

УДК 621.3
DOI [https://doi.org/10.15589/znp2024.4\(497\).12](https://doi.org/10.15589/znp2024.4(497).12)

DEVELOPMENT OF A SERVO DRIVE FOR A HANDLING DEVICE

РОЗРОБКА СЕРВОПРИВОДА ПЕРЕВАНТАЖУВАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ

Andrii M. Voitasyk
andrii.voitasyk@nuos.edu.ua
ORCID: 0000-0002-9409-6108

А. М. Войтасик,
канд. техн. наук, доцент

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв

Abstract. *Purpose.* Development and design of a servo drive for a handling device capable of gripping and moving loads in vertical and horizontal planes for their further unloading on specialized carriers. *Method.* As part of the research, the method of complex modeling was used to build 3D models of the structure of the servo-driven movement mechanisms of the reloading device and all the executive equipment proposed to be used in its composition; the method of empirical description of technological processes for the justification and explanation of the peculiarities of the organization of the transmission of torques during the operation of the drive; the method of conducting an experiment to certify the functional capabilities of the product. *Results.* Based on the use of the necessary equipment in the composition of: synchronous electric motors, gear mechanisms, braking resistors, network throttle, power and coordinate modules, electromagnetic gripping device and the proposed 3D model of the structure, a servo drive of the handling device was developed for the purpose of operating the product during gripping and moving loads in a vertical and horizontal planes and their further unloading on specialized carriers. The operation of the servo-driven movement mechanisms of the handling device with a load capacity of 40 kg is ensured by the use of synchronous electric motors with permanent magnets, which, compared to asynchronous motors, have a greater torque and lower inertia and dynamic characteristics. *Scientific novelty.* The methodology for increasing the efficiency of automated cargo handling at the production site has received further development through the introduction of a developed handling device with an electromagnetic gripping mechanism, which contributes to improving the quality of the work performed. The servo drive of the handling device was theoretically substantiated and developed, which ensures the processing of loads weighing up to 40 kg while maintaining the following speeds: vertical raising/lowering of the load – 1,73 m/s; horizontal movement of cargo – 1,64 m/s. Control of the servo drive of the handling device according to the vector law is implemented on the basis of one force and two coordinate modules. *Practical importance.* The developed handling device is designed to automate the work of the production line of an industrial plant and is capable of handling loads in the form of metal blanks of various standard sizes weighing no more than 40 kg within its working area. The device is designed in the form of a P-shaped metal structure, on which a set of necessary equipment is installed to ensure the operation of two servo-driven movement mechanisms: raising/lowering the load using an electromagnetic gripping device; movement of a cargo trolley moving forward/backward along the bridge of the handling device. The use of a handling device with an electromagnetic gripping mechanism for handling cargo involves operation from a three-phase alternating current power network with a voltage of 380 V with a frequency of 50 Hz and provides for the possibility of their movement: in the vertical plane for a distance of 1 m, in the horizontal plane for a distance of 3 m.

Key words: cargo handling; conveyor; gripper device.

Анотація. *Мета.* Розробка та проектування сервопривода перевантажувального пристрою, що здатен виконувати захват і переміщення вантажів у вертикальній та горизонтальній площинах для їх подальшого розвантаження на спеціалізовані носії. *Методика.* В рамках дослідження використано метод комплексного моделювання для побудови 3D моделей конструкції сервоприводних механізмів руху перевантажувального пристрою та всього виконавчого обладнання, яке запропоновано застосувати у його складі; метод емпіричного опису технологічних процесів для обґрунтування та пояснення особливостей організації передачі обертових моментів; метод проведення експерименту для засвідчення функціональних можливостей виробу. *Результати.* На базі використання необхідного обладнання у складі: синхронних електродвигунів, редукторних механізмів, гальмівних резисторів, мережевого дроселя, силових та координатних модулів, електромагнітного захватного пристрою та запропонованої 3D моделі конструкції, розроблено сервопривод перевантажувального пристрою

з метою експлуатації виробу під час захвату і переміщення вантажів у вертикальній і горизонтальній площинах та їх подальшого розвантаження на спеціалізовані носії. Функціонування сервоприводних механізмів руху перевантажувального пристрою вантажопідйомністю 40 кг забезпечується застосуванням синхронних електродвигунів з постійними магнітами, які в порівнянні з асинхронними двигунами мають більший обертовий момент і менші інерційність та динамічні характеристики. *Наукова новизна.* Отримала подальший розвиток методологія підвищення ефективності проведення автоматизованої обробки вантажів на виробничій ділянці шляхом впровадження розробленого перевантажувального пристрою з електромагнітним захватним механізмом, що сприяє покращенню якості виконуваних робіт. Теоретично обґрунтовано та розроблено сервопривод перевантажувального пристрою, який забезпечує обробку вантажів масою до 40 кг з підтриманням швидкостей: вертикального підйому/спуску вантажу – 1,73 м/с; горизонтального переміщення вантажу – 1,64 м/с. Керування сервоприводом перевантажувального пристрою за векторним законом реалізовано на базі одного силового та двох координатних модулів. *Практична значимість.* Розроблений перевантажувальний пристрій призначений для автоматизації роботи виробничої лінії промислового заводу та здатен виконувати функції обробки вантажів у вигляді металевих заготовок різних типорозмірів масою не більше 40 кг в межах своєї робочої зони. Пристрій спроектований у вигляді П-подібної металевої конструкції, на якій встановлюється комплект необхідного обладнання для забезпечення роботи двох сервоприводних механізмів руху: підйому/спуску вантажу з застосуванням електромагнітного захватного пристрою; переміщення вантажного візка, який рухається вперед/назад вздовж мосту перевантажувального пристрою. Застосування перевантажувального пристрою з електромагнітним захватним механізмом для обробки вантажів передбачає роботу від трифазної електромережі змінного струму напругою 380 В з частотою 50 Гц та передбачає можливість їх переміщення: у вертикальній площині на відстань 1 м, у горизонтальній площині на відстань 3 м.

Ключові слова: обробка вантажів; конвеєр; захватний пристрій.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

При виконанні різноманітних видів робіт, таких як будівельні, перевантажувальні та багато інших, щодня виникають ситуації, коли фізичних зусиль працівників підприємств недостатньо для успішного виконання поставлених завдань. У таких випадках важливо звертатися до допомоги вантажопідіймальних механізмів, які можуть значно полегшити робочий процес і підвищити його ефективність.

Вантажопідіймальне обладнання представлено в широкому асортименті, що дозволяє підібрати оптимальний варіант для кожної конкретної задачі. Таке обладнання може мати різні призначення: одні механізми спеціалізуються на підйомі вантажів з нижніх рівнів, в той час як інші призначені для горизонтального переміщення вантажів, що забезпечує гнучкість у використанні та можливість пристосування до різних умов праці. Наприклад, деякі зразки розроблені виключно для перевантаження певних виробів, що може включати в себе як малогабаритні, так і великогабаритні об'єкти, що надає змогу забезпечити оптимальний підбір обладнання для кожного конкретного завдання.

Сучасний зразок перевантажувального пристрою (ПП) є складною технічною системою, що включає в себе велику кількість функціональних модулів, кожен з яких виконує свої завдання. Такі модулі взаємодіють між собою, формуючи єдину цілісну конструкцію, яка здатна ефективно справлятися з різними завданнями перевантаження. Кожен модуль складається з вузлів і механізмів, чия робота не лише взаємопов'язана, але й ретельно узгоджена у часі. Тобто, досягнення максимальної ефективності

роботи всього пристрою вимагає, щоб усі елементи функціонували злагоджено і без затримок.

Однією з основних складових будь-якого ПП є привод. Завдяки сучасним технологіям, приводи стали значно більш енергоефективними, що позитивно впливає на загальні витрати енергії при обробці вантажів. Тому, набуває актуальності задача розробки та проектування сервопривода ПП, що здатен обробляти вантажі у вигляді металевих заготовок різних типорозмірів масою не більше 40 кг та забезпечувати автоматизовану роботу виробничої лінії промислового заводу.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Один з перших зразків ПП був обладнаний централізованим приводом, що використовував лише один двигун для забезпечення механічного руху [1, 2]. Двигун забезпечував передачу енергії через різноманітні виконавчі та передатні механізми, при цьому вся система функціонувала за допомогою розподіленого керуючого валу [3, 4]. Подібне технічне рішення набуло широкого загалу в пакувальному обладнанні, де існує необхідність у забезпеченні циклічності рухів робочих органів, що дозволило ефективно переміщати продукцію, подавати пакувальні матеріали та виконувати інші важливі завдання, що стосуються упаковки [5, 6].

З часом, однак, стало очевидно, що для сучасних зразків обладнання, які активно використовують мікропроцесорну техніку, така конструктивна схема перестала бути оптимальною [7, 8, 9]. Вона виявилася складною у виготовленні та експлуатації, вимагаючи значних витрат на матеріали та енергію [10, 11].

Складність конструкції часто призводила до підвищення ризику поломок і збільшення витрат на обслуговування [12, 13].

Сучасні технології пропонують нові, більш ефективні рішення, які не тільки знижують витрати, але й забезпечують більшу надійність і продуктивність [14–18]. Системи з мікропроцесорним керуванням здатні автоматизувати багато процесів, що раніше вимагали ручного контролю, що дозволяє суттєво зменшити час на налаштування і узгодження обладнання до різних виробничих умов [19, 20].

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Захоплення та надійне утримання у визначеному положенні вантажів в процесі їх перевантаження реалізується застосуванням захватних пристроїв (ЗП). Дані пристрої забезпечують не тільки фіксацію об'єкта, але і контроль над його переміщенням та розташуванням у просторі. У деяких випадках типові ЗП обладнуються змінними робочими елементами, що дозволяє адаптувати пристрій до різних типів об'єктів і операцій. Проте, в більшості ситуацій, ЗП оснащуються спеціально розробленими робочими елементами, призначеними для виконання конкретних завдань і операцій, що дозволяє забезпечити максимальну ефективність і точність у роботі.

Більшу частину існуючих ЗП можна умовно поділити на дві групи. Перша група – це контактні ЗП, які мають механічні рухомі зв'язки під час захвату та утримання вантажу. Наприклад, важільний, кулісно-важільний, шатунно-гвинтовий, рейковий та клиновий ЗП. Друга група – це безконтактні ЗП, які здійснюють захоплення об'єктів без безпосереднього фізичного контакту з ними, використовуючи магнітні поля або вакуум.

В роботі запропоновано реалізувати можливість обробляти вантажі у вигляді металевих заготовок різних типорозмірів масою не більше 40 кг за допомогою ПП, який облаштований електромагнітним ЗП. Відмінною особливістю в представлений статі є реалізація сервоприводних механізмів руху ПП до складу яких входять: електродвигуни, редукторні механізми, гальмівні резистори, мережевий дросель, силовий та координатні модулі, захватний пристрій. Прийняті технічні рішення здатні забезпечити автоматизовану роботу виробничої лінії промислового заводу.

Метою дослідження є розробка та проектування сервопривода перевантажувального пристрою, що здатен виконувати захват і переміщення вантажів у вертикальній та горизонтальній площинах для їх подальшого розвантаження на спеціалізовані носії.

ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

В якості *об'єкта дослідження* обрано технологічні процеси, які здатен реалізовувати сервопривод ПП до складу якого входять: електродвигуни, редукторні

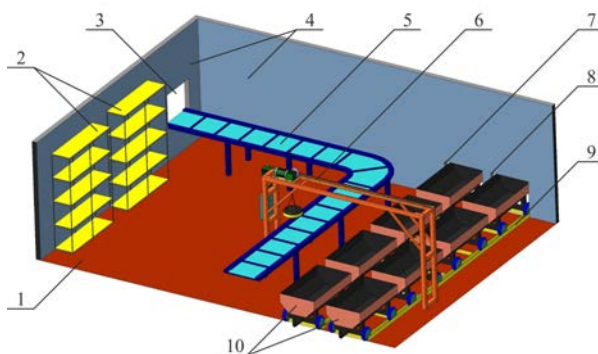
механізми, гальмівні резистори, мережевий дросель, силовий та координатні модулі, захватний пристрій.

Предметом дослідження є моделі та методи аналізу для запровадження необхідної точності та надійності роботи сервоприводних механізмів руху ПП, розробка та реалізація алгоритмічного забезпечення для безпечної експлуатації виробу, забезпечення комунікації та сумісності застосованого обладнання, створення 3D моделей складових елементів обладнання та загальної конструкції сервопривода ПП.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

Для автоматизації виробничої лінії промислового заводу запропоновано застосувати допоміжний ПП (рис. 1). Основні функції, які він має реалізовувати це переміщення вантажів, що надходять зі складу (3, рис. 1) у вертикальній та горизонтальній площинах для їх подальшого завантаження на вагонетки (10, рис. 1). Вагонетки разом з вантажем відправляються до виробничих цехів № 2 та № 3 де їх потім застосовують у виробничому процесі заводу. Рух вагонеток реалізований шляхом їх автоматичного переміщення по залізним коліям (9, рис. 1) через відповідні вікна, що ведуть до цеху № 2 та № 3 (7, 8 рис. 1).

В якості вантажів, які можуть рухатися конвеєром (5, рис. 1) маємо на увазі металеві заготовки, різних типорозмірів масою не більше 40 кг (пластини, циліндри, куби, трикутники і т.п.). Перед захватом виробів конвеєрне полотно призупиняється навпроти ПП (6, рис. 1), так як спрацьовує кінцевий перемикач конвеєра. Для захвату виробів з конвеєрного полотна ПП оснащується електромагнітним захватним пристроєм (ЕЗП). Перевантаження виробів може відбуватися по різним вагонеткам в залежності від вимог виробництва. Після завантаження вагонетки напруга з ЕЗП знімається і вантаж залишається у вагонетці. Далі, ЕЗП знову повертається до конвеєрного полотна і процес виконується циклічно.

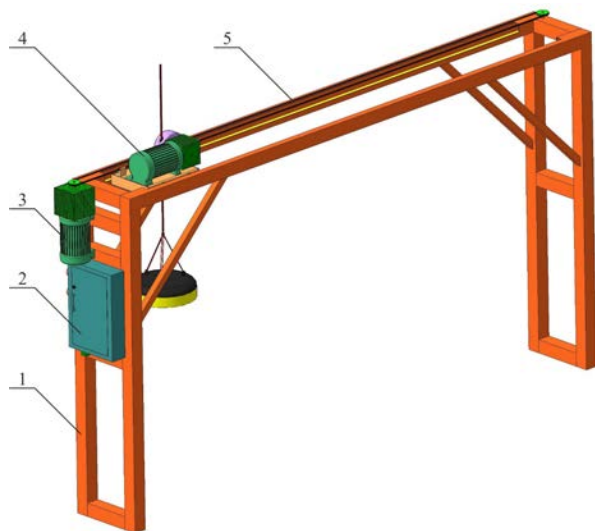


- 1) – підлога цеху № 1; 2) – стелажі; 3) – вікно до складу;
- 4) – стіни цеху № 1;
- 5) – транспортувальний конвеєр; 6) – ПП;
- 7) – вікно до цеху № 2;
- 8) – вікно до цеху № 3; 9) – залізні колії;
- 10) – вагонетки

Рис. 1. Внутрішній вигляд цеху № 1

Стелажі (2, рис. 1), що знаходяться в приміщенні цеху № 1 (1, рис. 1) використовуються для зберігання інструментів, комплектів запасних частин та деталей, які можуть знадобитися в періодичному обслуговуванні обладнання конвеєра, ПП та вагонеток.

Розроблена конструкція ПП вантажопідйомністю 40 кг виготовляється у вигляді металевої П-подібної рамної конструкції (рис. 2).



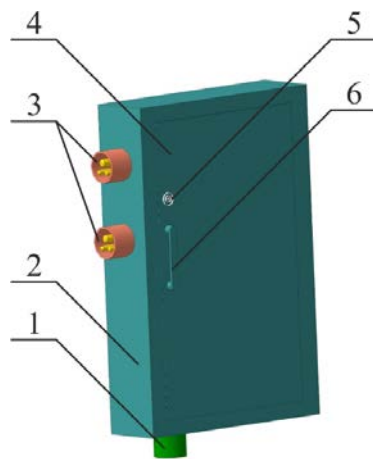
1) – рама; 2) – БЕК; 3) – сервопривод переміщення вантажу;
4) – сервопривод підйому/спуску вантажу; 5) – міст
Рис. 2. 3D модель рамної конструкції ПП (вид спереду ліворуч)

Рамна конструкція виробу (1, рис. 2) виготовляється з металевих профільних труб та стрижнів. Всі металеві елементи рами жорстко з'єднуються зварюванням (5, рис. 2). Виконавче електрообладнання закріплюється шляхом застосування болтових з'єднань (2, 3, 4 рис. 2).

Розроблена конструкція ПП передбачає можливість установки виробу лише на рівній поверхні. Сполучення виробу з площиною рівної поверхні також виконується болтовими з'єднаннями. За необхідності можна застосувати додаткову систему розпірних та розтяжних механізмів.

Блок енергетики та керування (БЕК) сервоприводом ПП (2, рис. 2) представляє собою єдину централізовану мережу живлення всього задіяного електричного обладнання та відповідає за реалізацію керування процесом переміщення, підйому/спуску вантажів масою до 40 кг. БЕК розміщується на лівій вертикальній стійці поблизу сервопривода горизонтального переміщення. Він виготовлений у вигляді прямокутного металевого ящика (2, рис. 3). Для підключення електроживлення до виконавчого електрообладнання застосовані три силові роз'єми. Один вхідний на БЕК (1, рис. 3) та два вихідні до сервоприводів (3, рис. 3) переміщення і підйому/спуску.

Для захисту БЕК від стороннього втручання працівників в процесі експлуатації сервопривода доступ до його складових елементів обмежений закритими дверцятами (4, рис. 3). Взятись за ручку (6, рис. 3) відкрити БЕК може лише відповідальний за роботу ПП працівник. Для цього йому надається спеціальний ключ (5, рис. 3).



1) – вхідний роз'єм електроживлення; 2) – рама;
3) – вихідні роз'єми;
4) – дверцята; 5) – замок; 6) – ручка
Рис. 3. 3D модель БЕК (вид спереду)

Зміна горизонтального положення конструкції виробу не передбачена, так як у цьому не має необхідності.

Для підвищення жорсткості запропонованої конструкції між вертикальними та горизонтальними стійками окрім розпірок (1, рис. 4) додатково встановлюються чотири вантажонесучі опори (2, рис. 4).

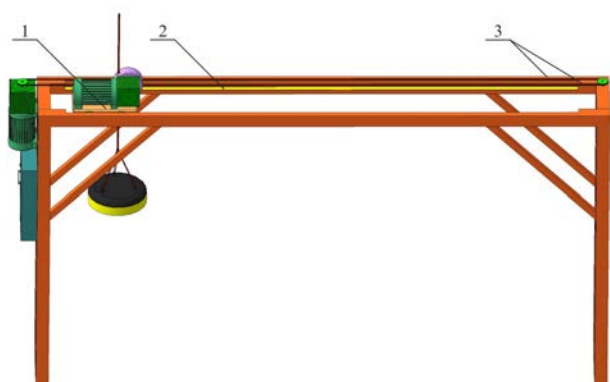


1) – розпірка; 2) – вантажонесучі опори; 3) – ролик;
4) – шків; 5) – ремінь

Рис. 4. 3D модель рамної конструкції ПП (вид праворуч)

Також в розробці застосовуються ремний механізм переміщення (5, рис. 4) вантажу у горизонтальній площині. Для цього передбачено два обертових механізми. Перший це шків (4, рис. 4) встановлений на валу сервопривода механізму переміщення, другий – ролик (3, рис. 4) з внутрішнім підшипником закріплений з протилежної частини конструкції. Таким чином, шків є ведучим елементом, а ролик веденим.

Переміщення вантажу в горизонтальній площині виконує вантажна платформа (ВП) (1, рис. 5), що рухається по напрямним рейкам (2, рис. 5) розташованим на мосту ПП довжиною 3 м. ВП по рейкам рухається узгоджено з механічними обмеженнями (3, рис. 5).



1) – ВП; 2) – напрямні рейки моста;
3) – механічні обмежувачі

Рис. 5. 3D модель основних елементів моста ПП (вид зверху)

Переміщення вантажів у вертикальній площині реалізовано застосуванням зубчатої рейки (6, рис. 6) закріпленої на ВП (4, рис. 6). Рух рейки у вертикальній площині здійснюється через конічний планетарний редуктор (7, рис. 6) з кожухом (5, рис. 6) закріпленим на валу сервопривода (8, рис. 6) підйому/спуску вантажу.

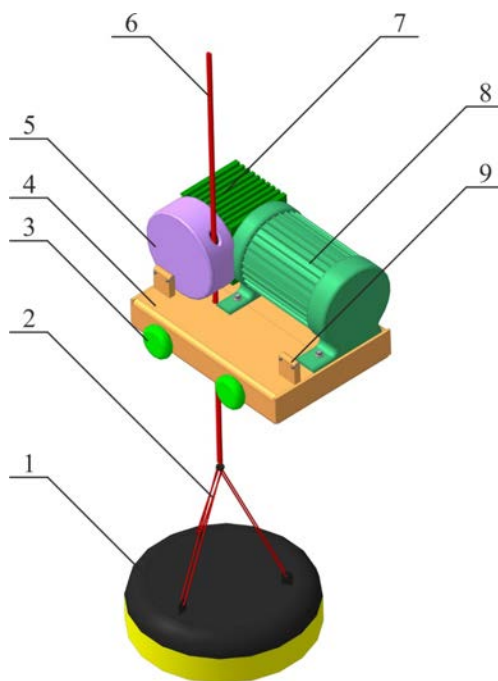
Механізм переміщення ВП складається з чотирьох ведених коліс (3, рис. 6). Обертовий момент від сервопривода механізму горизонтального переміщення зрушує ВП з місця через ремінь зафіксований на платформі (9, рис. 6). Конічний планетарний редуктор разом з виконавчим сервоприводом закріплені на поверхні ВП болтовими з'єднаннями.

Для захоплення та переміщення вантажів запропоновано застосувати ЕЗП (1, рис. 6). Він закріплюється через металеве підвішування (2, рис. 6) на зубчастій рейці.

На ВП розміщується все необхідне виконавче обладнання для реалізації сервопривода механізму підйому/спуску вантажів.

Керування роботою сервопривода ПП реалізується за векторним законом. Для цього способу вимірюються миттєві значення струмів трьох фаз

двигуна. Струми перетворюються з трифазної системи в Декартову, а потім в обертову систему. Для обох струмів створюються пропорційно-інтегральні регулятори. Вихідні сигнали регуляторів повертаються в Декартову систему. Просторово-векторний модулятор обчислює тривалості включення силових ключів для реалізації вектора струму в обмотках двигуна. Регулятор швидкості підтримує задану швидкість обертання валу. Сигнал завдання швидкості задається користувачем або системою керування, а зворотний зв'язок забезпечується сигналом, розрахованим за допомогою визначника швидкості. Вихідний сигнал регулятора швидкості визначає момент двигуна.



1) – ЕЗП; 2) – підвішування; 3) – колеса; 4) – рама;
5) – кожух; 6) – зубчата рейка; 7) – конічний планетарний редуктор; 8) – сервопривод підйому/спуску;
9) – фіксатор

Рис. 6. 3D модель ВП (вид позаду праворуч)

Основні технічні характеристики розробки представлені у табл. 1.

ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Складність технологічного процесу перевантаження, разом із високими вимогами до автоматизованих машин з коротким кінематичним циклом, потребує використання якісних і високодинамічних сервоприводів, що суттєво впливає на вартість і якість виробництва.

Основною характеристикою сервопривода є зворотний зв'язок між положенням ротора та кодуючого пристрою на валу двигуна. У деяких випадках ця інформація може бути доповнена або замінена прямим вимірюванням положення рухомих елементів

Таблиця 1. Основні технічні характеристики розробки

№ з/п	Найменування параметра	Значення
1	Напруга змінного живлення, В	3х380
2	Частота мережі, Гц	50
3	Вантажопідйомність, кг	40
4	Висота підняття вантажу, м	1
5	Швидкість підйому/спуску вантажу, м/с	1,73
6	Відстань переміщення вантажу, м	3
7	Швидкість переміщення вантажу, м/с	1,64
8	Коефіцієнт корисної дії (ККД), %	90
9	Сервопривод	DY71MB – 1 шт., DY71SB – 1 шт.
10	Планетарний редуктор	PSF412 – 1 шт., PSF311 – 1 шт.
11	Гальмівний резистор	BW147 – 2 шт.
12	Мережевий дросель	ND045-013 – 1 шт.
13	Силовий модуль	MPB51A011-503-00 – 1 шт.
14	Координатний модуль	MAS51A005-503-00 – 2 шт.
15	Радіатор охолодження	DKF07 – 1 шт.
16	Захватний пристрій	електромагнітний, MS300 – 1 шт.
17	Габаритні розміри ПП, мм	3760x460x2040
18	Маса у зібраному стані, кг	487

машини. Кодуючий пристрій визначає загальну точність системи привода. Датчики положення та кодуєчі пристрої встановлюються на валах виконавчих двигунів і підключаються до координатних модулів. У якості двигунів задіяно синхронні двигуни з постійними магнітами. Такі електричні машини оптимізовані для виконання функцій сервопривода та володіють низкою вагомим переваг. По-перше, вони забезпечують високий крутний момент при досить компактних розмірах, що робить їх ідеальними для застосувань, де важлива економія простору. По-друге, ці двигуни здатні досягати значних значень прискорення, що дозволяє їм швидко реагувати на зміни в навантаженнях і вимогах системи. Крім того, висока ефективність синхронних двигунів робить їх економічно вигідними у тривалій експлуатації, оскільки знижують витрати на електроенергію.

На базі використання необхідного обладнання у складі: синхронних електродвигунів, редукторних механізмів, гальмівних резисторів, мережевого дроселя, силових та координатних модулів, електромагнітного захватного пристрою та запропонованої 3D моделі конструкції, розроблено сервопривод ПП з метою експлуатації виробу під час захвату і переміщення вантажів у вертикальній і горизонтальній площинах та їх подальшого розвантаження на спеціалізовані носії.

Функціонування сервоприводних механізмів руху ПП вантажопідйомністю 40 кг забезпечується застосуванням синхронних електродвигунів з постійними магнітами, які в порівнянні з асинхронними двигунами мають більший обертовий момент і менші інерційність та динамічні характеристики.

ВИСНОВКИ

1. Розроблений ПП призначений для автоматизації роботи виробничої лінії промислового заводу та здатен виконувати функції обробки вантажів у вигляді металевих заготовок різних типорозмірів масою не більше 40 кг в межах своєї робочої зони. Пристрій спроектований у вигляді П-подібної металевої конструкції, на якій встановлюється комплект необхідного обладнання для забезпечення роботи двох сервоприводних механізмів руху: підйому/спуску вантажу з застосуванням електромагнітного захватного пристрою; переміщення вантажного візка, який рухається вперед/назад вздовж мосту перевантажувального пристрою.

2. Застосування ПП з ЕЗП для обробки вантажів передбачає роботу від трифазної електромережі змінного струму напругою 380 В з частотою 50 Гц та передбачає можливість їх переміщення: у вертикальній площині на відстань 1 м, у горизонтальній площині на відстань 3 м.

REFERENCES

- [1] Neranon P., Bicker R. (2016) Force/position control of a robot manipulator for human-robot interaction. *Therm Sci*, 20(2), 537-548.
- [2] Luo Y., Liu W., Wu L. (2015) Analysis of the displacement of lumped compliant parallel-guiding mechanism considering parasitic rotation and deflection on the guiding plate and rigid beams. *Mech mach theory*, 91, 50-68.

- [3] Hedberg E. (2020) Control, models and industrial manipulators. *LiU-Tryck*, Linköping, Sweden, 1-68.
- [4] Liu Y., Wu G., Li L. (2024) Design and development of a flexible-rigid Triglides sorting manipulator. *Journal of mechanical engineering science*. DOI: 10.1177/09544062241275383
- [5] Li D., Zhao H., Ge D. (2024) A novel robotic multiple peg-in-hole assembly pipeline: modeling, strategy, and control. *Transactions on mechatronics*, 29(4), 2602-2612.
- [6] Vaschieri V., Gadaleta M., Bilancia P. (2017) Virtual prototyping of a flexure-based RCC device for automated assembly. *Procedia Manuf*, 11, 380-388.
- [7] Dižo J., Steišunas S., Blatnický M. (2016) Simulation analysis of the effects of a rail vehicle running with wheel flat. *Manufacturing Technology*, 16, 889-896.
- [8] Asperti M., Zanelli F., Sabbioni E. (2024) Data-driven design of a derailment detection system for freight wagons. *Journal of rail and rapid transit*. DOI: 10.1177/09544097241276585
- [9] Kampczyk, A., Dybeł, K. (2021) Integrating surveying railway special grid pins with terrestrial laser scanning targets for monitoring rail transport infrastructure. *Measurement*, 170, 108729. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108729>
- [10] Yang Y., Zhou Y., Hecht M. (2024) Investigations on wagon-track interaction and running safety with unsupported sleepers. *Transportation geotechnics*, 45, 101204. DOI: 10.1016/j.trgeo.2024.101204
- [11] Muradian L., Shvets A., Shvets A. (2024) Influence of wagon body flexural deformation on the indicators of interaction with the railroad track. *Archive of applied mechanics*, 94, 8. DOI: 10.1007/s00419-024-02633-2
- [12] Auersch L. (2023) Vehicle dynamics and train-induced ground vibration-theoretical analyses and simultaneous vehicle, track, and soil measurements. *Vehicles*, 5(1), 223-247. DOI: <https://doi.org/10.3390/vehicles5010013>
- [13] Tran L.H., Do T.T.H., Le-Nguyen K. (2023) Influence of beam models on dynamic responses of ballasted railway track subjected to moving loads. *Arch. Appl. Mech*, 93, 3665-3682. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00419-023-02459-4>
- [14] Liang Y., Zeng J., Wang Q. (2023) Dynamic performance study of railway vehicle on half-vehicle roller rig. *Dynamic control*, 11, 473-481. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40435-022-01021-4>
- [15] Shvets A.O. (2021) Analysis of the dynamics of freight cars with lateral displacement of the front bogie. *Adv. Math. Models*, 6(1), 45-58.
- [16] Ouyang H.M., Zhang G.M., Mei L., Deng X., Wang D.M. (2016) Load vibration reduction in rotary cranes using robust two degree of freedom control approach. *Advances in mechanical engineering*, 8(3), 73-89. DOI: 10.1177/1687814016641819
- [17] Ramli L., Mohamed Z., Abdullahi A.M., Jaafar H.I., Lazim I.M. (2017) Control strategies for crane systems: a comprehensive review. *Mechanical systems and signal processing*, 95, 1-23. DOI: 10.1016/j.ymssp.2017.03.015
- [18] Huang J., Maleki E., Singhose W. (2013) Dynamics and swing control of mobile boom cranes subject to wind disturbances. *IET Control theory & application*, 7(9), 1187-1195. DOI: 10.1049/iet-cta.2012.0957
- [19] Wang F., Shimasaki K., Hu Sh., Ishii I., Umegaki Y., Ito T. (2024) Displacement distribution monitoring of an unloader crane in ironworks using high-speed and high-resolution vision. *Tetsu to Hagane*, 110(11). DOI: 10.2355/tetsutohagane.TETSU-2024-021
- [20] Zhang Y., Chen K. (2023) Digital technologies for enhancing crane safety in construction: a combined quantitative and qualitative analysis. *Journal of civil engineering and management*, 29(7), 604-620. DOI: 10.3846/jcem.2023.19574

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Neranon P., Bicker R. (2016) Force/position control of a robot manipulator for human-robot interaction. *Therm Sci*, 20(2), 537-548.
- [2] Luo Y., Liu W., Wu L. (2015) Analysis of the displacement of lumped compliant parallel-guiding mechanism considering parasitic rotation and deflection on the guiding plate and rigid beams. *Mech mach theory*, 91, 50-68.
- [3] Hedberg E. (2020) Control, models and industrial manipulators. *LiU-Tryck*, Linköping, Sweden, 1-68.
- [4] Liu Y., Wu G., Li L. (2024) Design and development of a flexible-rigid Triglides sorting manipulator. *Journal of mechanical engineering science*. DOI: 10.1177/09544062241275383
- [5] Li D., Zhao H., Ge D. (2024) A novel robotic multiple peg-in-hole assembly pipeline: modeling, strategy, and control. *Transactions on mechatronics*, 29(4), 2602-2612.
- [6] Vaschieri V., Gadaleta M., Bilancia P. (2017) Virtual prototyping of a flexure-based RCC device for automated assembly. *Procedia Manuf*, 11, 380-388.
- [7] Dižo J., Steišunas S., Blatnický M. (2016) Simulation analysis of the effects of a rail vehicle running with wheel flat. *Manufacturing Technology*, 16, 889-896.
- [8] Asperti M., Zanelli F., Sabbioni E. (2024) Data-driven design of a derailment detection system for freight wagons. *Journal of rail and rapid transit*. DOI: 10.1177/09544097241276585
- [9] Kampczyk, A., Dybeł, K. (2021) Integrating surveying railway special grid pins with terrestrial laser scanning targets for monitoring rail transport infrastructure. *Measurement*, 170, 108729. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108729>
- [10] Yang Y., Zhou Y., Hecht M. (2024) Investigations on wagon-track interaction and running safety with unsupported sleepers. *Transportation geotechnics*, 45, 101204. DOI: 10.1016/j.trgeo.2024.101204
- [11] Muradian L., Shvets A., Shvets A. (2024) Influence of wagon body flexural deformation on the indicators of interaction with the railroad track. *Archive of applied mechanics*, 94, 8. DOI: 10.1007/s00419-024-02633-2

- [12] Auersch L. (2023) Vehicle dynamics and train-induced ground vibration-theoretical analyses and simultaneous vehicle, track, and soil measurements. *Vehicles*, 5(1), 223-247. DOI: <https://doi.org/10.3390/vehicles5010013>
- [13] Tran L.H., Do T.T.H., Le-Nguyen K. (2023) Influence of beam models on dynamic responses of ballasted railway track subjected to moving loads. *Arch. Appl. Mech.*, 93, 3665-3682. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00419-023-02459-4>
- [14] Liang Y., Zeng J., Wang Q. (2023) Dynamic performance study of railway vehicle on half-vehicle roller rig. *Dynamic control*, 11, 473-481. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40435-022-01021-4>
- [15] Shvets A.O. (2021) Analysis of the dynamics of freight cars with lateral displacement of the front bogie. *Adv. Math. Models*, 6(1), 45-58.
- [16] Ouyang H.M., Zhang G.M., Mei L., Deng X., Wang D.M. (2016) Load vibration reduction in rotary cranes using robust two degree of freedom control approach. *Advances in mechanical engineering*, 8(3), 73-89. DOI: 10.1177/1687814016641819
- [17] Ramli L., Mohamed Z., Abdullahi A.M., Jaafar H.I., Lazim I.M. (2017) Control strategies for crane systems: a comprehensive review. *Mechanical systems and signal processing*, 95, 1-23. DOI: 10.1016/j.ymssp.2017.03.015
- [18] Huang J., Maleki E., Singhose W. (2013) Dynamics and swing control of mobile boom cranes subject to wind disturbances. *IET Control theory & application*, 7(9), 1187-1195. DOI: 10.1049/iet-cta.2012.0957
- [19] Wang F., Shimasaki K., Hu Sh., Ishii I., Umegaki Y., Ito T. (2024) Displacement distribution monitoring of an unloader crane in ironworks using high-speed and high-resolution vision. *Tetsu to Hagane*, 110(11). DOI: 10.2355/tetsutohagane.TETSU-2024-021
- [20] Zhang Y., Chen K. (2023) Digital technologies for enhancing crane safety in construction: a combined quantitative and qualitative analysis. *Journal of civil engineering and management*, 29(7), 604-620. DOI: 10.3846/jcem.2023.19574

© Войтасик А. М.

Дата надходження статті до редакції: 05.11.2024

Дата затвердження статті до друку: 14.11.2024