

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ТЕРНОПІЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ІВАНА ПУЛЮЯ

МИХАЙЛИШИН РОМАН ІГОРОВИЧ

УДК 621.865.8

**ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ТА ОРІЄНТАЦІЇ СТРУМИННОГО
ЗАХОПЛЮВАЧА МАНІПУЛЯТОРА ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ
ВАНТАЖНО-РОЗВАНТАЖУВАЛЬНИХ ОПЕРАЦІЙ**

05.05.05 – піднімально-транспортні машини

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Тернопіль – 2018

Дисертація на правах рукопису

Робота виконана на кафедрі автоматизації технологічних процесів і виробництв Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник

кандидат технічних наук, доцент
Савків Володимир Богданович,
Тернопільський національний технічний
університет імені Івана Пулюя,
доцент кафедри автоматизації технологічних
процесів і виробництв

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор
Ловейкін Вячеслав Сергійович
Національний університет біоресурсів і
природокористування України,
завідувач кафедри конструювання машин і
обладнання;

доктор технічних наук, доцент
Кирилович Валерій Анатолійович
Житомирський державний технологічний
університет, професор кафедри автоматизації та
комп'ютерно-інтегрованих технологій імені
професора Б.Б. Самотокіна

Захист відбудеться «02» березня 2018 року о 10:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 58.052.03 у Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя за адресою: 46001, м. Тернопіль, вул. Руська, 56, ауд. 58.

З дисертацією можна ознайомитись в науково-технічній бібліотеці Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя за адресою: 46001, м. Тернопіль, вул. Руська, 56, корпус №2.

Автореферат розіслано «30» січня 2018 року.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

А.Є. Дячун

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Сучасний стан розвитку засобів автоматизації передбачає використання промислових роботів як для виконання основних (технологічних) так і допоміжних (вантажно-розвантажувальних, транспортних, складських) операцій. Роботизація виробничих процесів дозволяє покращити якість продукції та знизити її собівартість, а також звільнити робітників від важкої, монотонної праці та шкідливих умов виробництва. Згідно даних Міжнародної федерації робототехніки середній річний темп приросту впровадження промислових роботів на виробництві становить 14%, а їх світова чисельність до 2020 року зросте до 3 млн. одиниць.

Проте впровадження сучасних засобів автоматизації вантажно-розвантажувальних операцій призводить до зростання енерговитрат підприємства, виснажує природні ресурси та погіршує екологію. Тому підвищення енергоефективності експлуатації основного та допоміжного обладнання є актуальним завданням. Так під час автоматизації вантажно-розвантажувальних операцій важливу роль відіграє визначення та мінімізація необхідної сили утримування вантажу, щоб забезпечити зменшення загального енергоспоживання на виробництві.

В результаті аналізу стану досліджень за тематикою дисертації визначено найближчі напрямки, що характеризують взаємодію захоплювального пристрою з вантажем. Питанням дослідження впливу захоплювального пристрою на деформацію вантажу присвячені праці Xaviera F. Bruna та Giacomo Mantriota. Моделюванням динаміки механізмів підйому вантажу займалися В.С. Ловеїкін, М.С. Комаров, М.О. Лобов, В.Ф. Гайдамака. Зв'язком між складовими технологічної взаємодії захоплювачів з вантажем, оптимізацією траєкторії та зниженням енергетичних затрат під час транспортування вантажу за допомогою промислових роботів займалися В.А. Кирилович, Z. Shiller, J.E. Bobrow, S. Dubowsky, J.S. Gibson та N. Mc Kay.

Однак питання моделювання динамічної взаємодії захоплювальних пристроїв (ЗП) з вантажем у процесі виконання промисловим роботом вантажно-розвантажувальних операцій вивчено недостатньо. Технічні рішення та підходи щодо зниження енергозатрат на утримування вантажів захоплювальними пристроями та підвищення надійності їх утримування практично не досліджено.

Тема дисертаційної роботи, що присвячена розробці моделей взаємодії струминного захоплювального пристрою (СЗП) та вантажу у процесі транспортування, а також завдання зниження енергоспоживання – є достатньо актуальними.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами. Дисертаційна робота виконана згідно з планом науково-дослідної роботи кафедри автоматизації технологічних процесів і виробництв Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя при виконанні НДР ВК55-16 «Розробка моделей для оптимізації орієнтації кисті промислового робота» (номер державної реєстрації 0116U005075).

Згідно Національної стипендіальної програми Словацької Республіки для підтримки обміну студентів, аспірантів, викладачів вузів і науковців проведено

експериментальні дослідження за тематикою дисертації у Словацькому технічному університеті в Братиславі (Національний центр робототехніки). Результати досліджень були опубліковані за підтримки грантів Req-00347-0001, VEGA 1/0065/16, APVV-16-0006 і VEGA 1/0752/17.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є зниження енергоспоживання струминного захоплювача та підвищення стабільності утримування ним вантажів за рахунок оптимізації орієнтації кінцевої ланки маніпулятора та роззосередження зон взаємодії захоплювального пристрою з поверхнею вантажу.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- провести аналіз конструкцій захоплювальних пристроїв та методів планування траєкторій транспортування вантажів маніпуляторами для забезпечення стабільності їх утримування при зміні параметрів руху;
- розробити математичну модель динамічної взаємодії струминного захоплювача з вантажем при його транспортуванні по прямолінійній траєкторії та визначити його оптимальну орієнтацію для мінімізації енергоспоживання;
- розробити математичну модель динамічної взаємодії струминного захоплювача з вантажем при його транспортуванні по гвинтовій траєкторії та визначити його оптимальну орієнтацію;
- дослідити вплив масо-габаритних характеристик вантажу, параметрів базуючих елементів струминного захоплювача та режимів руху на мінімальну необхідну силу утримування вантажу;
- провести експериментальні дослідження процесу транспортування з метою перевірки достовірності розроблених моделей та методу оптимізації орієнтації ЗП;
- встановити енергоефективність процесу транспортування вантажів з використанням СЗП для різних схем вантажно-розвантажувальних операцій;
- розробити рекомендації щодо застосування методу оптимізації орієнтації пневматичних захоплювальних пристроїв та їх конструктивні схеми.

Об'єкт дослідження – процес взаємодії захоплювального пристрою маніпулятора з вантажем під час транспортування.

Предмет дослідження – вплив параметрів транспортування та вантажу на оптимальну орієнтацію кінцевої ланки маніпулятора, що дозволить мінімізувати силові характеристики струминного захоплювального пристрою.

Методи дослідження. Для розробки математичних моделей застосовано методи теоретичної механіки, зокрема аналітичної механіки, математичного аналізу, математичної фізики та сучасні числові методи. Експериментальні дослідження проводились з використанням промислового робота IRB 4600 на спеціально розробленому оснащенні з використанням методів планування багатофакторного експерименту, статистичного аналізу. Для моделювання і симуляції системи «маніпулятор-захоплювач-вантаж» використано програмний пакет ABB RobotStudio®.

Наукова новизна отриманих результатів:

- вперше запропоновано математичну модель динамічної взаємодії струминного захоплювального пристрою з вантажем при його транспортуванні по гвинтовій траєкторії, яка враховує відцентрові сили та дозволяє визначити

необхідну силу утримування вантажу;

- вперше визначено оптимальну орієнтацію струминного захоплювального пристрою в процесі транспортування вантажу, що враховує діючі на нього сили та дозволить мінімізувати енергетичні затрати при виконанні вантажно-розвантажувальних операцій;

- удосконалено математичну модель динамічної взаємодії струминного захоплювального пристрою з вантажем при його транспортуванні по прямолінійній траєкторії, яка враховує зміщення центра мас вантажу та вплив сили лобового опору повітря та дозволяє підвищити точність обчислень при моделюванні завантаження габаритних об'єктів;

- удосконалено теоретичні залежності для розрахунку мінімальної необхідної сили утримування вантажу, що враховують його масу, габарити, параметри руху, та дозволяють визначити експлуатаційні характеристики струминного захоплювального пристрою.

Практичне значення отриманих результатів. Запропоновані математичні методики дозволяють визначити ряд конструктивних та експлуатаційних характеристик необхідних при проектуванні СЗП та інших захоплювачів утримуючого та підтримуючого типів. Метод оптимізації орієнтації ЗП під час виконання маніпулятором вантажно-розвантажувальних операцій дозволяє знизити енергетичні затрати на утримування вантажу у процесі транспортування. Запропоновано конструктивні схеми пневматичних ЗП, які забезпечують підвищену вантажопідіймальність та стабільність утримування вантажу в процесі транспортування, які підтверджені двома деклараційними патентами України.

Результати роботи впроваджено на ПАТ «Булат» (Тернопільська обл., смт. Микулинці) при автоматизації процесів завантаження плоских заготовок у фрезерний верстат з ЧПК. Прогнозований річний економічний ефект від впровадження складає 26355 грн.

Особистий внесок здобувача. Основні положення та результати досліджень за темою дисертаційної роботи отримані автором самостійно на основі власних ідей та розробок. У працях, опублікованих у співавторстві, здобувачем особисто: проаналізовано методи планування траєкторій маніпуляторів [2,10,11]; запропоновано метод оптимізації орієнтації СЗП в процесі транспортування вантажу по прямій траєкторії [1,4,12]; запропоновано метод оптимізації орієнтації СЗП в процесі транспортування вантажу по гвинтовій траєкторії [16]; досліджено вплив масо-габаритних характеристик вантажу на необхідну вантажопідіймальність СЗП [3,15]; досліджено вплив параметрів базуючих елементів СЗП на мінімальну необхідну силу утримування вантажу [3,13]; досліджено енергоефективність процесу транспортування вантажу з використанням СЗП [14]; проведено планування експериментальних досліджень та здійснено статистичну обробку експериментальних даних [6,7]; проведено розрахунок силових характеристик струминно-вакуумного захоплювача [5], обґрунтовано способи підвищення силових характеристик пневматичних захоплювачів [5,8,9].

Апробація матеріалів дисертації. Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідались та обговорювались: на наукових конференціях

Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя (м. Тернопіль, 2015р., 2016р., 2017р.); на III Всеукраїнській науково-технічній конференції «Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки і приладобудування» Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя (м. Тернопіль, 2017р.); на VII Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування», Херсонська державна морська академія (м. Херсон, 2016р.); на X Міжнародній науковій конференції «Transbaltica 2017: Transportation Science and Technology», Технічний університет Вільнюса (м. Вільнюс, 2017р.); на Міжнародній науково-технічній конференції «Транспорт: механічна інженерія, експлуатація, матеріалознавство», Херсонська державна морська академія (м. Херсон, 2017р.); на Міжнародній науково-практичній конференції Державного фонду фундаментальних досліджень «Science-Society-Personality» (м. Київ, 2017р.); на Міжнародному форумі молодих вчених «2017 IEEE International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering» (м. Львів, 2017р.).

Публікації. Основні положення та результати дисертаційних досліджень опубліковано в 16 наукових працях, з яких 7 статей у фахових наукових журналах та збірниках наукових праць, 3 з яких опубліковані в журналах, що входять до міжнародних науко-метричних баз Scopus, Web of Science та IEEE Xplore Digital Library, 2 – деклараційні патенти України на корисні моделі, 7 – тез наукових та науково-технічних конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота містить вступ, п'ять розділів, загальні висновки і рекомендації, список використаних джерел та додатки. Загальний обсяг дисертації становить 185 сторінки, 102 рисунки, 8 таблиць з текстом, список використаних джерел із 130 найменувань на 13 сторінках, з яких 53 іноземною мовою та додатки.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, визначено тему досліджень, обрано об'єкт та предмет досліджень, сформульовано наукову новизну і встановлено практичне значення отриманих результатів.

У першому розділі **“Аналіз стану проблеми маніпулювання вантажем та обґрунтування напрямків їх вирішення”** проаналізовано сучасний стан і практику захоплення та транспортування вантажів маніпуляторами.

Науковий напрям, пов'язаний з оптимізацією рухів маніпуляторів, виник у 80-х роках минулого століття. Даній тематиці присвячені дослідження наступних вчених: В.А. Кириловича, J.E. Bobrow, S. Dubowsky, J.S. Gibson, F. Pfeiffer, K. Richter, K. Shin, N. McKay, Z. Shiller, K.S. Fu, R.C. Gonzales, C. Lee, C.T. Chettibi, H.E. Lehtihet, M. Haddad, S. Hanchi, J. Peng, S. Akella, J.J. Wang, A. Khoukhi, Y. Hamam і A. Chatraei. Задачі оптимізації траєкторії щодо мінімізації вібрацій кінцевої ланки маніпулятора вирішували А.І. Бохонський та Н.І. Вармінська. Зв'язком між складовими технологічної взаємодії захватів промислових роботів з вантажем займався В.А. Кирилович. Проблемами планування рухів та орієнтації кінцевої ланки маніпуляторів займались Richard M. Murray, Zexiang Li, S. Shankar Sastry,

А.Ю. Кобринський і В.С. Ловейкін. Даними науковцями проаналізовано математичні методи впровадження орієнтації як основного параметра під час програмування промислових робіт на виробництві.

Хоча питанням оптимізації траєкторії приділена значна увага, проте не проводилась оптимізація орієнтації кінцевої ланки маніпулятора під час транспортування вантажів з метою зниження енергоспоживання захоплювальними пристроями. Тому моделювання динамічної взаємодії захоплювального пристрою з вантажем та визначення його оптимальної орієнтації під час транспортування представляють практичний інтерес і є актуальними в даному напрямку.

З метою визначення переваг та недоліків захоплювальних пристроїв проведено аналіз існуючих прототипів. Для моделювання вибрано СЗП, які мають найбільше переваг серед захоплювачів утримуючого типу. Вони володіють високими динамічними характеристиками, керованою навантажувальною здатністю, можливістю демпфування ударів під час захоплення вантажів з відстані. Також вони забезпечують високу якість продукції за рахунок відсутності на поверхні виробів слідів контакту, забруднень і пошкоджень, чого неможливо уникнути при використанні інших захоплювачів.

У другому розділі **“Теоретичні дослідження динамічної взаємодії струминного захоплювального пристрою з вантажем в процесі транспортування”** запропоновано математичні моделі динамічної взаємодії СЗП з вантажем під час його транспортування по прямолінійній або гвинтовій траєкторіях, визначено оптимальну орієнтацію ЗП під час транспортування.

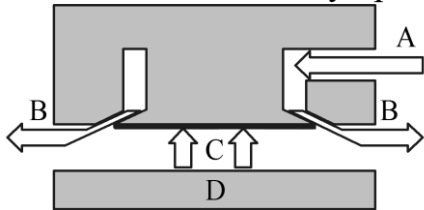


Рис. 1. Принцип дії СЗП:

- А – стиснуте повітря;
- В – повітряний потік;
- С – піднімальна сила;
- Д – вантаж

Моделювання проводили з використанням СЗП ежекційного типу для утримання вантажу за плоску поверхню. Принцип дії цього пристрою показаний на рис. 1. Розглянуто транспортування вантажу по прямолінійній траєкторії для випадку зміщеного центру мас вантажу відносно осі ЗП (рис. 2). Отримано умови рівноваги, що враховують діючі на вантаж сили та моменти, відносно системи координат, зв'язаної з СЗП:

$$\begin{cases} \sum X = 0 \Rightarrow 0 = 0, \quad \sum M_{oy} = 0 \Rightarrow (N_1 - N_3)W = 0 \Rightarrow N_1 = N_3, \quad \sum M_{oz} = 0 \Rightarrow 0 = 0, \\ \sum Y = 0 \Rightarrow mg \sin \alpha - (Q_1 + Q_2 + F_{in}) \cos(\alpha + \beta) - m\omega^2 E + m\varepsilon \frac{H}{2} - f(N_1 + N_2 + N_3) = 0, \\ \sum Z = 0 \Rightarrow -mg \cos \alpha - (Q_1 + Q_2 + F_{in}) \sin(\alpha + \beta) - F_{np} + N_1 + N_2 + N_3 + m\omega^2 \frac{H}{2} + m\varepsilon E = 0, \\ \sum M_{ox} = 0 \Rightarrow (N_1 + N_3)c - N_2d + mgE \cos \alpha - mg \frac{H}{2} \sin \alpha + F_{in}E \sin(\alpha + \beta) + \\ + F_{in} \frac{H}{2} \cos(\alpha + \beta) + Q_1 \frac{A}{2} \cos(\alpha + \beta) - Q_1 \left(\frac{A}{2} - E \right) \sin(\alpha + \beta) + Q_2 H \cos(\alpha + \beta) + \\ + Q_2 E \sin(\alpha + \beta) - m\varepsilon R^2 = 0, \end{cases} \quad (1)$$

де F_{in} – сила інерції; F_{in}^n , F_{in}^τ – нормальна і тангенціальна складові сили інерції, що діють на вантаж під час переорієнтації; F_{np} – сила притягання СЗП; m – маса вантажу; Q_1 , Q_2 – складові сил лобового опору вантажу; mg – сила тяжіння; N_1 , N_2 , N_3 – нормальні реакції в точках контакту вантажу з ЗП; f – коефіцієнт тертя; c – відстань від центру СЗП до проекції N_1 та N_3 на Oy ; R – відстань між центром СЗП і центром мас вантажу; α – кут між напрямком руху вантажу і нормаллю до площини захоплення; β – кут нахилу траєкторії відносно глобальної системи координат XOY ; ω , ε – відповідно кутова швидкість та кутове прискорення центра мас вантажу під час переорієнтації; A , B , H – довжина, ширина та висота вантажу; d – відстань від центра СЗП до фрикційного елемента; E – відстань від центра СЗП до проекції центра мас C на вісь y ; W – відстань від центра СЗП до проекції N_1 та N_3 на Ox .

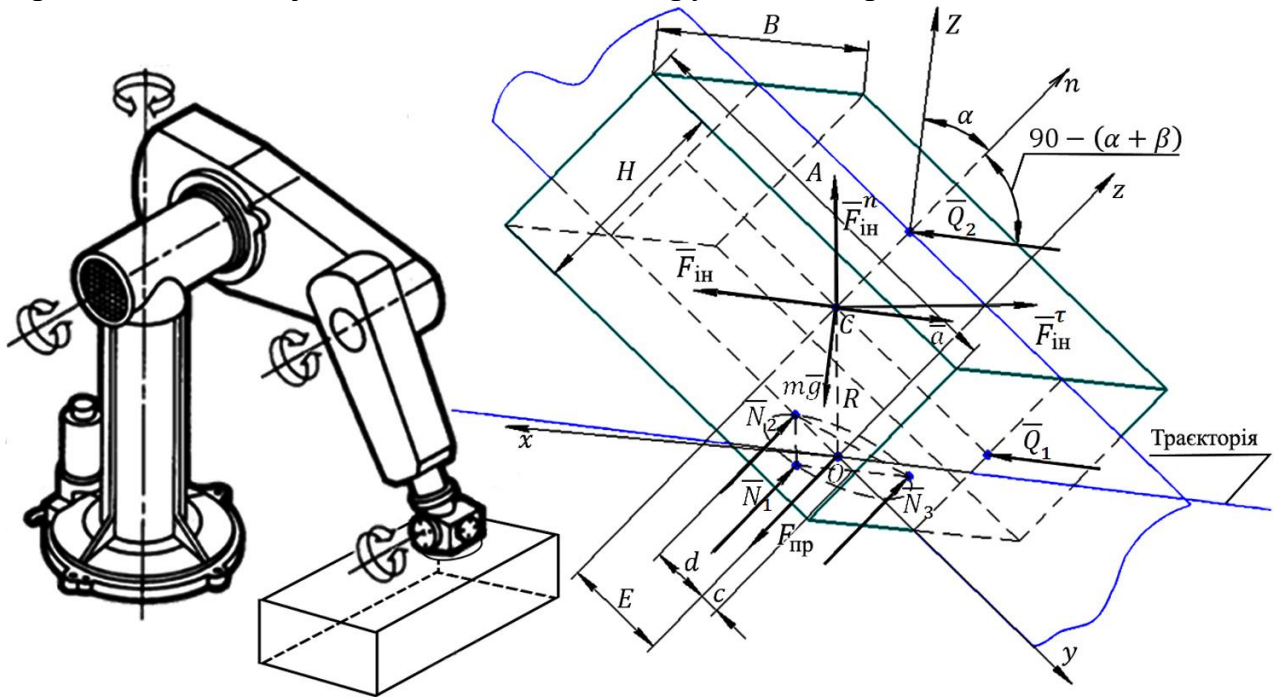


Рис. 2. Розрахункова схема сил, що діють на вантаж призматичної форми під час транспортування

Для габаритних вантажів необхідно враховувати силу лобового опору повітря. Для діапазону швидкостей від 0,1 до 3 м/с та габаритах вантажу від 0,05 до 0,5 м число Рейнольдса $Re=360 \dots 1 \cdot 10^5$. При таких числах Рейнольдса сила лобового опору, відповідно до праць Прандтля, пропорційна квадрату швидкості. Складові сил лобового опору Q_1 , Q_2 , що діють на різні площини вантажу призматичної форми, можна виразити за формулами:

$$Q_1 = \rho B H v^2 \frac{\pi \cos(\alpha + \beta)}{4 + \pi \cos(\alpha + \beta)}, \quad Q_2 = \rho A B v^2 \frac{\pi \sin(\alpha + \beta)}{4 + \pi \sin(\alpha + \beta)}, \quad (2)$$

де ρ – густина повітря; v – швидкість руху вантажу.

Для симуляції руху ЗП з вантажем та програмування промислового робота IRB 4600 компанії ABB використовувалось програмне забезпечення RobotStudio. Зведені результати симуляції показані на рис. 3.

Запропонований метод оптимізації орієнтації полягає в розділенні прямолінійної траєкторії T_1-T_6 на окремі відрізки: T_1-T_2 – розгін; $T_2'-T_3$ –

переорієнтація з попередньої орієнтації, яка була на відрізку T_1-T_2' , на орієнтацію, яка необхідна на відрізку T_3-T_4 ; T_3-T_4 – транспортування вантажу з сталою швидкістю; T_4-T_5' – переорієнтація з попередньої орієнтації, яка була на відрізку T_3-T_4 , на орієнтацію необхідну на відрізку $T_5'-T_6'$; T_5-T_6 – уповільнення. Згідно запропонованого методу безвідривне транспортування вантажу забезпечується на відрізках траєкторії: T_1-T_1' , $T_2'-T_3$, T_4-T_5' , $T_6'-T_6$ – лише за рахунок сили притягання СЗП; $T_1'-T_2'$, T_3-T_4 , $T_5'-T_6'$ – за рахунок сили інерції, пов'язаної з оптимальною орієнтацією СЗП. Оптимальна орієнтація СЗП забезпечується тоді, коли вісь ЗП направлена в протилежному напрямку до напрямку вектора рівнодійної всіх сил, що діють на вантаж.

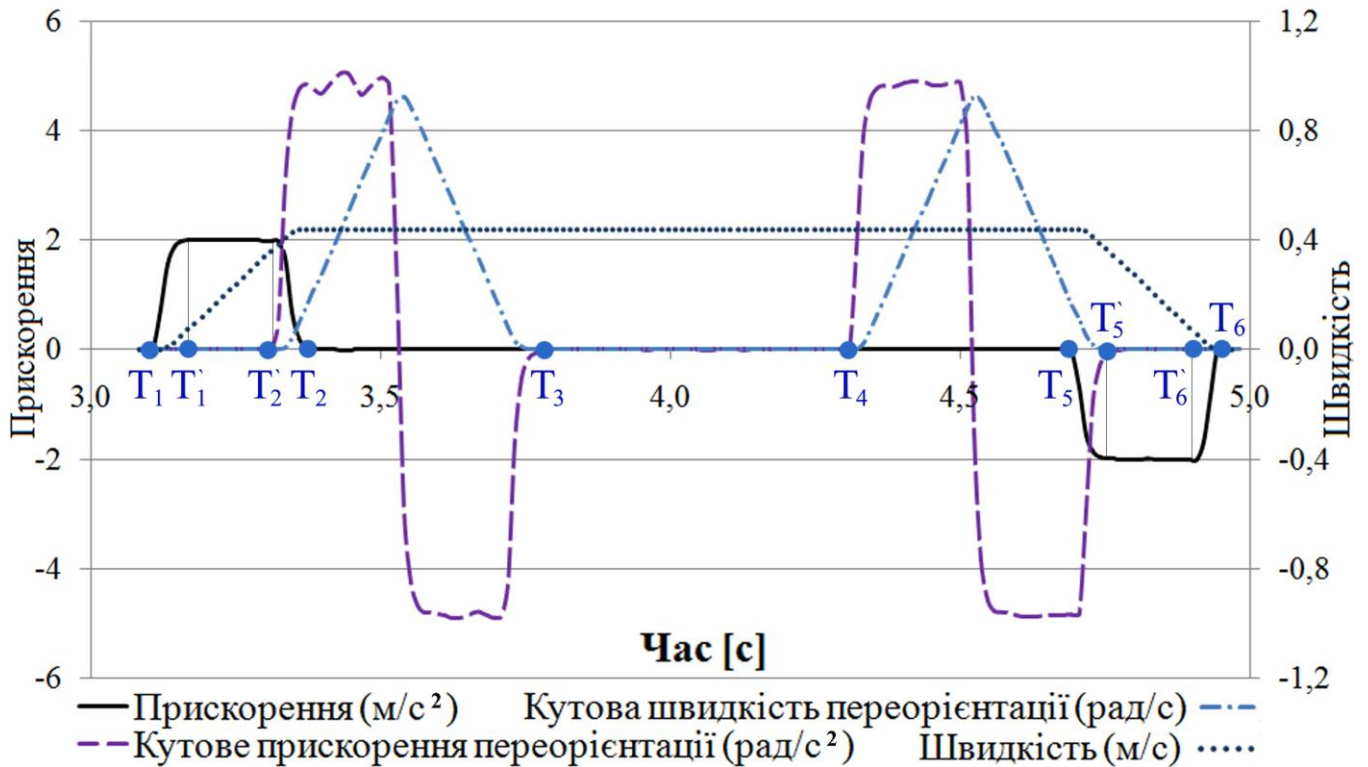


Рис. 3. Графіки зміни параметрів руху ЗП (довжина горизонтальної траєкторії 1,8м, максимальна швидкість 0,45м/с, прискорення (уповільнення) 2м/с², кутове прискорення (уповільнення) переорієнтації 5рад/с², $\beta=0$)

Для визначення оптимальної орієнтації (кут α) на відрізках $T_1'-T_2'$, T_3-T_4 , $T_5'-T_6'$, при якій сила притягання мінімальна, з умов рівноваги (1) визначено реакції N_1 і N_2 . Так як $N_2 > N_1$ з граничної умови $N_1 = N_3 = 0$ на основі (1) отримано трансцендентне рівняння для знаходження оптимального кута α , при якому забезпечується мінімальне енергоспоживання ЗП:

$$\begin{aligned}
 & m \left[\varepsilon \left(R^2 + \frac{Hd}{2f} \right) - \frac{d}{f} \omega^2 E \right] + m \left\{ \frac{d}{f} (g \sin(\alpha) - a \cos(\alpha + \beta)) - g \left(E \cos(\alpha) - \frac{H}{2} \sin(\alpha) \right) - \right. \\
 & \left. - a \left(E \sin(\alpha + \beta) + \frac{H}{2} \cos(\alpha + \beta) \right) \right\} - Q_1 \left[\left(\frac{d}{f} + \frac{A}{2} \right) \cos(\alpha + \beta) + \left(E - \frac{A}{2} \right) \sin(\alpha + \beta) \right] + \\
 & + Q_2 \left[\left(\frac{d}{f} + H \right) \cos(\alpha + \beta) + E \sin(\alpha + \beta) \right] = 0.
 \end{aligned} \quad (3)$$

Визначення оптимального кута α здійснювалось чисельним методом у програмному середовищі MathCAD.

Відповідно мінімальна сила F_{np} , яка необхідна для утримування вантажу під час транспортування за запропонованим методом дорівнює:

$$F_{np} = m \left[g \left(\frac{\sin(\alpha)}{f} - \cos(\alpha) \right) - \omega^2 \left(\frac{E}{f} - \frac{H}{2} \right) + \varepsilon \left(\frac{H}{2f} + E \right) \right] - (Q_1 + Q_2 + F_{in}) \left(\frac{\cos(\alpha + \beta)}{f} + \sin(\alpha + \beta) \right). \quad (4)$$

Розглянуто випадок транспортування вантажу по гвинтовій траєкторії (рис. 4). Закон руху центра мас вантажу по гвинтовій траєкторії має вигляд:

$$x = R \cdot \cos \gamma(t), \quad y = R \cdot \sin \gamma(t), \quad z = k \cdot \gamma(t), \quad (5)$$

де $\gamma(t)$ – функція часу, що характеризує взаємозв'язок між параметрами гвинтової траєкторії; R – радіус гвинтової траєкторії; $k = (z_{end} - z_0) / (\gamma_{end} - \gamma_0)$ – коефіцієнт пропорційності, який визначає величину вертикального переміщення вантажу; z_0 , z_{end} – вертикальні координати початку і кінця гвинтової траєкторії; γ_0 , γ_{end} – кутові координати початку і кінця гвинтової траєкторії.

Складові прискорення центра мас вантажу знаходимо за формулами:

$$\ddot{x} = -R \cos \gamma \cdot \omega^2 - R \sin \gamma \cdot \varepsilon, \quad \ddot{y} = -R \sin \gamma \cdot \omega^2 + R \cos \gamma \cdot \varepsilon, \quad \ddot{z} = k \varepsilon, \quad (6)$$

де $\omega = d\gamma/dt$, $\varepsilon = d^2\gamma/dt^2 = d\omega/dt$.

На першій ділянці траєкторії T_0-T_1 відбувається розгін вантажу ($0 \leq t \leq t_1$). Для забезпечення неперервності прискорення на цій ділянці прийнято:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \sin^3 \frac{\pi t}{t_1}; \quad \omega(t) = \frac{\varepsilon_0 t_1}{\pi} \left(\frac{2}{3} - \cos \frac{\pi t}{t_1} + \frac{1}{3} \cos^3 \frac{\pi t}{t_1} \right); \quad (7)$$

$$\gamma(t) = \frac{\varepsilon_0 t_1}{\pi} \left(\frac{2}{3} t - \frac{t_1}{3\pi} \sin \frac{\pi t}{t_1} \cdot \left(2 + \frac{1}{3} \sin^2 \frac{\pi t}{t_1} \right) \right).$$

В точці траєкторії T_1 для $t=t_1$ отримано

$$\varepsilon(t_1) = \varepsilon_1 = 0, \quad \omega(t_1) = \omega_1 = 4\varepsilon_0 t_1 / 3\pi, \quad \gamma(t_1) = \gamma_1 = 2\varepsilon_0 t_1^2 / 3\pi.$$

На другій ділянці траєкторії T_1-T_2 відбувається рівномірний рух вантажу за час $t_1 \leq t \leq t_2$. Для цієї ділянки прийнято:

$$\varepsilon(t) = 0, \quad \omega(t) = \omega_1 = 4\varepsilon_0 t_1 / 3\pi; \quad \gamma(t) = 2\varepsilon_0 t_1 / 3\pi (2t - t_1). \quad (8)$$

Уповільнення відбувається на третій ділянці траєкторії T_2-T_{end} за час $t_2 \leq t \leq t_{end}$.

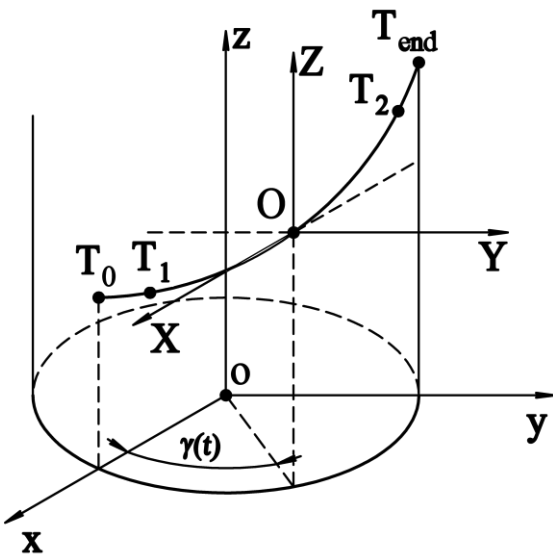


Рис. 4. Гвинтова траєкторія

Для цієї ділянки прийнято:

$$\varepsilon(t) = -\frac{\varepsilon_0 t_1}{t_{\text{end}} - t_2} \sin^3 \frac{\pi(t-t_2)}{t_{\text{end}} - t_2}; \quad \omega(t) = \frac{\varepsilon_0 t_1}{\pi} \left[\frac{2}{3} + \cos \frac{\pi(t-t_2)}{t_{\text{end}} - t_2} \left(1 - \frac{1}{3} \cos^2 \frac{\pi(t-t_2)}{t_{\text{end}} - t_2} \right) \right];$$

$$\gamma(t) = \frac{\varepsilon_0 t_1}{3\pi} \left[2(t+t_2-t_1) + \frac{t_{\text{end}}-t_2}{\pi} \sin \frac{\pi(t-t_2)}{t_{\text{end}} - t_2} \left(2 + \frac{1}{3} \sin^2 \frac{\pi(t-t_2)}{t_{\text{end}} - t_2} \right) \right]. \quad (9)$$

З умови $t=t_{\text{end}}$, $\gamma=\pi/2$ визначено $\varepsilon_0 = (3\pi^2)/(4t_1(t_{\text{end}} + t_2 - t_1))$.

Складові сили інерції $F_x^{\text{in}} = -m\ddot{x}$, $F_y^{\text{in}} = -m\ddot{y}$, $F_z^{\text{in}} = -m\ddot{z}$, визначались підстановкою значень ε , ω і γ для кожної з ділянок в рівняння (6).

Орієнтація захоплювального пристрою визначається напрямком вектора $\bar{n}$, який співпадає з віссю захоплювального пристрою (рис. 5).

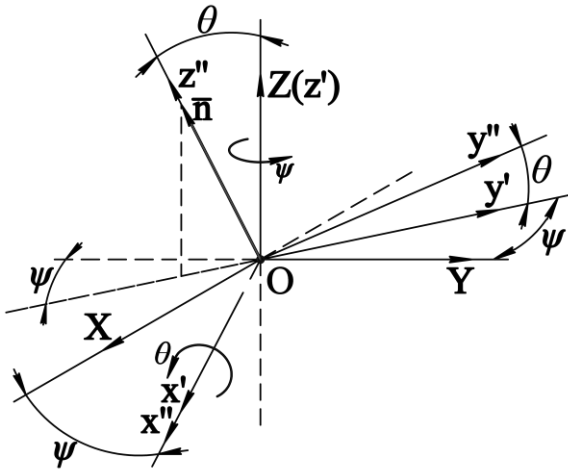


Рис. 5. Куты Ейлера для знаходження орієнтації вектора $\bar{n}$

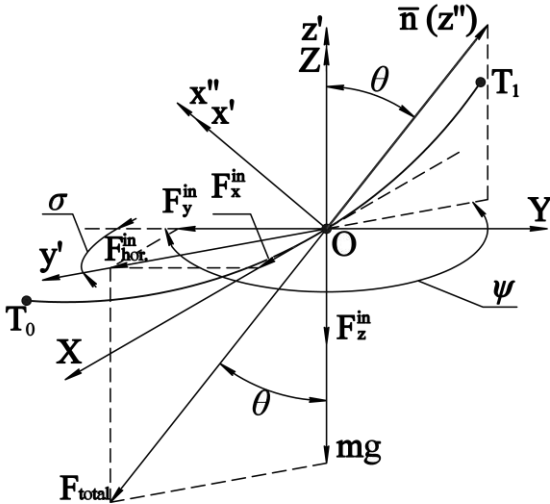


Рис. 6. Сили що діють на вантаж під час руху з прискоренням на ділянці траєкторії T_0-T_1

Цей напрямок можна визначити за допомогою двох кутів Ейлера: кута прецесії ψ і кута нутації θ . Кут власного обертання φ не впливає на орієнтацію вектора $\bar{n}$.

Кут прецесії ψ відраховується від осі OX до лінії вузлів Ox' , в яку перейде вісь OX після повороту системи координат навколо осі OZ на кут ψ (відраховується в напрямку проти стрілки годинника, якщо дивитися з додатного напрямку осі Z). Кут ψ рівний куту, що відраховується від від'ємної півосі Y до проекції нормалі $\bar{n}$ на площину XOY .

Кут нутації θ – це кут повороту навколо лінії вузлів Ox' . Його додатній напрямок відраховується проти стрілки годинника, якщо дивитися з додатного напрямку Ox' .

Оптимальна орієнтація СЗП буде забезпечена тоді, коли в кожен момент часу вісь ЗП буде направлена в протилежному напрямку до напрямку вектора рівнодійної сил інерції і сили тяжіння. Це пов'язано з тим, що сила притягання діє в напрямку протилежному до $\bar{n}$. Отже, за такої орієнтації роль сили притягання виконують сили інерції і сила тяжіння вантажу. Оптимальну орієнтацію для кожної з ділянок траєкторії знайдено з врахуванням сил, що діють на вантаж (рис. 6).

На ділянці розгону T_0-T_1 в площині XOY будуть діяти складові сили інерції F_x^{in} і F_y^{in} . Отже $\psi = \pi + \sigma$, де $\text{ctg}\sigma = -F_y^{in}/F_x^{in}$, $\sigma = \pi - \text{arccctg} F_y^{in}/F_x^{in}$. Таким чином

$$\psi = 2\pi - \text{arccctg} F_y^{in}/F_x^{in}. \quad (10)$$

Для знаходження θ необхідно, щоб проекція $\bar{n}$ на площину $y'Oz'$ була напрямлена в протилежному напрямку до напрямку результуючої сил, що діють на центр мас вантажу. На ділянці розгону в площині $y'Oz'$ будуть діяти F_{hor}^{in} і $F_z^{in} + mg = m(g + k\varepsilon(t))$, тому:

$$\theta = \text{arctg} \left(\sqrt{(F_x^{in})^2 + (F_y^{in})^2} / m(g + k\varepsilon(t)) \right). \quad (11)$$

Оскільки орієнтація точок контакту відносно локальної системи координат (XOY) не змінюється, то кут φ не буде змінювати свого значення.

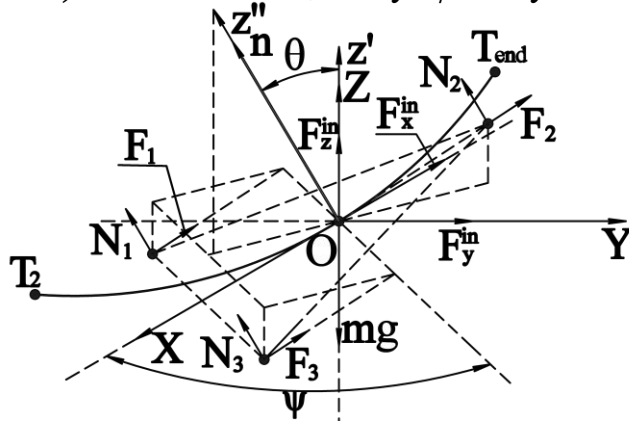


Рис. 7. Сили, що діють на вантаж на ділянці T_2-T_{end}

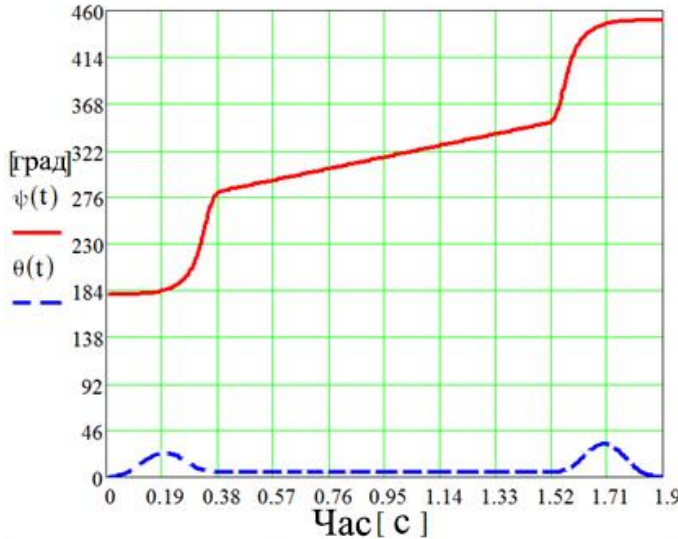


Рис. 8. Графіки зміни оптимальної орієнтації СЗП на відрізку гвинтової траєкторії T_0-T_{end}

кожен момент часу (рис. 8). Обчислення проведено для таких параметрів: $m=1\text{кг}$, $t_0=0$, $t_1=0,4\text{с}$, $t_2=1,5\text{с}$, $t_{\text{end}}=1,9\text{с}$, $z=0,5\text{м}$, $R=0,8\text{м}$.

Знаючи оптимальну орієнтацію в кожен момент часу, знайдено мінімальну необхідну силу притягання впродовж всього часу транспортування.

На другій ділянці, де рух рівномірний, оптимальну орієнтацію визначено аналогічно. Значення кута прецесії ψ на ділянці траєкторії T_1-T_2 змінюється в прямій залежності від $\gamma(t)$ і приймає значення $\psi=2\pi-\sigma$. Так як $\sigma=\pi/2-\gamma(t)$, то

$$\psi = 3\pi/2 + \gamma(t). \quad (12)$$

На цій ділянці траєкторії $\varepsilon(t)=0$, тоді кут нутації рівний:

$$\theta = \text{arctg} \left(\sqrt{(F_x^{in})^2 + (F_y^{in})^2} / mg \right). \quad (13)$$

Розглянуто третю ділянку траєкторії T_2-T_{end} – ділянку уповільнення (рис. 7). На цій ділянці кут ψ визначається з рівняння

$$\psi = 2\pi + \sigma,$$

$$\text{де } \text{tg}\sigma = -F_x^{in}/F_y^{in}, \sigma = -\text{arctg}(F_x^{in}/F_y^{in}).$$

Звідси:

$$\psi = 2\pi - \text{arccctg}(F_x^{in}/F_y^{in}). \quad (14)$$

Кут θ на третій ділянці визначається аналогічно як на першій за виразом (11).

Рівняння (10-14) дозволяють визначити оптимальну орієнтацію ЗП в

Для цього записано умови рівноваги вантажу утримуваного ЗП (рис. 7):

$$N_1 + N_2 + N_3 = N_{total}, F_1 + F_2 + F_3 = N_{total} f.$$

$$F_x = 0 \rightarrow N_{total} \sin \theta \sin \psi - N_{total} f \cos \theta \sin \psi - F_{np} \sin \theta \sin \psi - F_x^{in} = 0; \quad (15)$$

$$F_y = 0 \rightarrow N_{total} \sin \theta \cos \psi - N_{total} f \cos \theta \cos \psi - F_{np} \sin \theta \cos \psi - F_y^{in} = 0; \quad (16)$$

$$F_z = 0 \rightarrow -mg + N_{total} \cos \theta - N_{total} f \sin \theta - F_{np} \cos \theta + F_z^{in} = 0. \quad (17)$$

Провівши аналіз рівнянь (15-17), для знаходження мінімальної необхідної сили притягання прийнято умову $N_{total} \geq 0$, що забезпечить безвідривне транспортування вантажу. Рівняння (17) дозволяє знайти обмеження на мінімальну силу притягання для транспортування вантажу по гвинтовій траєкторії з оптимальною орієнтацією (рис. 9):

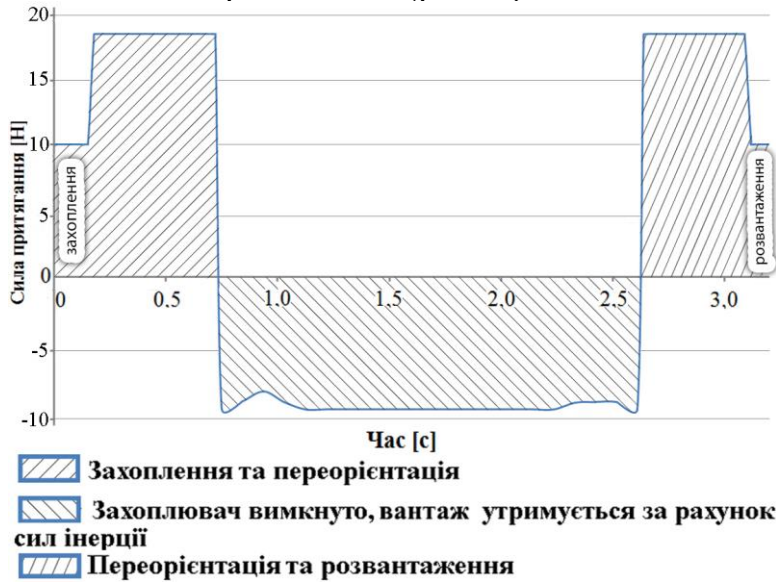


Рис. 9. Характер зміни мінімальної необхідної сили притягання при захопленні, переорієнтації, розвантаженні вантажу та руху на ділянці гвинтової траєкторії

$$F_{np} \geq \begin{cases} (-F_z^{in} - mg) / \cos \theta, & \text{якщо } 0 \leq t \leq t_1; \\ -mg / \cos \theta, & \text{якщо } t_1 \leq t \leq t_2; \\ (F_z^{in} - mg) / \cos \theta, & \text{якщо } t_2 \leq t \leq t_{end}. \end{cases} \quad (18)$$

Використовуючи метод оптимізації орієнтації СЗП для транспортування вантажу по гвинтовій траєкторії, можна не застосовувати силу притягання на цій ділянці. Це дозволило значно зменшити енергетичні затрати на

утримування вантажу струминним захоплювачем.

У третьому розділі “Експериментальні дослідження впливу параметрів транспортування на силові характеристики захоплювальних пристроїв” наведено методику експериментальних досліджень та їх статистичний аналіз.

Експериментальні дослідження проводили на базі «Національного центру робототехніки Словацької Республіки» в Словацькому технічному університеті в м. Братиславі. Функціональна схема експериментальної установки представлена на рис. 10.

Експериментальна установка містить промисловий робот 5 (модель IRB 4600), на кінцевій ланці якого через орієнтуючий подовжувач 6 закріплений струминний захоплювальний пристрій 7, що утримує вантаж 8. СЗП через пневмодросьель 2 під’єднаний до компресора 1. За допомогою персонального комп’ютера 4, на якому встановлене ліцензійне програмне забезпечення ABB RobotStudio, через контролер 3 проводиться програмування промислового робота. Для забезпечення безпеки і контролю проковзування вантажу типу «пластина» відносно осі захоплювача в

конструкцію орієнтуючого подовжувача кінцевої ланки робота додані захисні елементи 10. Також для фіксування відриву вантажу від фрикційних елементів захоплювача під час транспортування було спроектовано датчик відриву 9.

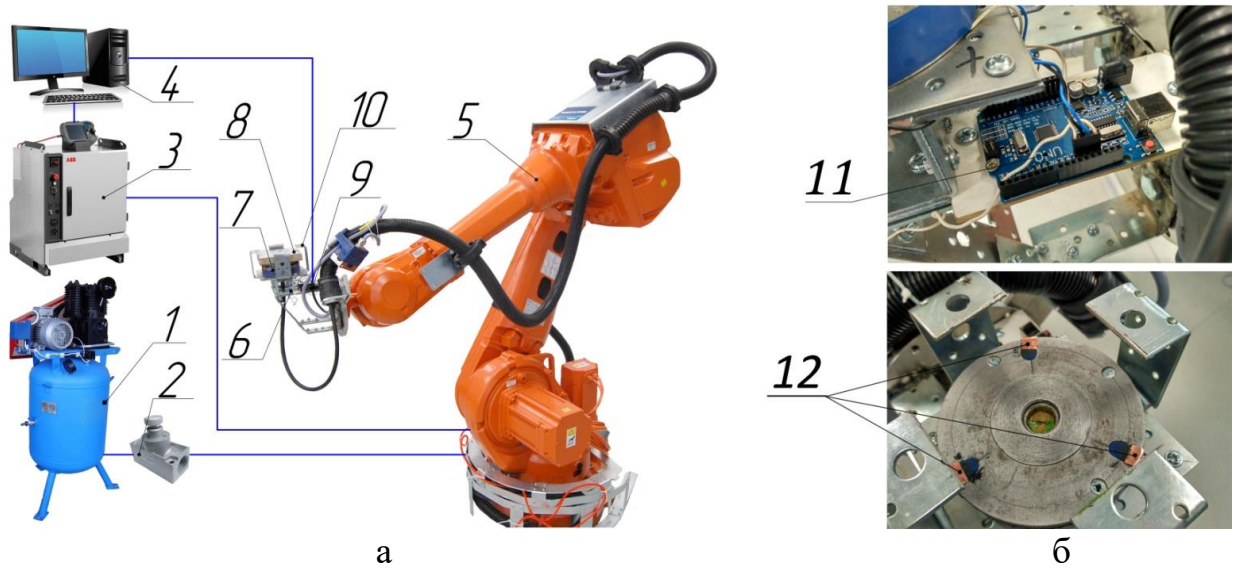


Рис. 10. Функціональна схема дослідної установки

Датчик відриву 9 побудований на основі контролера 11 (рис. 10,б) марки Arduino. Контролер запрограмований таким чином, щоб при відриві вантажу 8 від будь-якого з трьох контактів 12, передавати сигнал на ПК в режимі реального часу.

Для визначення мінімальної необхідної сили притягання залежно від зміни параметрів руху та параметрів СЗП проводили заміри сили притягання захоплювача за допомогою електронних ваг з точністю 0,05Н. Контролюючим елементом був датчик відриву вантажу від фрикційних елементів.

За результатами експериментальних досліджень отримана залежність мінімальної необхідної сили притягання від прискорення (рис. 11).

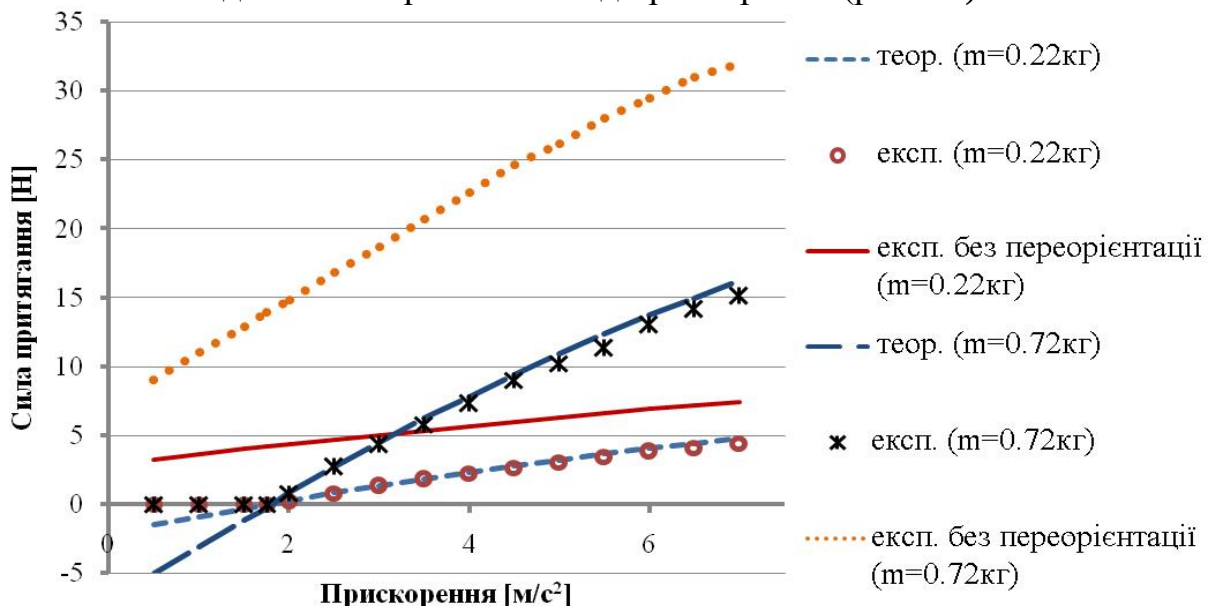


Рис. 11. Графіки залежності мінімальної необхідної сили притягання від прискорення ($A=0,11\text{м}$; $B=0,11\text{м}$; $H=0,02\text{м}$; $E=0$; $d=0,04\text{м}$; $c=0,02\text{м}$; $\rho=1,25\text{кг/м}^3$; $\beta=0$; $f=0,185$)

Отримані експериментальні результати підтверджують достовірність математичної моделі. Залежності на рис. 11 вказують на величину зменшення мінімальної необхідної сили притягання внаслідок застосування моделі оптимізації орієнтації порівняно з транспортуванням без переорієнтації вантажу. Характер впливу прискорення вантажу на мінімальну необхідну силу притягання близький до лінійного і є найістотнішим серед інших факторів. Статистичний аналіз з використанням t-критерію Стюдента показав, що коефіцієнт детермінації між теоретичними і експериментальними даними за варіюванням значеннями прискорення і швидкості становить 0,9991, відносна похибка значень 2,63%.

Перевірку достовірності математичної моделі динамічної взаємодії вантажу і ЗП при транспортуванні по гвинтовій траєкторії проведено із знаходженням необхідної сили притягання при транспортуванні без зміни орієнтації захоплювача (рис. 12). Це пов'язано з тим, що при русі по гвинтовій траєкторії вантаж притискується до базуючих елементів ЗП за рахунок відцентрових сил.

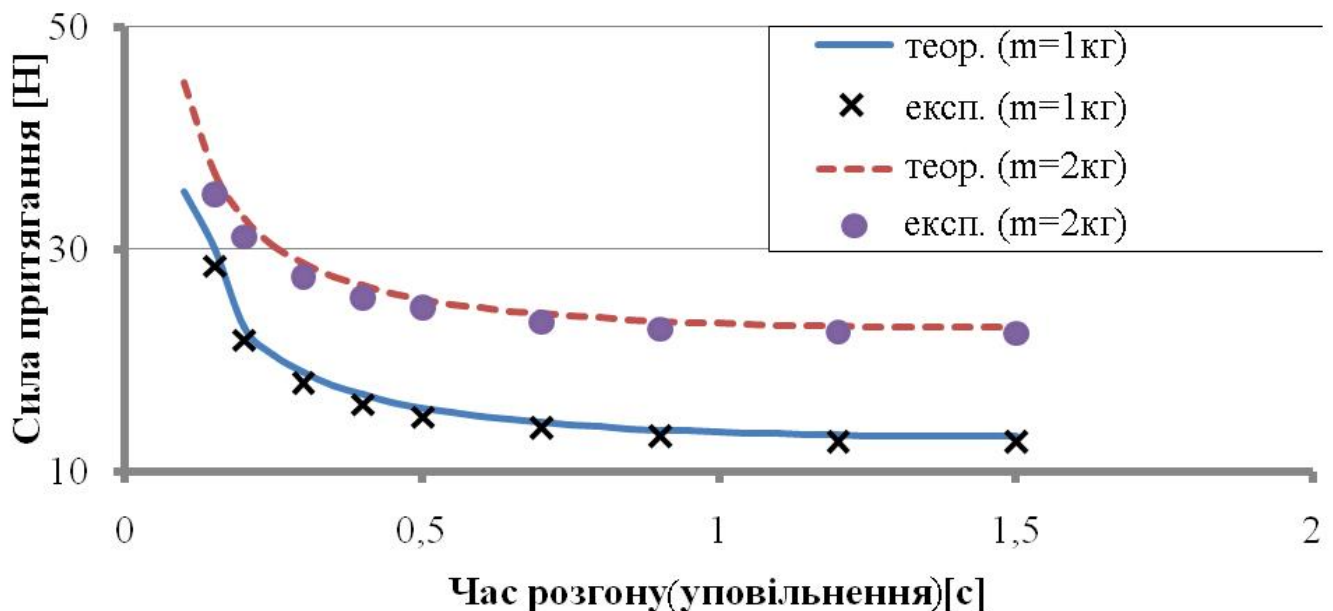


Рис. 12. Графіки залежності необхідної сили притягання від зміни часу розгону (уповільнення) ($t_0=0$; $t_{end}=3$ с; $z=0,5$ м; $R=1$ м)

Статистичний аналіз експериментальних даних з використанням t-критерію Стюдента показав, що коефіцієнт детермінації між теоретичними і експериментальними даними за аналізованого часу розгону і висотою підйому вантажу становить 0,95, відносна похибка значень 4,56%.

У четвертому розділі **“Дослідження енергоефективності вантажно-розвантажувальних операцій на базі струминних захоплювальних пристроїв”** проведено аналіз впливу масо-габаритних характеристик вантажу, параметрів руху та параметрів фрикційних елементів на силові характеристики та енергоспоживання струминних захоплювачів.

Оцінено вплив коефіцієнта тертя вантажу до фрикційних елементів ЗП на мінімальну необхідну силу притягання (рис. 13).

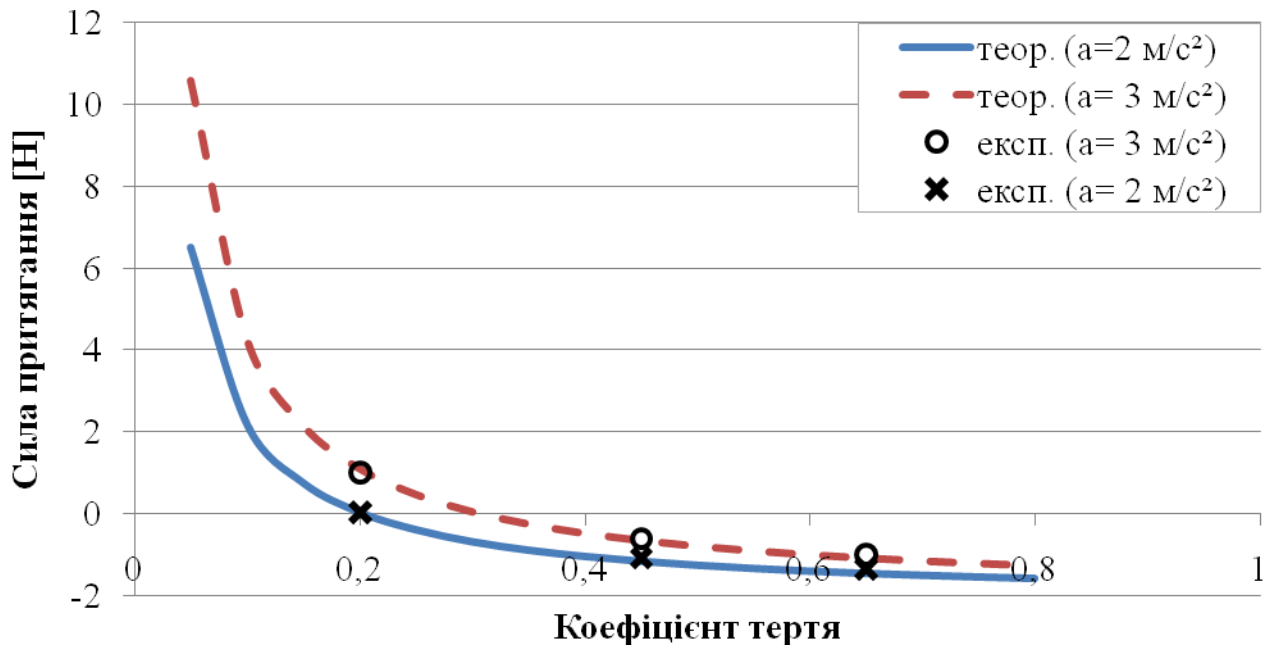


Рис. 13. Графіки характеру впливу коефіцієнта тертя вантажу до фрикційних елементів ЗП на мінімальну необхідну силу притягання

Результати досліджень впливу маси і зміщення центра мас вантажу на мінімальну необхідну силу притягання захоплювача при транспортуванні вантажів по прямолінійній траєкторії узагальнено на рис. 14. Дослідження проведено за таких параметрів: $A=0,11\text{м}$, $B=0,11\text{м}$, $H=0,02\text{м}$, $v=0,64\text{м/с}$, $d=0,04\text{м}$, $c=0,02\text{м}$, $\rho=1,25\text{кг/м}^3$, $\beta=0$, $E=0$, $m=0,22\text{кг}$, $\omega=0$, $\varepsilon=0$, $f=0,44$, $a=2\text{м/с}^2$.

Для гвинтової траєкторії, досліджено вплив висоти підйому вантажу і радіуса траєкторії на мінімальну необхідну силу притягання.

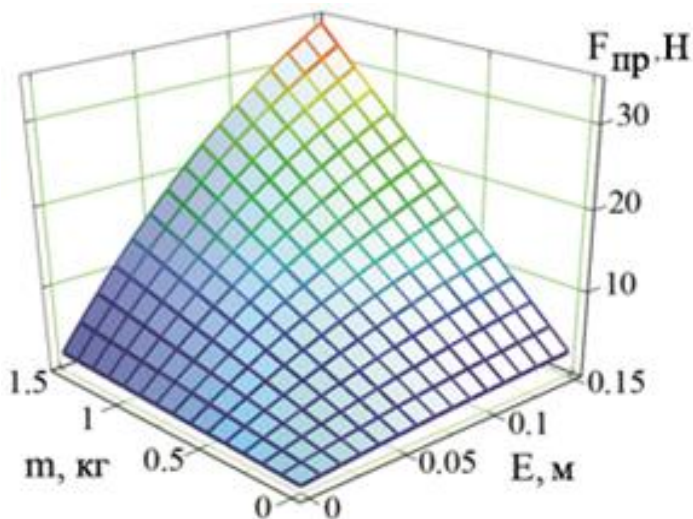


Рис. 14. Графік впливу маси m і зміщення центра мас вантажу E на мінімальну необхідну силу притягання ЗП $F_{пр}$

без переорієнтації, що в абсолютних одиницях становить 100...2700Дж за одну вантажно-розвантажувальну операцію.

Змодельовано та проведено порівняння транспортування вантажу з використанням методу оптимізації орієнтації та без переорієнтації для різних методів захоплення вантажу (рис. 15).

Аналіз затрат енергії на транспортування вантажу, для різних схем вантажно-розвантажувальних операцій, показав, що найменші затрати енергії відповідають способу захоплення за нижню горизонтальну площину.

Використання методу оптимізації орієнтації ЗП дозволило знизити енергетичні затрати на 15-54% порівняно з транспортуванням

Встановлено, що зростання ефективності використання методу оптимізації орієнтації ЗП відповідає зростанню маси та прискорення вантажу при виконанні вантажно-розвантажувальних операцій.

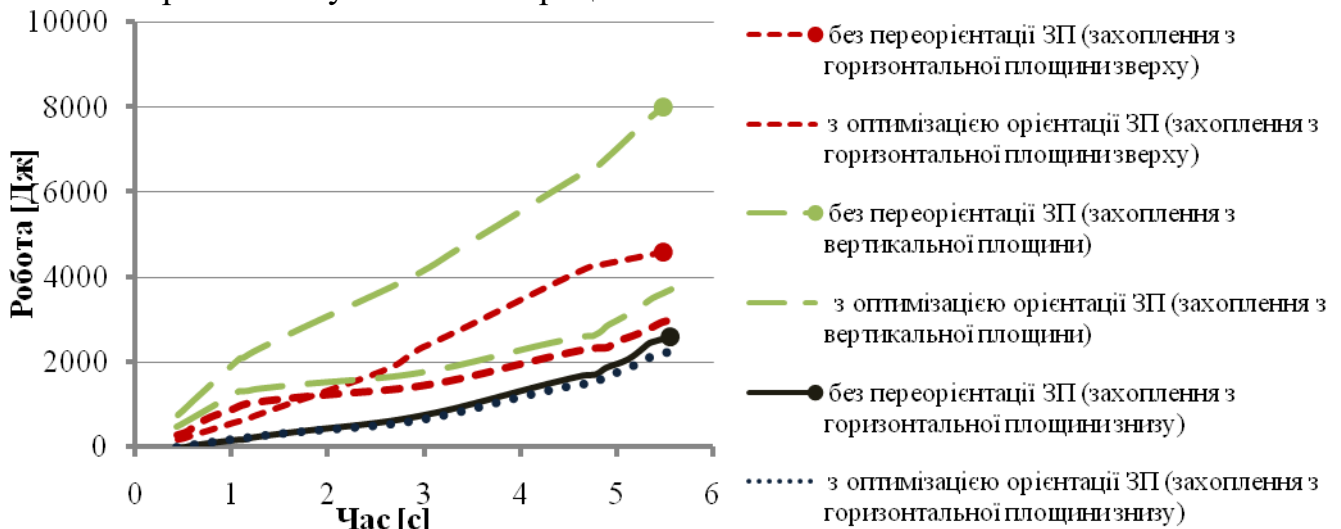


Рис. 15. Графіки зміни сумарної затраченої енергії на транспортування вантажу для різних схем вантажно-розвантажувальних операцій

Проведений аналіз ефективності впровадження методу оптимізації орієнтації СЗП при транспортуванні вантажів по гвинтовій траєкторії (рис. 16).

Використання запропонованого методу моделювання орієнтації дозволяє знизити енергетичні затрати на транспортування вантажу на 41% (797Дж), порівняно з транспортуванням без переорієнтації.

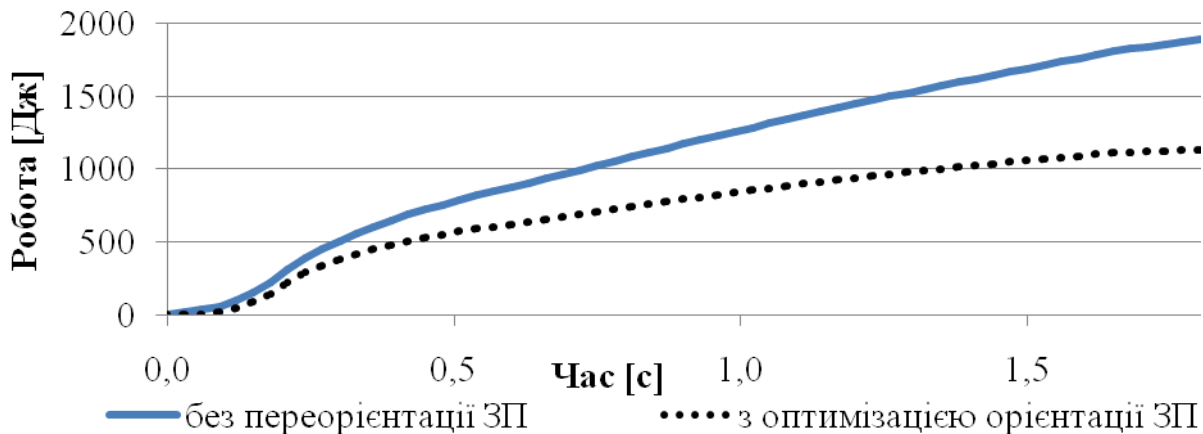


Рис. 16. Графіки зміни сумарного енергоспоживання СЗП і промислового робота

У п'ятому розділі **“Методи підвищення вантажопідймальності пневматичних захоплювальних пристроїв та забезпечення стабільності утримування вантажу”** запропоновано нові конструкції пневматичних ЗП, що забезпечують стабільність утримування вантажу із зміщеним центром мас.

Теоретичними та експериментальними дослідженнями встановлено, що стабільне утримування вантажів залежить від взаємного розміщення фрикційних елементів ЗП та координат центру мас вантажу. Одним із методів підвищення стабільності утримування вантажу є використання в конструкції СЗП виносних фрикційних елементів із можливістю регулювання їх взаємного положення.

Інший метод забезпечення стабільного положення вантажів у процесі транспортування, з використанням безконтактного методу утримування, полягає у створенні кількох зон взаємодії між СЗП і площиною вантажу та максимального їх розсосередження. Для цього запропоновано раціональні конструкції струминно-вакуумного та струминних захоплювальних пристроїв для утримування вантажів за плоску чи циліндричну поверхню. Для струминно-вакуумного захоплювача обґрунтовано конструктивні параметри жорсткого присосу, що підвищило його піднімальну здатність та знизило витрати стисненого повітря.

Як приклад, на рис. 17 представлено конструктивну схему безконтактного СЗП, призначеного для захоплення циліндричних вантажів з лотка-ската.

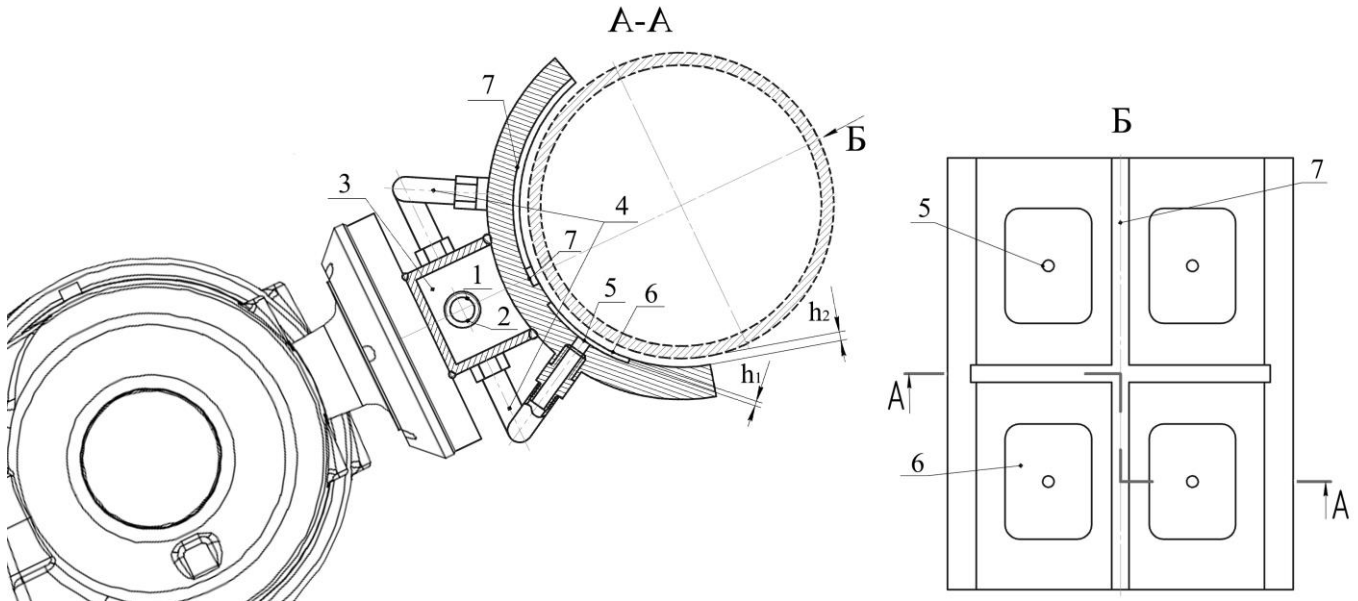


Рис. 17. Безконтактний струминний захоплювальний пристрій

СЗП працює наступним чином: стиснуте повітря від пневмомагістралі через штуцер 1 і отвір 2 надходить в робочу камеру 3. Далі стиснуте повітря по трубках 4 надходить в чотири сопла і витікає в проміжок між циліндричними поверхнями СЗП та вантажу. При цьому стиснуте повітря, що витікає із чотирьох сопел 5, розсосереджує зони взаємодії захоплювача і вантажу. При $h_2 > 0,2$ мм витікаючі із сопел потоки повітря притягують вантаж. При зменшенні відстані до $h_2 < 0,08$ мм, в зонах, що відповідають заглибленням 6, утворюються пневматичні подушки. Поздовжній і поперечний пази 7 призначені для унеможливлення взаємного впливу потоків повітря, що витікають із сопел 5. Для запобігання зміщення вантажу вздовж власної осі необхідно використовувати бічні упори (на схемі не показані).

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язано важливі наукові задачі оптимізації орієнтації кінцевої ланки маніпулятора та розсосередження зон взаємодії захоплювального пристрою з поверхнею вантажу з метою зниження енергоспоживання струминним захоплювачем та підвищення стабільності утримування ним вантажів.

Отримані наступні основні результати:

1. Проаналізовано конструкції утримуючих і підтримуючих захоплювальних пристроїв та методи планування траєкторій при виконанні маніпуляторами

вантажно-розвантажувальних операцій, що дало можливість визначити умови стабільного утримування вантажу.

2. Запропоновано математичну модель динамічної взаємодії захоплювального пристрою з вантажем при його транспортуванні по прямолінійній траєкторії, що враховує зміщення центра мас вантажу і вплив сили лобового опору повітря, та дає можливість визначити оптимальну орієнтацію захоплювача для зниження мінімально необхідної сили утримування до 45%.

3. Запропоновано математичну модель динамічної взаємодії захоплювального пристрою з вантажем при його транспортуванні по гвинтовій траєкторії, що враховує відцентрові сили та дає можливість визначити оптимальну орієнтацію захоплювача для мінімізації його енергоспоживання. Для заданих параметрів гвинтової траєкторії, оптимізація орієнтації захоплювача у процесі транспортування вантажу дозволить знизити енергетичні затрати до 41%.

4. Одержано залежності впливу маси і зміщення центра мас вантажу на мінімальну необхідну силу його утримування. При зміщенні центру мас до 0,15м для вантажів масою від 0,5кг до 1,5кг необхідна сила утримування збільшиться у 15...32 рази. Встановлено основні закономірності впливу параметрів базуючих елементів струминного захоплювального пристрою та параметрів руху на мінімальну необхідну силу утримування вантажу. При збільшенні коефіцієнта тертя між поверхнями захоплювального пристрою та вантажу від 0,05 до 0,2 необхідна сила утримування зменшиться на 90%.

5. Проведено експериментальні дослідження процесу транспортування з використанням запропонованого методу оптимізації орієнтації захоплювального пристрою. Статистичний аналіз з використанням t-критерію Стюдента довів, що коефіцієнт детермінації між теоретичними і експериментальними даними при варіюванні значеннями прискорення і швидкості для прямолінійної траєкторії складає 0,9991, відносна похибка значень 2,63%, а для гвинтової при варіюванні часом розгону і висотою підйому вантажу становить 0,95, відносна похибка значень 4,56%.

6. Досліджено енергоефективність процесу транспортування вантажу з використанням струминних захоплювальних пристроїв. Використання методу оптимізації орієнтації захоплювального пристрою при транспортуванні вантажів по заданій траєкторії дозволило знизити енергетичні затрати на 15-54%, залежно від схеми вантажно-розвантажувальної операції.

7. Розроблено рекомендації по застосуванню методу оптимізації орієнтації струминного захоплювача та розрахунку його конструктивних параметрів. Запропоновано конструктивні схеми пневматичних захоплювальних пристроїв утримуючого та підтримуючого типів, які забезпечують підвищену вантажопідіймальність та стабільність утримування вантажу. Результати роботи впроваджені на ПАТ «Булат», річний економічний ефект становить 26355 грн.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Михайлишин Р. І. Optimization of bernoulli gripping device's orientation under the process of manipulations along direct trajectory / Р.І. Михайлишин, Я. І. Проць, В.Б. Савків // Вісник ТНТУ. – Тернопіль, 2016. – Том 81. – №1. – С. 107 – 117. *(Автором запропонований метод оптимізації орієнтації струминних*

захоплювальних пристроїв в процесі транспортування вантажу по прямій траєкторії).

2. Михайлишин Р. І. Аналіз методів планування траєкторій маніпуляторів / Р.І. Михайлишин, В.Б. Савків // Збірник наукових праць «Перспективні технології та прилади» Луцький НТУ. – Луцьк, 2016. – №8 (1). – С. 61 – 69. *(Автором узагальнено методи планування траєкторії маніпуляторів, наведено їх класифікацію, проаналізовано переваги і недоліки різних методів).*

3. Justification of the object of manipulation parameters influence on the optimal orientation and lifting characteristics of Bernoulli gripping device / В.Б. Савків, Р.І. Михайлишин, Ф. Духон, М.С. Михайлишин // Вісник Херсонського національного технічного університету. – Херсон, 2017. – № 2 (61). – С. 98 – 104. *(Автором досліджено вплив масо-габаритних характеристик вантажу на необхідну вантажопідіймальність струминного захоплювального пристрою та його оптимальну орієнтацію).*

4. Orientation Modeling of Bernoulli Gripper Device with Off-Centered Masses of the Manipulating Object / V. Savkiv, R. Mykhailyshyn, O. Fendo, M. Mykhailyshyn // Procedia Engineering. – 2017. – № 187. – P. 264 – 271. – DOI: 10.1016/j.proeng.2017.04.374 *(Автором запропоновано математичну модель динамічної взаємодії струминного захоплювального пристрою з вантажем із зміщеним центром мас при його транспортуванні по прямолінійній траєкторії).*

5. Justification of Design and Parameters of Bernoulli-Vacuum Gripping Device [Electronic resource] / V. Savkiv, R. Mykhailyshyn, F. Duchon, O. Fendo // International Journal of Advanced Robotic Systems. – 2017. – DOI: 1729881417741740. – Mode of access: World Wide Web: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1729881417741740>. *(Автором запропоновано конструктивну схему струминно-вакуумного захоплювального пристрою та проведено розрахунок його силових характеристик).*

6. Experimental Research of the Manipulation Process by the Objects Using Bernoulli Gripping Devices / R. Mykhailyshyn, V. Savkiv, M. Mikhalishin, F. Duchon // In Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering, International IEEE Conference. – 2017. – P. 8 – 11. – DOI: 10.1109/YSF.2017.8126583 *(Автором проведено планування експериментальних досліджень та здійснено статистичну обробку отриманих експериментальних даних).*

7. Pod hlavičkou Národného centra robotiky pracujú už aj odborníci zo zahraničia / F. Duchon, L. Chovanec, R. Mykhailyshyn, V. Savkiv // ATP journal. – 2017. – №3. – P. 54 – 55. *(Автором наведені результати експериментальних досліджень силових характеристик струминного захоплювального пристрою).*

8. Пат. 119726 Україна, МПК В25J 15/00. Струминний захоплювальний пристрій / Савків В.Б., Михалишин Р.І.; заявник і патентотримувач Тернопільський нац. тех. ун-т. імені Івана Пулюя. – № U201702403; заявл. 15.03.2017; опубл. 10.10.2017, Бюл. № 19. *(Автором запропоновано конструкцію струминного захоплювального пристрою, що забезпечує стабільне положення вантажу).*

9. Пат. 119819 Україна, МПК В25J 15/00. Безконтактний струминний захоплювальний пристрій / Савків В.Б., Михалишин Р.І.; заявник і патентотримувач Тернопільський нац. тех. ун-т. імені Івана Пулюя. – № U201703755; заявл. 18.04.2017; опубл. 10.10.2017, Бюл. № 19. *(Автором запропоновано конструкцію безконтактного струминного захоплювального пристрою, що забезпечує стабільне положення вантажу).*

10. Михайлишин Р.І. Кінематичний розрахунок траєкторій маніпуляторів /

Р.І. Михайлишин, Я.І. Проць, В.Б. Савків // Збірник тез доповідей IV Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів: 25 – 26 листопада 2015 р.: тези доп. – Тернопіль, 2015. – С. 189 – 190. *(Автором проведений кінематичний аналіз прямолінійної траєкторії маніпуляторів та визначений мінімальний час виконання транспортної операції).*

11. Михайлишин Р.І. Методи планування траєкторій маніпуляторів / Р.І. Михайлишин, В.Б. Савків, Я.І. Проць // Збірник тез доповідей 7-мої Міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування»: 22 – 23 вересня 2016 р.: тези доп. – Херсонська державна морська академія, 2016. – С. 104 – 105. *(Автором проведений аналіз методів планування траєкторії маніпулятора та визначено вплив режимів транспортування на потужність його двигунів).*

12. Савків В.Б. Розробка алгоритму забезпечення програмної орієнтації струминного захоплювального пристрою в процесі маніпулювання по прямій траєкторії / В.Б. Савків, Р.І. Михайлишин, Я.І. Проць // Матеріали XIX наукової конференції Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя: 18 – 19 травня 2016 р.: тези доп. – Тернопіль, 2016. – С. 71 – 72. *(Автором запропонований алгоритм забезпечення програмної орієнтації кінцевої ланки маніпулятора в середовищі RobotStudio).*

13. Михайлишин Р. Аналіз впливу параметрів базуючих елементів струминного захоплювального пристрою на його вантажопідймальність / Р. Михайлишин // Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки і приладобудування. Матеріали III Всеукраїнської науково-технічної конференції: 09 – 10 червня 2017 р.: тези доп. – Тернопіль: ФОП Паляниця ВА, 2017. – С. 164 – 166.

14. Михайлишин Р.І. Аналіз енергоефективності процесу маніпулювання об'єктами виробництва з використанням струминних захоплювальних пристроїв / Р.І. Михайлишин, В.Б. Савків, М.С. Михайлишин // XX наукова конференція Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя: 18 – 19 травня 2017 р.: тези доп. – ТНТУ, 2017. – С. 39 – 40. *(Автором досліджено вплив маси, площі та зміщення центру мас вантажу на енергоефективність застосування методу оптимізації орієнтації).*

15. Аналіз впливу масо-габаритних параметрів об'єктів маніпулювання на необхідну вантажопідймальність струминних захоплювальних пристроїв / Р. Михайлишин, В. Савків, Ф. Duchon, М. Михайлишин // Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки і приладобудування. Матеріали III Всеукраїнської науково-технічної конференції: 09 – 10 червня 2017 р.: тези доп. – Тернопіль: ФОП Паляниця ВА, 2017. – С. 167 – 169. *(Автором досліджено вплив параметрів об'єкта маніпулювання та параметрів руху на мінімальну необхідну силу притягання струминного захоплювального пристрою).*

16. Михайлишин Р.І. Визначення силових характеристик захоплювальних пристроїв при транспортуванні об'єктів по дуговій траєкторії / Р.І. Михайлишин, В.Б. Савків, І.Р. Козбур // Транспорт: механічна інженерія, експлуатація, матеріалознавство. Міжнародна науково-технічна конференція: 25 – 26 листопада 2015 р.: тези доп. – Херсон: Херсонська державна морська академія, 2017. – С. 45 – 46. *(Автором запропоновано математичну модель динамічної взаємодії струминного захоплювального пристрою з вантажем при його транспортуванні по дуговій траєкторії).*

АНОТАЦІЯ

Михайлишин Р.І. Обґрунтування параметрів та орієнтації струминного захоплювача маніпулятора для автоматизації вантажно-розвантажувальних операцій. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.05 «Піднімально-транспортні машини». – Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Тернопіль, 2018.

Дисертація присвячена моделюванню та оптимізації орієнтації струминних захоплювальних пристроїв в процесі виконання маніпулятором вантажно-розвантажувальних операцій.

Розроблено математичні моделі динамічної взаємодії струминного захоплювального пристрою з вантажем при його транспортуванні по прямолінійній або гвинтовій траєкторії. Визначено оптимальну орієнтацію захоплювального пристрою, що забезпечить йому мінімальне енергоспоживання.

Досліджено вплив масо-габаритних параметрів вантажу та параметрів руху на силові характеристики струминного захоплювача. Досліджено енергоефективність процесу транспортування вантажу з використанням струминних захоплювальних пристроїв для різних схем вантажно-розвантажувальної операції. Запропоновано конструктивні схеми пневматичних захоплювальних пристроїв утримуючого та підтримуючого типів, які забезпечують підвищену вантажопідймальність та стабільність утримування вантажу.

Ключові слова: струминний захоплювальний пристрій, маніпулятор, орієнтація, вантаж, транспортування, вантажно-розвантажувальна операція, сила притягання, енергоефективність.

АННОТАЦИЯ

Михайлишин Р.И. Обоснование параметров и ориентации струйного захвата манипулятора для автоматизации погрузочно-разгрузочных операций. - Квалификационный научный труд на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.05.05 «Подъемно-транспортные машины». - Тернопольский национальный технический университет имени Ивана Пулюя, Тернополь, 2018.

Диссертация посвящена моделированию и оптимизации ориентации струйных захватных устройств в процессе выполнения манипулятором погрузочно-разгрузочных операций.

Разработано математические модели динамического взаимодействия струйного захватного устройства с грузом при его транспортировке по прямолинейной или винтовой траектории. Определено оптимальную ориентацию захватного устройства, что обеспечит ему минимальное энергопотребление.

Исследовано влияние массо-габаритных параметров груза и параметров движения на силовые характеристики струйного захвата. Исследована энергоэффективность процесса транспортировки груза с использованием струйных

захватных устройств для разных схем погрузочно-разгрузочных операций. Предложены конструктивные схемы пневматических захватных устройств удерживающего и поддерживающего типов, которые обеспечивают повышенную грузоподъемность и стабильность удержания груза.

Ключевые слова: струйное захватное устройство, манипулятор, ориентация, груз, транспортирование, погрузочно-разгрузочная операция, сила притяжения, энергоэффективность.

SUMMARY

Mykhailyshyn R.I. Justification of the parameters and orientation Bernoulli gripping device of the manipulator for the automation of handling operations. - The qualification scientific work on the manuscript copyright.

Ph.D. thesis in Engineering Science with major in 05.05.05 "Lifting-and-Transport Vehicles". – Ternopil Ivan Pul'uj National Technical University, Ternopil, 2018.

The dissertation is devoted to the modeling of dynamic interaction of gripping devices and cargo during transportation.

The mathematical model of the dynamic interaction of the Bernoulli gripping device with the cargo during its transportation along the linear and arc trajectory was developed, the optimal orientation was determined, which provide the minimum energy consumption of the gripping device during transportation.

The influence of mass-dimensional parameters of the cargo and parameters of motion on the minimum necessary force of attraction during transportation was investigated. The energy efficiency of the manipulating cargo process with the use of Bernoulli gripping devices was investigated.

The method of optimizing the orientation of Bernoulli gripping devices in the process of manipulation is proposed, which minimizes the energy costs of cargo holding. The energy efficiency of the manipulating cargo process with the use of Bernoulli gripping devices is investigated. For a straight-line trajectory, using the orientation modeling method will reduce energy costs by 15-52% depending on the capture method, and for the arc trajectory 41%.

The dependence of the displacement of the center of mass and mass of the cargo on the minimum lifting force of Bernoulli grippers was obtained. Experimental investigations of the transportation process with the use of previously developed methods for optimization of the orientation of the gripping device were carried out. Statistical analysis showed that the determination coefficient between theoretical and experimental data, with variations in the values of acceleration and speed, is 0.95, the relative error of 4.65%.

The design schemes of the pneumatic gripping devices of the holding and supporting types were improved, which would provide increased handling carrying capacity and reliability of the cargo holding.

Key words: Bernoulli gripping device, manipulator, orientation, cargo, transportation, lifting-and-transport operation, lifting force, energy efficiency.