу.

Портал (5, рис. 3.1) є основною несучою конструкцією, що формує робочий об'єм переміщення сортувального пристрою. Його рамна система сприймає навантаження від усіх осей руху та забезпечує просторову жорсткість під час дії динамічних моментів від сервопривода. Для уникнення резонансних коливань при роботі з навантаженнями до 50 кг застосовано ребра жорсткості та посилення вузлів кріплення рейки і горизонтальних балок (рис. 3.2). Портал також виконує функцію несучої основи для кабель-каналів та комутаційних елементів електроприводної системи.

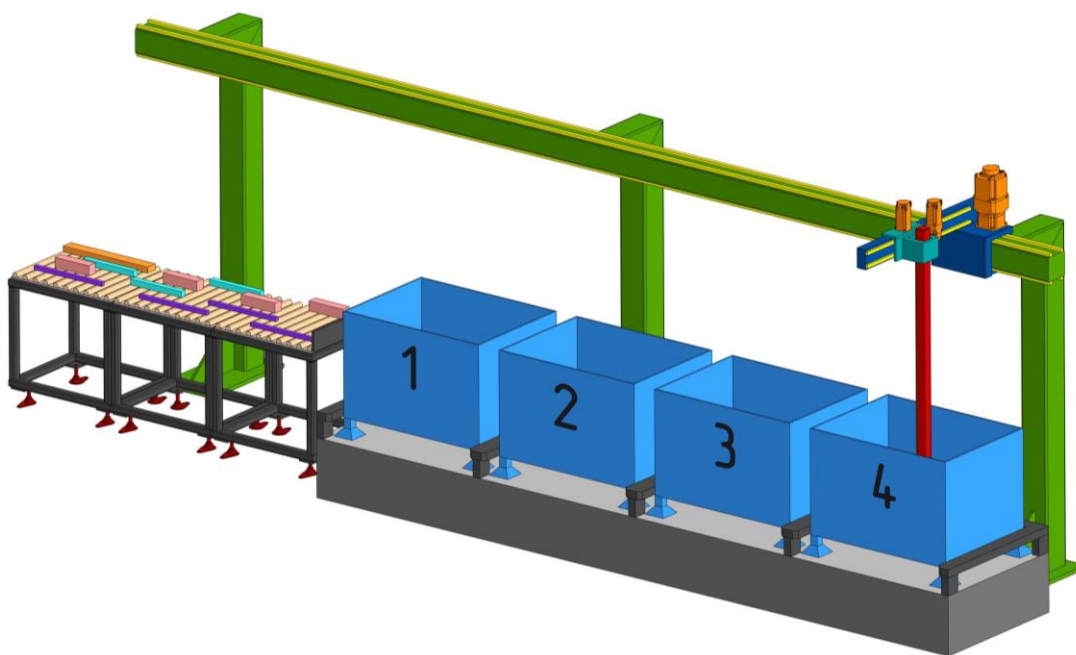


Рисунок 3.2 – Фрагмент роботи сервопривода сортувального пристрою на етапі спуску вантажу у сортувальний контейнер №4
(вид спереду, праворуч)

Горизонтальна балка (6, рис. 3.1) є елементом порталу, на якому розміщується рейка з кареткою та сортувальним пристроєм. Балка працює на вигин і кручення, тому виконана з порожнистого профілю прямокутного перерізу із внутрішніми ребрами жорсткості. Її конструкція дозволяє рівномірно розподіляти навантаження

по довжині та зберігати точність позиціонування сервопривода. На балці встановлено обмежувачі ходу, датчики лінійного переміщення та кріплення для тримачів кабелів.

Вертикальні стійки (7, рис. 3.1) утворюють опору для горизонтальної балки й забезпечують стабільність геометрії порталу. Вони виготовлені зі сталевих профілів з посиленими вузлами кріплення до основи. Конструкція стійок розрахована на сприйняття вертикальних і горизонтальних навантажень, що виникають під час роботи сервопривода, а також інерційних сил при гальмуванні. Для зниження вібрацій передбачено використання гумо-металевих прокладок у місцях обпирання.

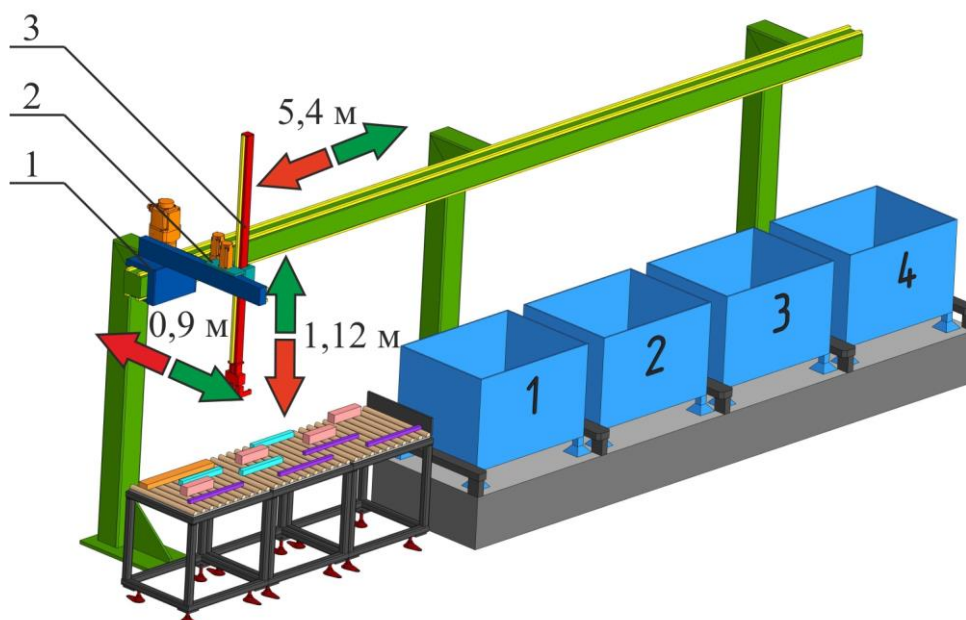
Контейнери (8, рис. 3.1) призначені для приймання відсортованих вантажів. Їх розташування відповідає координатам програмно заданих позицій сортувального пристрою. Конструкція контейнерів передбачає можливість швидкого демонтажу, очищення та обслуговування. Після завершення циклу сортування та повного заповнення контейнерів, система автоматично передає сигнал на верхній рівень керування про необхідність вивантаження. До зони розвантаження під'їжджає пневмоколісний вилковий перевантажувач, який здійснює транспортування відсортованого матеріалу у зону готової продукції. Конструкція контейнерів та розміщення порталної рами передбачають достатній простір для безпечного під'їзду перевантажувача, а також наявність напрямних для точного позиціонування вил при підйомі. Такий спосіб обслуговування дозволяє мінімізувати ручні операції, підвищити рівень автоматизації виробничого процесу та скоротити час простою обладнання між циклами сортування.

Посилення (9, рис. 3.1) виконує функцію підвищення жорсткості основи, на якій встановлено сортувальний портал. Посилення запобігає деформації конструкції при багаторазових циклах навантаження та забезпечує рівномірний розподіл маси по площі основи. Посилення виготовляється у вигляді пластин, з'єднаних зварюванням.

Опори (10, рис. 3.1) забезпечують стійкість порталної конструкції. Вони виконані у вигляді металевих стояків із можливістю фіксації за допомогою анкерних

болтів. Крім того, опори можуть містити елементи заземлення для підвищення електробезпеки при експлуатації сервопривода.

На рис. 3.3 подано схему, яка ілюструє робочі відстані переміщення виконавчого органу сортувального порталу у трьох координатних напрямках: повздовжньому, поперечному та вертикальному. Визначені діапазони руху обумовлені габаритами робочого простору портальної конструкції та характеристиками сервоприводів, що забезпечують точне позиціонування при переміщенні вантажів масою до 50 кг.



- 1) – повздовжній механізм переміщення; 2) – поперечний механізм переміщення;
3) – механізм підйому / спуску вантажу

Рисунок 3.3 – 3D модель рамної конструкції сервопривода сортувального порталу
(вид спереду, ліворуч)

Повздовжній механізм (1, рис. 3.3) забезпечує рух сортувального пристрою вздовж порталу на відстань 5,4 м. Цей рух реалізується за допомогою електромеханічного сервопривода, який передає крутний момент на рейково-зубчасту передачу. Кінематична пара характеризується високою плавністю ходу, що дозволяє досягати стабільної швидкості переміщення без ривків та вібрацій.

Конструкція напрямних виключає перекоси під час руху та забезпечує стійкість при роботі з вантажами максимальної маси.

Поперечний механізм (2, рис. 3.3) дозволяє переміщати виконавчий орган у напрямку, перпендикулярному основному руху порталу, на відстань 0,9 м. Цей ступінь руху забезпечує точне наведення сортувального пристрою на відповідний контейнер або позицію захоплення (рис. 3.4). Механізм оснащений окремим сервоприводом, який працює у режимі позиційного регулювання із замкнутим контуром за сигналом з датчика зворотного зв'язку. Така конструкція дозволяє компенсувати можливі похибки під час циклу сортування, а також забезпечує узгодження координат поперечного руху з положенням повздовжнього механізму.

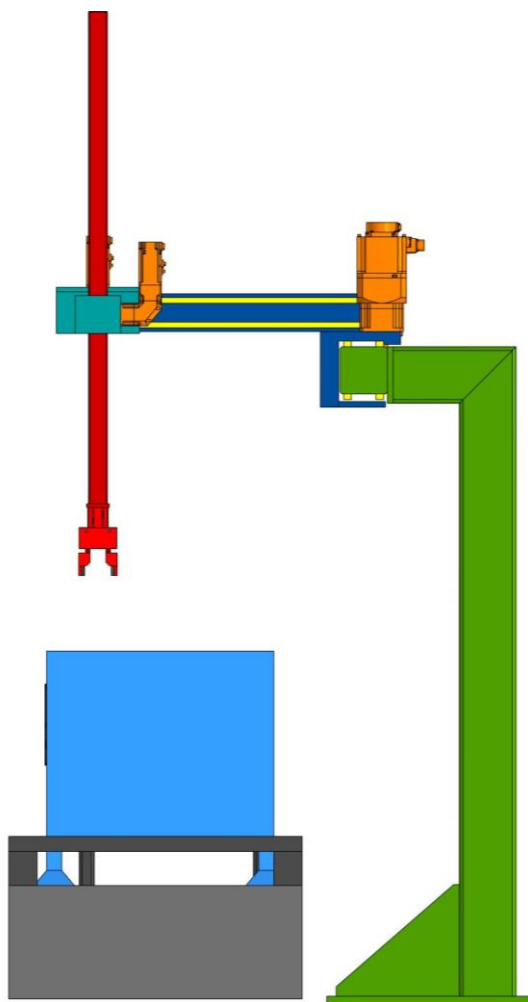


Рисунок 3.4 – 3D модель рамної конструкції сервопривода сортувального порталу
(вид з права)

Механізм підйому / спуску вантажу (3, рис. 3.3) забезпечує вертикальне переміщення виконавчого органу в межах 1,12 м. Його робота координується із положенням у повздовжній і поперечній площинах, що дозволяє здійснювати просторове позиціонування у тривимірному робочому об'ємі порталу. Вертикальний рух реалізується за допомогою сервопривода з зубчатою передачею, що забезпечує високу точність та плавність ходу при збереженні вантажопідйомності до 50 кг. Для підвищення безпеки система має механічне гальмо, яке фіксує положення вантажу у разі аварійного вимкнення живлення. Додатково встановлені кінцеві вимикачі обмежують хід механізму, запобігаючи перевищенню допустимої амплітуди руху.

Блок енергетики та керування сортувального порталу живиться від трифазної мережі 3×380 В, 50 Гц, із подальшим випрямленням до постійної напруги 500 В DC, що використовується для живлення силового модуля сервоприводів. Блок розташований поблизу нижньої частини порталу, на жорстко закріпленій платформі, яка забезпечує зручний доступ для обслуговування та водночас захищає обладнання від ударних навантажень і пилового середовища.

3.2 Функції резольвера у системах керування електроприводом

Резольвер функціонує за принципом обертового трансформатора та складається з ротора, що має обмотку, і статора з кількома обмотками [18]. Взаємодія обмоток статора та ротора утворює трансформаторну систему. Основна відмінність резольвера від звичайного обертового трансформатора полягає у наявності на статорі двох обмоток, розташованих під кутом 90° одна до одної.

Пристрій використовується для визначення абсолютного положення валу електродвигуна в межах одного повного оберту (рис. 3.5). Крім цього, сигнал, сформований резольвером, може застосовуватися для обчислення швидкості обертання та як імпульсний сигнал для системи керування положенням (позиціонування).



Рисунок 3.5 – Зовнішній вигляд резольвера

Ротор резольвера жорстко встановлюється на валу електродвигуна. Для передавання збуджувальної (первинної) напруги на ротор без використання щітково-колекторного вузла в конструкції передбачено додаткові обмотки на роторі та статорі. Саме через ці допоміжні обмотки напруга передається індукційним (трансформаторним) способом. Додаткова і робоча обмотки ротора з'єднані між собою електрично, тому напруга збудження, що індукується у допоміжній обмотці статора, одночасно прикладається і до основної (робочої) обмотки ротора.

При зміні положення ротора у робочих обмотках статора виникають напруги, амплітуда яких змінюється відповідно до кута повороту ротора. У тій обмотці, крізь яку проходить максимальний потік збудження U_1 , напруга досягає найбільшого значення. При повороті ротора на 90° ця напруга U_1 зменшується до нуля, а при подальшому обертанні (на 180°) знову досягає максимуму, але зі зсувом фази. Таким чином, її зміна відбувається за косинусоїдальним законом.

Напруга у другій робочій обмотці U_2 зміщена по фазі на 90° відносно першої, тому при нульовому положенні ротора вона дорівнює нулю, досягає максимуму при 90° і знову спадає до нуля при 180° . Отже, її амплітуда змінюється за законом синуса.

Сигнал, який формує резольвер, у перетворювачі серводвигуна (рис. 3.6) перетворюється на дискретне цифрове значення. Це значення надалі обробляється для отримання додаткових параметрів роботи системи.

Резольвер-перетворювач передає дані про кутове положення ротора, що дає змогу точно визначати його позицію. Одночасно за кількістю імпульсів, зареєстрованих за певний проміжок часу, розраховується середня швидкість обертання двигуна. Крім того, молодші розряди цифрового сигналу застосовуються для визначення напрямку обертання та забезпечення функції позиціонування.



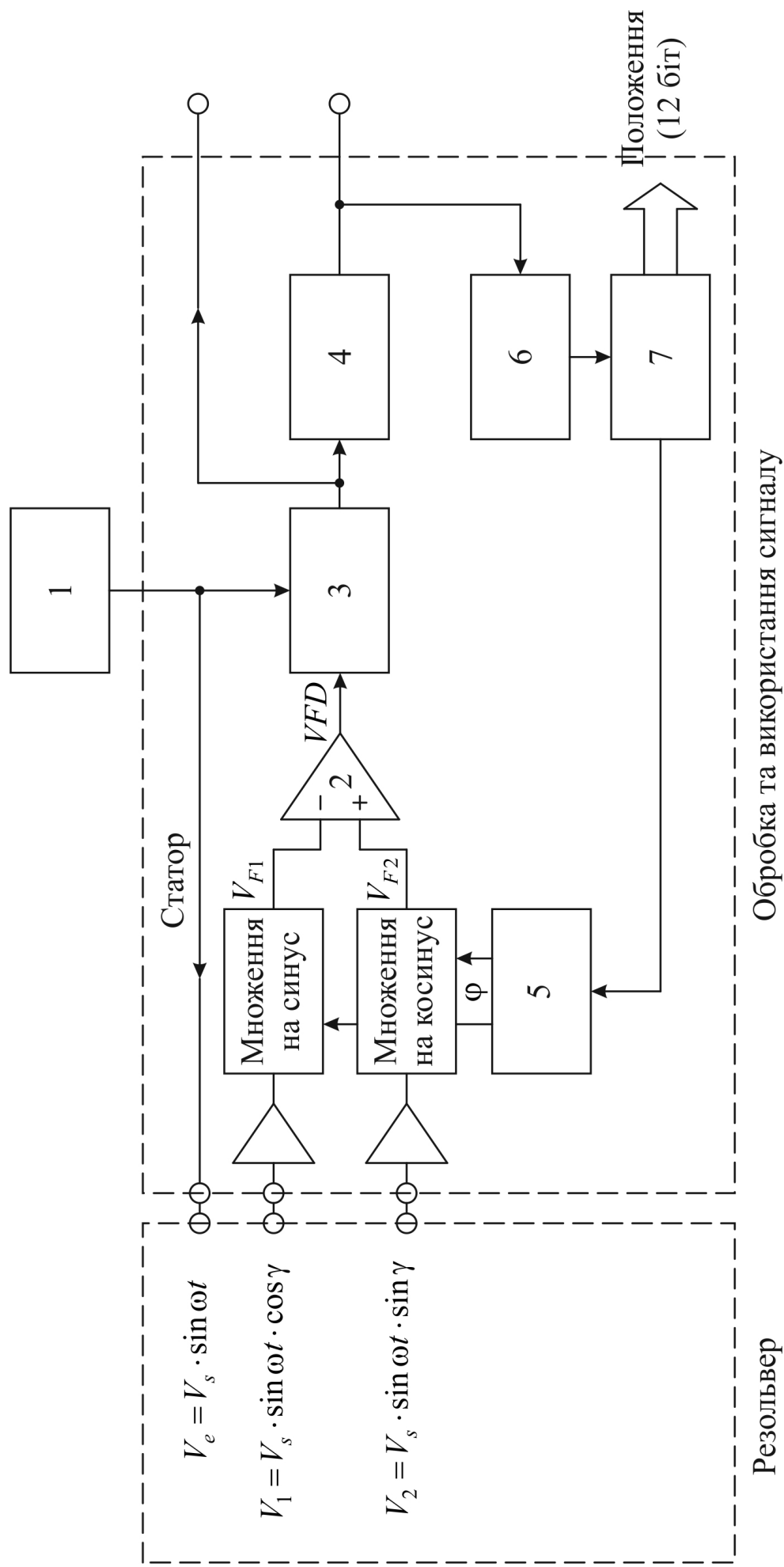
Рисунок 3.6 – Обробка вихідного сигналу резольвера

Генератор опорної частоти подає через статорну обмотку на ротор змінну напругу приблизно 10 В із частотою близько 7 кГц (рис. 3.7). Отримане дискретне числове значення у реверсивному лічильнику далі подається на цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП). Вихідні сигнали U_1 і U_2 статора резольвера, перемножуються відповідно на синус та косинус поточного виміряного кута. У цьому випадку значення, зафіксоване реверсивним лічильником, відповідає куту φ .

У результаті формується вихідна напруга, пропорційна цьому куту

$$U_{F1} = U_S \cdot \sin \omega t \cdot \cos \gamma \cdot \sin \varphi,$$

$$U_{F2} = U_S \cdot \sin \omega t \cdot \sin \gamma \cdot \cos \varphi.$$



1) – генератор опорної частоти; 2) – ; 3) – фоточутливий випрямляч; 4) – інтегратор; 5) – цифро-аналоговий перетворювач; 6) – реверсивний лічильник; 7) – генератор керувань напругою

Рисунок 3.7 – Блок схема перетворювача

У підсилювальному блоці обидва сигнали порівнюються шляхом їх віднімання. Отримане значення є різницею, тобто похибкою між заданим кутом φ та фактичним кутом γ .

Помилка виходить у вигляді

$$U_{FD} = U_S \cdot \sin \omega t \cdot (\sin \gamma \cdot \cos \varphi - \cos \gamma \cdot \sin \varphi),$$

або після перетворення

$$U_{FD} = U_S \cdot \sin \omega t \cdot \sin(\gamma - \varphi).$$

У фазочутливому випрямлячі, який під'єднано після вузла віднімання, відбувається демодуляція сигналу з метою усунення несучої частоти. На виході випрямляча формується сигнал U_F , амплітуда якого пропорційна величині похибки між кутами $\sin(\gamma - \varphi)$.

Отримана напруга подається на один із входів резольвера-перетворювача, а також на вхід інтегратора. Інтегратор виконує накопичення (інтегрування) сигналу помилки та передає сформовану напругу далі на генератор керований напругою (ГКН).

У разі наявності розбіжності між заданим і фактичним кутами (γ і φ) інтегратор створює випрямлену напругу, за допомогою якої ГКН генерує імпульси, що подаються до реверсивного лічильника.

На вході генератора, керованого ГКН, сигнал у вигляді постійної напруги зберігається доти, доки різниця між заданим і фактичним кутами не стане нульовою, тобто система досягає стану рівноваги. У цей момент дискретний код, сформований реверсивним лічильником, повністю відповідає аналоговому значенню кута, визначеному резольвером.

Під час безперервного обертання ротора резольвера ГКН генерує імпульси доти, доки цифрове значення лічильника узгоджується з аналоговим сигналом

кутового положення. Це означає, що зміна кута ротора компенсується автоматично. Частота імпульсів, яку видає ГКН, прямо пропорційна швидкості обертання двигуна і самого резольвера. Відповідно, вихідна напруга інтегратора також є пропорційною швидкості.

Таким чином, перетворювач формує на виході напругу U_T , що відображає швидкість обертання, а також містить інформацію про кількість обертів резольвера. Схема реалізована у вигляді інтегруючого контуру з підключенням опорного генератора ззовні. Похибка сигналу резольвера є незначною і становить менше 0,05 %.

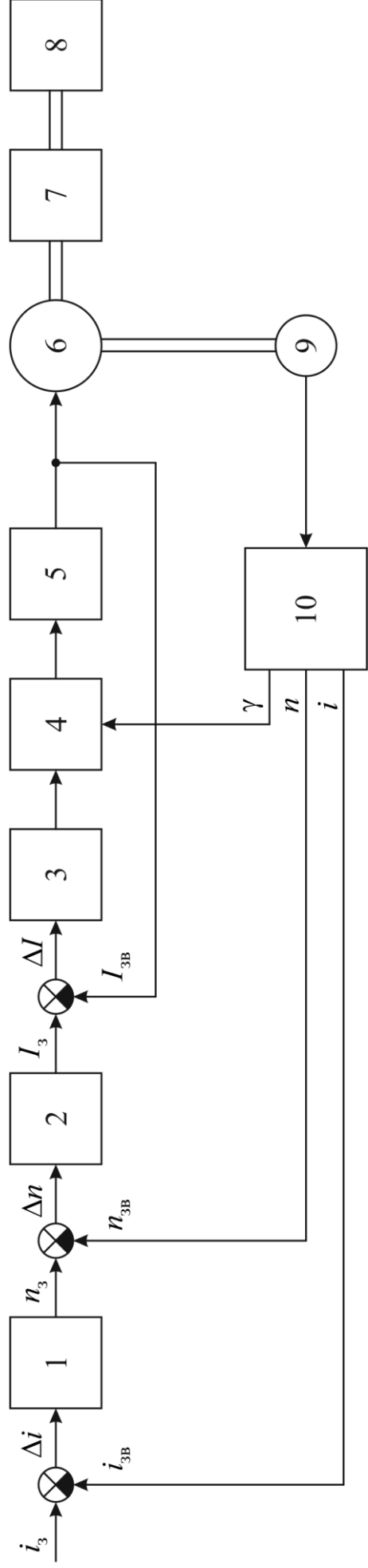
3.3 Організація регулювання і режими роботи електричного сервопривода

У більшості практичних систем електричний сервопривод застосовується для точного регулювання положення (рис. 3.10). У такій структурі регулятори швидкості та струму працюють під керуванням регулятора положення, що забезпечує високі динамічні властивості приводу [19].

Керуючим сигналом для сервопривода виступає задане значення положення, яке надходить із зовнішнього джерела. Різниця між цим заданим положенням і фактичним положенням валу є вхідним сигналом для регулятора положення. На виході регулятор формує сигнал завдання для швидкості обертання двигуна.

Далі на вході регулятора швидкості здійснюється порівняння між заданою та реальною швидкістю. Отримана похибка обробляється у пропорційно-інтегральному (ПІ) регуляторі швидкості, який формує керуючий сигнал для контуру струму.

Вихід регулятора швидкості формує сигнал завдання струму, який подається на схему обмеження з метою захисту двигуна та інвертора від перевантажень. Вихід цього обмежувача знову виступає сигналом завдання для регулятора струму. Фактичне значення струму, виміряне у ланцюзі живлення, за допомогою випрямляча перетворюється у сигнал постійного струму.



1) – регулятор положения; 2) – регулятор швидкості; 3) – регулятор струму; 4) – широтно-імпульсний модулятор;
5) – силові ключі; 6) – двигун; 7) – редуктор; 8) – навантаження; 9) – резольвер; 10) – перетворювач

Рисунок 3.8 – Структура регулювання сервопривода

Регулятор струму порівнює отримане значення з заданим і, використовуючи широтно-імпульсний модулятор (ШІМ), формує керуючі імпульси для відкривання силових транзисторів інвертора. З урахуванням вимог до швидкодії, контур регулювання струму реалізовано в аналоговому виконанні, тоді як решта функцій – керування, регулювання та моніторинг – здійснюються мікроконтролером.

Сервопривод змінного струму може працювати у трьох основних режимах, залежно від характеру керування та навантаження системи.

3.3.1 Режим керування положенням

Основною задачею цього режиму є точний контроль кута повороту ротора. Керування здійснюється за допомогою послідовності імпульсів, які можуть надходити, наприклад, від контролера системи. Такий режим застосовується для високоточного позиціонування окремих вузлів або механізмів технологічного обладнання.

Послідовність імпульсів, що використовується для керування положенням, може містити не лише інформацію про поточний кут, але й дані щодо швидкості та напрямку обертання двигуна. Для цього застосовують три основні типи сигналів:

- квадратурні імпульси – з фазовим зсувом на 90° ;
- імпульси обертання – послідовні сигнали, що чергуються при обертанні за або проти годинникової стрілки;
- імпульси швидкості та сигнал напрямку – подаються на два окремі входи системи для визначення напрямку руху та величини швидкості.

3.3.2 Режим керування швидкістю

У режимі керування швидкістю подача керуючого впливу здійснюється за допомогою аналогового сигналу. Значення швидкості можуть перемикатися між заздалегідь встановленими рівнями шляхом подачі сигналів на відповідні дискретні входи системи. Якщо ж використовується аналоговий сигнал змінної полярності, це дозволяє не лише регулювати швидкість, а й змінювати напрямок обертання серводвигуна.

Режим керування швидкістю за своїм принципом нагадує роботу асинхронного електродвигуна, який живиться від перетворювача частоти. У цьому

випадку задаються такі параметри, як час розгону та гальмування, граничні значення швидкості (максимальне та мінімальне), а також додаткові налаштування, що визначають динаміку роботи приводу.

3.3.3 Режим керування моментом

У даному режимі серводвигун може як обертатися, так і залишатися нерухомим, при цьому крутний момент на його валу підтримується на заданому рівні. Керування здійснюється або дискретним сигналом, або аналоговим двополярним керуючим впливом. Такий режим застосовується у механізмах, де потрібно регулювати силу притискання, тиск або подібні параметри.

Визначення поточного значення моменту, необхідного для корекції керування, відбувається за допомогою вбудованого датчика струму.

Рекупераційний процес активується, коли напрямок (знак) моменту навантаження стає протилежним моменту, який створює серводвигун. Якщо кількість зворотної енергії невелика, вона накопичується в конденсаторах постійної напруги, збільшуючи їх заряд. У випадку, коли різниця між моментами навантаження та двигуна досягає значного значення, напруга на конденсаторах може перевищити допустимий рівень. Тоді надлишкова енергія рекуперації відводиться через гальмівний резистор, запобігаючи перевантаженню системи.

3.4 Електрична принципова схема керування сервоприводом механізму підйому/спуску вантажу сортувального порталу

Електрична принципова схема системи керування сервоприводом механізму підйому та опускання вантажу сортувального порталу наведена на рис. 3.9.

Живлення сервопривода з мотор-редуктором здійснюється від трифазної мережі змінного струму з номінальною напругою 380 В та частотою 50 Гц. Подача живлення на сервопідсилювач (СП) виконується через блок-контакти електромагнітного контактора (КН) [20]. Для захисту сервопідсилювача від перенапруги та електромагнітних завад у схемі передбачено мережевий фільтр (МФ).

Керування роботою контактора КН здійснюється напругою постійного струму 24 В, яку забезпечує джерело живлення (ДЖ), передбачене у схемі. Така ж напруга використовується для живлення оптичних датчиків і кінцевих вимикачів, що входять до системи керування.

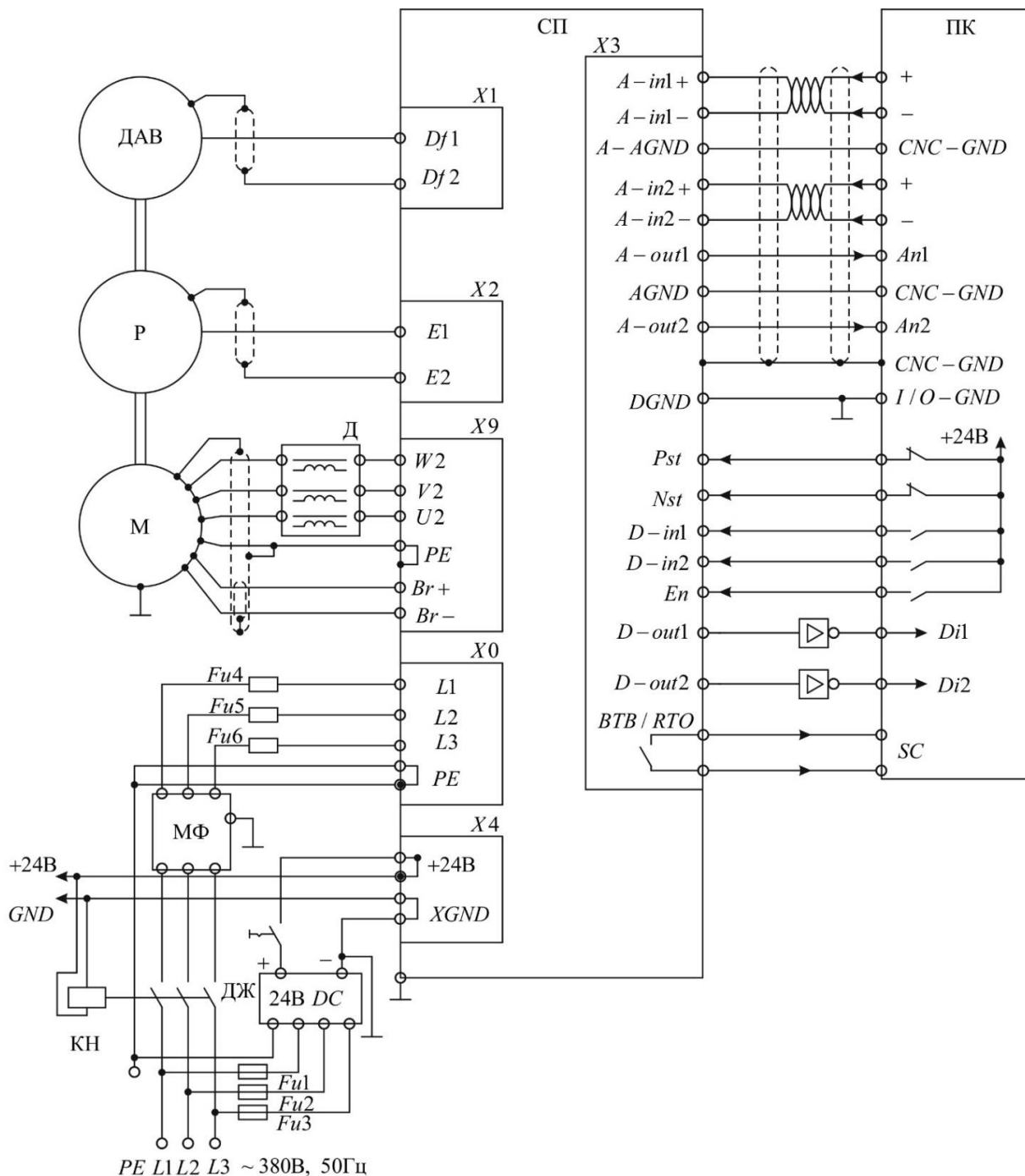


Рисунок 3.9 – Електрична принципова схема керування сервоприводом механізму підйому/спуску вантажу сортувального порталу

Для запобігання аварійним режимам і коротким замиканням у трифазних лініях живлення встановлені плавкі запобіжники $Fu1 - Fu6$, які забезпечують індивідуальний захист кожної фази електричного кола.

Головним виконавчим елементом електричної схеми керування є мотор-редуктор (М), підключений до сервопідсилювача (СП) через вихідний дросель (Д), який виконує функцію приглушення високочастотних завад, що виникають під час роботи М, та запобігає їхньому впливу на СП. До складу синхронного двигуна входить резольвер (Р), який працює за принципом обертового трансформатора та забезпечує отримання сигналів, пропорційних куту повороту вала двигуна. Для підвищення точності позиціонування та стабільності роботи сервосистеми двигун додатково обладнано датчиком абсолютного відліку (ДАВ). Наявність цього елемента дозволяє системі зберігати інформацію про поточне положення вала навіть у разі короткочасної втрати живлення або повного знеструмлення.

У випадку, коли у знеструмленому стані вал двигуна здійснив певний поворот або кілька обертів, після подачі напруги ДАВ миттєво формує і передає у систему актуальні дані про кутове положення вала та кількість його обертів. Керування роботою системи відбувається в автоматичному режимі за допомогою пульта керування (ПК), який забезпечує коригування налаштувань і параметрів функціонування конвеєрної лінії сортувального порталу.

3.5 Висновок по розділу

У розділі розглянуто особливості застосування резольвера та принцип його функціонування. Наведено структурну схему системи регулювання сервопривода, а також охарактеризовано основні режими її роботи. Розроблено 3D модель конструкції сервопривода сортувального порталу вантажопідйомністю 50 кг з можливістю обробки вантажів у межах робочої зони розміром $5,4 \times 0,9 \times 1,12$ м. Представлено електричну принципову схему керування сервоприводом механізму підйому/спуску вантажу сортувального порталу та описано принцип її роботи.

4 РОЗРАХУНКИ, ЩО ПІДТВЕРДЖУЮТЬ ПРАЦЕЗДАТНІСТЬ РОЗРОБКИ СЕРВОПРИВОДА СОРТУВАЛЬНОГО ПОРТАЛУ ВАНТАЖОПІДЙОМНІСТЮ 50 КГ

4.1 Розрахунок діаграми робочого циклу електропривода

Вхідні дані до розрахунку сервопривода сортувального порталу представимо у вигляді табл. 4.1 та табл. 4.2. При переміщенні вантажів будемо передавати механічні зусилля від циліндричних редукторних механізмів до зубчатих рейок.

Таблиця 4.1 – Сервопривод переміщення (вісь X)

Параметр	Позначення	Величина
Загальна маса переміщення, кг	m_L	130
Діаметр шківів, мм	D	150
Коефіцієнт тертя в направляючих	μ	0,1
Відстань переміщення, м	s	6,3
Максимальне прискорення, м/с^2	$a_{\max}$	10
Тривалість циклу, с	t_z	30
Час переміщення, с	t	15
ККД навантаження	η_L	0,87

При підйомі/спуску вантажів будемо передавати механічні зусилля від та конічно-циліндричного редукторного механізму до зубчатої рейки.

Таблиця 4.2 – Сервопривод підйому/спуску (вісь Y)

Параметр	Позначення	Величина
Маса вантажу, кг	m_L	50
Діаметр шестерні, мм	D	110

Параметр	Позначення	Величина
Відстань переміщення, м	s	1,12
Максимальне прискорення, м/с ²	$a_{\max}$	10
Тривалість циклу, с	t_z	10
Час підйому, с	t	5
ККД навантаження	η_L	0,86

4.1.1 Механізм переміщення

Швидкість

$$v = \frac{a_{\max} \cdot t - \sqrt{(a_{\max} \cdot t)^2 - 4 \cdot a_{\max} \cdot s}}{2},$$

$$v = \frac{10 \cdot 15 - \sqrt{(10 \cdot 15)^2 - 4 \cdot 10 \cdot 6,3}}{2} = 0,42 \text{ м/с.}$$

Час розгону

$$t_A = \frac{v}{a_{\max}},$$

$$t_A = \frac{0,42}{10} \approx 0,04 \text{ с.}$$

Довжина шляху розгону

$$s_A = \frac{1}{2} \cdot a_{\max} \cdot t_A^2,$$

$$s_A = \frac{1}{2} \cdot 10 \cdot 0,04^2 = 0,008 \text{ м.}$$

Довжина шляху с постійною швидкістю

$$s_F = s - 2 \cdot s_A,$$

$$s_F = 6,3 - 2 \cdot 0,008 = 6,28 \text{ м.}$$

Час руху з постійною швидкістю

$$t_F = \frac{s_F}{v},$$

$$t_F = \frac{6,28}{0,42} = 15 \text{ с.}$$

4.1.2 Механізм підйому/спуску

Швидкість

$$v = \frac{a_{\max} \cdot t - \sqrt{(a_{\max} \cdot t)^2 - 4 \cdot a_{\max} \cdot s}}{2},$$

$$v = \frac{10 \cdot 5 - \sqrt{(10 \cdot 5)^2 - 4 \cdot 10 \cdot 1,12}}{2} = 0,23 \text{ м/с.}$$

Час розгону

$$t_A = \frac{v}{a_{\max}},$$

$$t_A = \frac{0,23}{10} = 0,02 \text{ с.}$$

Довжина шляху розгону

$$s_A = \frac{1}{2} \cdot a_{\max} \cdot t_A^2,$$

$$s_A = \frac{1}{2} \cdot 10 \cdot 0,02^2 = 0,002 \text{ м.}$$

Довжина шляху з постійною швидкістю

$$s_F = s - 2 \cdot s_A,$$

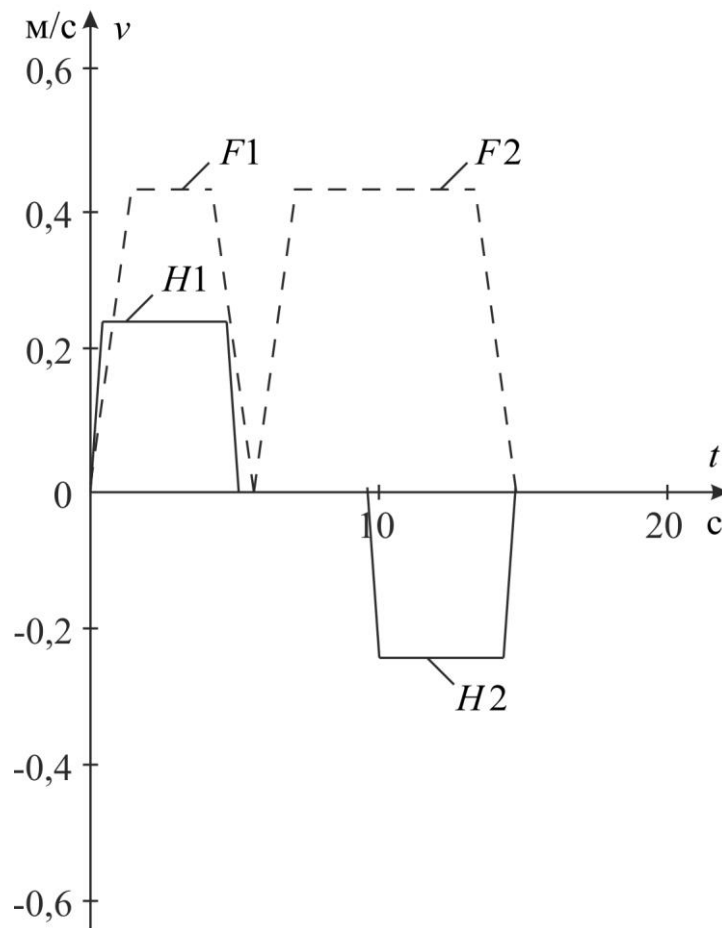
$$s_F = 1,12 - 2 \cdot 0,002 = 1,12 \text{ м.}$$

Час руху з постійною швидкістю

$$t_F = \frac{s_F}{v},$$

$$t_F = \frac{1,12}{0,23} = 4,87 \text{ с.}$$

Загальна діаграма робочого циклу сервопривода сортувального порталу вантажопідйомністю 50 кг представлена на рис. 4.1.



H1) – підйом вантажу; *H2)* – спуску вантажу; *F1)* – поперечне переміщення вантажу; *F2)* – повздовжнє переміщення вантажу

Рисунок 4.1 – Діаграма робочого циклу сервопривода сортувального порталу вантажопідйомністю 50 кг

4.2 Розрахунок потужностей

4.2.1 Механізм переміщення

Сила опору кочення

$$F_{F1} = m_L \cdot g \cdot \mu_L,$$

$$F_{F1} = 130 \cdot 9,81 \cdot 0,1 = 128 \text{ Н.}$$

Статичний обертовий момент

$$M_{S1} = F_{F1} \cdot \frac{D}{2} \cdot \frac{1}{\eta_L},$$

$$M_{S1} = 128 \cdot \frac{0,15}{2} \cdot \frac{1}{0,87} = 11 \text{ Нм.}$$

Визначимо параметри прискорення.

Сила прискорення

$$F_{A1} = m_L \cdot a_{\max},$$

$$F_{A1} = 130 \cdot 10 = 1300 \text{ Н.}$$

Динамічний момент

$$M_{A1} = F_{A1} \cdot \frac{D}{2} \cdot \frac{1}{\eta_L},$$

$$M_{A1} = 1300 \cdot \frac{0,15}{2} \cdot \frac{1}{0,87} = 112 \text{ Нм.}$$

Сумарний момент

$$M_{дт} = M_{A1} + M_{S1},$$

$$M_{дт} = 112 + 11 = 123 \text{ Нм.}$$

Визначимо параметри уповільнення.

Динамічний момент при гальмуванні

$$M_{B1} = F_{A1} \cdot \frac{D}{2} \cdot \eta_L,$$

$$M_{B1} = -1300 \cdot \frac{0,15}{2} \cdot 0,87 = -84,8 \text{ Нм.}$$

Сумарний момент

$$M_{BT} = M_{B1} + M_{S1},$$

$$M_{BT} = -84,8 + 11 = -73,8 \text{ Нм.}$$

4.2.2 Механізм підйому

Статична сила тяжіння при підйомі

$$F_{H2} = m_L \cdot g,$$

$$F_{H2} = 50 \cdot 9,81 = 490 \text{ Н.}$$

Статичний момент при підйомі

$$M_{S2} = F_{H2} \cdot \frac{D}{2} \cdot \frac{1}{\eta_L},$$

$$M_{S2} = 490 \cdot \frac{0,11}{2} \cdot \frac{1}{0,87} = 31 \text{ Нм.}$$

Визначимо параметри прискорення.

Сила прискорення

$$F_{A2} = m_L \cdot a_{\max},$$

$$F_{A2} = 50 \cdot 10 = 500 \text{ Н.}$$

Динамічний момент

$$M_{A2} = F_{A2} \cdot \frac{D}{2} \cdot \frac{1}{\eta_L},$$

$$M_{A2} = 500 \cdot \frac{0,11}{2} \cdot \frac{1}{0,86} = 32 \text{ Нм.}$$

Сумарний момент

$$M_{AT2} = M_{A2} + M_{S2},$$

$$M_{AT2} = 32 + 31 = 63 \text{ Нм.}$$

Визначимо параметри уповільнення.

Динамічний момент при гальмуванні

$$M_{B2} = -F_{A2} \cdot \frac{D}{2} \cdot \eta_L,$$

$$M_{B2} = -500 \cdot \frac{0,11}{2} \cdot 0,86 = -23,6 \text{ Нм,}$$

Сумарний момент

$$M_{BT2} = M_{B2} + M_{S2},$$

$$M_{BT2} = -23,6 + 31 = 7,4 \text{ Нм.}$$

4.2.3 Механізм спуску

Статична сила тяжіння при спуску

$$F_{H3} = m_L \cdot g,$$

$$F_{H3} = 50 \cdot 9,81 = 490 \text{ Н.}$$

Статичний момент при спуску

$$M_{S3} = F_{H3} \cdot \frac{D}{2} \cdot \eta_L,$$

$$M_{S3} = -490 \cdot \frac{0,11}{2} \cdot 0,87 = -23,4 \text{ Нм.}$$

Визначимо параметри прискорення.

Сила прискорення

$$F_{A3} = m_L \cdot a_{\max},$$

$$F_{A3} = 50 \cdot 10 = 500 \text{ Н.}$$

Динамічний момент

$$M_{A3} = F_{A3} \cdot \frac{D}{2} \cdot \frac{1}{\eta_L},$$

$$M_{A3} = 500 \cdot \frac{0,11}{2} \cdot \frac{1}{0,86} = 32 \text{ Нм.}$$

Сумарний момент

$$M_{AT3} = M_{A3} + M_{S3},$$

$$M_{AT3} = 32 - 23,4 = 8,6 \text{ Нм.}$$

Визначимо параметри уповільнення.

Динамічний момент при гальмуванні

$$M_{B3} = -F_{A3} \cdot \frac{D}{2} \cdot \eta_L,$$

$$M_{B3} = -500 \cdot \frac{0,11}{2} \cdot 0,86 = -23,6 \text{ Нм,}$$

Сумарний момент

$$M_{BT3} = M_{B3} + M_{S3},$$

$$M_{BT3} = -23,6 - 23,4 = -47 \text{ Нм.}$$

В результаті проведених розрахунків отримаємо криву зміни обертового моменту на виході обох механізмів.

4.3 Розрахунок параметрів редукторних механізмів

Для того, щоб визначити передатне відношення редуктора необхідно спочатку вибрати швидкість обертання двигуна [21]. Якщо сервопривод має бути мінімального типорозміру та забезпечувати дуже високу точність регулювання та позиціонування, тоді швидкість обертання двигуна має бути високою. Перевагою такого технічного рішення є передатне число редуктора. Чим вище частота обертання двигуна, тим більше передатне число редуктора, а значить і обертовий момент на вихідному валу. Крім того, при більш високому передатному відношенні збільшується і розширення позиціонування.

Недоліком підвищення швидкості обертання електродвигуна є зменшення терміну служби його підшипників, а іноді збільшення необхідного пускового моменту, оскільки такому електродвигуну необхідно за той самий час розігнати свій вал до більш високої швидкості.

З урахування наведених переваг та недоліків обираємо електродвигуни зі швидкістю обертання 3000 об/хв. Для того, щоб змінити резерв на регулювання, передатне число редуктора вибираємо таким чином, щоб максимальна швидкість обертання на виході редуктора становила по можливості 90 % номінальної швидкості обертання електродвигуна. В даному випадку $n_M = 2700$ об/хв.

4.3.1 Механізм переміщення

Швидкість обертання

$$n_a = \frac{v \cdot 60}{D \cdot \pi},$$

$$n_a = \frac{0,42 \cdot 60}{0,15 \cdot 3,14} = 53,5 \text{ об/хв.}$$

Передатне число

$$I = \frac{n_M}{n_a},$$

$$I = \frac{2700}{150} = 50,5.$$

Таким чином, вибираємо редуктор *PSF522* з передатним числом $i = 56$ для механізму повздовжнього переміщення вантажу та редуктор *PSF222* з передатним числом $i = 16$ для механізму поперечного переміщення вантажу.

4.3.2 Механізм підйому/спуску

Швидкість обертання

$$n_a = \frac{v \cdot 60}{D \cdot \pi},$$

$$n_a = \frac{0,23 \cdot 60}{0,11 \cdot 3,14} = 39,9 \text{ об/хв.}$$

Передатне число

$$I = \frac{n_M}{n_a},$$

$$I = \frac{2700}{39,9} = 67,7.$$

Таким чином, вибираємо редуктор *PSF322* з передатним числом $i = 70$.

Визначимо точність позиціонування сервопривода сортувального порталу.

Для механізму переміщення

$$\Delta s = \pm \frac{D \cdot \pi \cdot \frac{\alpha}{2}}{360^\circ} \pm \frac{D \cdot \pi}{4096 \cdot i},$$

$$\Delta s = \pm \frac{150 \cdot 3,14 \cdot \frac{10}{2} \cdot \frac{1}{60}}{360^\circ} \pm \frac{150 \cdot 3,14}{4096 \cdot 56} = \pm 0,12 \text{ мм.}$$

Окрім того, необхідно враховувати можливий люфт в інших вузлах установки.

У випадку механізму підйому/спуску можна виходити з того, що зубці шестерні та рейки прилягають один до одного завжди з однієї і тієї ж сторони. Тому редукторну складову люфту враховувати не потрібно.

Для механізму підйому/спуску

$$\Delta s = \pm \frac{D \cdot \pi}{4096 \cdot i},$$

$$\Delta s = \pm \frac{110 \cdot 3,14}{4096 \cdot 70} = \pm 0,01 \text{ мм.}$$

Окрім того, необхідно враховувати можливий люфт в інших вузлах установки.

4.4 Вибір електродвигунів

Електродвигун має відповідати трьом основним умовам:

1) Критичний момент не повинен перевищувати потрібного значення пускового моменту M_0 .

2) Визначений ефективний обертовий момент при роботі без примусового охолодження не має перевищувати значення M_0 .

3) Відношення зовнішнього моменту інерції до моменту інерції ротора електродвигуна (активна складова без врахування маси гальм) має бути менше 10.

Відповідні точні значення можна отримати тільки для відомого електродвигуна, але для приблизного розрахунку параметрів відомих даних достатньо.

4.4.1 Механізм переміщення

Розрахунковий критичний момент навантаження (без врахування інерції ротора електродвигуна) $M_A = 123$ Нм. Після приведення до валу електродвигуна отримаємо попереднє значення максимального динамічного моменту

$$M_H = \frac{M_A}{i},$$

$$M_H = \frac{123}{56} = 2,2 \text{ Нм.}$$

Відповідно першій умові пусковий момент M_0 має бути не менше значення $2,2 / 3 = 0,73$ Нм.

Ефективний обертовий момент

$$M_F = \sqrt{\frac{1}{t_z} \cdot (M_1^2 \cdot t_1 + M_2^2 \cdot t_2 + \dots + M_n^2 \cdot t_n)},$$

$$M_F = \sqrt{\frac{1}{30} \cdot (112^2 \cdot 0,04 + 11^2 \cdot 15 + \dots + (-84,8)^2 \cdot 0,04)} = 9,32 \text{ Нм.}$$

Відповідно другій умові пусковий момент M_0 має бути не менше значення

$$J_X = 91,2 \cdot m_L \cdot \left(\frac{v}{n_M} \right)^2,$$

$$J_X = 91,2 \cdot 130 \cdot \left(\frac{0,42}{2700} \right)^2 = 0,003 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Відповідно третій умові відношення J_X / J_M має бути не більше 10, тому необхідно вибрати електродвигун з моментом інерції ротора $J_M > 0,0003 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$.

Таким чином, обираємо електродвигун типу *DR160* з швидкістю обертання $n_N = 3000 \text{ об/хв}$, номінальний момент на валу $M_0 = 2,5 \text{ Нм}$, момент інерції $J_M = 0,000689 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, номінальний струм $I_0 = 2,7 \text{ А}$.

4.4.2 Механізм підйому/спуску

Розрахунковий критичний момент навантаження (без врахування інерції ротора електродвигуна) $M_A = 32 \text{ Нм}$. Після приведення до валу електродвигуна отримаємо попереднє значення максимального динамічного моменту

$$M_H = \frac{M_A}{i},$$

$$M_H = \frac{32}{70} = 0,46 \text{ Нм}.$$

Відповідно першій умові пусковий момент M_0 має бути не менше значення $0,46 / 3 = 0,15 \text{ Нм}$.

$$M_F = \sqrt{\frac{1}{t_z} \cdot (M_1^2 \cdot t_1 + M_2^2 \cdot t_2 + \dots + M_n^2 \cdot t_n)},$$

$$M_F = \sqrt{\frac{1}{30} \cdot (32^2 \cdot 0,02 + 31^2 \cdot 4,87 + (-23,6)^2 \cdot 0,02 + +32^2 \cdot 0,02 + (-23,4)^2 \cdot 4,87 + (-23,6)^2 \cdot 0,02)} = 15,7 \text{ Нм}.$$

Зовнішній момент інерції

$$J_X = 91,2 \cdot m_L \cdot \left(\frac{v}{n_M} \right)^2,$$

$$J_X = 91,2 \cdot 50 \cdot \left(\frac{0,23}{2700} \right)^2 = 0,000033 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Відповідно третій умові відношення J_X / J_M має бути не більше 10, тому необхідно вибрати електродвигун з моментом інерції ротора $J_M > 0,000033 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$.

Таким чином, обираємо електродвигун типу *DR71* з швидкістю обертання $n_N = 3000 \text{ об/хв}$, номінальний момент на валу $M_0 = 1,83 \text{ Нм}$, момент інерції $J_M = 0,000546 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, номінальний струм $I_0 = 1,85 \text{ А}$.

Тепер момент інерції ротора електродвигуна відомий і можна виконати перевірку динамічної навантажувальної здатності з врахуванням отриманих значень.

Динамічний момент для механізму переміщення

$$M_H = \frac{\left(J_M + \frac{1}{\eta_L} \cdot J_X \right) \cdot n_M}{9,56 \cdot t_A} + M_S,$$

$$M_H = \frac{\left(0,000342 + \frac{1}{0,87} \cdot 0,00287 \right) \cdot 2700}{9,56 \cdot 0,04} + 11 = 15,7 \text{ Нм.}$$

Динамічний момент для механізму підйому/спуску

$$M_H = \frac{\left(J_M + \frac{1}{\eta_L} \cdot J_X \right) \cdot n_M}{9,56 \cdot t_A} + M_B,$$

$$M_H = \frac{\left(0,000546 + \frac{1}{0,86} \cdot 0,000033 \right) \cdot 2700}{9,55 \cdot 0,02} + 31 = 39,3 \text{ Нм.}$$

Результати розрахунків ефективних обертових моментів представимо у вигляді табл. 4.3.

Таблиця 4.3 – Результати розрахунків ефективних обертових моментів

ПРИ ПЕРЕМІЩЕННІ ВАНТАЖУ		
Параметр	Позначення	Значення
Сумарний динамічний момент, Нм	M_{A1}	112
Сумарний динамічний момент при гальмуванні, Нм	M_{B1}	-84,8
Статичний момент навантаження, Нм	M_{S1}	11
Ефективний обертовий момент електродвигуна, Нм	M_{M1}	-13,25

Параметр	Позначення	Значення
ПРИ ПІДЙОМІ ВАНТАЖУ		
Сумарний динамічний момент, Нм	M_{A2}	32
Сумарний динамічний момент при гальмуванні, Нм	M_{B2}	-23,6
Статичний момент навантаження, Нм	M_{S2}	31
ПРИ СПУСКУ ВАНТАЖУ		
Сумарний динамічний момент, Нм	M_{A3}	32
Сумарний динамічний момент при гальмуванні, Нм	M_{B3}	-23,6
Статичний момент навантаження, Нм	M_{S3}	-23,4
Ефективний обертовий момент електродвигуна, Нм	M_{M3}	-37,4

4.5 Вибір привідної електроніки

Для реалізації процесу керування сервоприводом сортувального порталу можна задіяти один з двох варіантів:

1) застосувати модульну техніку (один силовий модуль живить три координатних модулі, які керують механізмами сервопривода сортувального порталу – поздовжнє / поперечне переміщення та підйому/спуску вантажу);

2) застосувати компактні контролери (складаються з силового та координатного модулів), кожний з яких керує одним з двох механізмів сервопривода сортувального порталу – поздовжнє / поперечне переміщення та підйому/спуску вантажу.

Кожний з цих варіантів має свої переваги та недоліки. В даному випадку, з метою зменшення кількості комплектного обладнання, обираємо перший варіант.

Виконаємо вибір координатних модулів.

Для цього визначимо критерії їх вибору:

- піковий вихідний струм;
- середня величина струму електродвигуна. Вона не має перевищувати номінальний вихідний струм відповідного координатного модуля.

Зазначені значення струму можна отримати по вже відомим розрахунковим значенням обертового моменту.

4.5.1 Механізм переміщення

По результатам розрахунків максимальний пусковий момент складає 112 Нм, що відповідає споживанню максимального струму

$$I_{\max} = \frac{M_{\max} \cdot I_0}{M_0},$$

$$I_{\max} = \frac{112 \cdot 2,7}{2,5} = 121 \text{ А.}$$

На відміну від вибору параметрів електродвигунів, де враховуються ефективні значення, параметри координатних модулів вибираємо по середньому значенню обертового моменту, тобто по середній величині струму

$$\bar{M} = \frac{M_1 \cdot t_1 + M_2 \cdot t_2 + \dots + M_n \cdot t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n},$$

$$\bar{M} = \frac{112 \cdot 0,04 + 11 \cdot 15 + (-84,8) \cdot 0,04}{30} = 5,54 \text{ Нм,}$$

$$\bar{I}_M = \frac{\bar{M} \cdot I_0}{M_0},$$

$$\bar{I}_M = \frac{5,54 \cdot 2,7}{2,5} = 5,98 \text{ A.}$$

Вибираємо координатний модуль типу MAS51A005 з параметрами номінального струму $I_0 = 5 \text{ A}$, максимального струму $I_{\max} = 7,5 \text{ A}$.

4.5.2 Механізм підйому/спуску

По результатам розрахунків максимальний пусковий момент складає 32 Нм, що відповідає споживанню максимального струму

$$I_{\max} = \frac{M_{\max} \cdot I_0}{M_0},$$

$$I_{\max} = \frac{32 \cdot 1,85}{1,83} = 32,3 \text{ A.}$$

Визначаємо середню величину струму

$$\bar{M} = \frac{M_1 \cdot t_1 + M_2 \cdot t_2 + \dots + M_n \cdot t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n},$$

$$\bar{M} = \frac{32 \cdot 0,02 + 31 \cdot 4,87 + (-23,6) \cdot 0,02 + 32 \cdot 0,02 + (-23,4) \cdot 4,87 + (-23,6) \cdot 0,02}{30} = 1,24 \text{ Нм,}$$

$$\bar{I}_M = \frac{\bar{M} \cdot I_0}{M_0},$$

$$\bar{I}_M = \frac{1,24 \cdot 1,85}{1,83} = 1,25 \text{ A.}$$

Вибираємо координатний модуль типу *MAS51A005* з параметрами номінального струму $I_0 = 5$ А, максимального струму $I_{\max} = 7,5$ А.

Виконаємо вибір силового модуля.

Визначимо основні критерії вибору силового модуля:

- критичний вихідний струм;
- середня величина струму координатного модуля. Ця величина не має перевищувати номінальний вихідний струм відповідного силового модуля.

Зазначені величини струму утворюються з значень вихідного струму координатних модулів:

- максимальний струм силового модуля

$$I_{\max(NM)} = I_{\max_M(F)} + I_{\max_M(H)},$$

де $I_{\max_M(F)} = 2,7$ А – максимальний струм електродвигуна в механізмі переміщення;

$I_{\max_M(H)} = 1,85$ А – максимальний струм електродвигуна в механізмі підйому/спуску;

Тоді

$$I_{\max(NM)} = 2,7 + 1,85 = 4,55 \text{ А.}$$

- струм силового модуля

$$\bar{I}_{NM} = \bar{I}_{M(F)} + \bar{I}_{M(H)},$$

де $\bar{I}_{M(F)} = 5$ А – струм електродвигуна в механізмі переміщення;

$\bar{I}_{M(H)} = 5$ А – струм електродвигуна в механізмі підйому/спуску.

Тоді

$$\bar{I}_{NM} = 5 + 5 = 10 \text{ А.}$$

Вибираємо силовий модуль типу *MPB51A011* з номінальним струмом $I_N = 20 \text{ А}$ разом з мережевим дроселем *ND045-013*.

Виконаємо вибір гальмівного резистора.

Гамівний резистор навантажується тільки тоді, коли обертовий момент електродвигуна становиться від'ємним (генераторний режим). Із діаграми зміни обертового моменту на вихідних валах тривалість включення (ТВ) складає 20 %. Максимальний обертовий момент генераторного режиму виникає у тому випадку, коли механізм підйому уповільнюється при спуску вантажу та одночасно загальмовує механізм переміщення. Спочатку необхідно перевести значення гальмівного моменту в значення потужності.

Критична потужність гальмування для механізму переміщення

$$\bar{P}_{B1} = \frac{M_{B1} \cdot n_M}{9550},$$

$$\bar{P}_{B1} = \frac{23,6 \cdot 2700}{9550} = 6,67 \text{ кВт.}$$

При постійній величині уповільнення середня потужність гальмування відповідає половині критичної потужності гальмування, тобто $\bar{P}_{B1} = 3,34 \text{ кВт}$.

Критична потужність гальмування для механізму підйому/спуску

$$\bar{P}_{B3} = \frac{M_{B3} \cdot n_M}{9550},$$

$$\bar{P}_{B3} = \frac{23,6 \cdot 2700}{9550} = 6,67 \text{ кВт.}$$

При постійній величині уповільнення середня потужність гальмування відповідає половині критичної потужності гальмування, тобто $\bar{P}_{B3} = 3,34 \text{ кВт.}$

Повна потужність гальмування

$$\bar{P}_{BT} = P_{B1} + P_{B3},$$

$$\bar{P}_{BT} = 6,67 + 6,67 = 13,3 \text{ кВт.}$$

Для 25 % ТВ по ефективній потужності знаходимо відповідний гальмівний резистор BW147.

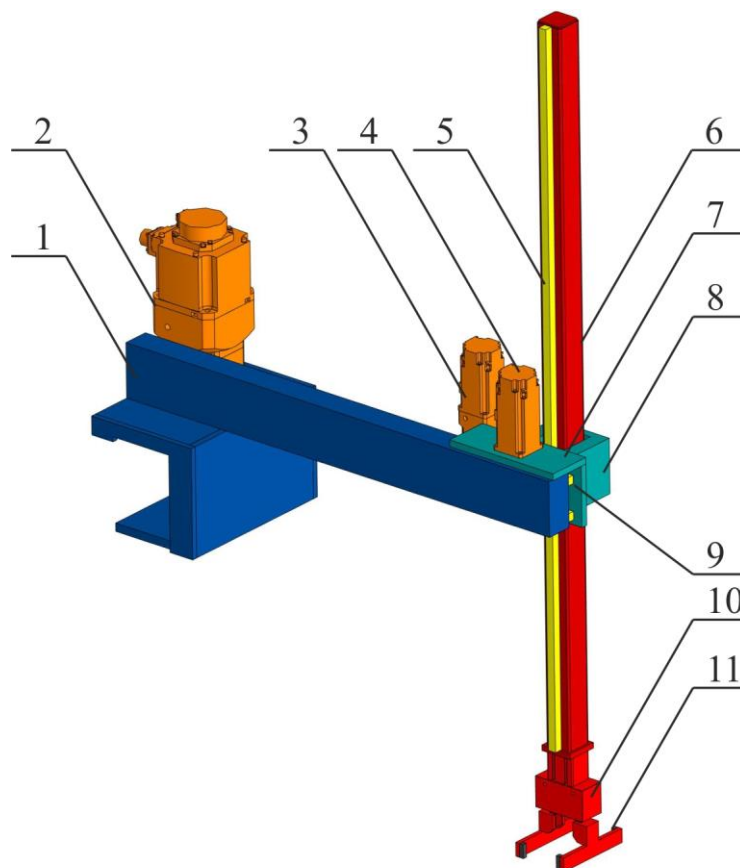
4.6 Розрахунок механізму захвату вантажу

Дані для розрахунку представлені у вигляді таблиці табл. 4.4.

Таблиця 4.4 – Початкові дані

Назва параметра	Позначення	Значення
Час захвату вантажу, с	t	< 5
Діаметр ділильної окружності сектора, м	d_d	0,022
Міжосьова відстань, мм	b	0,045
Відстань від сектора до стропа вантажу, мм	h	0,03

3D модель механізму захвату вантажу представлено на рис. 4.2.



1) – консоль; 2) – мотор-редуктор механізму повздовжнього переміщення;
 3) – мотор-редуктор механізму підйому/спуску вантажу; 4) – мотор-редуктор
 механізму поперечного переміщення; 5) – рейки механізму підйому / спуску
 вантажу; 6) – стійка; 7) – кутник; 8) – кронштейн; 9) – рейки механізму
 поперечного переміщення; 10) – корпус механізму захвату; 11) – захватні губки

Рисунок 4.2 – 3D модель механізму захвату вантажу

В якості конструкції захватного механізму запропоновано застосовувати рейковий механізм (10, рис. 4.2). В порівнянні з важільними механічними захватами вони мають менші габаритні характеристики та забезпечують більше розкриття захватних губок (11, рис. 4.2), але не надають переваги в зусиллі затискання вантажів.

Захватні губки вільно насадженні на осі валів змонтованих на підшипникові пари. Конструкція захватних губок передбачає зубчасті сектори, що входять попарно в зачеплення з рейкою (8, рис. 4.2). Рейка, в свою чергу, з'єднана з тягою сервопривода, що виконуватиме різьбове обертання механізму переміщення (5,

рис. 4.2). При переміщенні тяги сервопривода вгору виконується затискання вантажу в губках механізму захвату. Притискання вантажу захватними губками виконується при куті затискання $\alpha = 70^\circ$.

Сумарний утримуючий момент

$$M_{\Sigma} = G \cdot \left(\frac{a}{g} + \sin \varphi \right) \cdot h + b \cdot \cos \varphi,$$

де $G = 491 \text{ Н}$ – маса вантажу (50 кг);

$\varphi = 60^\circ$ – кут між віссю переміщення та захватними губками;

$\alpha = 15^\circ$ – кут між вантажем та захватними губками;

$g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – прискорення вільного падіння;

$\mu = 0,15$ – коефіцієнт тертя;

a – значення осьового граничного прискорення, що визначається з виразу

$$a = \frac{\mu \cdot g \cdot \cos \varphi}{\sin \alpha},$$

$$a = \frac{0,15 \cdot 9,81 \cdot \cos 60^\circ}{\sin 70^\circ} \approx 2,85 \text{ м/с}^2.$$

Отже, сумарний утримуючий момент

$$M_{\Sigma} = 491 \cdot \left(\frac{2,85}{9,81} + \sin 60^\circ \right) \cdot 0,03 + 0,045 \cdot \cos 60^\circ \approx 16 \text{ Н}.$$

Сили взаємодії R визначаємо для лівої та правої захватної губки

$$R_{1л} = \frac{0,22 \cdot G \cdot \left(\left(\frac{a}{g} + \sin \varphi \right) + \frac{\cos \varphi}{\sin \alpha} \cdot (\cos \alpha + 2 \cdot \mu \cdot \sin \alpha) \right)}{2 \cdot (\cos \alpha + \mu \cdot \sin \alpha)},$$

$$R_{1л} = \frac{0,22 \cdot 491 \cdot 3,166}{2,018} \approx 170 \text{ Н},$$

$$R_{2л} = \frac{0,22 \cdot G \cdot \left(\left(\frac{a}{g} + \sin \varphi \right) + \frac{\cos \varphi \cdot \cos \alpha}{\sin \alpha} \right)}{2 \cdot (\cos \alpha + \mu \cdot \sin \alpha)},$$

$$R_{2л} = \frac{0,22 \cdot 491 \cdot 3,016}{2,018} \approx 162 \text{ Н},$$

$$R_{1п} = \frac{0,1 \cdot G \cdot \left(\left(\frac{a}{g} + \sin \varphi \right) + \frac{\cos \varphi \cdot \cos \alpha}{\sin \alpha} \right)}{2 \cdot (\cos \alpha + \mu \cdot \sin \alpha)} = 2793 \text{ Н},$$

$$R_{1п} = \frac{0,1 \cdot 491 \cdot 3,016}{2,018} \approx 77 \text{ Н},$$

$$R_{2п} = \frac{0,1 \cdot G \cdot \left(\left(\frac{a}{g} + \sin \varphi \right) + \frac{\cos \varphi}{\sin \alpha} \cdot (\cos \alpha + 2 \cdot \mu \cdot \sin \alpha) \right)}{2 \cdot (\cos \alpha + \mu \cdot \sin \alpha)},$$

$$R_{2п} = \frac{0,1 \cdot 491 \cdot 3,166}{2,018} \approx 74 \text{ Н}.$$

Максимальне навантаження на один сектор захватного механізму визначається з виразу

$$P_3 = \frac{M_i}{\eta \cdot (d_d / 2)},$$

де M_i – утримуючий момент створюваний силами взаємодії R захватного механізму відносно точки підвісу, Н·м;

$d_d = 0,022$ м – діаметр ділильної окружності сектора;

$\eta = 0,94$ – коефіцієнт корисної дії рейкового захватного механізму.

Утримуючий момент захватного механізму

$$M_i = F_1 + F_2 + F_3 - F_4,$$

де складові виразу визначаються за формулами

$$F_1 = R_{1л} \cdot \sin \alpha \cdot \left(b + \frac{d_d}{2} \cdot \cos \alpha \right),$$

$$F_1 = 170 \cdot 0,26 \cdot \left(0,045 + \frac{0,022}{2} \cdot 0,97 \right) \approx 2,5 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

$$F_2 = R_{2л} \cdot \cos \alpha \cdot \left(h - \frac{d_d}{2} \cdot \sin \alpha \right),$$

$$F_2 = 162 \cdot 0,97 \cdot \left(0,03 - \frac{0,022}{2} \cdot 0,26 \right) \approx 4,27 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

$$F_3 = R_{1л} \cdot \sin \alpha \cdot \left(b - \frac{d_d}{2} \cdot \cos \alpha \right),$$

$$F_3 = 77 \cdot 0,26 \cdot \left(0,045 - \frac{0,022}{2} \cdot 0,97 \right) \approx 0,69 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

$$F_4 = R_{2п} \cdot \cos \alpha \cdot \left(h - \frac{d_d}{2} \cdot \sin \alpha \right),$$

$$F_4 = 74 \cdot 0,97 \cdot \left(0,03 - \frac{0,022}{2} \cdot 0,26 \right) \approx 1,95 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Отже, утримуючий момент захватного механізму

$$M_i = 2,5 + 4,27 + 0,69 - 1,95 = 5,51 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Таким чином, максимальне навантаження на один сектор захватного механізму

$$P_3 = \frac{5,51}{0,94 \cdot (0,022 / 2)} \approx 533 \text{ Н}.$$

Тобто швидкість переміщення механізму

$$v_{\text{пер}} = \frac{S}{t} = \frac{0,01}{5} = 0,002 \text{ м/с}.$$

де $S = 0,01 \text{ м}$ – необхідна відстань обертово-поступального переміщення рейкового захватного механізму.

Необхідна максимальна частота обертання мотор-редуктора відповідно до розробленого механізму переміщення

$$n_{\max} = \frac{v_{\text{пер}} i_p}{t_{\text{ГВ}}} = \frac{0,002 \cdot 12}{0,001} = 24 \text{ с}^{-1},$$

де $i_p = 12$ – передатне число редуктора;

$t_{\text{ГВ}} = 0,001$ м/об – основний шаг різьбового з'єднання М6.

Необхідна потужність виконавчого електропривода

$$P_{\text{ДВ}} = \frac{P_z \cdot v_{\text{пер}}}{1000} = \frac{533 \cdot 0,002 \cdot 60}{1000} \approx 0,7 \text{ кВт.}$$

Отже, для електропривода механізму захвату вантажу достатньо застосувати один мотор-редуктор потужністю виробництва компанії *Transtecno* типу *80B4* потужністю 750 Вт.

4.7 Вибір радіатора охолодження

При використанні радіаторів охолодження варто враховувати, що установка модуля на стику двох радіаторів не допускається. Тому спочатку необхідно перевести ширину окремих модулів в спеціальні одиниці вимірювання *TE*:

- 1) координатний модуль переміщення – 2 *TE* (2 шт.);
- 2) координатний модуль підйому/спуску – 2 *TE*;
- 3) силовий модуль – 3 *TE*.

Таким чином, загальна ширина радіатора становить 7 *TE*. Отже, обираємо радіатор типу *DKF07* шириною 7 *TE*.

Тепловий опір радіатора становить 0,4 К/Вт. Ця величина представляє собою перевищення температури навколишнього середовища в кельвінах відносно

потужності втрат змонтованих модулів в ватах. Максимально допустима температура складає 80 °C.

Виконаємо розрахунки втрат потужності.

Введемо наступні позначення:

$P_{V(S)}$ – втрати потужності в імпульсному блоці живлення;

P_{VLMF} – втрати потужності в силовому модулі;

$P_{VLMA(H)}$ – втрати потужності в координатному модулі механізму підйому/спуску;

$P_{VLMA(F)}$ – втрати потужності в координатному модулі механізму переміщення;

S – імпульсний блок живлення;

L – силова частина;

E – електронні схеми керування.

Імпульсний блок живлення

$$P_{V(S)} = 15 + 20 \cdot 3 = 75 \text{ Вт.}$$

Механізм переміщення

$$P_{VLMA(F)} = 25 \cdot 1,6 = 40 \text{ Вт.}$$

Механізм підйому/спуску

$$P_{VLMA(H)} = 25 \cdot 1,2 = 30 \text{ Вт.}$$

Силовий модуль

$$P_{VLMF} = 2 \cdot (1,6 + 1,2) = 5,6 \text{ Вт.}$$

$$P_{KK} = \frac{1}{2} \cdot P_{V(S)} + P_{VLMP} + \sum P_{VLMA},$$

$$P_{KK} = \frac{1}{2} \cdot 75 + 5,6 + 40 + 30 = 113 \text{ Вт.}$$

$$\Delta\theta = P_{KK} \cdot R_{KK} = 113 \cdot 0,4 = 45,2 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Таким чином, забезпечуємо безпечний тепловий режим в діапазоні до температури навколишнього середовища $80 \text{ }^{\circ}\text{C} - 45,2 \text{ }^{\circ}\text{C} = 34,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

4.8 Висновок по розділу

На основі виконання математичних розрахунків побудовані діаграми робочих циклів сервопривода сортувального порталу для механізмів повздовжнього / поперечного переміщення та підйому/спуску вантажу. Визначено потужність виконавчих електродвигунів. Виконано вибір захватного пристрою та привідної електроніки. Реалізовано перевірку сервопривода сортувального порталу для режимів пуску і гальмування. Забезпечено роботу сервопривода без перегрівання силового та координатних модулів. Отримані у розділі результати в повній мірі засвідчують працездатність розробки.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ

5.1 Аналіз потенційно небезпечних і шкідливих факторів, що впливають на організм людини в процесі експлуатації сортувального порталу

Небезпеки під час експлуатації сортувального порталу зазвичай пов'язані з:

- випадковим контактом людини з рухомими частинами обладнання;
- ураженням електричним струмом [22];
- падінням підіймального вантажу.

5.1.1 Небезпека ураження електричним струмом

У разі пошкодження ізоляції провідників, відсутності надійного заземлення або недотримання правил введення й виведення обладнання з експлуатації виникає ризик ураження електричним струмом.

5.1.2 Небезпека внаслідок дії магнітних полів

До складу вузлів електричного двигуна постійного струму можуть входити магніти, які навіть у вимкненому стані створюють сильні магнітні поля. Під час роботи утворюються додаткові електромагнітні поля. Найбільш небезпечними вони є для осіб, які користуються кардіостимуляторами. На відстані 100 мм густина магнітного потоку на вторинних ділянках становить менше 5 мТл, а на відстані 150 мм – менше 0,5 мТл.

5.1.3 Небезпека виникнення пожежі

Може виникати внаслідок недотримання норм пожежної безпеки, незадовільного технічного стану обладнання, пошкодження провідників, поганого контакту в з'єднаннях, незакритих захисних кожухів або використання обладнання з невідповідним класом захисту.

5.1.4 Небезпека падіння вантажу

Це одна з найпоширеніших небезпек під час експлуатації вантажопідіймальних механізмів. Найчастіше виникає через несправність

вантажозахоплювальних пристроїв, ненадійну фіксацію вантажу під час підйому чи переміщення або перевантаження системи.

У процесі збирання, розбирання, налагодження та експлуатації сервопривода сортувального порталу необхідно враховувати небезпеку ураження електричним струмом. Розрізняють два основних типи уражень електричним струмом – електричні травми та електричні удари.

До електротравм належать:

- електричний опік – наслідок теплової дії електричного струму в місці контакту;
- електричний знак – характерне ураження шкіри, що проявляється у затвердінні та омертвінні її верхнього шару;
- металізація шкіри – проникнення у верхні шари шкіри мікрочастинок металу;
- електрофтальмія – запалення зовнішніх оболонок очей, спричинене впливом ультрафіолетового випромінювання електричної дуги;
- механічні ушкодження, що виникають у результаті мимовільних скорочень м'язів під дією електричного струму.

Залежно від тяжкості наслідків електричні удари поділяють на чотири ступені:

- I ступінь – судомні скорочення м'язів без втрати свідомості;
- II ступінь – судомні скорочення м'язів із втратою свідомості, але зі збереженим диханням і роботою серця;
- III ступінь – втрата свідомості з порушенням серцевої діяльності або дихання (або обох одночасно);
- IV ступінь – стан клінічної смерті.

Основним чинником, що визначає ступінь ураження людини електричним струмом, є сила струму, яка проходить через тіло. Для оцінки впливу електричного струму на організм людини застосовують три основні критерії (табл. 5.1).

Для виконавчого сервопривода сортувального порталу використовується змінна напруга 3×380 В із частотою мережі 50 Гц, яка є потенційно небезпечною для життя людини.

Таблиця 5.1 – Середні значення граничних струмів

Вид струму	Значення струму, мА		
	граничний відчутний струм	граничний невідпускаючий струм	граничний фібриляційний струм
змінний, 50Гц	0,5...1,5	6...10	50...100
постійний	5...20	50...80	300

З метою забезпечення безпечних умов праці персоналу, що обслуговує обладнання, необхідно дотримуватися вимог Правил улаштування електроустановок (ПУЕ), а саме:

- переріз заземлювального провідника повинен бути не меншим за переріз кабелю живлення, але не менше 1,5 мм² у системах напругою до 400 В;
- опір заземлювального провідника має бути не більшим за 4 Ом для установок з напругою до 400 В та не більше 0,5 Ом – для установок із напругою понад 1000 В;
- опір ізоляції установки відносно корпусу при потужності машини до 100 кВт, напрузі до 500 В і температурі, близькій до розрахункової, повинен становити не менше 0,7 Ом;
- контроль індивідуальних засобів захисту від напруги та перевірка ізоляції проводяться щороку, а контроль опору ізоляції – щомісяця.

5.2 Правила Регістру судноплавства України з улаштування та розподілу електричної енергії

У суднових електроустановках дозволяється застосування таких систем розподілу електричної енергії [23]:

Системи змінного струму напругою до 1000 В:

- трифазна трипровідна система з ізольованою нейтраллю;
- трифазна трипровідна система з нейтраллю, заземленою через високоомний резистор або реактор (так звана система з компенсовано-резистивною нейтраллю).

Для мереж напругою до 500 В включно додатково допускаються:

- трифазна чотирипровідна система з ізольованою нейтраллю;
- трифазна чотирипровідна система з глухозаземленою нейтраллю;
- однофазна двопровідна система з ізольованою нейтраллю;
- однофазна двопровідна система з нульовою точкою;
- однофазна однопровідна система, у якій корпус судна використовується як зворотний провідник (для напруги до 50 В), за умови, що струм не може проходити через вибухонебезпечні приміщення.

Системи постійного струму:

- двопровідна ізольована система;
- однопровідна система з використанням корпусу судна як зворотного провідника (для напруги до 50 В), за умови відсутності струмів у вибухонебезпечних приміщеннях.

При використанні корпусу судна як зворотного провідника всі кінцеві електричні кола повинні виконуватись двопровідними. Ізольований зворотний провід має бути заземлений на шині розподільного щита, від якого коло отримує живлення, у місці, що є доступним для огляду. Для перевірки стану ізоляції повинні бути передбачені пристрої, які забезпечують можливість від'єднання заземлювальної шини корпусу судна.

На судах із валовою місткістю 1600 т і більше дозволяється застосування локальних заземлених систем живлення окремих споживачів, за умови, що будь-який можливий струм не проходить безпосередньо через вибухонебезпечні приміщення або простори. До таких споживачів належать:

- системи електричного (аккумуляторного) пуску двигунів внутрішнього згорання;
- системи катодного захисту корпусу судна з накладеним струмом;
- системи контролю та вимірювання опору ізоляції.

Допустима напруга на затискачах джерел електричної енергії постійного струму не повинна перевищувати таких значень:

- 500 В – для силових систем;

– 250 В – для систем освітлення, обігріву та штепсельних розеток.

Для споживачів змінного струму гранично допустимі значення напруги визначаються залежно від типу обладнання та умов його експлуатації:

– 1000 В – для стаціонарних силових споживачів, а також нагрівальних, камбузних та опалювальних приладів, встановлених стаціонарно;

– 500 В – для переносних силових споживачів, що живляться від стаціонарних штепсельних розеток, а також нагрівальних і опалювальних приладів, розміщених у каютах та пасажирських приміщеннях;

– 250 В – для систем освітлення, сигналізації, внутрішнього зв'язку, а також штепсельних розеток, призначених для живлення переносних споживачів з подвійною або посиленою ізоляцією, чи електрично відокремлених за допомогою ізолюючого трансформатора;

– 50 В – для штепсельних розеток, встановлених у вологих або особливо сирих приміщеннях, призначених для живлення споживачів без подвійної чи посиленої ізоляції або електрично не відокремлених.

5.3 Вимоги Конвенції СОЛАС-74 до систем автоматичного виявлення пожеж

Будь-яка стаціонарна система пожежного сповіщення, оснащена ручними датчиками, повинна постійно перебувати у робочому стані та бути готовою до негайного реагування [24].

Система має забезпечувати постійний контроль за станом джерел живлення та електричних кіл, необхідних для її функціонування, з метою оперативного виявлення втрати живлення або виникнення несправностей. При появі несправності на панелі керування станції пожежного виявлення повинні автоматично активуватись світлова та звукова індикації, які чітко відрізняються від сигналу пожежної тривоги (рис. 5.3).



Рисунок 5.3 – Пожежа на судні

Для електричного обладнання, що входить до складу системи пожежного сповіщення, передбачається наявність щонайменше двох незалежних джерел живлення, одне з яких виконує функцію резервного. Живлення має здійснюватися окремими кабельними лініями, призначеними виключно для цієї системи, які підводяться до автоматичного перемикача на станції пожежної сигналізації або розташовуються безпосередньо поблизу неї.

Автоматичні та ручні пожежні сповіщувачі мають бути об'єднані у променеві зони контролю. Спрацювання будь-якого сповіщувача, незалежно від його типу, повинно викликати на панелі керування станції пожежного виявлення, а також на панелях сигналізації, одночасну подачу світлового та звукового сигналів про виникнення пожежі.

У випадку, якщо протягом двох хвилин ці сигнали не будуть підтверджені або не привернуть уваги чергового персоналу, у всіх житлових та службових приміщеннях екіпажу, на постах управління, а також у машинних відділеннях категорії А автоматично активується загальний звуковий сигнал тривоги.

Допускається, щоб система формування цього звукового сигналу була інтегрована до складу системи пожежного виявлення, забезпечуючи централізоване керування оповіщенням.

Панель керування станцією системи виявлення пожежі повинна розташовуватися на ходовому містку або у центральному пожежному посту. Панелі сигналізації мають забезпечувати принаймні індикацію променя, у якому спрацював автоматичний або ручний сповіщувач.

Щонайменше одна сигнальна панель повинна бути встановлена таким чином, щоб доступ до неї був постійно забезпечений для відповідальних членів екіпажу як під час морського переходу, так і під час стоянки судна в порту (крім випадків виведення судна з експлуатації). Якщо головна станція сигналізації розміщується у центральному пожежному посту, додаткова панель сигналізації обов'язково встановлюється на ходовому містку.

Біля кожної панелі сигналізації має бути чітко нанесена інформація про приміщення, які вона обслуговує, а також про схему розташування променів.

Якщо система не має засобів дистанційного визначення місця розташування кожного сповіщувача, один промінь не повинен обслуговувати більше однієї палуби в межах житлових і службових приміщень та постів керування (за винятком променів, що охоплюють вигородку трапу).

З метою скорочення часу на встановлення місця виникнення пожежі кількість вигороджених приміщень, підключених до одного променя, має бути обмежена відповідно до вимог Адміністрації, але не може перевищувати 50.

У випадку, якщо система виявлення пожежі дозволяє дистанційно ідентифікувати місце спрацювання кожного окремого сповіщувача, один промінь може обслуговувати кілька палуб та необмежену кількість приміщень.

На пасажирських судах, де система виявлення пожежі не забезпечує дистанційне визначення місця займання для кожного окремого автоматичного сповіщувача, один промінь автоматичних сповіщувачів не повинен обслуговувати приміщення, розташовані по обох бортах судна, на більш ніж одній палубі або у різних вертикальних зонах.

Допускається відхилення від цієї вимоги за рішенням Адміністрації лише у випадках, коли доведено, що така конфігурація не зменшує ефективність протипожежного захисту судна.

На пасажирських судах, обладнаних системою виявлення пожежі з можливістю дистанційного визначення місця займання для кожного окремого автоматичного сповіщувача, один промінь може охоплювати приміщення, розташовані на обох бортах судна та на кількох палубах.

Промінь автоматичних пожежних сповіщувачів, що обслуговує пост керування, службові або житлові приміщення, не повинен одночасно охоплювати машинні приміщення категорії «А».

Автоматичні пожежні сповіщувачі повинні реагувати на вплив тепла, диму, полум'я або продуктів горіння, а також на будь-яку комбінацію зазначених факторів. Адміністрація може дозволити застосування сповіщувачів, що реагують на інші ознаки виникнення пожежі, за умови, що їхня чутливість не нижча за чутливість традиційних теплових чи димових приладів.

Світлові сповіщувачі допускається використовувати лише як додаткові засоби до теплових або димових сповіщувачів.

Для системи виявлення пожежі повинні бути передбачені експлуатаційні інструкції, а також комплект запасних частин, необхідних для проведення перевірок та технічного обслуговування.

Функціонування системи повинно регулярно перевірятися відповідно до вимог Адміністрації за допомогою спеціальних пристроїв, що створюють гаряче повітря заданої температури, дим або аерозоль з контрольованими параметрами густини чи розміру частинок. Також можуть застосовуватись інші елементи, що імітують умови займання, на які має реагувати автоматичний сповіщувач.

Всі автоматичні сповіщувачі повинні бути виконані таким чином, щоб їх можна було випробовувати на працездатність і повертати у нормальний робочий режим без необхідності заміни будь-яких компонентів.

Система виявлення пожежі повинна використовуватися виключно за своїм прямим призначенням – для своєчасного виявлення загоряння та подання сигналу тривоги. Її застосування для інших цілей не допускається, за винятком функцій, безпосередньо пов'язаних із забезпеченням пожежної безпеки, таких як дистанційне закриття протипожежних дверей із панелі керування або виконання аналогічних дій.

Системи виявлення пожежі, які забезпечують дистанційне визначення місця займання та встановлені після 1 жовтня 1994 року, повинні відповідати таким вимогам:

- конструкція петлі має виключати можливість пошкодження її пожежею більш ніж в одному місці;
- система повинна зберігати працездатність у разі будь-якого пошкодження петлі (зокрема при відключенні живлення, короткому замиканні чи заземленні);
- повинні бути передбачені технічні засоби для швидкого відновлення працездатності системи у разі пошкодження електричного або електронного обладнання, а також спотворення сигналів чи даних;
- спрацювання одного сповіщувача або подання першого сигналу тривоги не повинно перешкоджати спрацюванню інших сповіщувачів і формуванню наступних сигналів пожежної тривоги.

Ручні пожежні сповіщувачі повинні встановлюватися у житлових і службових приміщеннях, а також на постах керування. Біля кожного виходу має бути розташований принаймні один ручний сповіщувач. У коридорах кожної палуби ручні сповіщувачі необхідно розміщувати таким чином, щоб відстань від будь-якої точки коридору до найближчого сповіщувача не перевищувала 20 м.

Димові сповіщувачі повинні бути встановлені на всіх трапах, у коридорах і на шляхах евакуації в межах житлових приміщень. Крім того, слід розглянути доцільність монтажу спеціальних димових сповіщувачів у вентиляційних каналах для своєчасного виявлення диму в системах повітрообміну.

Автоматичні пожежні сповіщувачі необхідно розміщувати з урахуванням забезпечення максимальної ефективності їх роботи. Слід уникати розташування поблизу бімсів, вентиляційних каналів та інших місць, де повітряні потоки можуть негативно вплинути на чутливість приладів, а також зон, де можливе їх механічне пошкодження. Зазвичай сповіщувачі, встановлені на підволоку, повинні розташовуватися на відстані не менше 0,5 м від перебірок.

Електропроводка, що є складовою частиною системи виявлення пожежі, повинна прокладатися в обхід камбузів, машинних приміщень категорії А та інших

ізолюваних приміщень з підвищеною пожежною небезпекою. Виняток допускається лише у випадках, коли прокладання необхідне для забезпечення функцій виявлення або сигналізації пожежі в цих приміщеннях, а також для підключення системи до відповідного джерела живлення.

Конструкція системи та її обладнання має бути виконана з урахуванням стійкості до впливів експлуатаційних факторів, характерних для морських суден. Зокрема, елементи системи повинні надійно працювати при коливаннях напруги живлення, короточасних перехідних процесах, зміні температури навколишнього середовища, дії вібрації, підвищеної вологості, струсів, ударних навантажень та корозійного впливу морського середовища.

Димові сповіщувачі, встановлені в службових, житлових та інших приміщеннях, повинні мати діапазон чутливості, що відповідає вимогам Адміністрації. При цьому необхідно забезпечити уникнення як надмірної, так і недостатньої чутливості сповіщувачів, щоб гарантувати своєчасне виявлення ознак пожежі без помилкових спрацювань.

Необхідно мати документальне підтвердження, що теплові сповіщувачі реагують до моменту, коли температура перевищить 78°C , але не раніше ніж після перевищення 54°C , за умови підвищення температури зі швидкістю менше ніж 1°C на хвилину. У випадках, коли температура зростає швидше, сповіщувач повинен спрацьовувати в межах температурного діапазону, визначеного вимогами Адміністрації, з урахуванням необхідності уникати надмірної або недостатньої чутливості.

За погодженням з Адміністрацією допускається підвищення температури спрацювання теплових сповіщувачів до величини, що перевищує на 30°C максимальну температуру підволока у сушильних чи інших приміщеннях з підвищеним тепловим режимом. Таке підвищення повинно бути обґрунтованим і не знижувати ефективність виявлення пожежі в цих умовах.

5.4 Правила техніки безпеки в процесі експлуатації сортувального порталу

5.4.1 Кваліфікація персоналу

Всі механічні роботи повинні виконуватись виключно кваліфікованим фахівцем. Такий спеціаліст повинен володіти практичними навичками з монтажу, регулювання, технічного обслуговування, усунення несправностей та ремонту обладнання.

Обов'язкові вимоги до кваліфікації:

- наявність спеціальності у галузі механіки відповідно до чинних нормативно-правових актів;
- знання експлуатаційної документації на окремі вузли та механізми сортувального порталу.

Всі електротехнічні роботи мають виконуватись лише кваліфікованим електриком. Він повинен мати досвід електромонтажу, пусконаладження, діагностики та ремонту електрообладнання.

Обов'язкові вимоги до кваліфікації:

- спеціальність у галузі електротехніки відповідно до чинних нормативно-правових актів;
- знання експлуатаційної документації на електричні системи та прилади сортувального порталу.

Допоміжні роботи, пов'язані з транспортуванням, зберіганням, експлуатацією та утилізацією обладнання, можуть виконуватись лише особами, які пройшли відповідний інструктаж. Такі особи повинні бути здатні виконувати поставлені завдання з дотриманням вимог безпеки та відповідно до призначення обладнання.

5.4.2 Використання за призначенням

При вбудовуванні електричних або механічних компонентів у склад машин чи установок введення обладнання в експлуатацію забороняється до моменту офіційного підтвердження його відповідності чинним вимогам законодавства та нормативних документів.

Електродвигуни, що застосовуються у складі системи, повинні бути призначені для роботи з частотними перетворювачами.

Підключення будь-якого навантаження до виробу до моменту завершення перевірок не допускається. Категорично забороняється підключення ємнісного навантаження.

Всі підключення живлення повинні виконуватись відповідно до технічних даних, зазначених на заводській табличці виробу, з дотриманням умов, встановлених виробником.

5.4.3 Використання в приводі підйомних механізмів

З метою запобігання ризику травмування або загрози життю персоналу, що може виникнути внаслідок падіння підйомного пристрою, у конструкції приводу необхідно передбачити використання механічних захисних елементів. Такі пристрої повинні забезпечувати надійну фіксацію підйомного механізму в разі аварійного відключення живлення або пошкодження приводу.

5.4.4 Встановлення та монтаж

Встановлення, монтаж та охолодження виробу повинні здійснюватися відповідно до вимог технічної документації виробника.

Необхідно забезпечити захист обладнання від ударних та вібраційних навантажень.

Виріб та його навісні елементи не повинні виступати у проходи або робочі зони, що можуть бути використані для пересування персоналу.

Забороняється вигинати або деформувати конструктивні елементи, а також змінювати ізоляційні проміжки.

Електричні компоненти повинні бути вільні від будь-яких механічних пошкоджень, що можуть вплинути на їхню працездатність або безпечність експлуатації.

5.4.5 Електричне підключення

Електромонтажні роботи повинні виконуватись згідно з вимогами чинних нормативних документів, з урахуванням:

- правильного вибору поперечного перерізу кабелів;

- номінальних параметрів запобіжників і автоматичних вимикачів;
- наявності надійного захисного заземлення.

Підключення має проводитись лише кваліфікованим електротехнічним персоналом.

5.4.6 Безпечна розв'язка

Виріб відповідає вимогам стандарту *EN 61800-5-1* щодо безпечної електричної розв'язки між силовими та керуючими електронними колами.

Для забезпечення електробезпеки всі підключення струмових ланцюгів повинні також відповідати вимогам безпечної розв'язки, що унеможливорює небезпечний контакт між високовольтними та низьковольтними елементами системи.

Всі відкриті металеві частини електричних машин і обладнання, які в нормальних умовах не перебувають під напругою, але можуть опинитися під нею внаслідок пошкодження або несправності ізоляції, повинні бути заземлені.

Виняток допускається лише у таких випадках:

- обладнання живиться постійним струмом напругою не більше 55 В або змінним струмом, середньоквадратичне значення напруги між провідниками якого не перевищує 55 В, причому така напруга не повинна одержуватись від автотрансформаторів;
- живлення здійснюється від роздільного трансформатора, який обслуговує лише одного споживача, за умови, що напруга не перевищує 250 В;
- обладнання має подвійну або посилену ізоляцію, яка виключає можливість появи напруги на відкритих металевих частинах.

Роботодавець повинен забезпечити додаткові заходи безпеки при використанні переносного електроустаткування у тісних або особливо вологих приміщеннях, де існує підвищена небезпека ураження електричним струмом через високу провідність середовища.

Всі електричні апарати та установки мають бути спроектовані, виготовлені та змонтовані таким чином, щоб під час нормальної експлуатації або обслуговування контакт із ними не створював ризику травмування персоналу.

Головні та аварійні розподільні щити повинні розташовуватися таким чином, щоб забезпечувався вільний і безпечний доступ обслуговувального персоналу до всіх апаратів, приладів та з'єднань. Для запобігання випадковому дотику до струмоведучих частин бічні, тильні, а за необхідності й лицьові сторони щитів мають бути обладнані захисними огороженнями або кожухами, які відповідають вимогам електробезпеки.

У разі використання незаземлених систем розподілу струму – як первинних, так і вторинних – для живлення силових, опалювальних чи освітлювальних кіл, необхідно передбачити систему постійного контролю стану ізоляції відносно землі. Така система повинна автоматично подавати звуковий або світловий сигнал у разі зниження опору ізоляції до небезпечного рівня, що дозволяє своєчасно виявити пошкодження та запобігти аварійній ситуації.

Крім випадків, спеціально дозволених роботодавцем у виняткових обставинах, броньовані кабелі та кабелі з металевим екраном повинні бути електрично неперервними по всій довжині та надійно заземленими у відповідності з вимогами стандартів електробезпеки.

Всі електричні кабелі та проводка, прокладені поза межами корпусів устаткування, повинні бути виконані з матеріалів, що не підтримують горіння, та змонтовані таким чином, щоб зберігалися їхні початкові властивості щодо нерозповсюдження полум'я протягом усього строку експлуатації.

У виняткових випадках, коли цього вимагають технічні особливості обладнання або умови його використання, роботодавець може допустити застосування спеціалізованих кабелів (наприклад, радіочастотних або сигнальних), які не повністю відповідають вимогам щодо вогнестійкості, за умови вжиття додаткових компенсувальних заходів безпеки.

Якщо електричні кабелі прокладаються у вибухонебезпечних або пожежонебезпечних зонах, необхідно передбачити спеціальні технічні рішення та заходи захисту, які відповідають вимогам безпечної експлуатації електрообладнання та виключають ризик займання або вибуху у випадку електричної несправності.

Монтаж кабелів повинен виконуватися з дотриманням вимог механічної міцності та надійного кріплення, щоб запобігти перетиранню, перегину або іншим пошкодженням ізоляції. Всі з'єднання та підключення провідників повинні бути виконані так, щоб забезпечувалося збереження початкових електричних, механічних і вогнестійких характеристик кабелю.

Освітлювальні прилади та арматура мають бути розміщені та закріплені так, щоб уникати локального перегріву кабелів і навколишніх матеріалів, а також виключати ризик пошкодження ізоляції через надмірну температуру.

5.5 Висновок по розділу

В розділі виконано аналіз потенційно небезпечних ситуацій, які можуть виникнути при роботі сервопривода сортувального порталу та негативно вплинути на організм людини в процесі експлуатації розробки. Сформульовані основні правила техніки безпеки під час використання сервопривода сортувального порталу. Наведені та проаналізовані вимоги правил Регістру судноплавства України з улаштування та розподілу електричної енергії та вимоги Конвенції СОЛАС-74 до систем автоматичного виявлення пожеж.

ВИСНОВКИ

В кваліфікаційній роботі виконано огляд та аналіз вантажозахоплювальних пристроїв відповідно до їх існуючих різновидів. Визначено напрямок для наукової задачі дослідження, який полягає в розробці сервопривода сортувального порталу вантажопідйомністю 50 кг. Представлені основні технічні характеристики сервопривода сортувального порталу вантажопідйомністю 50 кг, а саме механізмів повздовжнього / поперечного переміщення вантажу зі швидкістю 0,42 м/с та підйому/спуску вантажу зі швидкістю 0,22 м/с в загальному вигляді, а також технічні характеристики його основних комплектуючих елементів електрообладнання, вибраних в результаті виконаних розрахунків. Розглянуто особливості застосування резольвера та принцип його функціонування. Наведено структурну схему системи регулювання сервопривода, а також охарактеризовано основні режими її роботи.

На основі виконання математичних розрахунків побудовані діаграми робочих циклів сервопривода сортувального порталу для механізмів повздовжнього / поперечного переміщення та підйому/спуску вантажу. Виконано вибір захватного пристрою та привідної електроніки. Забезпечено роботу сервопривода без перегрівання силового та координатних модулів. Розроблено 3D модель конструкції сервопривода сортувального порталу вантажопідйомністю 50 кг з можливістю обробки вантажів у межах робочої зони розміром $5,4 \times 0,9 \times 1,12$ м. Представлено електричну принципову схему керування сервоприводом механізму підйому/спуску вантажу сортувального порталу та описано принцип її роботи.

Розглянуто питання охорони праці щодо особливостей потенційно небезпечних ситуацій, які можуть виникнути при роботі сервопривода сортувального порталу та негативно вплинути на організм людини в процесі експлуатації розробки. Розглянуті вимоги правил Регістру судноплавства України з улаштування та розподілу електричної енергії та вимоги Конвенції СОЛАС-74 до систем автоматичного виявлення пожеж.

Всі прийняті в кваліфікаційній роботі технічні рішення супроводжуються відповідними формулами, рисунками та графічними характеристиками.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Стрічкові конвеєра [Електронний ресурс]. – 2025. – Режим доступу до ресурсу: <https://arks.com.ua/ua/lentochnye-konveyera/> (дата звернення: 20.09.2025).
2. Jiang X., Namoke M., Wu J., Jiang W. Control system design for belt conveyor. *Advanced manufacturing and automation XIII*. 2024. DOI: 10.1007/978-981-97-0665-5_70
3. Yuan Y., Wenjun M., Zhengmao Y. The multi-objective dynamic optimization of gantry crane based on reliability and robustness. *Journal of the balkan tribological association*. 2016. 22(3). P. 2454-2468.
4. Quoc Th. Ph., Lam Th. T. N., Quoc Van N., Nai-Shang L. Using a YOLOv8-based object detection model for an automatic garbage sorting system. *Journal of advanced research in applied mechanics*. 2024. 126(1). P. 24-32. DOI: 10.37934/aram.126.1.2432
5. Guo-Long Yang, Biao-Hua Zhang. Fully automated paper document sorting robot design. *Journal of electronic research and application*. 2018. 7(6). P. 1-9. DOI: 10.26689/jera.v7i6.5564
6. Khavieya A. Sorting robot using machine vision inspection system. *International journal of mechatronics, electrical and computer technology*. 2023. 13(47). P. 5323-5332. DOI: <https://www.researchgate.net/publication/384332566>
7. Wang J., Sahagun J. Optimizing CNN models for realtime hardware classification on resource constrained hardware: a raspberry pi 5 powered hardware sorting system. *Conference: 11th international conference on artificial intelligence and applications*. 2025. P. 327-342. DOI: 10.5121/csit.2025.151926
8. Selvam Ch. Design & fabrication of electro-pneumatic gantry type sorting robot. *International research journal of engineering and technology*. 2022. 12(09). P. 787-794. DOI: <https://www.researchgate.net/publication/369109184>
9. Bdiwi M., Suchý J. Robot control system with integrated vision / force feedback for automated sorting system. *IEEE conf. technol. pract. robot appl*. 2012. P. 31-36.
10. Trang T. T., Ha C. Irregular moving object detecting and tracking based on color

and shape in real-time system. *Int. conf. comput. manag. telecommun.* 2013. P. 415-419.

11. You B., Hu J., Xu J., Miao Y. High-speed and high-precision online detection system of the tile smoothness. *Int. conf. meas. inf. control.* 2012. P. 756-760.

12. Nandi C.S., Tudu B., Koley C. An automated machine vision based system for fruit sorting and grading. *Int. conf. sens. technol.* 2012. P. 195-200.

13. Zisgen H., Hinrichs J. F. Multi-agent reinforcement learning for controlling gantry robot systems. *Production engineering.* 2025. 19(3). DOI: 10.1007/s11740-025-01340-3

14. Zisgen H, Miltenberger R, Hochhaus M, Stöhr N. Dynamic scheduling of gantry robots using simulation and reinforcement learning. *Proceedings of the winter simulation conference.* 2024. P. 3026-3034. DOI: 10.5555/3643142.3643394

15. Albrecht S.V., Christianos F., Schäfer L. Multi-agent reinforcement learning: foundations and modern approaches. *MIT Press.* DOI: <https://www.marl-book.com>

16. Kuhnle A., Kaiser J.P., Thei F., Stricker N., Lanza G. Designing an adaptive production control system using reinforcement learning. *Intell Manuf.* 2021. 32(3). P. 855-876. DOI: 10.1007/s10845-020-01612-y

17. Тіряєв В.І. Автоматизований електропривод: навчальний посібник. Ч.2. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 204 с.

18. Бондарєв В.С., Дубинець О.І., Колісник М.П., Бондарєв С.В., Горбатенко Ю.П., Барабанов В.Я. Підйомно-транспортні машини: Розрахунки підймальних і транспортувальних машин: підручник. – Київ: 2009. – 734 с.

19. Лавріненко Ю.М., Марченко О.С., Савченко П.І., Синявський О.Ю., Войтюк Д.Г., Лисенко В.П. Електропривод: підручник. – К.: «Ліра-К», 2009. – 504 с.

20. Булгар В.В. Теорія електроприводу: збірник задач. – Одеса: ОНПУ, Поліграф, 2006 – 408 с.

21. Видмиш А. А., Ярошенко Л.В.. Основи електропривода. Теорія та практика: навчальний посібник, Ч.1. – Вінниця: ВНАУ, 2020. – 387 с.

22. Грибан В.Г., Негодченко О.В. Охорона праці: навчальний посібник. Київ, 2009. – 280 с.

23. Регістр судноплавства України [Електронний ресурс]. – 2025. – Режим доступу до ресурсу: http://91.203.91.178/books/PCBSSSt4_2023.pdf (дата звернення: 23.11.2025).

24. Конвенція СОЛАС-74 [Електронний ресурс]. – 2025. – Режим доступу до ресурсу: <http://docs.cntd.ua/document /901765675> (дата звернення: 25.11.2025).