

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

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Михайлишин Роман Ігорович

УДК 621.865.8

ДИСЕРТАЦІЯ

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

05.05.05 – піднімально-транспортні машини

13 – механічна інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора
філософії)

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ Р. І. Михайлишин

Науковий керівник:

Савків Володимир Богданович,

кандидат технічних наук, доцент

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 (доктора філософії) за спеціальністю 05.05.05 «Піднімально-транспортні машини». – Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Тернопіль, 2018.

Сучасний стан розвитку засобів автоматизації передбачає використання промислових роботів як для виконання основних (технологічних) так і додаткових (вантажно-розвантажувальних, транспортних і складських) операцій. Роботизація виробничих процесів дозволяє покращити якість продукції та зниження її собівартості, а також звільнення робітників від важкої, монотонної праці та шкідливих умов виробництва. Проте впровадження сучасних засобів автоматизації вантажно-розвантажувальних операцій призводить до зростання енерговитрат підприємства, до виснаження природних ресурсів та погіршення екології. Тому завдання енергоефективної 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 зниження загального енергоспоживання на виробництві.

Проведено аналіз конструкцій захоплювальних пристроїв та методів планування траєкторій транспортування вантажів маніпуляторами з метою забезпечення стабільності їх утримування при різних параметрах руху.

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

Дисертація присвячена дослідженню динамічної взаємодії струминних захоплювальних пристроїв і вантажу під час виконання вантажно-розвантажувальних операцій.

Розроблено математичну модель динамічної взаємодії струминного захоплювального пристрою з вантажем при його транспортуванні по прямолінійній і гвинтовій траєкторії, визначено оптимальну орієнтацію, що забезпечить мінімальне енергоспоживання струминного захоплювального пристрою під час виконання вантажно-розвантажувальних операцій.

Досліджено вплив масо-габаритних характеристик вантажу, параметрів базуючих елементів струминних захоплювальних пристроїв та режимів руху на мінімальну необхідну силу утримування вантажу під час виконання вантажно-розвантажувальних операцій.

Проведено експериментальні дослідження процесу транспортування з метою перевірки достовірності розроблених моделей та методу оптимізації орієнтації захоплювального пристрою. Статистичний аналіз показав, що коефіцієнт детермінації між теоретичними і експериментальними даними, при варіюванні значеннями прискорення і швидкості, складає 0,95, відносна похибка значень 4.65%.

Досліджено енергоефективність процесу транспортування вантажів з використанням струминних захоплювальних пристроїв для різних схем вантажно-розвантажувальних операцій. Так для прямолінійної траєкторії використання методу моделювання орієнтації дозволить знизити енергетичні затрати на 15-52% в залежності від методу захоплення, а для гвинтової траєкторії 41%.

Удосконалено конструктивні схеми пневматичних захоплювальних пристроїв, що забезпечують підвищену вантажопідймальність та стабільність утримування вантажу в процесі виконання вантажно-розвантажувальних операцій.

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

ANNOTATION

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 current state of automation development involves the use of industrial robots for both basic (technological) and additional (loading, handling, transport and warehouse) operations. Roboticization of production processes can improve the quality of products and reduce its cost, as well as the release of workers from heavy, monotonous labor and harmful production conditions. However, the introduction of modern means of automation of handling operations leads to increased energy consumption of the enterprise, depletion of natural resources and deterioration of the environment. Therefore, the task of energy-efficient operation of the main and auxiliary equipment is an urgent task. Thus, in the automation of handling operations, the definition and minimization of the necessary handling capacity plays an important role in ensuring that overall total power consumption in the production is reduced.

The analysis of constructions of gripping devices and methods of planning trajectory of cargo transportation by manipulators is carried out in order to ensure the stability of their containment under different parameters of motion.

However, the question of modeling the dynamic interaction of gripping devices with cargo in the process of carrying out an industrial robotic loading and unloading operations has been studied insufficiently. Technical solutions and approaches to reduce energy consumption for cargo by gripping devices and improving the reliability of containment have not been practically investigated.

The dissertation is devoted to research of dynamic interaction of Bernoulli gripping devices and cargo during handling operations.

The mathematical model of the dynamic interaction of the Bernoulli gripping device with the cargo during its transport along the straight line and arc trajectory has been developed, the optimal orientation has been determined, which will provide the minimum energy consumption of the Bernoulli gripping device during handling operations.

The influence of mass-dimensional characteristics of the cargo, parameters of the base elements of Bernoulli gripping devices and modes of movement on the minimum necessary lifting retention force during handling operations is investigated.

Experimental studies of the transportation process were conducted to verify the reliability of the developed models and the method of optimizing the orientation of the gripping device. Statistical analysis has shown 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 energy efficiency of cargo transportation process with the use of Bernoulli gripping devices for various schemes of handling operations is explored. So 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 design schemes of the pneumatic gripping devices, which provide increased lifting capacity and stability of the cargo gripping during handling operations, are improved.

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

Список публікацій здобувача:

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.

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.

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.

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.

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>.

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

7. Pod hlavičkou Národného centra robotiky pracujú už aj odborníci zo zahraničia / F. Duchoň, L. Chovanec, R. Mykhailyshyn, V. Savkiv // ATP journal. – 2017. – №3. – P. 54 – 55.

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.

9. Пат. 119819 Україна, МПК В25J 15/00. Безконтактний струминний захоплювальний пристрій / Савків В.Б., Михалишин Р.І.; заявник і патентоотримувач Тернопільський нац. тех. ун-т. імені Івана Пулюя. – № U201703755; заявл. 18.04.2017; опубл. 10.10.2017, Бюл. № 19.

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.

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.

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.

13. Михайлишин Р. Аналіз впливу параметрів базуючих елементів струминного захоплювального пристрою на його вантажопідіймальність / 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.

15. Аналіз впливу масо-габаритних параметрів об'єктів маніпулювання на необхідну вантажопідіймальність струминних захоплювальних пристроїв / Р. Михайлишин, В. Савків, F. 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.

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.

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ	2
ЗМІСТ	9
ВСТУП	12
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТАНУ ПРОБЛЕМИ МАНІПУЛЮВАННЯ ВАНТАЖЕМ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ НАПРЯМКІВ ЇЇ ВИРІШЕННЯ	
1.1. Аналіз робіт в області оптимізації рухів промислового робота і зниження енергетичних витрат на транспортування вантажу	18
1.2. Аналіз методів планування траєкторій під час транспортування вантажів промисловими роботами	21
1.3. Аналіз методів захоплення та транспортування вантажів	29
1.4. Струминні захоплювачі, як ефективна альтернатива безконтактного захоплення вантажів	31
1.5. Висновки	43
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНОЇ ВЗАЄМОДІЇ СТРУМИННОГО ЗАХОПЛЮВАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ З ВАНТАЖЕМ В ПРОЦЕСІ ТРАНСПОРТУВАННЯ	
2.1. Аналіз режимів руху маніпулятора	45
2.2. Оптимізація орієнтації утримуючих захоплювальних пристроїв маніпуляторів в процесі вантажно-розвантажувальних операцій по прямолінійній траєктрії	51
2.3. Моделювання динамічної взаємодії струминного захоплювального пристрою з вантажем при його транспортуванні по прямолінійній траєкторії	60
2.4. Моделювання динамічної взаємодії струминного	

	захоплювального пристрою з вантажем при його транспортуванні по гвинтовій траєкторії.....	72
2.5.	Висновки.....	84
РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ		
ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ТРАНСПОРТУВАННЯ НА		
СИЛОВІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗАХОПЛЮВАЛЬНИХ		
ПРИСТРОЇВ.....		
		85
3.1.	Загальна методика проведення експериментальних досліджень.....	85
3.2.	Обладнання для проведення експериментальних досліджень.....	87
3.3.	Експериментальні дослідження впливу параметрів руху на необхідну силу притягання при транспортування вантажів по прямолінійній траєкторії	94
3.4.	Експериментальні дослідження впливу параметрів руху на необхідну силу притягання при транспортування вантажів по гвинтовій траєкторії.....	112
3.5.	Висновки.....	115
РОЗДІЛ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ		
ЗАВАНТАЖУВАЛЬНО-РОЗВАНТАЖУВАЛЬНИХ		
ОПЕРАЦІЙ НА БАЗІ СТРУМИННИХ ЗАХОПЛЮВАЛЬНИХ		
ПРИСТРОЇВ.....		
		116
4.1.	Дослідження впливу масо-габаритних параметрів на оптимальну орієнтацію та мінімальну необхідну силу притягання при транспортуванні по прямолінійній траєкторії	116
4.2.	Дослідження впливу параметрів руху і вантажу на мінімально необхідну силу притягання при транспортуванні вантажів по гвинтовій траєкторії.....	120

4.3.	Дослідження енергетичних затрат на транспортування вантажів при різних схемах вантажно-розвантажувальних операцій.....	124
4.4.	Дослідження енергетичних затрат на транспортування вантажів по гвинтовій траєкторії.....	134
4.5.	Висновки.....	139

РОЗДІЛ 5. МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ

ВАНТАЖОПДІЙМАЛЬНОСТІ ПНЕВМАТИЧНИХ

ЗАХОПЛЮВАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ ТА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

СТАБІЛЬНОСТІ УТРИМУВАННЯ ВАНТАЖУ 141

5.1.	Методи забезпечення стабільного утримування вантажу відносно захоплювального пристрою.....	141
5.2.	Обґрунтування конструкції та параметрів струминно-вакуумних захоплювальних пристроїв	143
5.3.	Безконтактні струминні захоплювальні пристрої для транспортування вантажів з плоскою поверхнею захоплення.	152
5.4.	Безконтактні струминні захоплювальні пристрої для транспортування циліндричних вантажів	153
5.5	Рекомендації по застосуванню методу оптимізації орієнтації. Методика інженерного розрахунку параметрів струминного захоплювального пристрою	155
5.6.	Висновки.....	169

ВИСНОВКИ..... 171

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ..... 173

ДОДАТКИ..... 186

ВСТУП

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.

Актуальність теми. 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 Xavier F. Bruna та Giacomo Mantriota. Моделюванням динаміки механізмів підйому вантажу займалися В.С. Ловейкін, 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 розсосередження 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 конструктивних схем.

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 чисельні методи. Експериментальні дослідження проводились з використанням промислового робота IRB 4600 на спеціально розробленому оснащенні з використанням методів планування багатofакторного 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 вантажопідймальність 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 прямолінійній 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 складається з вступу, п'яти розділів, загальних висновків і рекомендацій, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації складає 185 сторінки, містить 102 рисунків, 8 таблиць з текстом, список використаних джерел із 130 найменувань на 13 сторінках, з яких 53 іноземною мовою та додатки.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СТАНУ ПРОБЛЕМИ МАНІПУЛЮВАННЯ ВАНТАЖЕМ ТА ОБГРУНТУВАННЯ НАПРЯМКІВ ЇЇ ВИРІШЕННЯ

1.1. Аналіз робіт в області оптимізації рухів промислового робота і зниження енергетичних витрат на транспортування вантажу.

Науковий напрям пов'язаний з оптимізацією рухів промислових роботів виник у 80-х роках минулого століття. Даній тематиці присвячені дослідження наступних вчених: J.E. Bobrow, S. Dubowsky, J.S. Gibson [4], F. Pfeiffer, K. Richter [34], K. Shin, N. McKay [44], Z. Shiller [40], K. S. Fu, R. C. Gonzales, C. Lee, C. [17], T. Chettibi, H. E. Lehtihet, M. Haddad, S. Hanchi [11], J. Peng, S. Akella [32], J. J. Wang [48], Z. Shiller, S. Dubowsky [41], A. Khoukhi, Y. Hamam [22], В.А. Кирилович [84,83] і А. Chatraei [11]. Задачі оптимізації траєкторії з точки зору зменшення вібрацій кінцевої ланки маніпулятора вирішували А. І. Бохонський та Н. І. Вармінська [61-66].

Z.Shiller [42] представив метод обчислення оптимальної траєкторії за часом і енергією впродовж заданої траєкторії, враховуючи повну нелінійну динаміку системи та обмеження виконавчого механізму. Проблема оптимізації сформульована як двоточкова крайова задача четвертого порядку і вирішується шляхом повторення вихідного значення одного множника Лагранжа. Показано, що запропоноване оптимальне управління є безперервним, на відміну від відомих методів оптимального управління, що зазвичай реалізуються дискретно.

Продемонстровані гладкі траєкторії, отримані за допомогою функції затрат часу та енергії, що забезпечують кращу перехідну характеристику та менші помилки відстеження ніж під час оптимізації траєкторії за часом, коли вони використовуються в якості основних методів для регулювання положення кінцевої ланки маніпулятора. Фактично, час оптимальної траєкторії неможливо визначити без подальшого керування або попереднього виведення номінальної

траєкторії (Z. Shiller і Н. Chang [43]) через обмежену пропускну здатність контролера зворотного зв'язку.

Невелике збільшення часу руху для запропонованої оптимальної траєкторії з точки зору енергетичних затрат, є незначним порівняно із покращенням точності руху кінцевої ланки. Очікується також, що оптимальні траєкторії позитивно вплинуть на збільшення ресурсу роботи електродвигунів, тобто при керуванні меншими струмами зменшиться температурне навантаження на двигуни.

Цей метод застосовується до широкого класу інтегрованих систем, які описуються динамікою твердого тіла, включаючи промислові роботи та автономні транспортні засоби.

Giacomo Mantriota [26, 27] провів дослідження захоплення вантажів за допомогою вакуумного захоплювального пристрою. Запропонував математичну модель для визначення сил контакту між всмоктувальною чашкою та вантажем. Основна мета роботи полягає у визначенні мінімального значення статичного коефіцієнта тертя та рівня вакууму, щоб гарантувати міцне захоплення вантажу під час руху, а точніше, без відриву або проковзування вантажу. Наводиться приклад руху вантажу і його переорієнтація, захопленого вакуумним захоплювальним пристроєм. В роботі [27] наведений розрахунок мінімальної необхідної кількості вакуумних захоплювальних пристроїв і сили притягання для утримування вантажів із плоскою поверхнею захоплення. Також у роботі досліджено вплив переорієнтуючих рухів на силові характеристики вакуумних захоплювачів.

У роботі В.А. Кириловича [84] запропоновано формалізований опис орієнтуючих рухів об'єктів роботизації під час вторинного орієнтування з використанням теорії кватерніонів. Наведено порівняльний аналіз відомих та запропонованого методів, відзначено переваги останнього. Представлена у [83] інформаційна модель об'єкта маніпулювання за структурою та змістом містить конструктивні та технологічні параметри об'єкта маніпулювання, є зрозумілими для користувача і не вимагає відповідно спеціальних знань та

застосування спеціалізованих програмних продуктів. Подана інформаційна модель об'єкта маніпулювання у вигляді формалізованого опису об'єкта маніпулювання дозволяє виконувати аналіз об'єкта, що використовується при автоматизованому визначенні координат точки затиску об'єкта маніпулювання схватом промислового робота та для аналізу можливості переорієнтації об'єкта маніпулювання (за технологічною потребою) в зоні обслуговування промислового робота та/або поза нею. Вказане є необхідним також при автоматизованому проектуванні роботизованих механоскладальних технологій на етапі формування опорних точок траєкторії переміщення схвата ПР з врахуванням геометричних розмірів захвата промислового робота та об'єкта маніпулювання та їх упорядкованого відпрацювання.

У працях П.П. Мельничука, В.А. Кириловича [90, 91, 92] розкрито сутність та визначено складові процесу технологічної взаємодії схватів промислових роботів з об'єктами маніпулювання при автоматизованому синтезі роботизованих механоскладальних технологій на відомому технічному базисі гнучких виробничих комірок. Сформовано задачі, що необхідно розв'язати для визначення показників та їх параметрів для даного процесу. Розроблена семантична модель технологічної взаємодії схватів промислових роботів з об'єктами маніпулювання.

Вагомий внесок в розвиток, дослідження і поширення робототехніки в тому вигляді у якому вона представлена зараз були Richard M. Murray, Zexiang Li і S. Shankar Sastry [28], які узагальнили всі методи планування рухів, траєкторій і орієнтацій промислового робота (маніпулятора), що дозволило використовувати їхню книгу як базову для вивчення робототехніки в університетах усього світу. Також важливим є те, що були проаналізовані математичні методи забезпечення орієнтації як основного параметру під час програмування маніпуляторів на виробництві.

Значний вклад у розвиток динамічних розрахунків механізму підйому вантажу внесли М.С. Комаров [86], М.О. Лобов [87], В.Ф. Гайдамака [71], В.С. Ловейкін, Ю.В. Човнюк, М.Г. Діктерук, С.І. Пастушенко, А.П. Нестеров [88,

95]. У роботі [88] В.С. Ловейкіна, Ю.В. Човнюка, М.Д. Діктерука та С.І. Пастушенка були поставлені та розв'язані задачі динамічного аналізу та синтезу режимів руху механізму підйому вантажу. У цій роботі використані системи із зосередженими та розподіленими параметрами (крановий міст, канат). Результати досліджень проілюстровані графічними залежностями. Крім того, важливою характеристикою роботи [88] є те, що автори врахували різноманітні нелінійні ефекти у динаміці руху механізму підйому вантажу (відхилення деформації каната від закону Гука, змінна довжина канату, тощо). Представлені результати отримані шляхом аналітичного розв'язування рівнянь руху елементів механізму підйому вантажу. У роботі [95] В.С.Ловейкіна та А.П. Нестерова проведено аналіз існуючих динамічних моделей піднімальних машин, проведені дослідження впливу пружно-демпфуючих муфт на формування силових перехідних процесів у елементах піднімальної машини, а також силові перехідні процеси в головній ланці підпружиненого редуктора. Крім того, проведено результати експериментальних досліджень демпфування коливань валопровода з підпружиненим редуктором та гумо-металевими муфтами.

1.2. Аналіз методів планування траєкторій під час транспортування вантажів промисловими роботами.

За своєю сутністю планувальник траєкторій можна розглядати як «чорний ящик» (рис. 1.1). На вхід планувальника траєкторій подають змінні, що характеризують обмеження накладені на траєкторію руху. Виходом планувальника траєкторій є задана у часі послідовність проміжних точок, через які маніпулятор повинен пройти на шляху з початкової до кінцевої точки траєкторії, а також визначені (у декартових чи приєднаних координатах) в цих точках орієнтація, швидкість та прискорення маніпулятора. Проблема полягає в узагальненні уже розроблених математичних методів для вибору й опису бажаного руху маніпулятора між початковою та кінцевою точками траєкторії.

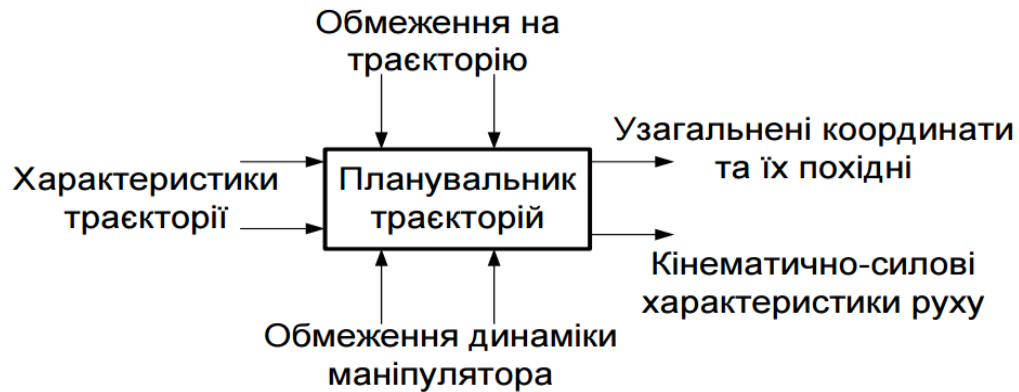


Рис. 1.1 Блок схема планування траєкторій руху маніпуляторів

Планування траєкторій руху маніпуляторів (промислових, будівельних роботів) розглянуто у роботах [31, 81, 70]. Планування траєкторій маніпулятора зводиться до апроксимації або інтерполяції обраної траєкторії поліномами та вибору послідовності опорних точок, в яких проводиться корекція параметрів руху маніпулятора на шляху від початкової до кінцевої точки траєкторії.

Планування траєкторій в декартових координатах [12] складається з двох послідовних кроків:

- 1) формування послідовності вузлових точок в декартовому просторі, розташованих уздовж запланованої траєкторії захоплювача;
- 2) вибір деякого класу функцій, що описують (апроксимують) ділянки траєкторії між вузловими точками відповідно до обраних критеріїв.

Існують два основні підходи до планування траєкторій в декартовому просторі [88].

У першому з них більшість обчислень, оптимізація траєкторії і подальше регулювання руху здійснюються в декартових координатах. Вузлові точки на заданій траєкторії в декартовому просторі вибираються через фіксовані інтервали часу. Обчислення значень приєднаних координат в цих точках проводиться в процесі управління рухом маніпулятора.

Другий підхід полягає в апроксимації ділянок траєкторії в декартовому просторі, траєкторіями в просторі приєднаних змінних, отриманими в

результаті інтерполяції траєкторії між сусідніми ділянками поліномами низького ступеня. Регулювання руху в цьому підході виробляється на рівні приєднаних змінних.

В роботі [74] описано технологію виготовлення композитних матеріалів із застосуванням маніпуляторів, які повинні забезпечувати при цьому певні параметри руху від початкової до кінцевої точки траєкторії.

Остаточний результат планування руху - це траєкторія яка визначає вхідні дані для системи керування в режимі реального часу.

Для траєкторії в декартовому просторі опис завдання подається в натуральній формі. При цьому можуть бути встановлені обмеження та вимагається кінематична інверсія.

Для траєкторії в приєднаному просторі виникають проблеми, пов'язані з кінематичними особливостями та надлишковістю ступенів свободи, не вимагається кінематична інверсія. При плануванні траєкторії в приєднаному просторі, результат руху кінцевої ланки не є основним.

Оператор, при призначенні команди руху, визначає обмежене число параметрів в якості вхідних даних:

- вибирає простір (приєднаний або декартовий),
- вибирає для траєкторії: кінцеві точки, можливі проміжні точки, геометрію траєкторії (сегмент, кругова дуга, і т.д.),
- вибирає для закону руху: загальний час руху, максимальні швидкості та/або прискорення, швидкість та/або прискорення в деяких точках.

Грунтуючись на цій інформації планувальник траєкторії генерує послідовність точок у відповідному просторі (приєднаному або декартовому) через фіксовані проміжки часу (наприклад, 12 мс). У разі траєкторії в декартовому просторі ці точки додатково перетворюються в точки приєданого простору через кінематичну інверсію.

Ці значення можуть бути інтерпольовані для того, щоб відповідати розмірності програмованого контролера (наприклад 1 мс або 500 мкс).

Для відбору траєкторій можуть бути задані деякі критерії:

- обчислювальна продуктивність і об'єм пам'яті;
- безперервність позиціонування, швидкості (можливо прискорення і ривків);
- мінімізація небажаних ефектів (коливань, нерегулярної кривини);
- точність (без перерегулювання в кінцевій позиції).

При плануванні траєкторії в приєднаному просторі потрібно створити функцію $q(t)$, яка інтерполює значення приєднаних змінних в початкових і кінцевих точках.

Представляють інтерес такі дві ситуації:

- рух від точки до точки (вказують кінцеві точки);
- інтерполяція (вказують ряд проміжних точок).

При плануванні в приєднаному просторі, визначення шляху в геометричному просторі не є проблемою, так як немає потреби у координації руху шарнірів (всі шарніри мають завершити свій рух одночасно).

Найпростіший випадок планування траєкторії руху від початкової до кінцевої точки, коли задано деякі початкові і кінцеві умови (швидкість, прискорення, ривок, час переміщення).

Найчастіше для апроксимації траєкторії використовують поліноміальну функцію, наприклад:

$$q(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + \dots + a_n t^n. \quad (1.1)$$

Чим вища ступінь n многочлена, тим більше число граничних умов можна задовольнити з метою забезпечення більш гладкої траєкторії.

Припустимо, що призначаються наступні граничні умови:

- початковий і кінцевий моменти часу t_i і t_f ;
- початкове положення і швидкість q_i і \dot{q}_i ;
- кінцеве положення і швидкість q_f і \dot{q}_f .

Матимемо чотири граничних умови. Для того, щоб їх забезпечити, нам потрібен многочлен порядку принаймні рівному трьом (кубічний поліном):

$$q(t) = a_0 + a_1(t - t_i) + a_2(t - t_i)^2 + a_3(t - t_i)^3. \quad (1.2)$$

Якщо накласти граничні умови:

$$\begin{aligned} q(t_i) &= q_i; \\ \dot{q}(t_i) &= \dot{q}_i; \\ q(t_f) &= q_f; \\ \dot{q}(t_f) &= \dot{q}_f, \end{aligned} \quad (1.3)$$

отримаємо

$$\begin{aligned} a_0 &= q_i; \\ a_1 &= \dot{q}_i; \\ a_2 &= \frac{-3(q_i - q_f) - (2\dot{q}_i + \dot{q}_f)T}{T^2}; \\ a_3 &= \frac{2(q_i - q_f) + (\dot{q}_i + \dot{q}_f)T}{T^3}, \end{aligned} \quad (1.4)$$

де $T = t_f - t_i$.

Приклад кубічного полінома представлений на рисунку 1.2 при наступних початкових умовах: $t_i = 0$, $t_f = 1$ с, $q_i = 10^\circ$, $q_f = 30^\circ$, $\dot{q}_i = \dot{q}_f = 0 \frac{\text{град}}{\text{с}}$.

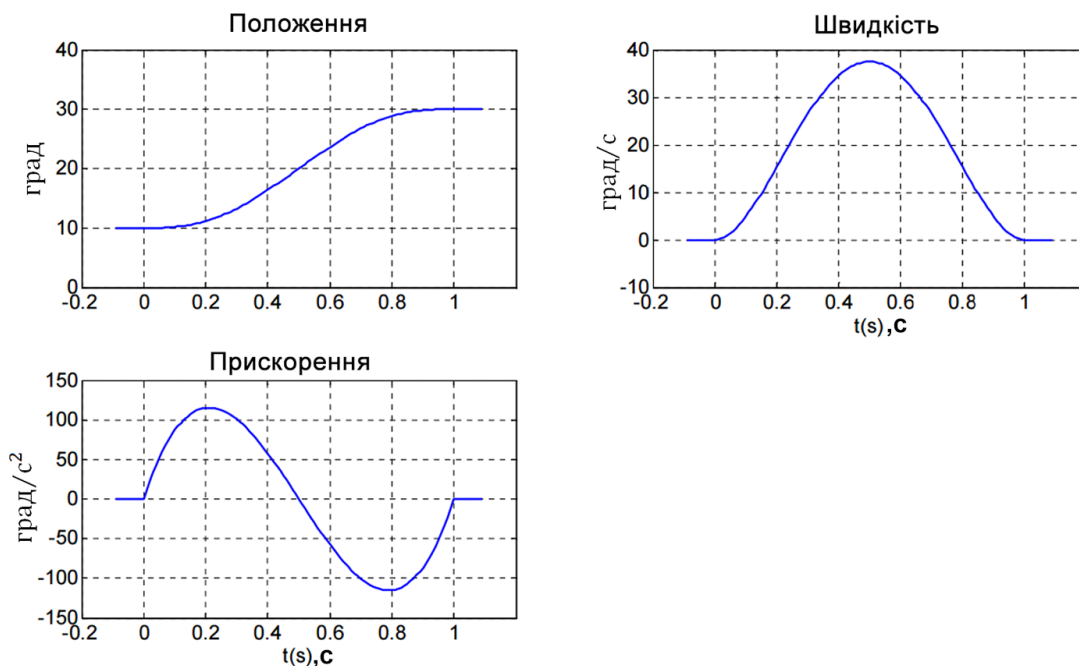


Рис. 1.2 Приклад кубічного полінома

Для того, щоб призначити умови для прискорень, необхідно розглянути многочлени п'ятого ступеня:

$$q(t) = a_0 + a_1(t - t_i) + a_2(t - t_i)^2 + a_3(t - t_i)^3 + a_4(t - t_i)^4 + a_5(t - t_i)^5. \quad (1.5)$$

Наклавши граничні умови:

$$\begin{aligned} q(t_i) &= q_i & q(t_f) &= q_f; \\ \dot{q}(t_i) &= \dot{q}_i & \dot{q}(t_f) &= \dot{q}_f; \\ \ddot{q}(t_i) &= \ddot{q}_i & \ddot{q}(t_f) &= \ddot{q}_f, \end{aligned} \quad (1.6)$$

отримаємо

$$\begin{aligned} a_0 &= q_i; \\ a_1 &= \dot{q}_i; \\ a_2 &= \frac{1}{2}\ddot{q}_i; \\ a_3 &= \frac{20(q_f - q_i) - (8\dot{q}_f + 12\dot{q}_i)T - (3\ddot{q}_f - \ddot{q}_i)T^2}{2T^3}; \\ a_4 &= \frac{30(q_i - q_f) + (14\dot{q}_f + 16\dot{q}_i)T + (3\ddot{q}_f - 2\ddot{q}_i)T^2}{2T^4}; \\ a_5 &= \frac{12(q_f - q_i) - 6(\dot{q}_f + \dot{q}_i)T - (\ddot{q}_f - \ddot{q}_i)T^2}{2T^5}. \end{aligned} \quad (1.7)$$

Приклад полінома п'ятого ступеня представлений на рисунку 1.3 при наступних початкових умовах: $t_i = 0$, $t_f = 1$ с, $q_i = 10^\circ$, $q_f = 30^\circ$, $\dot{q}_i = \dot{q}_f = 0$ град / с, $\ddot{q}_i = \ddot{q}_f = 0$ град / с².

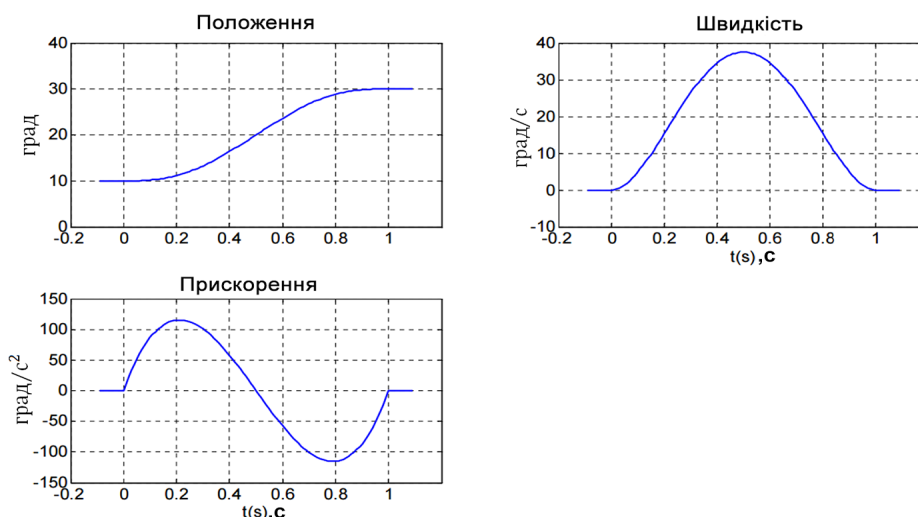


Рис. 1.3 Приклад полінома п'ятого ступеня

Гармонійна траєкторія узагальнює рівняння гармонійного руху, тут прискорення пропорційне координаті з протилежним знаком. Гармонійна траєкторія має неперервні похідні всіх порядків у всіх внутрішніх точках траєкторії.

Рівняння такого руху має вигляд:

$$\begin{aligned} q(t) &= \frac{q_f - q_i}{2} \left(1 - \cos \left(\frac{\pi(t - t_i)}{t_f - t_i} \right) \right) + q_i; \\ \dot{q}(t) &= \frac{\pi(q_f - q_i)}{2(t_f - t_i)} \sin \left(\frac{\pi(t - t_i)}{t_f - t_i} \right); & q(t_i) = q_i, q(t_f) = q_f; \\ \ddot{q}(t) &= \frac{\pi^2(q_f - q_i)}{2(t_f - t_i)^2} \cos \left(\frac{\pi(t - t_i)}{t_f - t_i} \right); & \dot{q}(t_i) = 0, \dot{q}(t_f) = 0. \end{aligned} \quad (1.8)$$

Приклад гармонійної траєкторії представлений на рисунку 1.4 при наступних початкових умовах: $t_i = 0, t_f = 1 \text{ с}, q_i = 10^\circ, q_f = 30^\circ$.

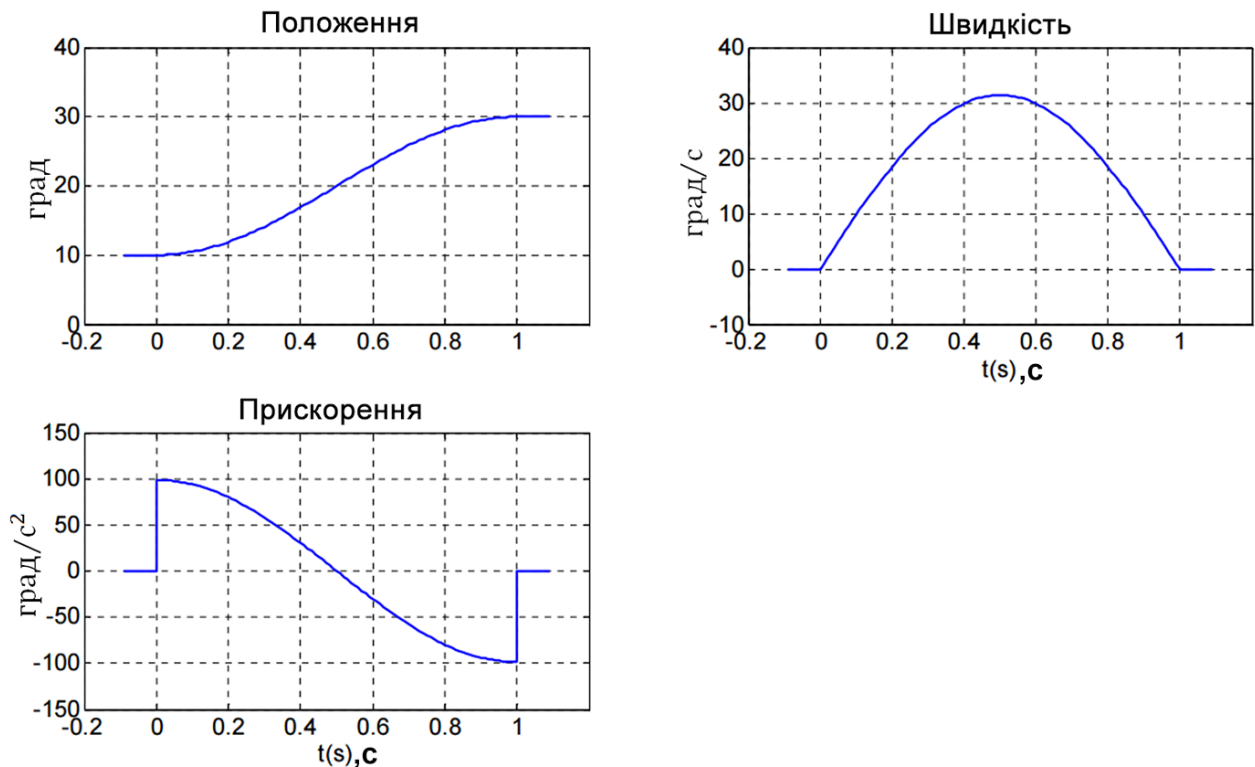


Рис. 1.4 Приклад гармонійної траєкторії

Гармонійна траєкторія має розриви у прискоренні в початкових та кінцевих моментах, і невизначені (або нескінченні) значення ривка. Альтернативою є циклоїдна траєкторія, яка має безперервне прискорення.

Рівняння руху циклоїдальної траєкторії має вигляд:

$$\begin{aligned}
 q(t) &= (q_f - q_i) \left(\frac{t - t_i}{t_f - t_i} - \frac{1}{2\pi} \sin \left(\frac{2\pi(t - t_i)}{t_f - t_i} \right) \right) + q_i; & q(t_i) &= q_i, q(t_f) = q_f; \\
 \dot{q}(t) &= \frac{q_f - q_i}{t_f - t_i} \left(1 - \cos \left(\frac{2\pi(t - t_i)}{t_f - t_i} \right) \right); & \dot{q}(t_i) &= 0, \dot{q}(t_f) = 0; \\
 \ddot{q}(t) &= \frac{2\pi(q_f - q_i)}{(t_f - t_i)^2} \sin \left(\frac{2\pi(t - t_i)}{t_f - t_i} \right); & \ddot{q}(t_i) &= 0, \ddot{q}(t_f) = 0.
 \end{aligned} \tag{1.9}$$

Приклад циклоїдальної траєкторії представлений на рисунку 1.5 при наступних початкових умовах: $t_i = 0, t_f = 1 \text{ с}, q_i = 10^\circ, q_f = 30^\circ$.

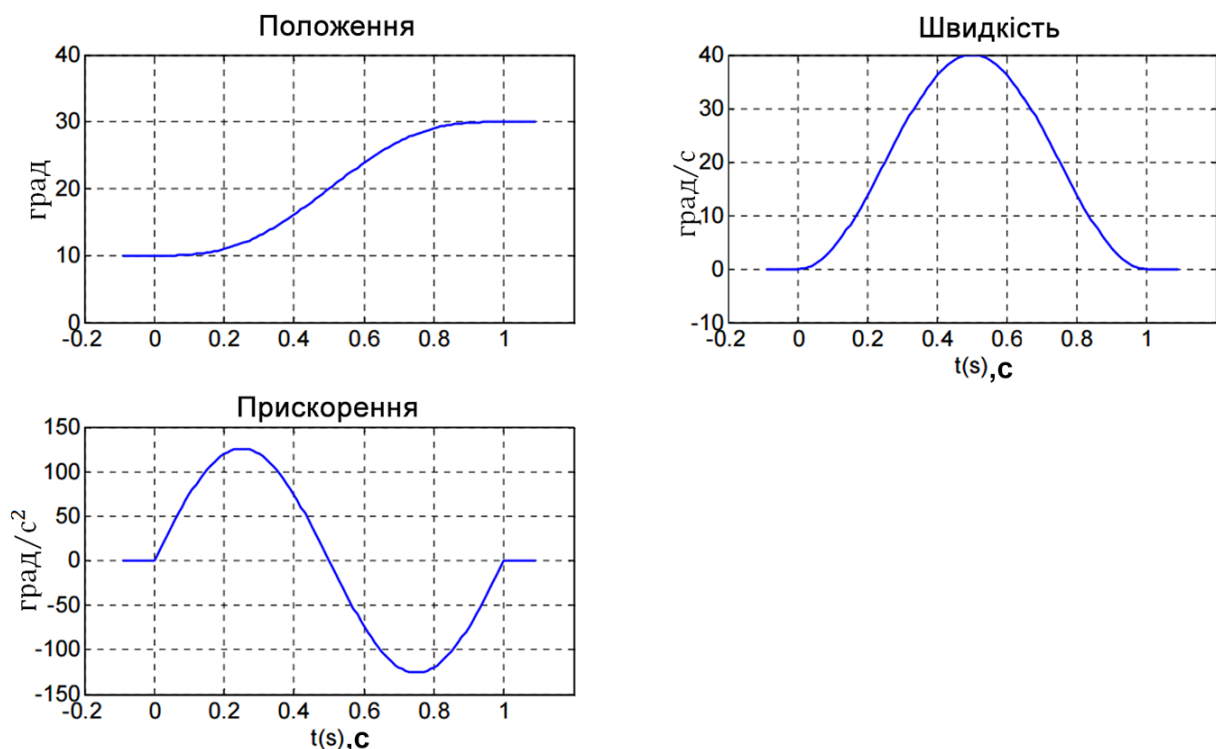


Рис. 1.5 Приклад циклоїдальної траєкторії

1.3. Аналіз методів захоплення та транспортування вантажів

Методи захоплення та транспортування вантажів проаналізовано у працях Проця Я.І., Савківа В.Б. та Фендьо О.М. [120, 126]. Так для здійснення вантажно-розвантажувальної операції необхідно здійснити захоплення, орієнтування та кінцеве переміщення захопленого вантажу [121]. Безконтактні методи захоплення та транспортування виробів дають змогу уникнути контактних деформацій захоплюваної поверхні, і на відміну від механічних методів, забезпечують вантаж від пошкодження та руйнування. В результаті ефективність піднімально-транспортних операцій покращується.

Аналіз літературних джерел [58, 45, 109, 46, 127] дає змогу виділити наступні методи, на яких базується захоплення вантажу (рис. 1.6): електромагнітний, електростатичний, оптичний принцип, принцип на основі стоячої хвилі, принцип на основі повітряної подушки та принцип Бернуллі.

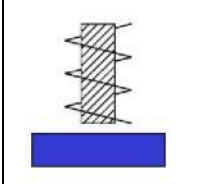
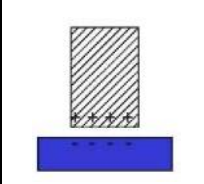
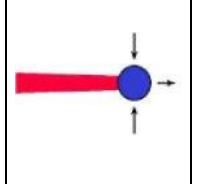
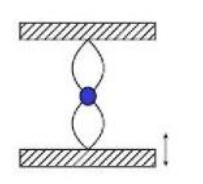
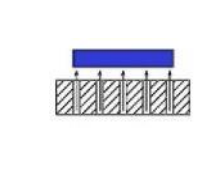
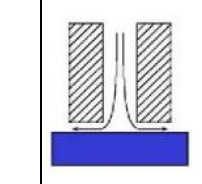
					
магнітний метод	електростатичний метод	оптичний метод	метод на основі стоячої хвилі	метод на основі повітряної подушки	метод Бернуллі

Рис. 1.6 Методи захоплення вантажів

Захоплення вантажів з використанням магнітних захоплювачів відбувається під дією магнітних сил, створених постійними магнітами або електромагнітами [19]. Магнітні захоплювачі захоплюють вироби, навіть якщо вони неорієнтовані і лежать насипом (наприклад у бункерах, лотках, магазинах). В разі одночасного захоплення декількох виробів, необхідно обладнати захоплювач спеціальним пристроєм - скидачем [70, 130].

Водночас, електромагнітні захоплювачі мають ряд недоліків: захопленню підлягають лише вироби з намагнічуваних матеріалів; можливе захоплення сторонніх часток (стружки, металевого пилю), що може призвести до пошкодження поверхні захоплюваного виробу або самого захоплювача; після відпускання виробу захоплювачем, має місце залишковий магнетизм; підйомна сила електромагніту зменшується з підвищенням температури матеріалу; наявність у металах марганцю та нікелю також призводить до зниження підйомної сили електромагнітних захоплювачів.

Електростатичний метод досить успішно застосовується для захоплення дуже тонких пластин, наприклад, тонких скляних панелей. Також, може бути використаний при транспортуванні товстіших пластин, зокрема кремнієвих у напівпровідниковому виробництві [100].

Необхідно відмітити, що недоліком даного методу захоплення є мала стабільність, пов'язана з виникненням нових сил внаслідок електризації тертям, а також розмірні обмеження по відношенню до вантажів.

Оптичний метод полягає в тому, що матеріальні частки можуть бути вільно підвішені і прискорені силами тиску променя від видимого лазерного світла. Потрібно відзначити, що цей принцип призводить до зусилля захвату, що ледь сягає 0,1-1 нН, і доцільний для невеликих часток сферичної форми до 50 мкм.

Метод захоплення на основі стоячої хвилі прийнятний лише для тих виробів, у яких розмір менший однієї восьмої довжини хвилі [44].

Системи на базі повітряної подушки та методу Бернуллі передбачають використання тиску струменя повітря на вантаж, і на відміну від механічних систем, практично виключають можливість пошкодження легкодеформованих виробів [127]. Пневматичні системи доцільно використовувати для маніпулювання групою заготовок з порівняно невеликою щільністю матеріалу та значною поверхнею обтікання [108, 116].

В роботах [65, 114, 116] широко висвітлено питання вакуумного методу захоплення вантажів, що полягає в утримуванні виробу (заготовки, деталі)

шляхом розрідження повітря в замкненій порожнині робочого елемента – присмоктувача. Створення вакууму здійснюється вакуум-насосом або ежектором від мережі стиснутого повітря.

За допомогою вакуумних захоплювачів можливе захоплення як плоских, так і сферичних вантажів. Вакуумні захоплювачі використовують для маніпулювання вантажами з рівними, сухими і чистими поверхнями, зокрема для перевантаження полірованих дерев'яних панелей, листового скла, виробів з кольорових металів, мармуру, полімерних матеріалів, для яких використання інших видів вантажозахоплювальних пристроїв є неможливим.

У порівнянні з підйомними електромагнітами, вакуумні захоплювачі володіють наступними перевагами:

- здійснюють захоплення та транспортування виробів з різних матеріалів (металу, бетону, дерева, пластмаси, скла та ін);
- мають меншу вагу та габарити;
- є конструктивно простими, достатньо надійними та довговічними.

Водночас, вакуумні захоплювачі мають наступні обмеження:

- забезпечують обмежену силу притягання для даної площі;
- придатні тільки для плоских та рівних поверхонь усіх матеріалів;
- характеризуються низькою точністю базування через еластичність присмоктувачів;
- вимагають повної відсутності чужорідних тіл між присмоктувачем і поверхнею виробу;
- потребують певного часу для створення вакууму.

1.4. Струминні захоплювачі, як ефективна альтернатива безконтактного захоплення вантажів

Протягом останніх років широкого застосування набувають пристрої в яких використовується стиснуте повітря [69, 88, 92, 124]. Так, наприклад,

окремі елементи струменевої техніки використовуються при автоматизації контрольних операцій [29, 78, 113, 116, 129], складальних процесів (орієнтація заготовок) [29, 109, 115, 117, 20], в пристроях транспортування виробів [2, 3, 45, 80, 124, 127], в живильних механізмах верстатів [55, 82] та ін. Завдяки різноманітному характеру силової дії потоку повітря на тверде тіло (реактивною силою, присмоктуючою дією, силами в'язкого тертя), а також в зв'язку з централізованим постачанням підприємств стиснутим повітрям, струменеві захоплювальні органи мають суттєві переваги перед іншими пристроями при розв'язанні задач автоматизації процесів завантаження та орієнтації вантажів.

Дослідженням силових характеристик і параметрів застосування струминних захоплювальних пристроїв займалися Xavier F. Brun [5-9], Проць Я. І., Савків В. Б. [120] та Фендьо О. М. [126]. Вони моделювали та прогнозували сили повітряного потоку, які виникають у струминних безконтактних захоплювачах, що використовувались в основному для захоплення нежорстких об'єктів. Моделі цих авторів можуть бути використані для розуміння впливу змінних, таких як відстань до вантажу та витрата повітря, на розподіл тиску по поверхні вантажу та силу підймання захоплювального пристрою.

Відомі наступні типи струминних захоплюючих пристроїв: опірні, вихрові, захоплювачі з одним циліндричним соплом, ежекційні захоплювачі з кільцевим соплом.

До опірних струминних захоплювачів відносять пристрої, які в якості робочого агента використовують потік спеціально підведеного від мережі стиснутого повітря. При цьому використовується аеродинамічний ефект притягування, який є особливо ефективним при завантаженні штучних заготовок з базовою плоскою поверхнею та невеликою вагою [56, 60]. Теоретичні основи по розрахунку струминних пристроїв автоматики та течій повітря у вузьких каналах заклали вчені Залманзон Л.А., Герц Є.В., Ідельчик І.Є. [73, 80, 81].

Струминні пристрої характеризуються довговічністю та надійністю в роботі, володіють високою швидкістю, а простота конструктивного виконання не потребує значних затрат на їх виготовлення. Опірні пристрої є універсальними, мають можливість комплектації виробів або накопичення об'єктів [49].

Вихрові струминні захоплювачі, які використовують ефект зміни характеристик потоку повітря при його завихренні, набувають все більшого застосування, про що свідчать роботи наступних авторів [67, 69, 85]. Принцип роботи даних захоплювачів базується на тому, що в приосьовій області захоплювача, всередині ізольованого вихрового потоку повітря, утворюється зона розрідження, в яку під дією радіальної сили тяги втягуються вантаж різної форми. Характерною ознакою таких захоплювачів є збільшене значення величини радіального зазору h між торцями корпусу та вантажу, що робить їх менш чутливими до шорсткості поверхонь захоплюваних вантажів.

На рис. 1.7 представлена схема вихрового струминного захоплювача [103]. Пристрій працює наступним чином: при подачі стиснутого повітря через отвір 9 в кожух 8 і далі через тангенціально розташовані отвори 7 в корпус 1, стиснуте повітря завихрюється, створюючи в приосьовій частині область пониженого тиску. Коли захоплювач наближається до поверхні вантажу на певну відстань, під дією розрідження в центральній області вихору, вантаж притягується до плоскої поверхні ребер 5. При цьому, утворюються щілинні проточні канали, по яких повітря витікає в атмосферу. Ребра 5 мають таку висоту, яка створює оптимальну величину зазору між поверхнею насадки 2 та вантажу.

Недоліком даного пристрою є мала вантажопідйомність внаслідок неповного використання присмоктуючої дії струменя стиснутого повітря.

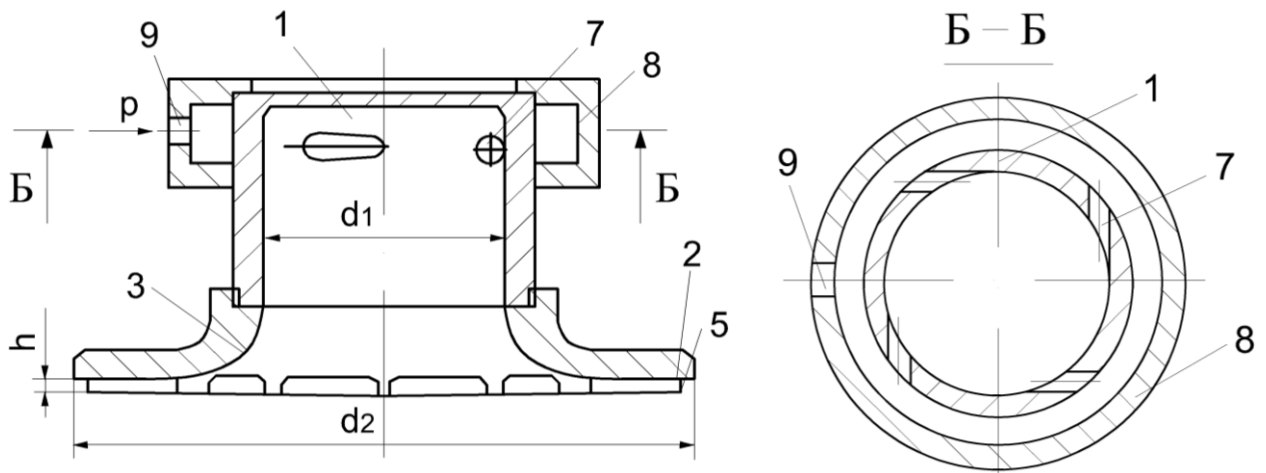


Рис. 1.7 Вихровий струминний захоплювач

Розробкою вихрових захоплювачів займаються і закордонні фірми. Зокрема, корпорація SMC Pneumatics випускає безконтактні вихрові захоплювальні пристрої серії ХТ661 [98].

Принцип роботи даних захоплювачів ілюструє рис. 1.8. Повітря подається в камеру захоплювача, а потім через тангенціальні сопла витікає в проміжок між захоплювачем та вантажем, де утворюється ефект вихору. В результаті, на поверхні вантажу створюється зона вакууму. Оскільки повітря безперервно протікає між поверхнями захоплювача та вантажу, то забезпечується безконтактне утримування вантажів.

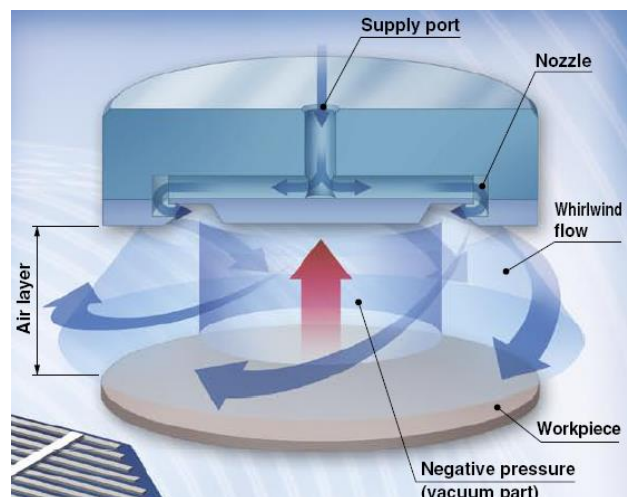
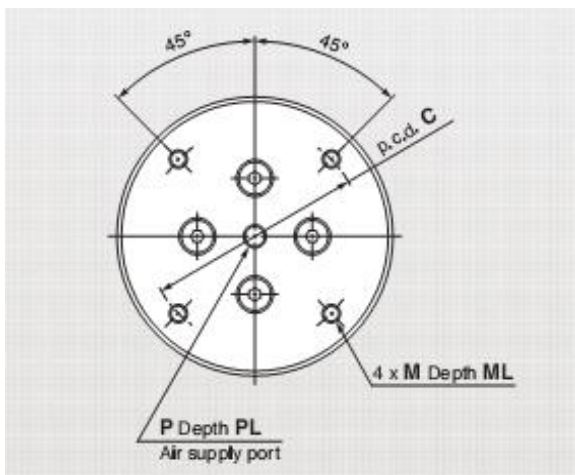


Рис. 1.8 Конструктивна схема та принцип роботи вихрових захоплювачів серії ХТ661

Виробник рекомендує застосовувати дані захоплювачі для маніпулювання

пористими, тонкими, гарячими, вологими вантажами або виробами з покриттями. Серія даних захоплювачів включає 5 типорозмірів, із зовнішніми діаметрами 20, 40, 60, 80 і 100 мм, при цьому їх силові характеристики відповідно становлять 3, 11, 19, 27 і 35 Н, а об'ємне споживання повітря відповідно 85, 145, 170, 200 і 240 л/хв. Зовнішній вигляд та силові характеристики захоплювача моделі ХТ661-8А із зовнішнім діаметром 80 мм представлені на рис. 1.9.

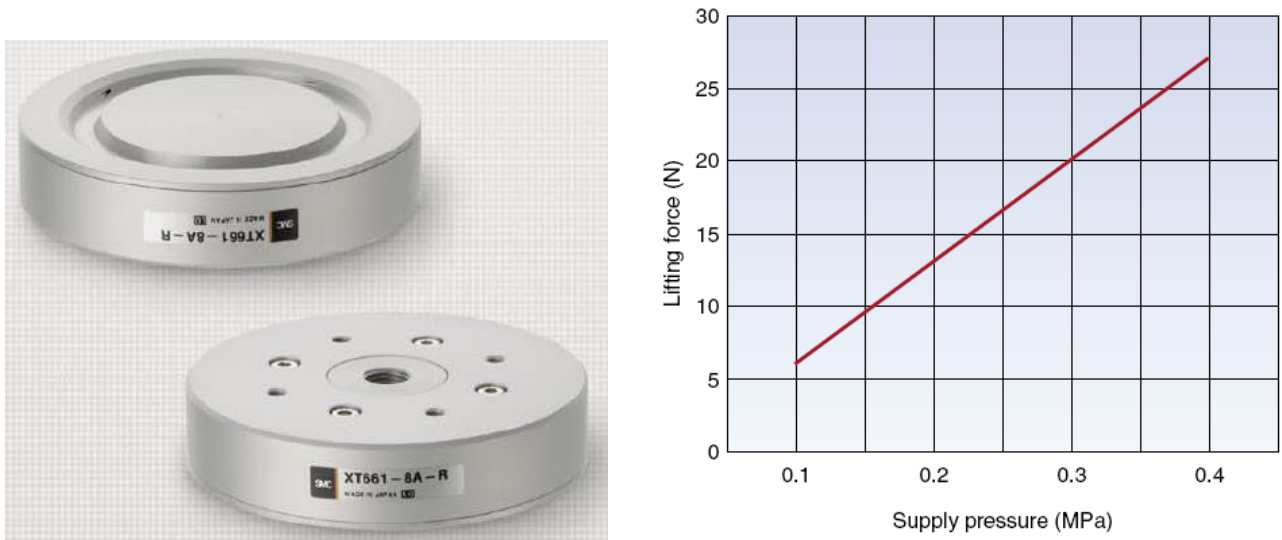


Рис. 1.9 Фотографія та силові характеристики захоплювача моделі ХТ661-8А

Ще один варіант вихрових захоплювачів представлений на рис. 1.10. Принцип роботи полягає у витіканні струменя повітря у вихрову чашу через тангенціальні сопла для створення завихреного потоку повітря [47]. Шляхом експериментів та аналізу основних характеристик потоку повітря, було підтверджено, що розрідження викликано відцентровою силою завихреного потоку повітря. Вихор поширюється у вигляді параболічної кривої, створюючи підйомну силу, під дією якої вироби притягуються до захоплювача.

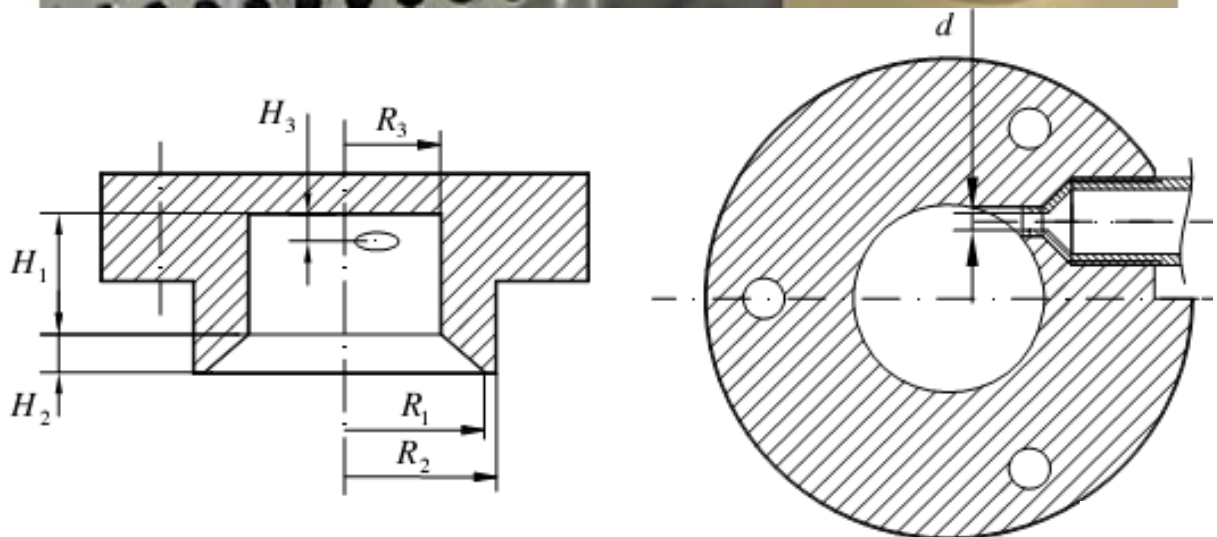
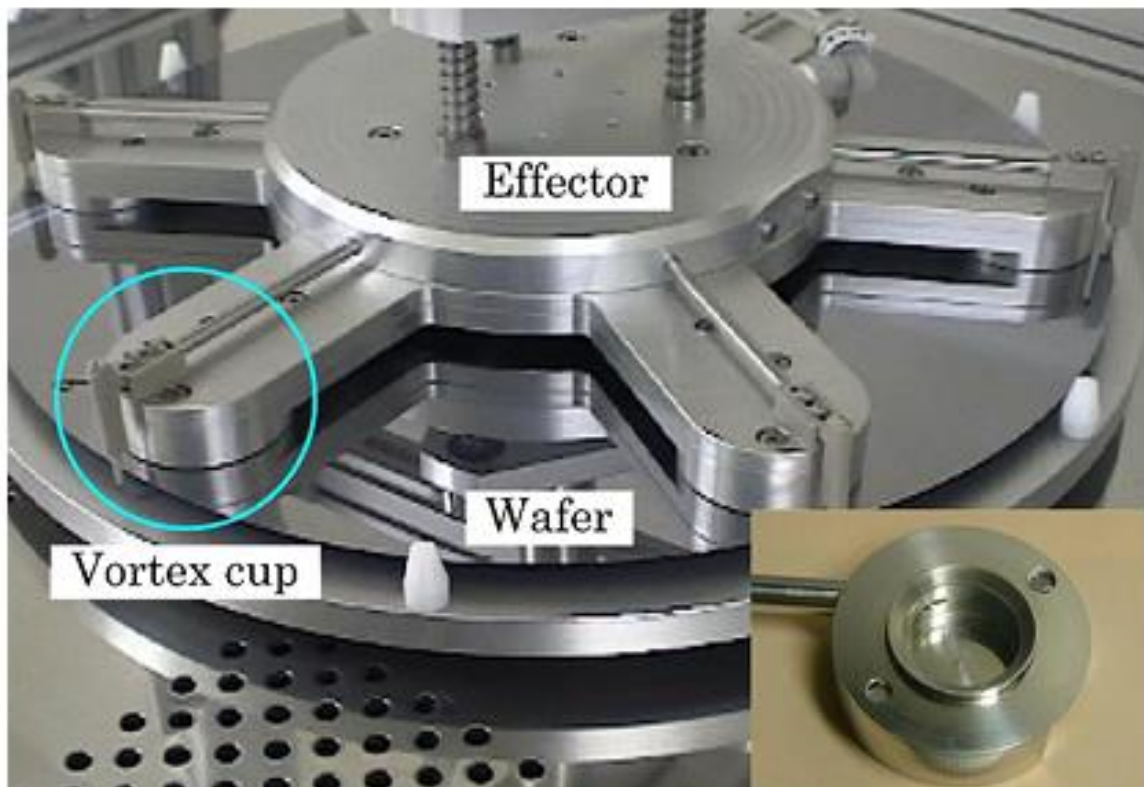


Рис. 1.10 Фотографія та конструктивна схема вихрового захоплювача

Необхідно зауважити, що вихрові ЗП для забезпечення необхідної вантажопідйомності потребують значних витрат стисненого повітря, тому їх використання може бути виправдане лише при маніпулюванні плоскими вантажами зі значними параметрами шорсткості захоплюваної поверхні ($Ra > 10$ мкм) та невеликими відхиленнями від площинності [69].

Доцільність використання струминних захоплювачів обумовлена їх високою надійністю, довговічністю роботи та низькою собівартістю

виготовлення [89, 79]. Вони забезпечують можливість безконтактного захоплення та утримування вантажів з різного матеріалу, з різними механічними характеристиками, структурою поверхневого шару та температурою, що робить їх надзвичайно ефективними та практичними.

Принцип роботи струминних захоплювачів полягає у виникненні аеродинамічного ефекту притягання при взаємодії витікаючого з сопла струменя повітря з плоскою поверхнею заготовки [120]. При наявності звукової швидкості на вході потоку в радіальний зазор, аеродинамічний ефект передбачає утворення зон розрідження між торцями захоплювача та заготовки. Збільшення площі поперечного перерізу надзвукового потоку приводить до зростання його швидкості з одночасним зменшенням статичного тиску в зазорі. Далі надзвуковий потік різким стрибком переходить у дозвуковий. У результаті подальшого розширення швидкість дозвукового потоку спадає, а статичний тиск у зазорі плавно зростає до величини атмосферного.

Для переміщення скляних листів ефективним є використання захоплювального пристрою, запропонованого авторами у роботі [18]. Варіація насадок дозволяє переносити плоскі вантажі різноманітної форми.

Оскільки використання повітряного струменя для левітації є досить обмеженим, тому є мало публікацій з дослідження цієї проблеми. Незважаючи на брак аналітичних досліджень, є ряд пристроїв, які використовують струминну левітацію.

Реальним прикладом є використання цього ефекту в пристрої для безконтактного транспортування НСТ (non-contact transport unit) [99]. Принцип дії цього пристрою показаний на рис. 1.11.

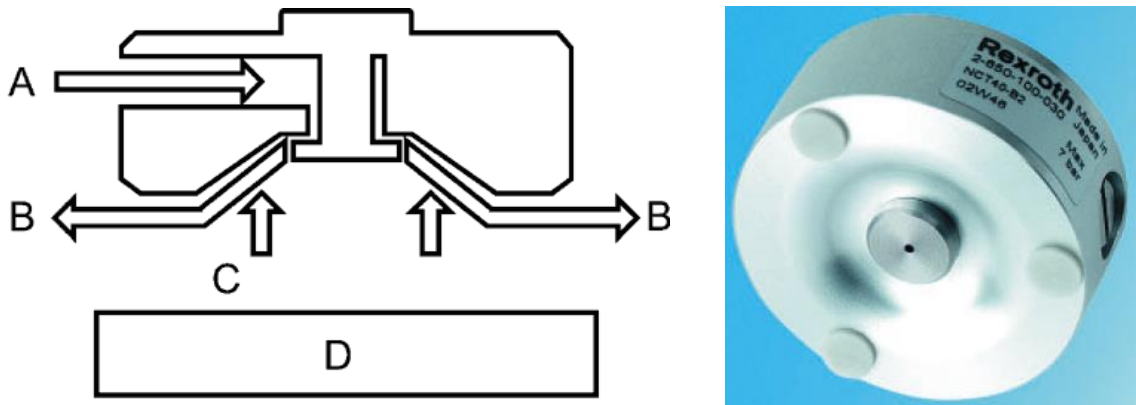


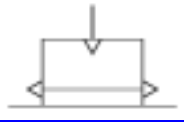
Рис. 1.11 Принцип дії струминного захоплювального пристрою:

A – стиснуте повітря, *B* – повітряний потік, *C* – підйомна сила, *D* – вантаж

NCT являє собою плоский алюмінієвий диск діаметром від 20 до 60 мм і завтовшки 17 мм. Диск має різьбовий отвір, до якого під'єднується шланг із стиснутим повітрям. Всередині цього диску використана «форсунка Бернуллі». Повітря, що проходить через кільцевий канал, викликає зниження тиску в нижній конусній частині диску до величини нижчої за атмосферний. Як наслідок, на вантаж діє підйомна сила. Потік повітря, що виходить з форсунки назовні, відштовхує вантаж від поверхні захоплювального пристрою, протидіючи торканню. Таким чином реалізується стан динамічної рівноваги – левітації. Технічні характеристики ЗП наведено в табл. 1.1.

Таблиця 1.1

**Технічні характеристики захоплювальних пристроїв NCT
корпорації Bosh Rexroth**

Позначення	Діаметр, [мм]	Вантажопідйомність при тиску 5 bar, [Н]	Витрати повітря, [л/хв]	Вага, [кг]
	20	0,9	100	0,02
	30	1,3	100	0,03
	40	2	110	0,05
	60	6	210	0,12

Згідно даних таблиці 1.1 [99], підйомна сила однієї з модифікацій пристрою NCT діаметром 60 мм при тиску повітря 0,6 МПа складає 6 Н. При цьому, витрата стисненого повітря приведена до нормальних умов складає 210 л/хв. NCT – це простий і надійний пристрій, який може бути використаний в різних галузях промисловості (фармацевтичній, харчовій, електронній) з метою автоматизації операцій подачі і транспортування вантажів.

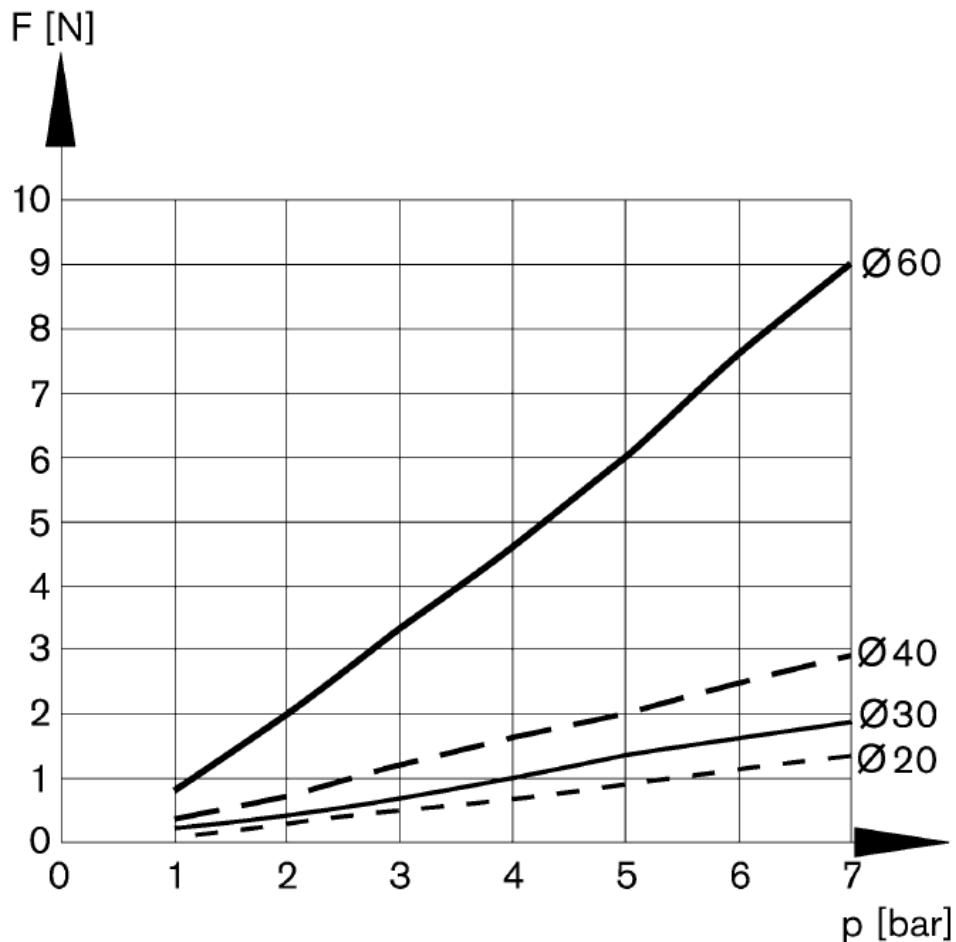


Рис. 1.12 Графіки зміни підйомної сили в залежності від тиску для захоплювачів різного діаметру

Подібні захоплювальні пристрої виготовляються також компанією Schmalz. На рис. 1.13 представлено один із захоплювальних пристроїв моделі SBS 60 M5-IG, що має зовнішній діаметр 60 мм [104].

У праці Фендьо О. М. [124] проаналізовано вплив конструктивного виконання кільцевого сопла на силові характеристики захоплювачів ежекційного типу. Також було встановлено, що виконання приведених вимог до конструкції соплової частини струминного захоплювача, при сталих інших конструктивних параметрах та тиску живлення p_0 , дозволяє підвищити силові характеристики лише на 2-3%.

Значно більший вплив на силові характеристики даних захоплювачів має форма активної (взаємодіючої з об'єктом) поверхні торця захоплювача, яка й визначає геометрію повітряного потоку між взаємодіючими поверхнями захоплювального пристрою та об'єкта маніпулювання. Активна поверхня повинна бути гладкою, тобто не мати ніяких виступів та заглибин, які б перешкождали потоку повітря, і забезпечувати плавне розширення потоку з метою його безвідривного режиму руху. Активна поверхня захоплювача може бути плоскою, конічною, сферичною або складатися з комбінації цих елементарних поверхонь. Раціональні конструкції струминних ежекційних захоплювачів наведені на рис. 1.15. Вони забезпечують максимальну присмоктуючу силу, виключають можливість відриву об'єкта від торця захоплювача та забезпечують стабільне положення об'єкта при його безконтактному утримуванні.

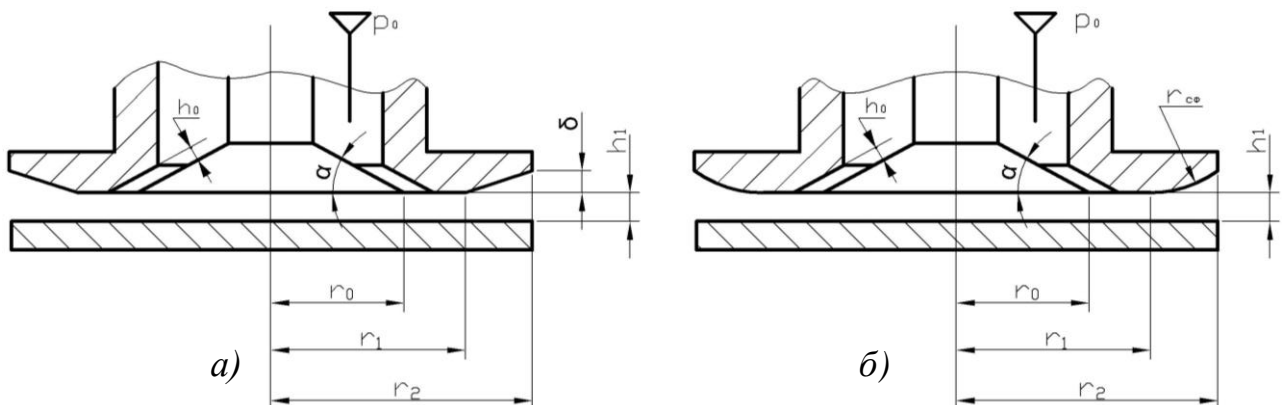


Рис. 1.15 Схеми ежекційних струминних захоплювачів з різними формами активної поверхні: *a)* – плоско-конічна; *б)* – плоско-сферична

Характер течії повітряного потоку в радіальному проміжку між активною поверхнею струминного захоплювача та об'єкта маніпулювання досить складний. При надлишковому тиску живлення захоплювача стиснутим повітрям більшим від 0,1 МПа, потік входить в кільцеве сопло із швидкістю рівною місцевій швидкості звуку. Внаслідок збільшення площі поперечного перетину сопла, в його вихідному перетині потік досягає надзвукової швидкості.

Подальше розширення потоку в радіальному проміжку забезпечує зростання надзвукової швидкості, а за рахунок явища ежекції відбувається падіння статичного тиску в зоні навпроти конічної вставки до величини p_1 меншої за атмосферний. Зростання швидкості відбувається до певного радіуса, на якому відбувається гальмування потоку, що супроводжується різким зростанням тиску та зменшенням швидкості потоку до дозвукової. В результаті подальшого розширення, швидкість дозвукового потоку V_r спадає, а статичний тиск p_r у радіальному проміжку плавно зростає до величини атмосферного.

Для спрощення теоретичних досліджень силових характеристик даних захоплювачів зроблено наступні припущення: площа поперечного перерізу камери захоплювача набагато більша площі прохідного січення кільцевого сопла; значення всіх параметрів газового потоку на радіусі r – сталі в межах виділеного елементарного кільця радіальному проміжку; потік повітря входить в кільцеве сопло з швидкістю рівною швидкості звуку для даних умов; максимальне значення швидкості V_0 надзвукового потоку та його перехід в дозвуковий відбувається у вихідному перерізі кільцевого сопла; термодинамічний процес протікання надзвукового потоку – адіабатичний, дозвукового – ізохоричний; характер розподілу швидкостей потоку на виході з кільцевого сопла та на будь якому радіусі радіального проміжку приймається рівномірним.

Результуюча сила F з якою захоплювач діє на об'єкт:

$$F = F_1 + F_2; \quad (1.10)$$

$$F_1 = \pi r_1^2 (p_{am} - p_1); \quad (1.11)$$

$$F_2 = 2\pi \int_{r_0}^{r_2} (p_{am} - p_r) r dr, \quad (1.12)$$

де F_1 , F_2 – сили, що викликані розрідженням в проміжку між взаємодіючими поверхнями захоплювача та об'єкта відповідно у зоні навпроти конічної вставки та зоні навпроти торця корпусу; $p_{am}=0,1033$ МПа – атмосферний тиск при нормальних умовах; p_1 , p_r – абсолютні значення тиску відповідно у зоні навпроти конічної вставки та на радіусі r ; r_0 - радіус конічної вставки; r_2 - радіус корпусу захоплювача.

1.5. Висновки

Із аналізу сучасного стану та практики захоплення і транспортування вантажів, можна зробити наступні висновки:

- у відомих наукових працях значна увага приділена оптимізації траєкторії транспортування вантажів, проте не досліджено вплив орієнтації вантажу на енергетичні затрати на транспортування;
- струминні захоплювальні пристрої володіють принципово новими властивостями – мінімальною силовою дією на поверхню вантажу та високою точністю його базування, високими динамічними характеристиками, керованою навантажувальною здатністю, можливістю демпфування удару вантажу під час захоплення;
- струминні захоплювальні пристрої забезпечують високу якість продукції за рахунок відсутності на поверхні виробів слідів контакту, забруднень і пошкоджень, чого неможливо уникнути при використанні традиційних пристроїв захоплення виробів.

З метою визначення переваг та недоліків захоплювальних пристроїв проведено аналіз існуючих прототипів. Для моделювання вибрано струминні захоплювальні пристрої, як такі, що володіють найбільшою кількістю переваг

серед захоплювачів утримуючого типу.

Хоча питанням оптимізації траєкторії приділено значної уваги, проте не проводилась оптимізація орієнтації кисті маніпулятора під час транспортування вантажів з метою зниження енергетичних затрат на транспортування. Тому моделювання динамічної взаємодії струминного захоплювального пристрою з вантажем та визначення його оптимальної орієнтації під час транспортування представляють практичний інтерес і є актуальними в даному напрямку.

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНОЇ ВЗАЄМОДІЇ СТРУМИННОГО ЗАХОПЛЮВАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ З ВАНТАЖЕМ В ПРОЦЕСІ ТРАНСПОРТУВАННЯ

2.1. Аналіз режимів руху маніпулятора

У виробничій практиці при генеруванні траєкторії досить поширено використовувати метод, в якому опираються на планування лінійних профілів швидкості і параболічні вигини положення траєкторії. Отриманий швидкісний профіль має типову трапецієподібну форму (рис. 2.1).

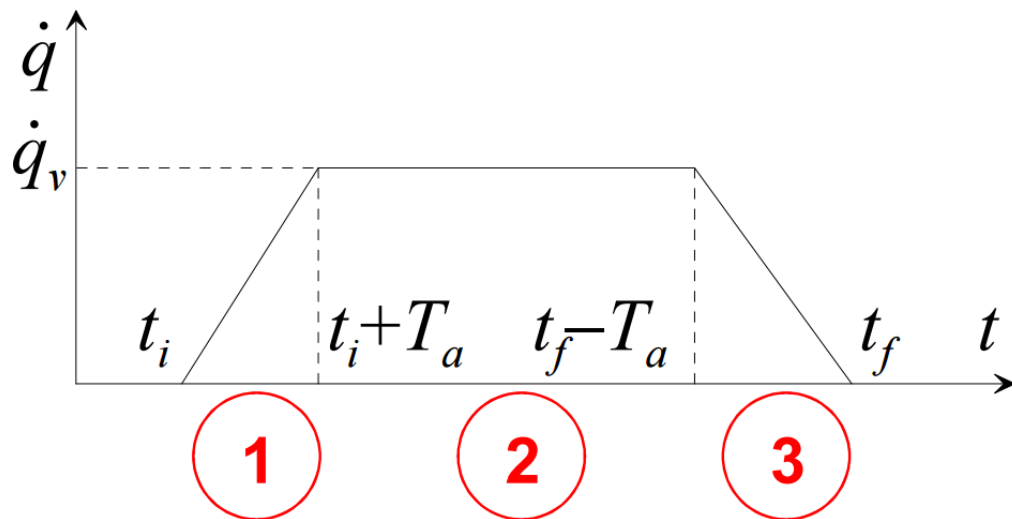


Рис. 2.1 Швидкісний профіль трапецієподібної форми.

Траєкторія складається з трьох частин:

- 1) стале прискорення, лінійна швидкість, параболічна траєкторія;
- 2) нульове прискорення, стала швидкість, лінійна траєкторія;
- 3) стале уповільнення, лінійна швидкість, параболічна траєкторія.

Часто тривалість T_a фази прискорення (етап 1) встановлюється рівним тривалості фази уповільнення (фаза 3): Таким чином траєкторія виходить симетричною відносно центрального моменту часу. Як правило тривалість фази

СТАНОВИТЬ:

$$T_a \leq (t_f - t_i)/2. \quad (2.1)$$

Рівняння трапецієподібного швидкісного профілю:

1. Етап

$$t_i \leq t \leq t_i + T_a;$$

$$\begin{cases} \ddot{q}(t) = \frac{\dot{q}_v}{T_a} = \text{const}; \\ \dot{q}(t) = \frac{\dot{q}_v}{T_a}(t - t_i); \\ q(t) = q_i + \frac{\dot{q}_v}{2T_a}(t - t_i)^2. \end{cases} \quad (2.2)$$

2. Етап

$$t_i + T_a \leq t \leq t_f - T_a;$$

$$\begin{cases} \ddot{q}(t) = 0; \\ \dot{q}(t) = \dot{q}_v; \\ q(t) = q_i + \dot{q}_v \left(t - t_i - \frac{T_a}{2} \right). \end{cases} \quad (2.3)$$

3. Етап

$$t_f - T_a \leq t \leq t_f - T_a;$$

$$\begin{cases} \ddot{q}(t) = -\frac{\dot{q}_v}{T_a}; \\ \dot{q}(t) = \frac{\dot{q}_v}{T_a}(t_f - t); \\ q(t) = q_f - \frac{\dot{q}_v}{2T_a}(t_f - t)^2. \end{cases} \quad (2.4)$$

Приклад трапецієподібного швидкісного профілю представлений на рисунку 2.2.

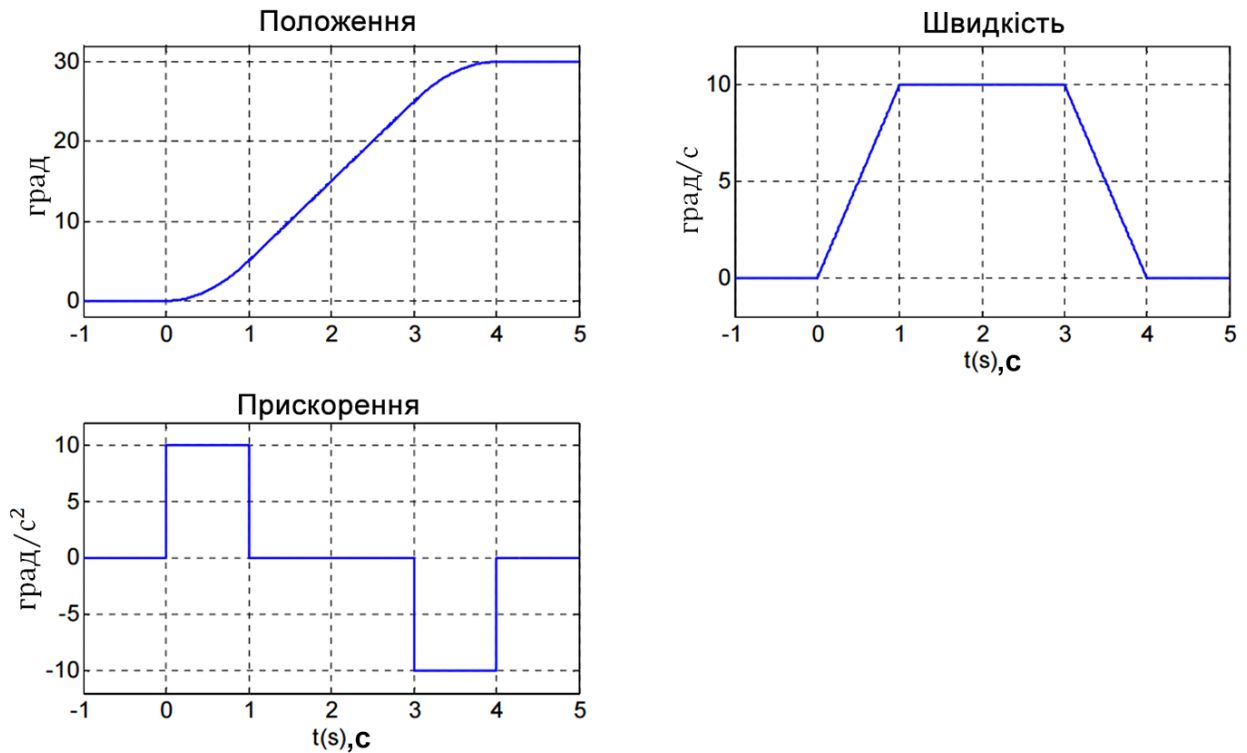


Рис. 2.2 Приклад трапецієподібного швидкісного профілю

$$(t_i = 0, t_f = 1c, q_i = 10^\circ, q_f = 30^\circ, \dot{q} = 10 \text{град} / c)$$

Наведемо приклад можливих специфікацій трапецієподібного швидкісного профілю. Задана відстань, яку необхідно пройти $h = q_f - q_i$ та час проходження шляху $T = t_f - t_i$, причому $q_a = q(t_i + T_a)$.

Якщо заданий час розгону:

$$0 < T_a < \frac{T}{2} \Rightarrow \begin{cases} \dot{q}_v = \frac{h}{T - T_a}, \\ \ddot{q}_a = \frac{\dot{q}_v}{T_a}, \end{cases} \quad (2.5)$$

де $q_a = q(t_i + T_a)$.

Якщо задана швидкість:

$$\frac{|h|}{T} < |\dot{q}_v| < \frac{2|h|}{T} \Rightarrow \begin{cases} T_a = \frac{T\dot{q}_v - h}{\dot{q}_v}, \\ \ddot{q}_a = \frac{\dot{q}_v}{T_a}. \end{cases} \quad (2.6)$$

Якщо задане прискорення:

$$|\ddot{q}_a| \geq \frac{4|h|}{T^2} \Rightarrow \begin{cases} T_a = \frac{\ddot{q}_a T - \sqrt{\ddot{q}_a^2 T^2 - 4\ddot{q}_a h}}{2\ddot{q}_a} \\ \dot{q}_v = \ddot{q}_a \cdot T_a \end{cases} \quad (2.7)$$

Використовуючи програмний пакет ABB RobotStudio 6.0 [96] для програмування і симуляції промислових роботів, продемонструємо попередній приклад на моделі робота IRB 1200 рис. 2.3.

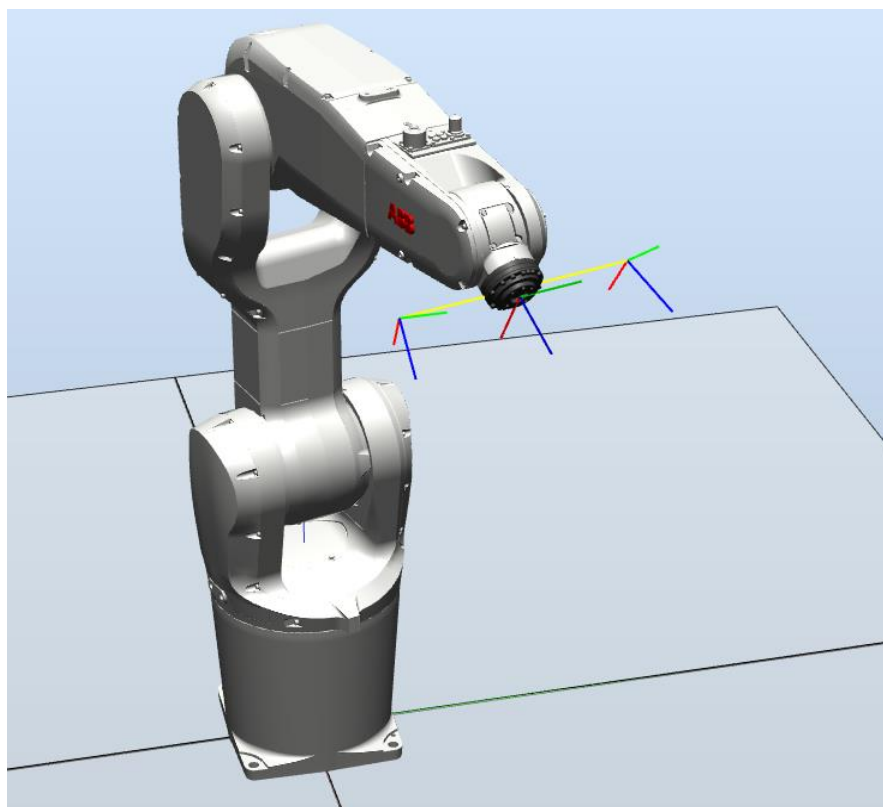


Рис. 2.3 Візуалізація маніпулятора IRB 1200 в програмному середовищі ABB RobotStudio 6.0

Для траєкторії з трапецієподібним швидкісним профілем прискорення є переривчастим. Як наслідок ривок (похідна прискорення) приймає нескінченні значення рис. 2.4.

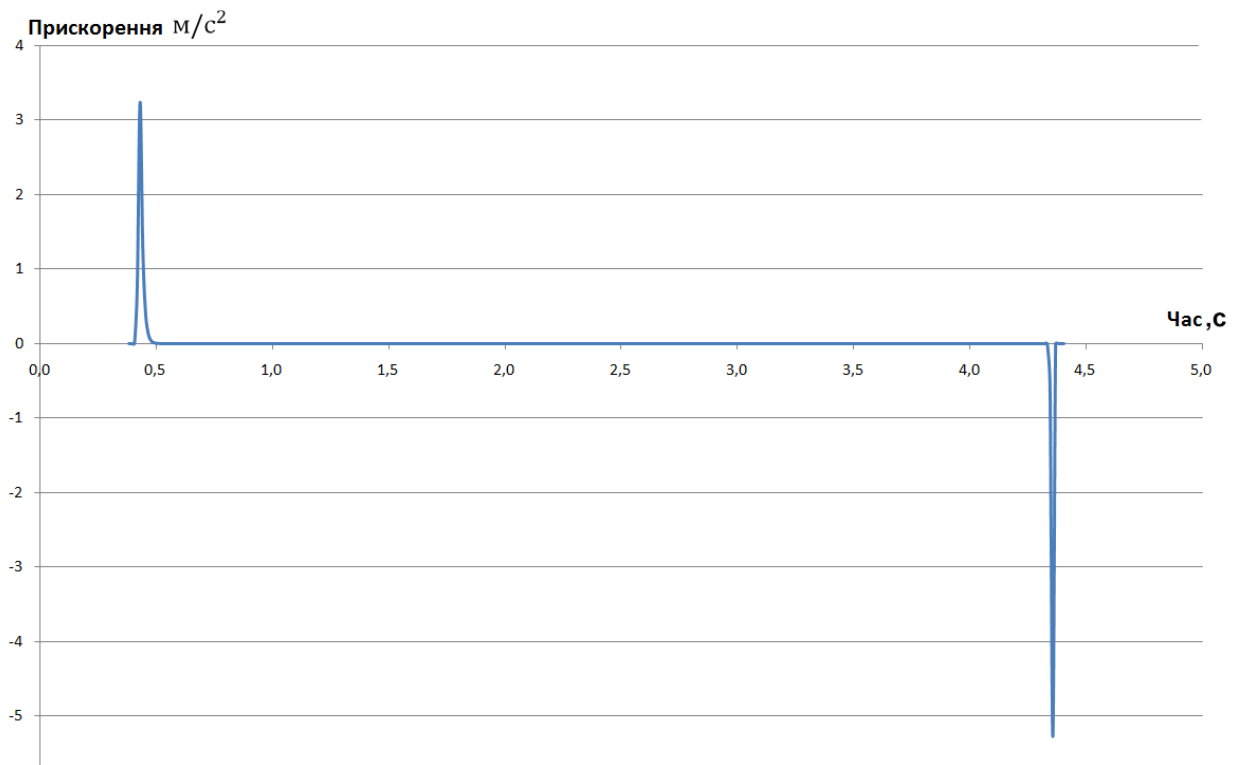


Рис. 2.4 Графік прискорення маніпулятора

Це може призвести до небажаних явищ, викликаючи можливі вібрації. Однією з причин вібрацій можуть бути стрибки потужності двигунів маніпулятора рис. 2.5 через те, що прискорення на стадіях розгону і уповільнення приймають максимальні значення (в нашому випадку 3,2 і 5,3 m/s^2).

Для того, щоб уникнути такої проблеми, планування траєкторії можна змінити додаючи, профіль з безперервним прискоренням. В програмному середовищі RobotStudio для цього використовується функція PathAccLim (PathAccLim TRUE \AccMax := 0.3, TRUE \DecelMax := 0.3). В результаті отримаємо трапецієподібний профіль в фазах прискорення і уповільнення рис. 2.6.

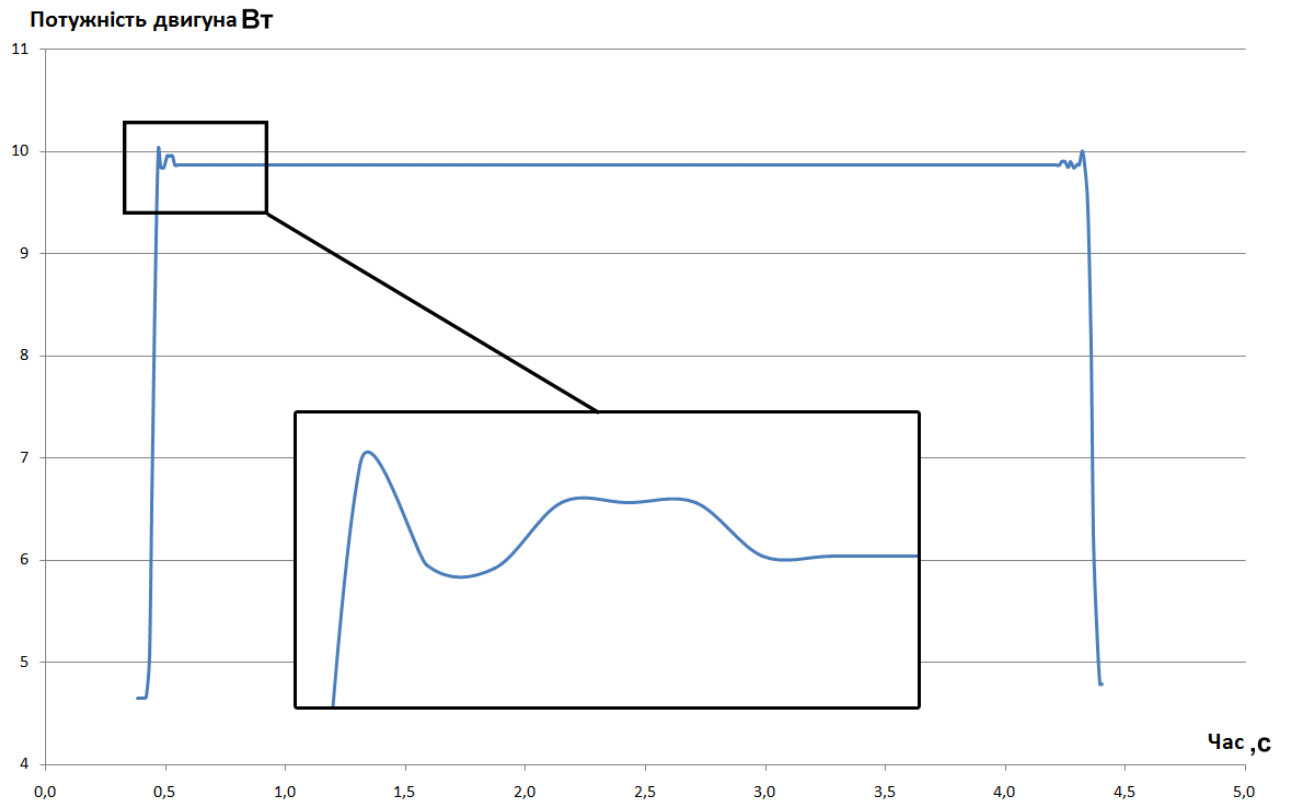


Рис. 2.5 Графік потужності двигуна маніпулятора

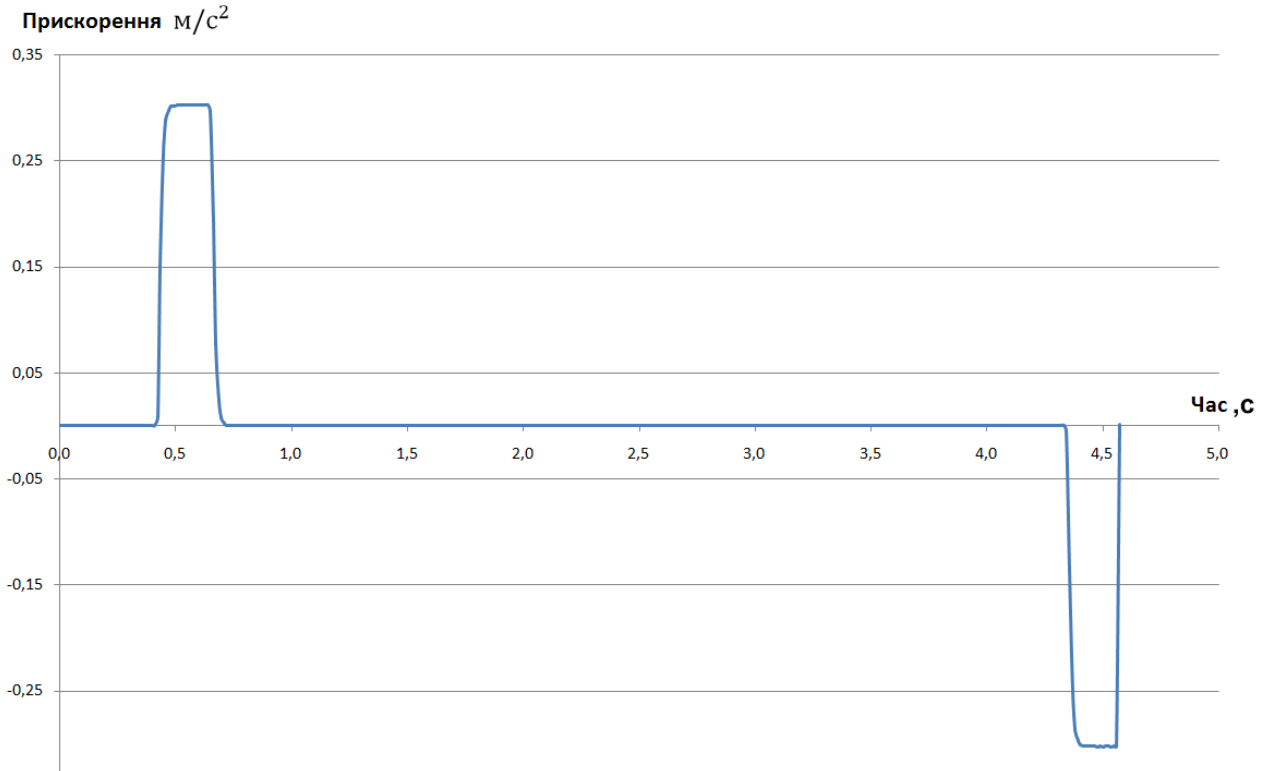


Рис. 2.6 Графік прискорення маніпулятора в фазах прискорення і уповільнення

З рисунку 2.7 видно, що коливання потужності двигуна відсутні, фази розгону і уповільнення проходять монотонно.

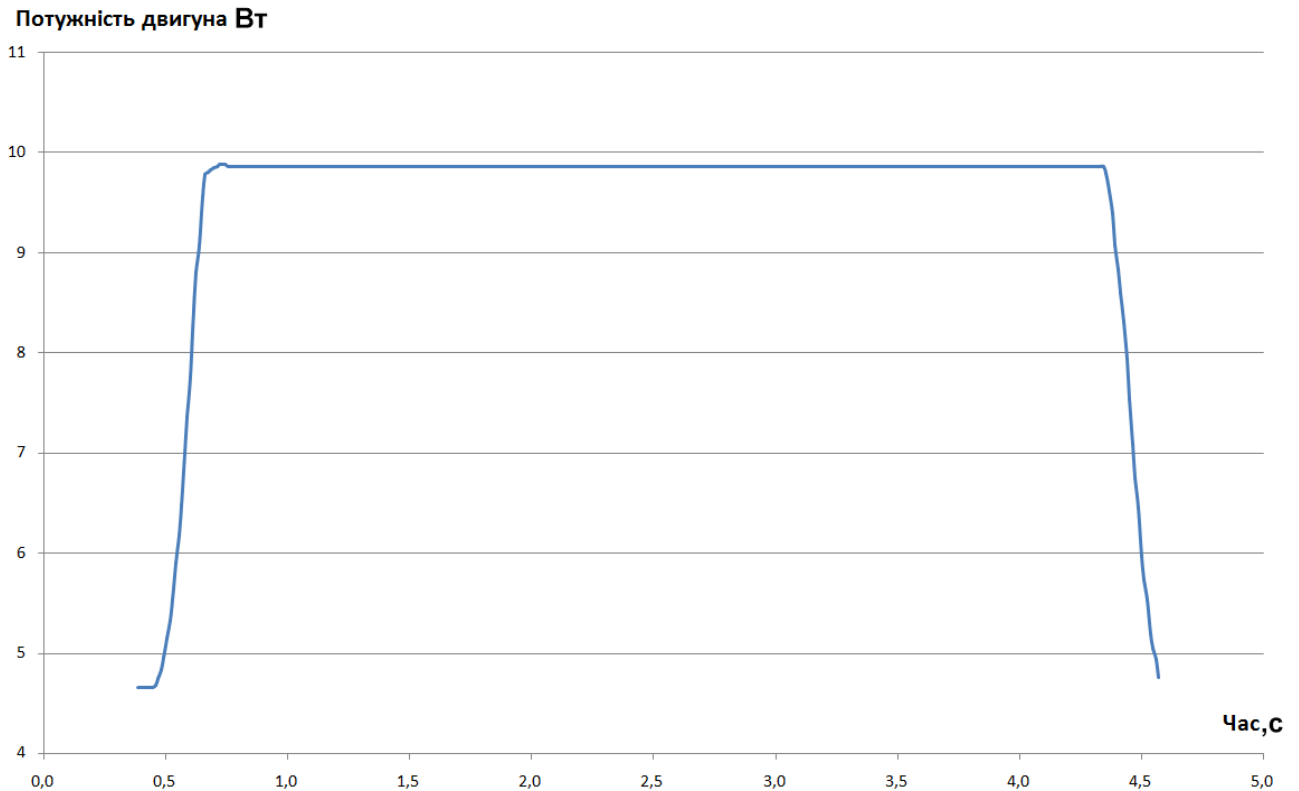


Рис. 2.7 Графік потужності двигуна маніпулятора

2.2. Оптимізація орієнтації утримуючих захоплювальних пристроїв маніпуляторів в процесі вантажно-розвантажувальних операцій по прямолінійній траєкторії

Розглянемо випадок транспортування плоских деталей за допомогою утримуючого захоплювального пристрою (рис. 2.8). Рух по заданій прямолінійній траєкторії здійснюється за допомогою маніпулятора IRB 1200 (ABB), який має 6 ступенів вільності.

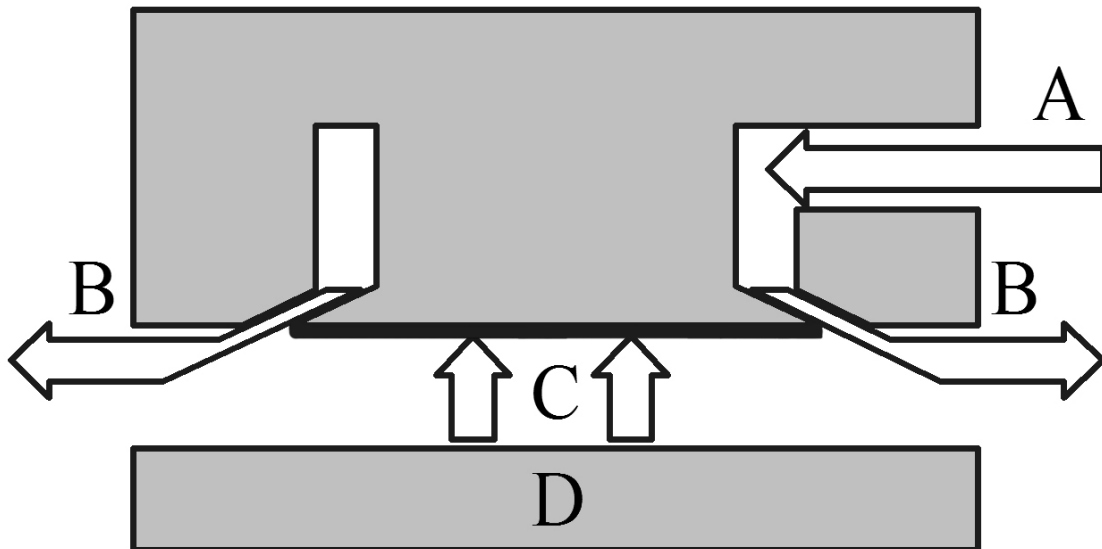


Рис. 2.8 Захоплювальний пристрій утримуючого типу

A – стиснуте повітря, B – повітряний потік, C – підйомна сила, D – вантаж

При заданих параметрах маніпулятора, захоплювального пристрою, вантажу і траєкторії ставиться задача знайти оптимальну орієнтацію захоплювача при якому споживання енергії ним буде мінімальна.

Розглянемо звичайний (без переорієнтації) спосіб транспортування плоских вантажів за допомогою захоплювального пристрою утримуючого типу (струминного, вакуумного, магнітного, електростатичного та ін.) (рис. 2.9). Протягом всього часу транспортування захоплювальний пристрій орієнтований паралельно до площини x - y глобальної системи координат таким чином, що вісь орієнтації захоплювального пристрою \bar{n} орієнтована в протилежному напрямку до глобальної осі Z . Тобто орієнтація захоплювального пристрою не змінюється протягом всього часу транспортування. Отже, енергоспоживання захоплювача за весь час транспортування залишається незмінним і максимальним.

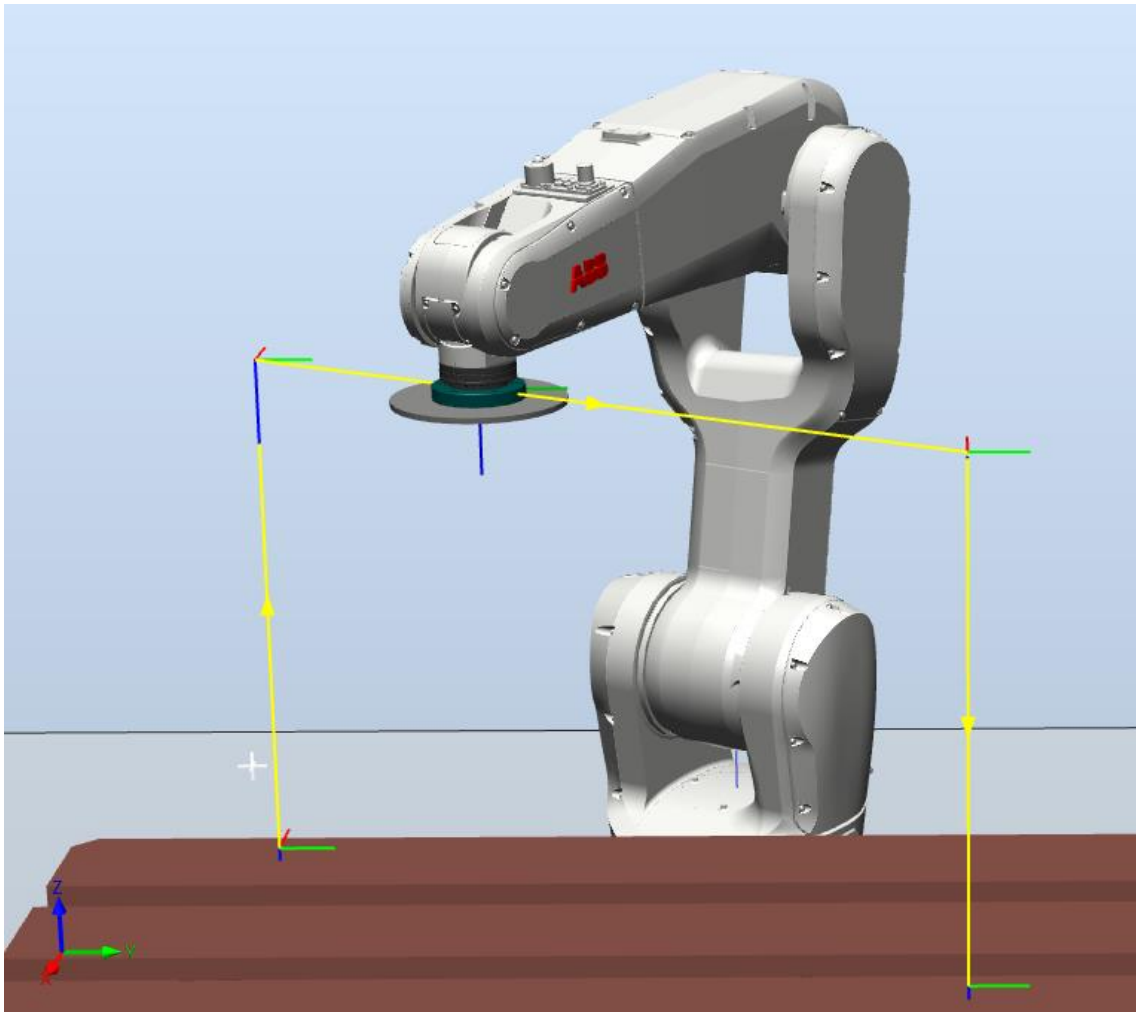


Рис. 2.9 Траєкторія руху без переорієнтації захоплювального пристрою під час симуляції у програмному середовищі RobotStudio 6.0

Нам потрібно транспортувати вантаж з положення A_0 в положення B^* (рис. 2.10). Вважаємо, що обидва ці положення знаходяться в зоні досягання маніпулятора. Для захоплення вантажу з початкового положення необхідно, щоб вісь орієнтації захоплюючого пристрою (ЗП) \bar{n} була орієнтована в протилежному напрямку до глобальної осі Z . Для ровантаження в положенні B^* ЗП теж повинен бути орієнтований так само, як в початковому положенні. Для спрощення прийнято, що B^* співпадає з B_0 . Будемо планувати траєкторію руху у вигляді трьох прямолінійних ділянок – A_0A_1 , A_1B_1 , B_1B_0 . На ділянці A_0A_1 здійснюється підймання вантажу і переорієнтації ЗП таким чином, щоб в кінці ділянки прийняти оптимальну орієнтацію для ділянки A_1B_1 . На ділянці B_1B_0

здійснюється опускання вантажу на місце складування і зміна орієнтації ЗП до необхідної в кінцевому положенні. На ділянках A_0A_1 , B_1B_0 вважаємо, що використання сили притягання, яке необхідне для забезпечення безвідривного транспортування максимальне. На ділянці A_1B_1 будемо планувати переміщення і орієнтацію вантажу таким чином, щоб енергетичні затрати на утримування були мінімальними. Для цього переміщення на даній ділянці необхідно здійснити за найкоротший час, а орієнтація ЗП повинна забезпечувати мінімальне енергоспоживання.

Відомо, що переміщення за найкоротший час при обмежених потужностях приводів маніпулятора здійснюється тоді, коли рух на половині траєкторії A_1B_1 відбувається з максимальним прискоренням, а на другій частині траєкторії – з максимальним уповільненням.

Знайдемо оптимальну орієнтацію ЗП на частині ділянки, де вантаж рухається з максимальним прискоренням \bar{a} . Підймальна сила ЗП направлена в протилежному напрямку до осі \bar{n} орієнтації ЗП. Очевидно, що ця вісь повинна бути орієнтована таким чином, щоб роль підймальної сили виконувала результуюча від сил тяжіння та інерції вантажу. На рис. 2.10 вважаємо, що вісь орієнтації направлена в напрямку вектора \bar{n} .

Результуюча сила (без врахування сили підймання) дорівнює:

$$\bar{F} = \bar{F}_{in} + m\bar{g}; \quad (2.8)$$

$$\bar{F}_{in} = -m\bar{a}. \quad (2.9)$$

У проекціях на осі x' , y' рівняння (2.8) набуде вигляду

$$\begin{cases} -F \sin \alpha = -m a \cos \beta; \\ -F \cos \alpha = -m a \sin \beta - mg. \end{cases} \quad (2.10)$$

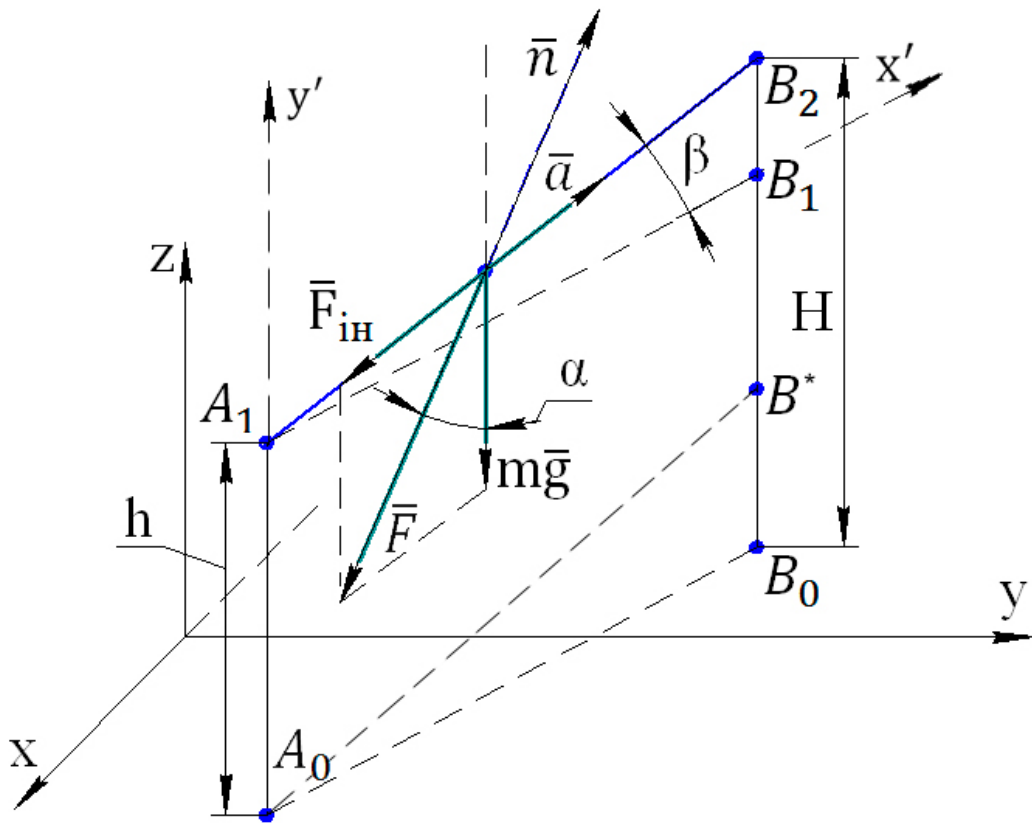


Рис. 2.10 Сили які діють на вантаж під час маніпулювання (глобальна система координат)

Розв'язавши отриману систему рівнянь відносно F і α , отримаємо:

$$F = \sqrt{m^2(a^2 + g^2) + 2mga \sin \beta}; \quad (2.11)$$

$$\alpha = \arctg \frac{a \cos \beta}{g + a \sin \beta}. \quad (2.12)$$

Формула (2.12) визначає оптимальний кут орієнтації ЗП при русі з прискоренням (уповільненням) \bar{a} . Якщо $\beta = 0$ тоді $\alpha = \arctg \frac{a}{g}$.

Для отримання реальних параметрів руху маніпулятора IRB 1200 необхідно просимулювати відпрацювання ним заданої траєкторії в програмному середовищі RobotStudio (ABB corporation) [95], причому із зміною орієнтації між точками A_1 , B_2 .

При маніпулюванні габаритними вантажами кінцева ланка маніпулятора часто не може забезпечити необхідну орієнтацію. Зокрема під час виходу на

початкову точку прямої і подальшому русі захоплювального пристрою може відбутися зіткнення вантажу з передпліччям маніпулятором (рис. 2.11).

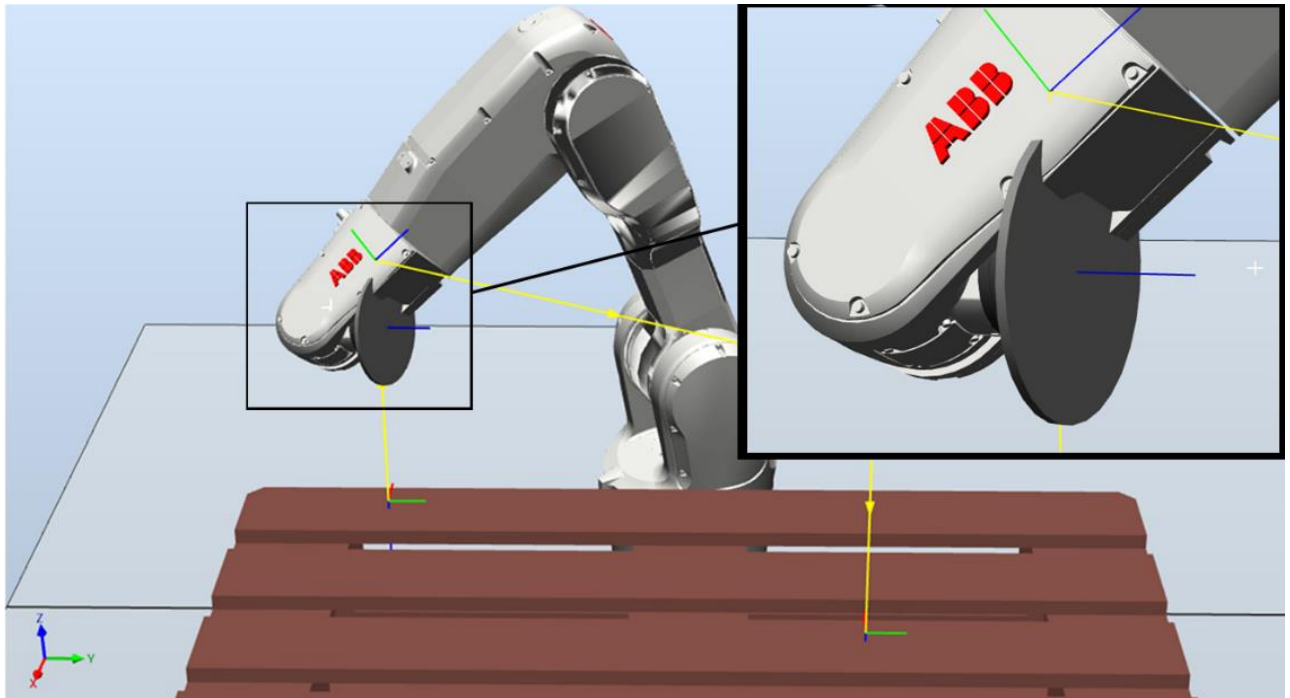


Рис. 2.11 Зіткнення вантажу з маніпулятором

У таких випадках доцільно використати відому методику, яку застосовують при контурній зварці. Для цього подовжують кріплення захоплювального пристрою і зміщують кут нахилу осі \bar{n} захоплювального пристрою на 30 градусів відносно орієнтації кінцевої ланки (рис. 2.12). Завдяки цьому маніпулятор може забезпечити необхідну орієнтацію.

Основні точки переорієнтації на прямолінійній траєкторії руху вантажу визначались відповідно до рисунку 2.13. Під час симуляції вводились обмеження прискорення на всьому шляху за допомогою функції `PathAccLim` (`PathAccLim TRUE \AccMax := 2, TRUE \DecelMax := 2;`).

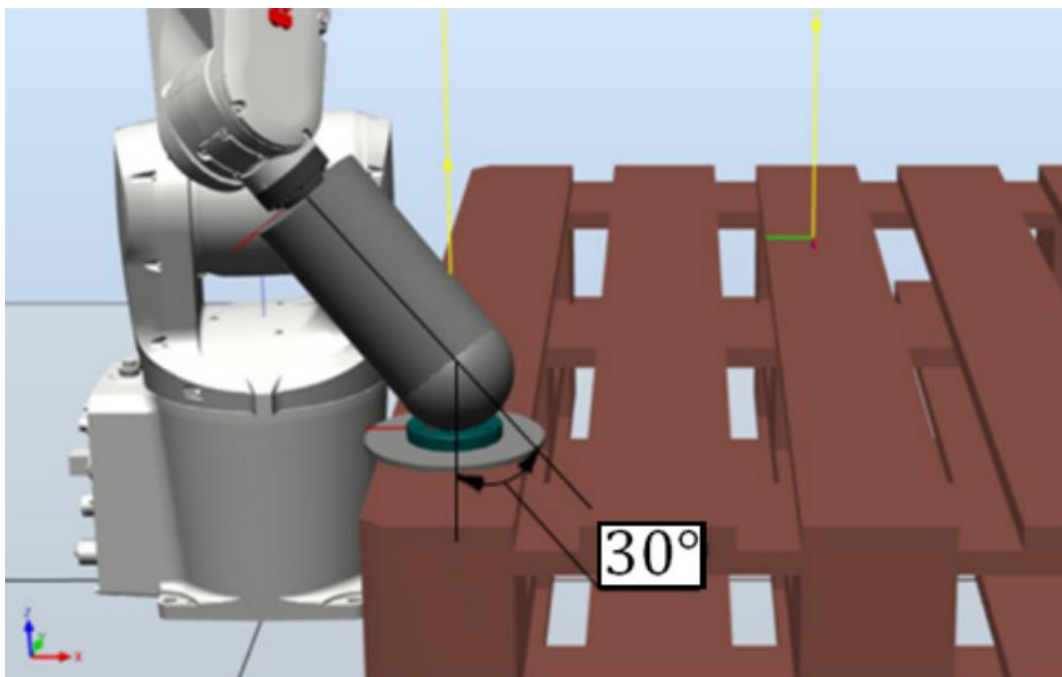


Рис. 2.12 Використання подовжувача захоплювального пристрою для розширення діапазону переорієнтації

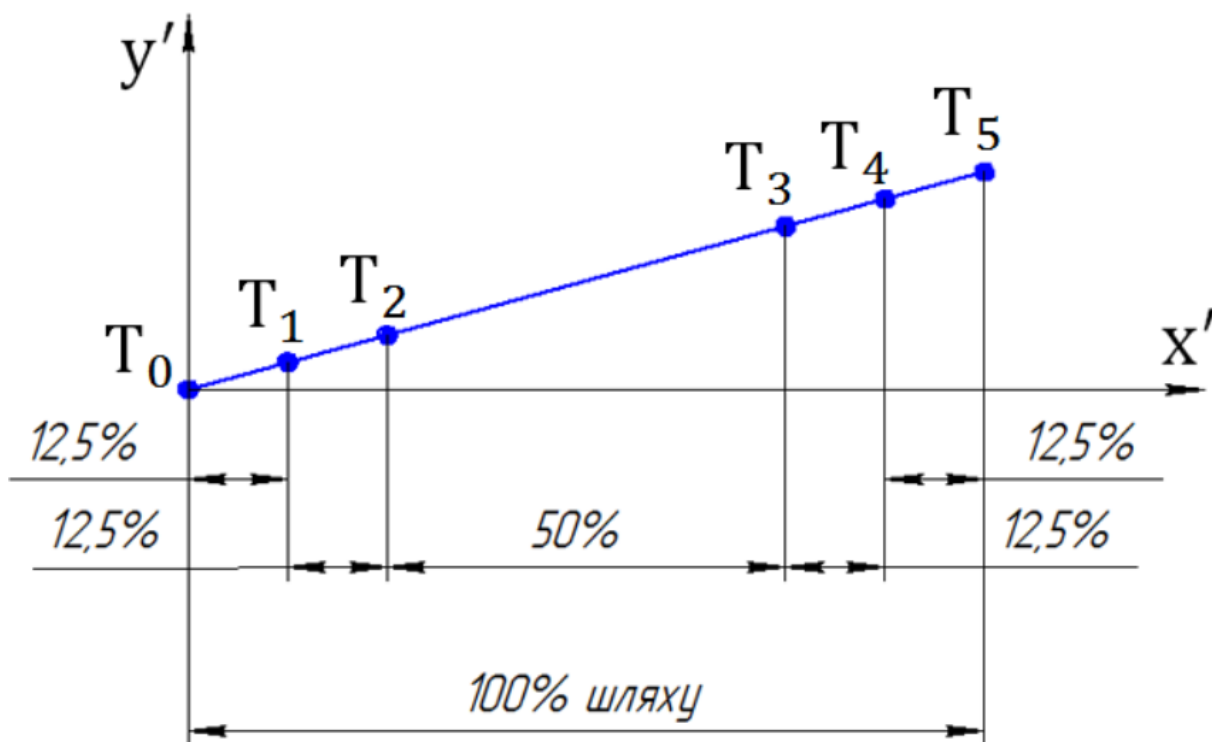


Рис. 2.13 Положення точок переорієнтації на прямолінійній ділянці траєкторії

З метою забезпечення трапецієподібного швидкісного профілю, достатньо обмежити швидкість T_1 - T_5 за допомогою функції [VAR speeddata](#)

vmedium.

У результаті симуляції отримаємо графік зміни прискорення захоплювального пристрою (рис. 2.14), який необхідний для знаходження оптимальної орієнтації.

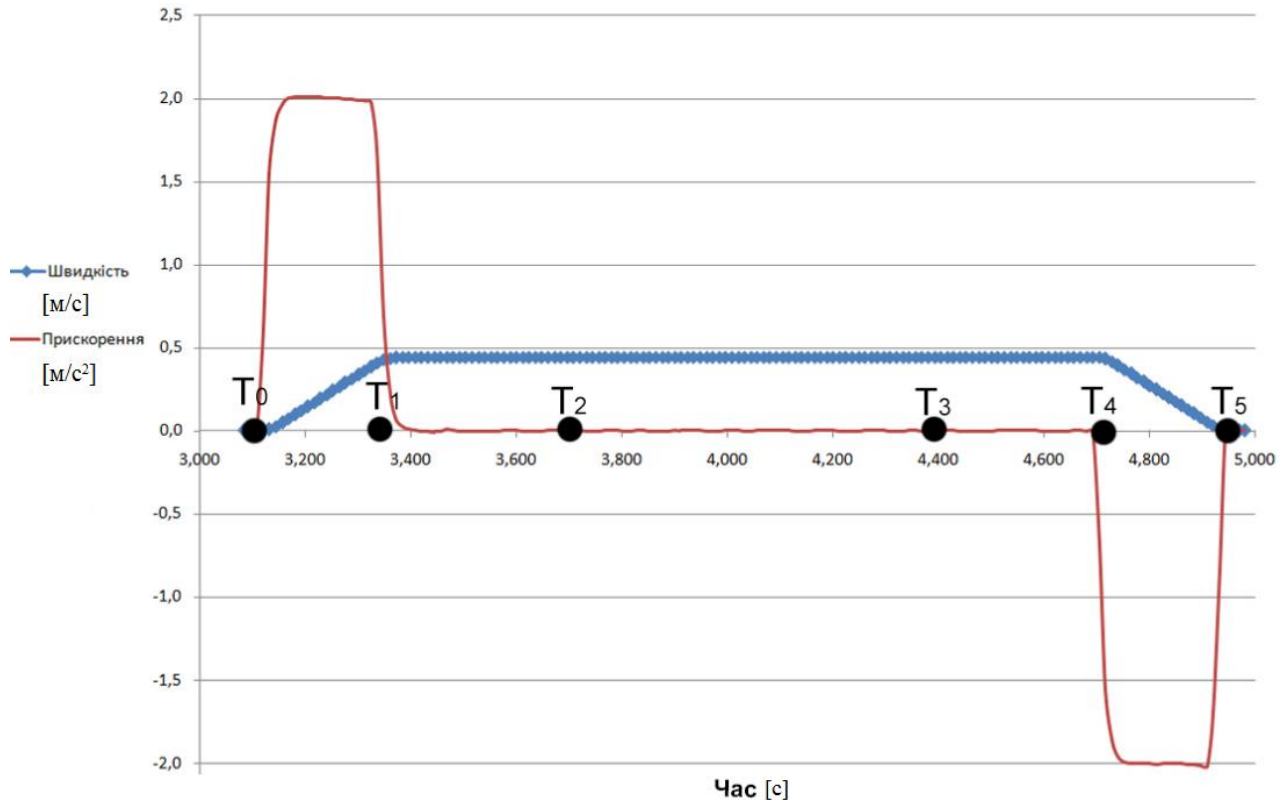


Рис. 2.14 Графік зміни швидкості та прискорення захоплювального пристрою

Далі визначаємо орієнтацію ЗП (кут між осями \bar{n} і Z) на ділянці розгону T_0T_1 та уповільнення T_4T_5 за формулою (2.12). На ділянці T_1T_2 необхідно змінити орієнтацію з кута α визначеного за формулою (2.12) до $\alpha=0$, так як на середній ділянці T_2T_3 рух рівномірний. На ділянці T_2T_3 орієнтація залишається незмінною, тобто $\alpha=0$. На ділянці T_3T_4 задається зміна орієнтації з $\alpha=0$ до кута α визначеного за формулою (2.12). Така ж орієнтація зберігається на відріжку T_4T_5 .

На відрізках траєкторії T_1T_2 і T_3T_4 , для забезпечення безвідривного транспортування вантажу, сила притягання створювана захоплювальним пристроєм повинна бути найбільшою. Найнесприятливіший випадок буде тоді коли в точці T_1 прискорення дорівнюватиме нулю, а кут нахилу в ній ще буде рівним куту α обчисленим за формулою (2.12) (рис. 2.15).

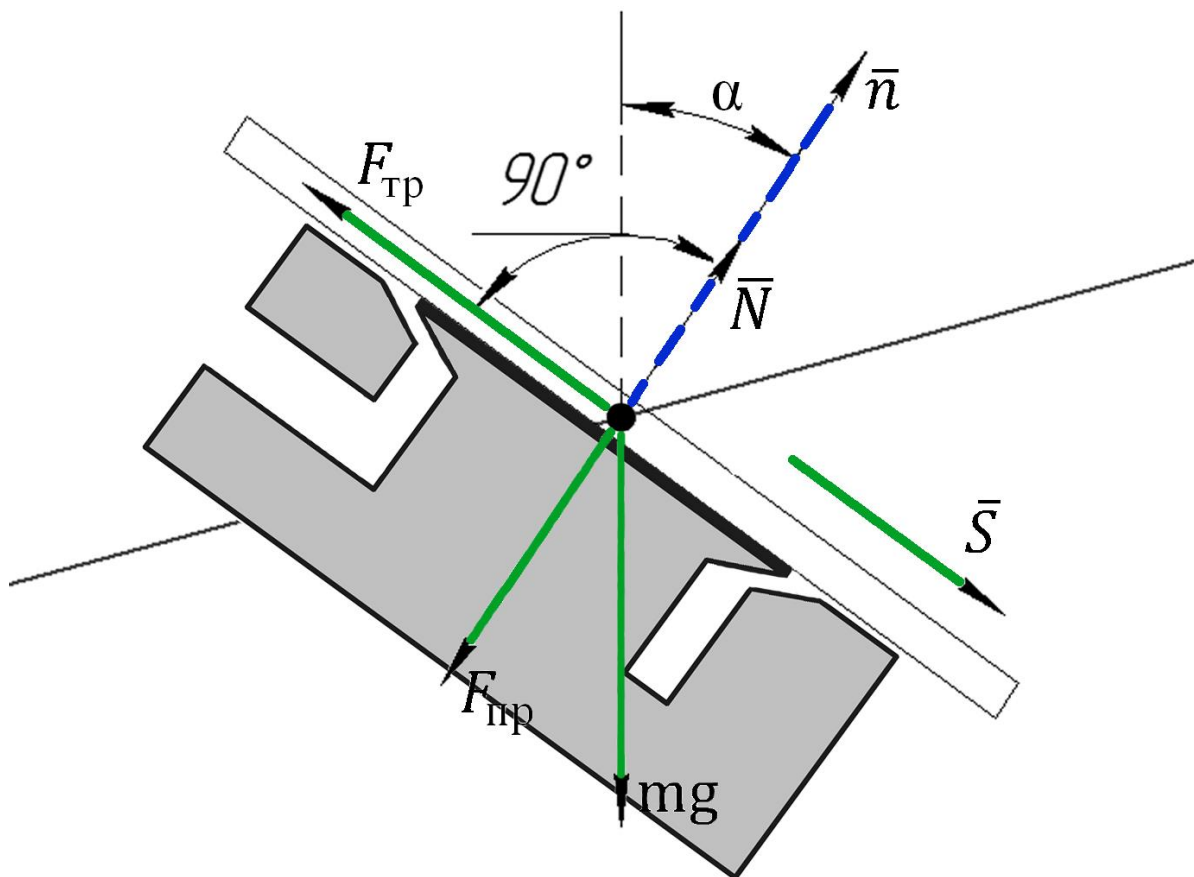


Рис. 2.15 Сили що діють на вантажу в точці T_1 при найнесприятливішому випадку

Знайдемо обмеження на величину підйомальної сили в цьому випадку. В точці T_1 вантаж може втратити відносну рівновагу і почати переміщатися в напрямку \bar{S} . В результаті виникає сила тертя в площині контакту вантажу з конічною вставкою СЗП $F_{mp} = fN$, де f – коефіцієнт тертя.

Умови рівноваги вантажу наступні

$$N - mg \cos \alpha - F_n = 0, \quad (2.13)$$

$$F_{mp} - mg \sin \alpha = 0. \quad (2.14)$$

З першого рівняння знайдемо

$$N = mg \cos \alpha + F_n. \quad (2.15)$$

Тоді $f(mg \cos \alpha + F_n) - mg \sin \alpha = 0$.

Для забезпечення безвідривного транспортування вантажу потрібне виконання умови

$$F_n \geq mg \left(\frac{\sin \alpha}{f} - \cos \alpha \right). \quad (2.16)$$

На відрізку T_3T_4 необхідну величину підйимальної сили визначаємо аналогічно, лише з врахуванням кута α відповідно до формули (2.12).

Для випадку транспортування вантажу без його переорієнтації (рис. 2.2), ЗП на протязі усієї транспортної операції повинен забезпечувати силу підіймання, що визначається за наступною формулою [120]:

$$F_n \geq m \left[g + a \left(\frac{\sin \gamma}{f} - \cos \gamma \right) \right], \quad (2.15)$$

де γ - кут між вектором прискорення і віссю \bar{n} .

Для прикладу розглянемо транспортування вантажу масою $m = 0,1$ кг, коефіцієнта тертя $f = 0,2$. При таких параметрах оптимальний кут на ділянці розгону $\alpha = 11,3^\circ$, а необхідна сила притягання для утримування вантажу становитиме $F_n \geq -0,0294$ Н, це свідчить про те, що на відрізках T_1T_2 і T_3T_4 транспортування буде здійснюватись безвідривно, без прикладання підйимальної сили. При інших заданих параметрах може виникати потреба в підйимальній силі. Під час транспортування вантажу без переорієнтації кут $\gamma = 90^\circ$, мінімальна необхідна сила притягання обчислюється за формулою (2.15) і рівна $F_n \geq 14,98 \approx 15$ Н.

2.3. Моделювання динамічної взаємодії СЗП з вантажем при його транспортуванні по прямолінійній траєкторії

Основне завдання моделювання полягає у визначенні оптимальної орієнтації захоплювального пристрою при якій енергетичні затрати на

утримування вантажу будуть мінімальними. Вихідними даними є технічні характеристики СЗП, параметри вантажу та траєкторії. Моделювання будемо проводити для випадку, коли центр ваги вантажу зміщений відносно осі симетрії ЗП, також будемо враховувати сили лобового опору повітря та інерційні сили, що виникають при переорієнтації.

Мінімізація енергоспоживання стиснутого повітря струминним захоплювальним пристроєм [97, 45] (рис. 1.5), тобто мінімізація сили притягання, буде забезпечена тоді коли реакції в опорах захоплюючого пристрою будуть мінімальними при забезпеченні безвідривного транспортування вантажу. Для цього потрібно, щоб виконувались умови рівноваги всіх сил, що діють на вантаж.

Розглянемо приклад транспортування вантажу по прямолінійній траєкторії (рис. 2.16). СЗП притягує транспортований вантаж та притискує його до трьох фрикційних елементів. Така схема базування покращує стабільність утримування габаритних вантажів, на відміну від схеми представленої у попередньому підрозділі. Симуляцію руху по даній траєкторії здійснюватимемо з використанням маніпулятора IRB 1200 (ABB), а дані для перевірки моделі отримаємо за допомогою програмного забезпечення RobotStudio (ABB)[97].

Сила лобового опору в загальному вигляді обчислюється за формулою:

$$Q = k_{lo} \cdot S \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2}, \quad (2.16)$$

де k_{lo} - коефіцієнт лобового опору тіла, який залежить від форми поверхні вантажу, ρ - густина повітря, v - швидкість руху вантажу, S - міделева площа вантажа, тобто площа перпендикулярна до напрямку руху тіла.

Для пластини сила лобового опору рівна [25]:

$$Q = \rho \cdot S \cdot v^2 \frac{\pi \sin \alpha}{4 + \pi \sin \alpha}, \quad (2.17)$$

де α кут між напрямком руху вантажу і нормаллю до площини пластини.

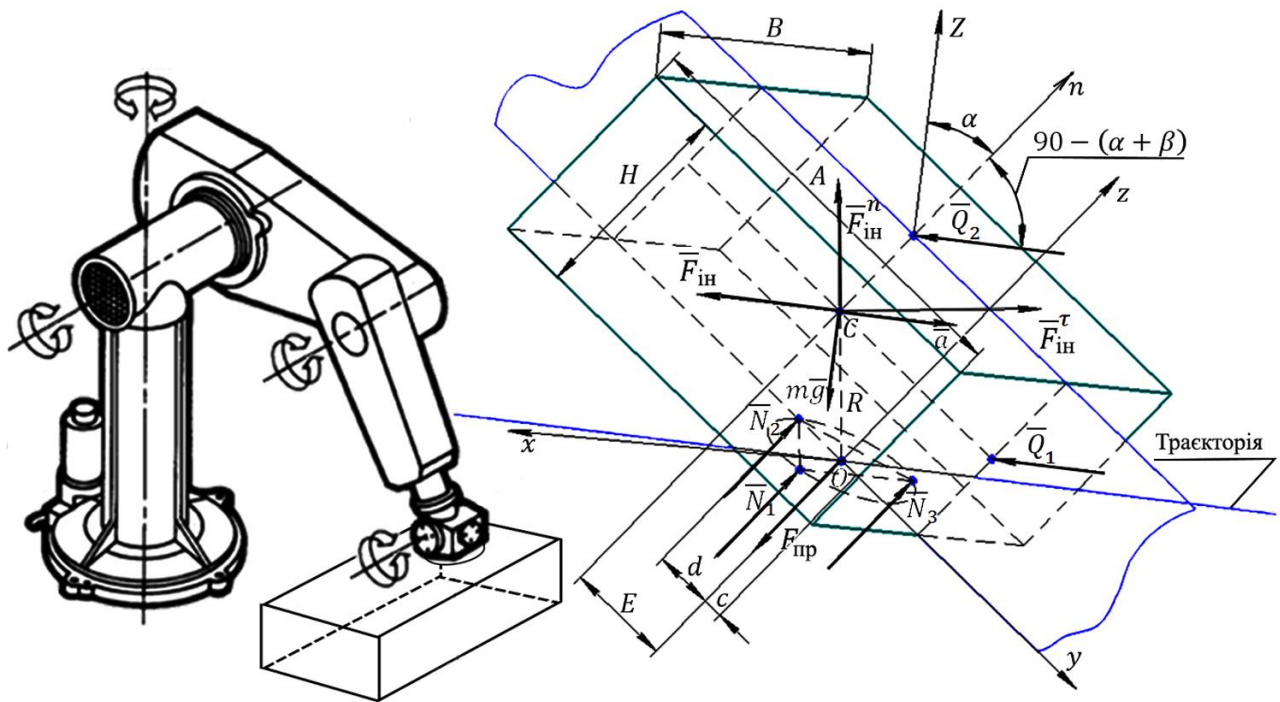


Рис. 2.16 Розрахункова схема сил, що діють на вантаж призматичної форми під час транспортування

Для вантажів з іншою формою, використовується формула (2.16) в якій коефіцієнт лобового опору (k_{lo}) залежить від форми вантажу [23, 33].

У нашому випадку (паралелепіпед) є дві складові сили лобового опору (Q_1 на площину $PGTF$, Q_2 на площину $LNGP$) (рис 2.17):

$$Q_1 = \rho B H v^2 \frac{\pi \cos \alpha}{4 + \pi \cos \alpha};$$

$$Q_2 = \rho A B v^2 \frac{\pi \sin \alpha}{4 + \pi \sin \alpha}.$$
(2.18)

На рисунку 2.18 представлений графік швидкостей і прискорень, при транспортуванні вантажу масою 1кг, за час 1,9с за допомогою програмного забезпечення RobotStudio (ABB).

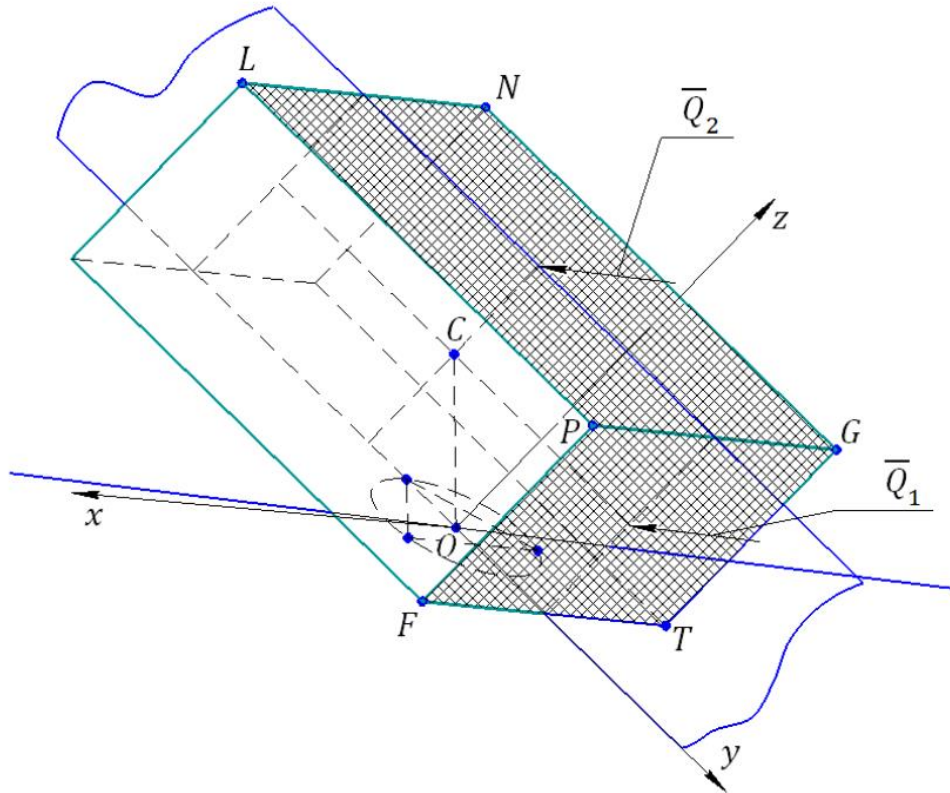


Рис. 2.17 Площини вантажу на які діють сили лобового опору

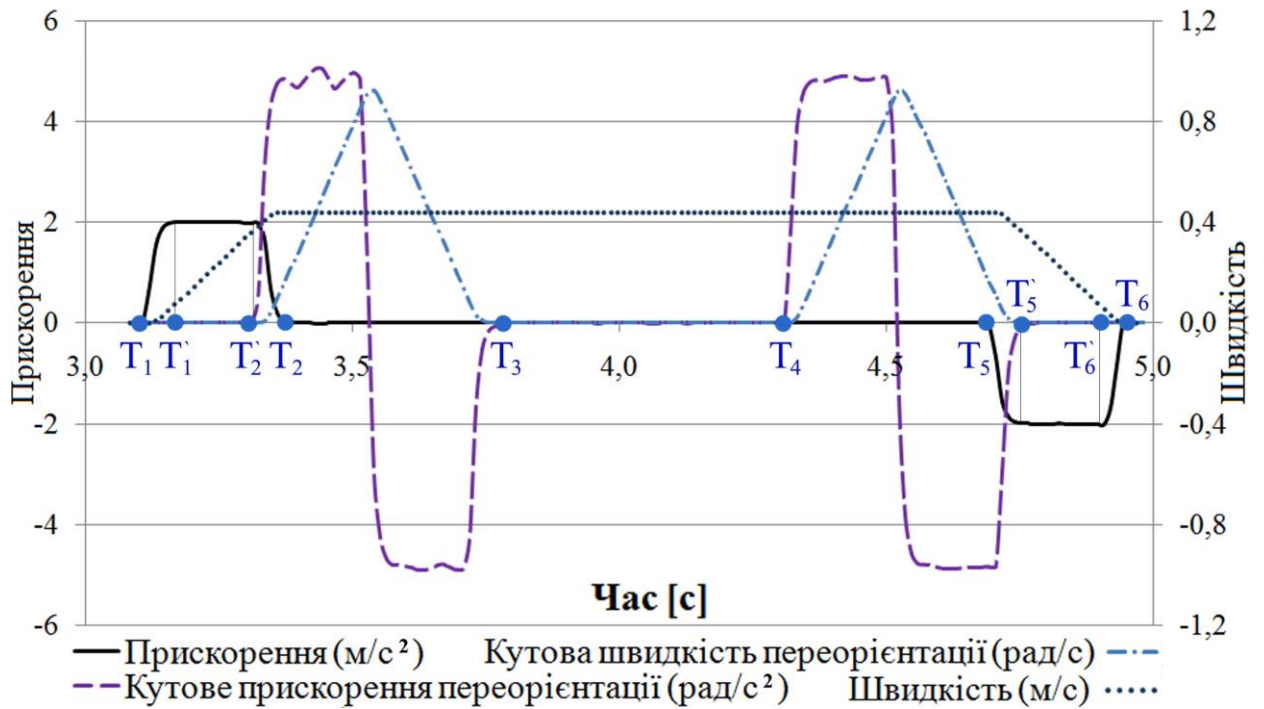


Рис. 2.18 Графік швидкостей і прискорень вантажу
 (T_1 -3,1 с, T_2 -3,3 с, T_3 -3,75 с, T_4 -4,3 с, T_5 -4,69 с, T_6 -4,95 с.)

Траєкторію T_1-T_6 розділено 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 зі 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 запропонованої моделі безвідривне транспортування вантажу забезпечується на відрізках: T_1-T_1' , $T_2'-T_3$, T_4-T_5' , $T_6'-T_6$ за рахунок сили притягання захоплювального пристрою (ЗП), $T_1'-T_2'$, T_3-T_4 , $T_5'-T_6'$ за рахунок оптимальної орієнтації і сили притягання ЗП.

Для відрізків прямої T_1-T_1' , $T_1'-T_2'$, $T_2'-T_3$, T_3-T_4 , T_4-T_5' , $T_5'-T_6'$, $T_6'-T_6$ необхідно знайти мінімальну силу притягання для забезпечення безвідривного транспортування вантажу. Для відрізків $T_1'-T_2'$, T_3-T_4 , $T_5'-T_6'$ потрібно знайти оптимальну орієнтацію, тобто кут α , при якому сила притягання для забезпечення безвідривного транспортування вантажу буде мінімальною.

Запишемо умови рівноваги всіх сил, що діють на вантаж, відносно системи координат, зв'язаної з ЗП:

$$\begin{aligned}
 \sum X &= 0 \Rightarrow 0 = 0, \\
 \sum Y &= 0 \Rightarrow mg \sin \alpha - (Q_1 + Q_2 + F_{in}) \cos(\alpha + \beta) - m\omega^2 E + \\
 &+ m\varepsilon \frac{H}{2} - f(N_1 + N_2 + N_3) = 0, \\
 \sum Z &= 0 \Rightarrow -mg \cos \alpha - (Q_1 + Q_2 + F_{in}) \sin(\alpha + \beta) - F_{np} + \\
 &+ N_1 + N_2 + N_3 + m\omega^2 \frac{H}{2} + m\varepsilon E = 0, \\
 \sum M_{ox} &= 0 \Rightarrow (N_1 + N_3)c - N_2d + mgE \cos \alpha - mg \frac{H}{2} \sin \alpha + \\
 &+ F_{in}E \sin(\alpha + \beta) + F_{in} \frac{H}{2} \cos(\alpha + \beta) + Q_1 \frac{A}{2} \cos(\alpha + \beta) - \\
 &- Q_1 \left(\frac{A}{2} - E \right) \sin(\alpha + \beta) + Q_2 H \cos(\alpha + \beta) + Q_2 E \sin(\alpha + \beta) - m\varepsilon R^2 = 0, \\
 \sum M_{oy} &= 0 \Rightarrow (N_1 - N_3)W = 0 \Rightarrow N_1 = N_3, \\
 \sum M_{oz} &= 0 \Rightarrow 0 = 0.
 \end{aligned} \tag{2.19}$$

З умови $\sum Y = 0$, $\sum M_{ox} = 0$ знаходимо N_1 і N_2 :

$$\begin{aligned}
 N_1 = & \left(\frac{d}{2(c+d)f} \right) \left[mg \sin(\alpha) - (Q_1 + Q_2 + F_{in}) \cos(\alpha + \beta) - \right. \\
 & \left. -m \left(\omega^2 E - \varepsilon \frac{H}{2} \right) \right] - \\
 & - \frac{1}{2(c+d)} mgE \cos(\alpha) + \frac{1}{2(c+d)} mg \frac{H}{2} \sin(\alpha) - \frac{1}{2(c+d)} maE \sin(\alpha + \beta) - \\
 & - \frac{1}{2(c+d)} ma \frac{H}{2} \cos(\alpha + \beta) - \frac{1}{2(c+d)} Q_1 \frac{A}{2} \cos(\alpha + \beta) + \\
 & + \frac{1}{2(c+d)} Q_1 \left(\frac{A}{2} - E \right) \sin(\alpha + \beta) - \frac{1}{2(c+d)} Q_2 H \cos(\alpha + \beta) - \\
 & - \frac{1}{2(c+d)} Q_2 E \sin(\alpha + \beta) + \frac{1}{2} m \varepsilon R^2,
 \end{aligned} \tag{2.20}$$

$$\begin{aligned}
 N_2 = & \frac{c}{(c+d)f} \left[mg \sin(\alpha) - (Q_1 + Q_2 + F_{in}) \cos(\alpha + \beta) - \right. \\
 & \left. -m \left(\omega^2 E - \varepsilon \frac{H}{2} \right) \right] + \\
 & + \frac{1}{(c+d)} mgE \cos(\alpha) - \frac{1}{(c+d)} mg \frac{H}{2} \sin(\alpha) + \frac{1}{(c+d)} maE \sin(\alpha + \beta) + \\
 & + \frac{1}{(c+d)} ma \frac{H}{2} \cos(\alpha + \beta) + \frac{1}{(c+d)} Q_1 \frac{A}{2} \cos(\alpha + \beta) - \\
 & - \frac{1}{(c+d)} Q_1 \left(\frac{A}{2} - E \right) \sin(\alpha + \beta) + \frac{1}{(c+d)} Q_2 H \cos(\alpha + \beta) + \\
 & + \frac{1}{(c+d)} Q_2 E \sin(\alpha + \beta) - m \varepsilon R^2.
 \end{aligned} \tag{2.21}$$

З (2.19, 2.20, 2.21) випливає, що $N_2 > N_1$, оскільки центр мас вантажу зміщується в сторону N_2 і коли задовільняються передумови перекидання вантажу $N_1 = N_3 = 0$, в такому випадку сила притягання буде мінімальною. З цієї умови на основі (2.19) отримаємо рівняння для знаходження кута α :

$$\begin{aligned}
& m \left[\varepsilon \left(R^2 + \frac{Hd}{2f} \right) - \frac{d}{f} \omega^2 E \right] + \\
& + m \left\{ \begin{aligned} & \frac{d}{f} (g \sin(\alpha) - a \cos(\alpha + \beta)) - g \left(E \cos(\alpha) - \frac{H}{2} \sin(\alpha) \right) - \\ & - a \left(E \sin(\alpha + \beta) + \frac{H}{2} \cos(\alpha + \beta) \right) \end{aligned} \right\} - \\
& - Q_1 \left[\left(\frac{d}{f} + \frac{A}{2} \right) \cos(\alpha + \beta) + \left(E - \frac{A}{2} \right) \sin(\alpha + \beta) \right] + \\
& + Q_2 \left[\left(\frac{d}{f} + H \right) \cos(\alpha + \beta) + E \sin(\alpha + \beta) \right] = 0.
\end{aligned} \tag{2.22}$$

Для прикладу підставимо дані для ділянки $T_1' - T_2'$ ($A = 0,25$ м, $B = 0,1$ м, $H = 0,1$ м, $E = 0,095$ м, $d = 0,03$ м, $c = 0,015$ м, $\rho = 1,25$ кг/м³, $\beta = 0$ рад, $a = 2$ м/с², $m = 0,1$ кг, $\omega = 0$ рад/с, $\varepsilon = 0$ рад/с², $f = 0,11$) при швидкості $v = 0,44$ м/с оптимальний кут дорівнює $\alpha = 28,075$ град., а при швидкості $v = 0,22$ м/с оптимальний кут дорівнює $\alpha = 27,96$ град.. З цього можна зробити висновок, що оптимальна орієнтація майже не буде змінювати своє значення при такій зміні швидкості, а буде змінювати значення лише при збільшенні прискорення (рис. 2.19), тому за оптимальний кут будемо приймати α при максимальній швидкості.

З третього рівняння (2.19) знайдемо мінімальну силу притягання F_{np} , яка необхідна при забезпеченні оптимальної орієнтації:

$$\begin{aligned}
F_{np} = m \left[g \left(\frac{\sin(\alpha)}{f} - \cos(\alpha) \right) - \omega^2 \left(\frac{E}{f} - \frac{H}{2} \right) + \varepsilon \left(\frac{H}{2f} + E \right) \right] - \\
- (Q_1 + Q_2 + F_{in}) \left(\frac{\cos(\alpha + \beta)}{f} + \sin(\alpha + \beta) \right).
\end{aligned} \tag{2.23}$$

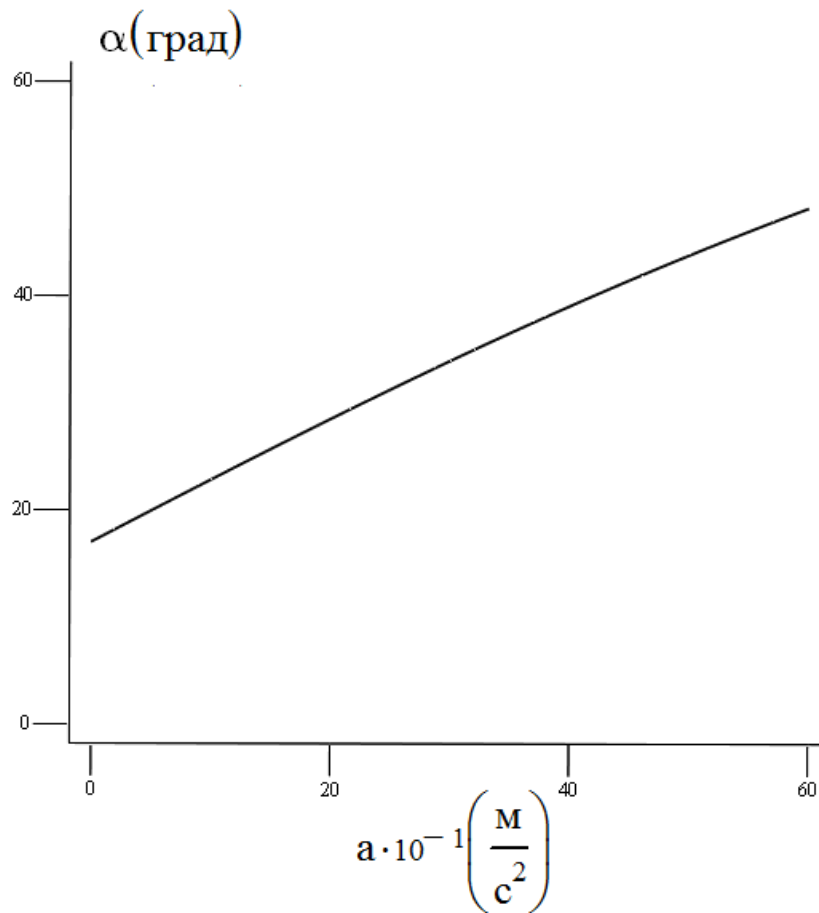


Рис. 2.19 Графік залежності кута оптимальної орієнтації від прискорення

В нашому випадку $\alpha = 28.075$ град., а мінімальна сила необхідна для безвідривного транспортування на цій ділянці $F_{np} \geq 1.606$ Н.

Аналогічно розраховуємо оптимальний кут орієнтації на ділянці $T_3 - T_4$ ($\alpha = 16.558$ град., $F_{np} \geq 1.58$ Н), $T_5 - T_6$ ($\alpha = 4.985$ град., $F_{np} \geq 1.613$ Н).

На відрізку $T_1 - T_1'$ знайдемо мінімальну необхідну силу притягання. Вона дорівнює максимальному значенню сили притягання, при зміні швидкості на проміжку $0 \leq v \leq 0.22$ м/с та прискорення на проміжку $0 \leq a \leq 2$ м/с² (рис. 2.20), на цій ділянці та має значення згідно наших даних $F_{np} \geq 3.328$ Н.

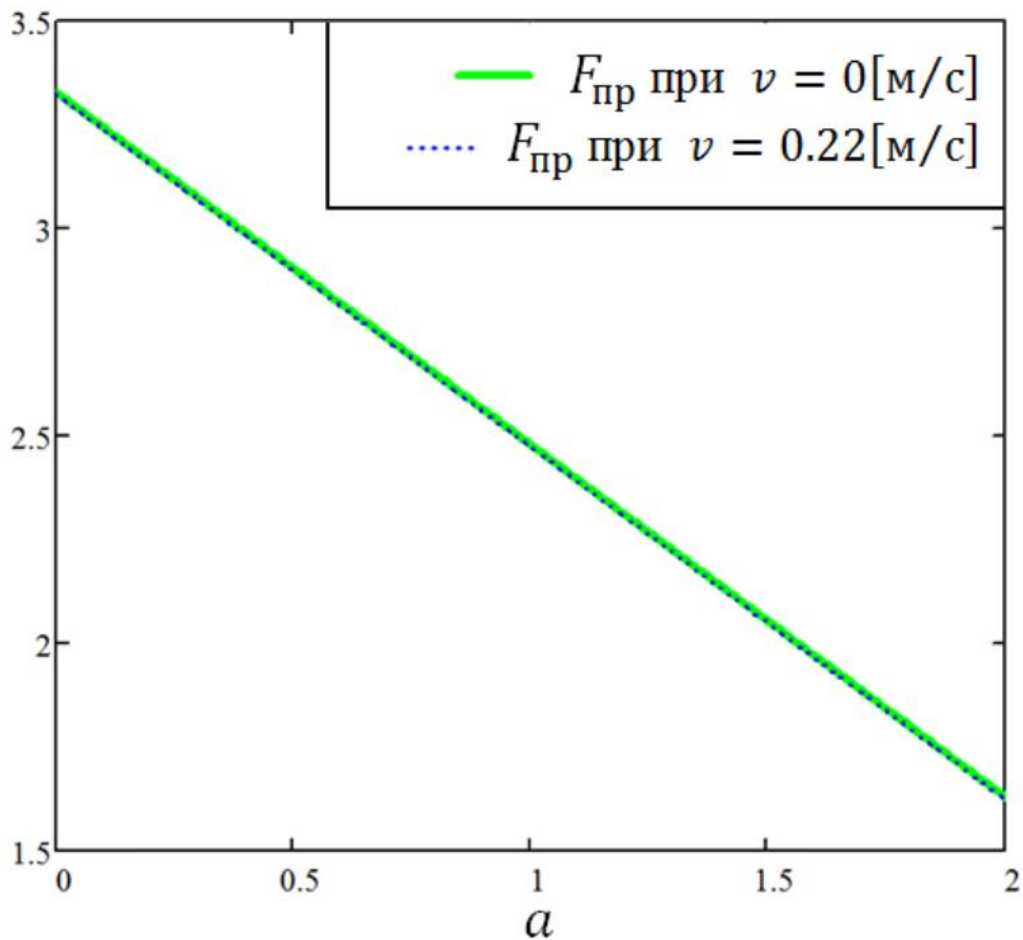


Рис. 2.20 Графік залежності мінімальної сили притягання від прискорення

Знайдемо необхідну силу притягання на відрізках $T_2' - T_3, T_4 - T_5'$ відносно зміни кута орієнтації $16.558 \leq \alpha \leq 28.075$ град. (рис. 2.21), $16.558 \leq \alpha \leq 4.985$ град. (рис. 2.22), прискорення переорієнтації $-5 \leq \varepsilon \leq 5$ рад/с² і швидкості переорієнтації $0 \leq \omega \leq 1$ рад/с. Вона дорівнює максимальному значенню мінімальної необхідної сили притягання для забезпечення безвідривної переорієнтації вантажу на цих відрізках. В нашому випадку для відрізка $T_2' - T_3$ сила притягання повинна задовольняти умові $F_{пр} \geq 3.581$ Н, а для відрізка $T_4 - T_5'$ $F_{пр} \geq 1.855$ Н.

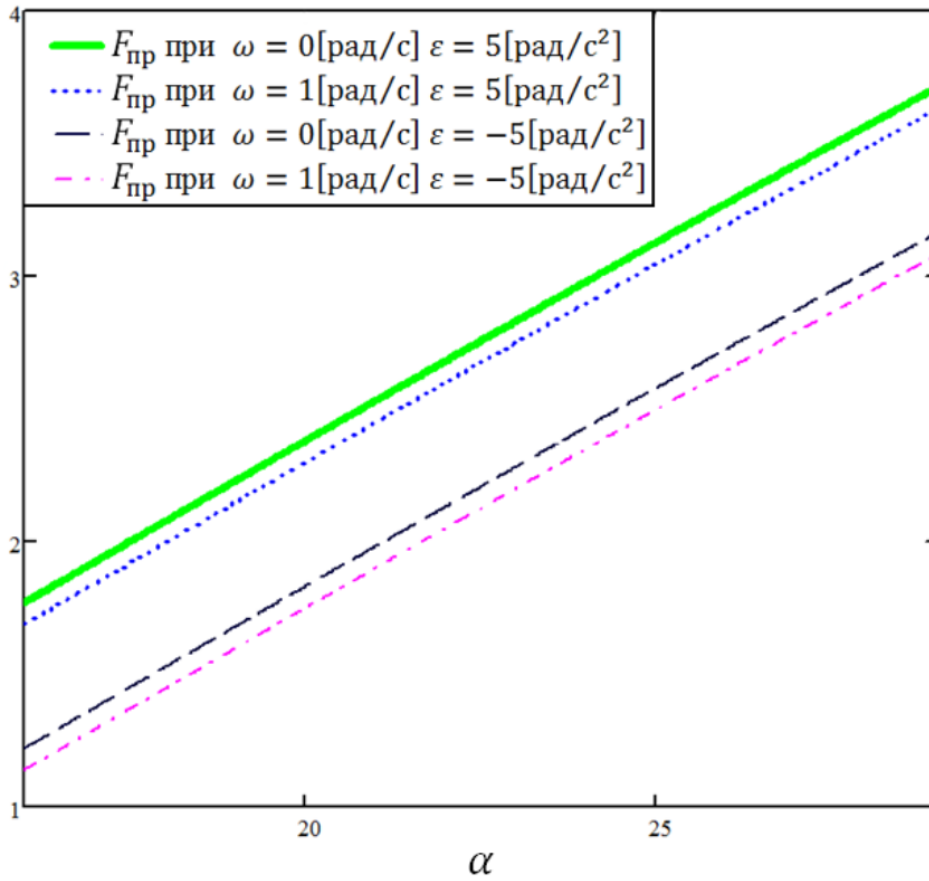


Рис. 2.21 Графік залежності мінімальної сили притягання від орієнтації
 $16.558 \leq \alpha \leq 28.075$ град.

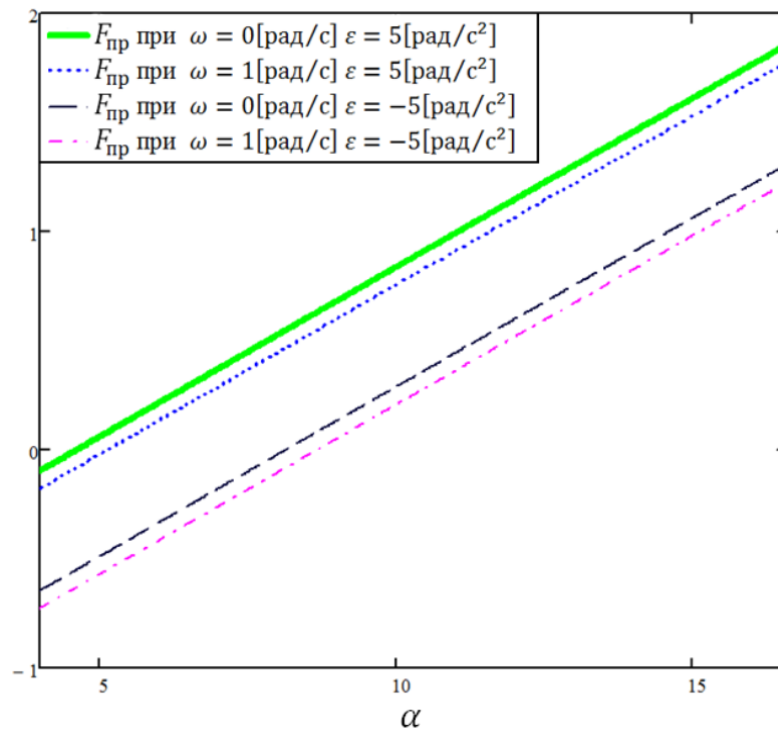


Рис. 2.22 Графік залежності мінімальної сили притягання від орієнтації
 $16.558 \leq \alpha \leq 4.985$ град

Мінімально необхідна сила притягання на відрізку $T_6' - T_6$ дорівнює максимальному значенню мінімальної сили притягання відносно зміни швидкості $0 \leq v \leq 0.22 \text{ м/с}$ та прискорення $0 \leq a \leq -2 \text{ м/с}^2$ (Рис. 2.23) за нашими даними $F_{np} \geq 1.627 \text{ Н}$.

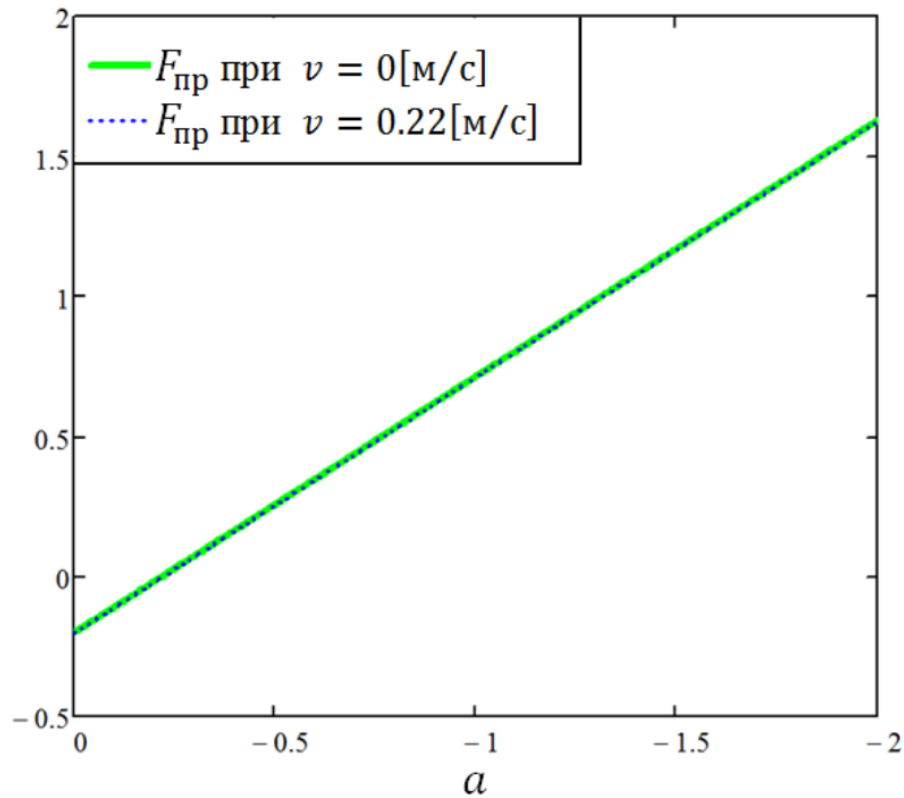


Рис. 2.23 Графік залежності мінімальної сили притягання від прискорення

Для оцінки впливу зміщення центру мас вантажу відносно осі симетрії ЗП побудуємо графік залежності кута оптимальної орієнтації від зміщення центра мас вантажу (рис. 2.24).

З рисунку 2.24 видно, що для $E = 0 \text{ м}$, $F_{np} = -0.978 \text{ Н}$, це означає, що при таких параметрах реакції в опорах ЗП додатні і сила притягання непотрібна для утримування вантажу. Для $E = 0.095 \text{ м}$ сила притягання буде дорівнювати $F_{np} = 1.58 \text{ Н}$. Очевидно, що мінімальна необхідна сила притягання буде зростати з віддаленням центра мас вантажу відносно осі симетрії ЗП.

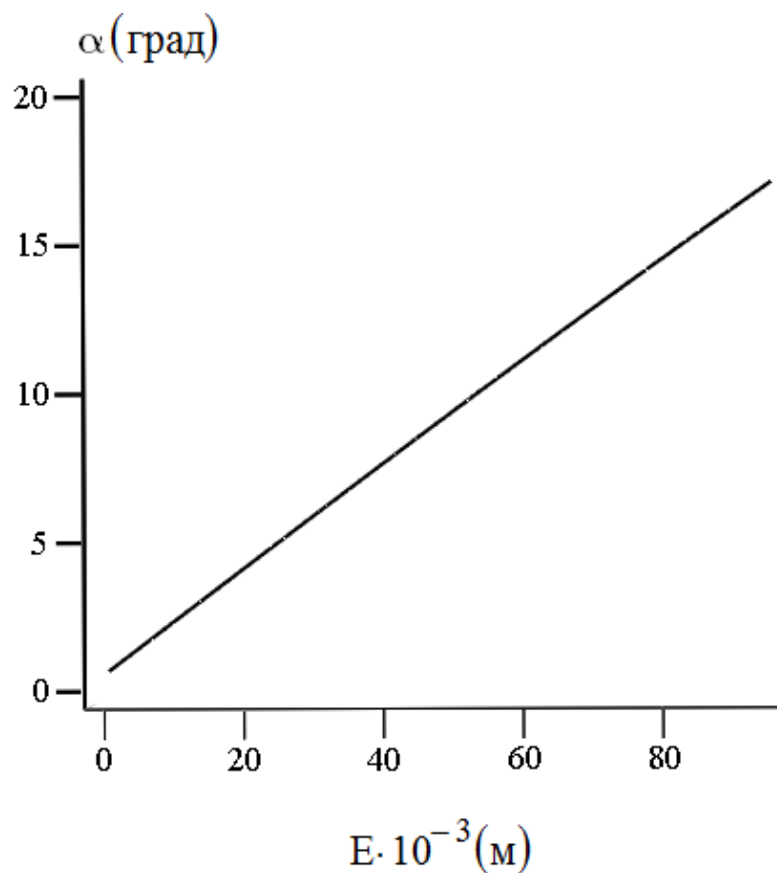


Рис. 2.24 Графік залежності кута оптимальної орієнтації від зміщення центра мас

Аналіз впливу сил лобового опору на необхідну мінімальну силу притягання для транспортування вантажу надана в таблиці 1.

Як бачимо з таблиці 1 врахування сил лобового опору необхідне при транспортуванні габаритних вантажів, а також при транспортуванні вантажів на великій швидкост

Результати обчислень

	$v = 0.44 \text{ м/с}$		$v = 5 \text{ м/с}$	
	$A = 0.25 \text{ м}$ $B = 0.1 \text{ м}$ $H = 0.1 \text{ м}$	$A = 0.5 \text{ м}$ $B = 0.2 \text{ м}$ $H = 0.2 \text{ м}$	$A = 0.25 \text{ м}$ $B = 0.1 \text{ м}$ $H = 0.1 \text{ м}$	$A = 0.5 \text{ м}$ $B = 0.2 \text{ м}$ $H = 0.2 \text{ м}$
З врахування сил лобового опору	$\alpha = 16.558$ $F_{np} = 1.58 \text{ Н}$	$\alpha = 14.897$ $F_{np} = 1.269 \text{ Н}$	$\alpha = 38.617$ $F_{np} = 1.89 \text{ Н}$	$\alpha = 72.078$ $F_{np} = 2.259 \text{ Н}$
Без врахування сил лобового опору	$\alpha = 16.387$ $F_{np} = 1.573 \text{ Н}$	$\alpha = 14.324$ $F_{np} = 1.255 \text{ Н}$	$\alpha = 16.387$ $F_{np} = 1.577 \text{ Н}$	$\alpha = 14.324$ $F_{np} = 1.255 \text{ Н}$
Процент збільшення сили притягання при врахуванні сил лобового опору відносно без врахування	0.44 %	1.1 %	16.6 %	44.4 %

2.4. Моделювання динамічної взаємодії струминного захоплювального пристрою з вантажем при його транспортуванні по гвинтовій траєкторії

Розглянемо випадок, транспортування плоских вантажів за допомогою струминного захоплювального пристрою, який представлений на рисунку 1.5. Рух по заданій гвинтовій траєкторії здійснюється за допомогою маніпулятора IRB 4600-20, який має 6 ступенів вільності. Програмування і симуляція руху захоплювального пристрою з вантажем здійснюється за допомогою програмного забезпечення RobotStudio (ABB corporation) [97].

Орієнтація захоплювального пристрою визначається напрямком вектора

\bar{n} , який співпадає з віссю захоплювального пристрою (рис. 2.25).

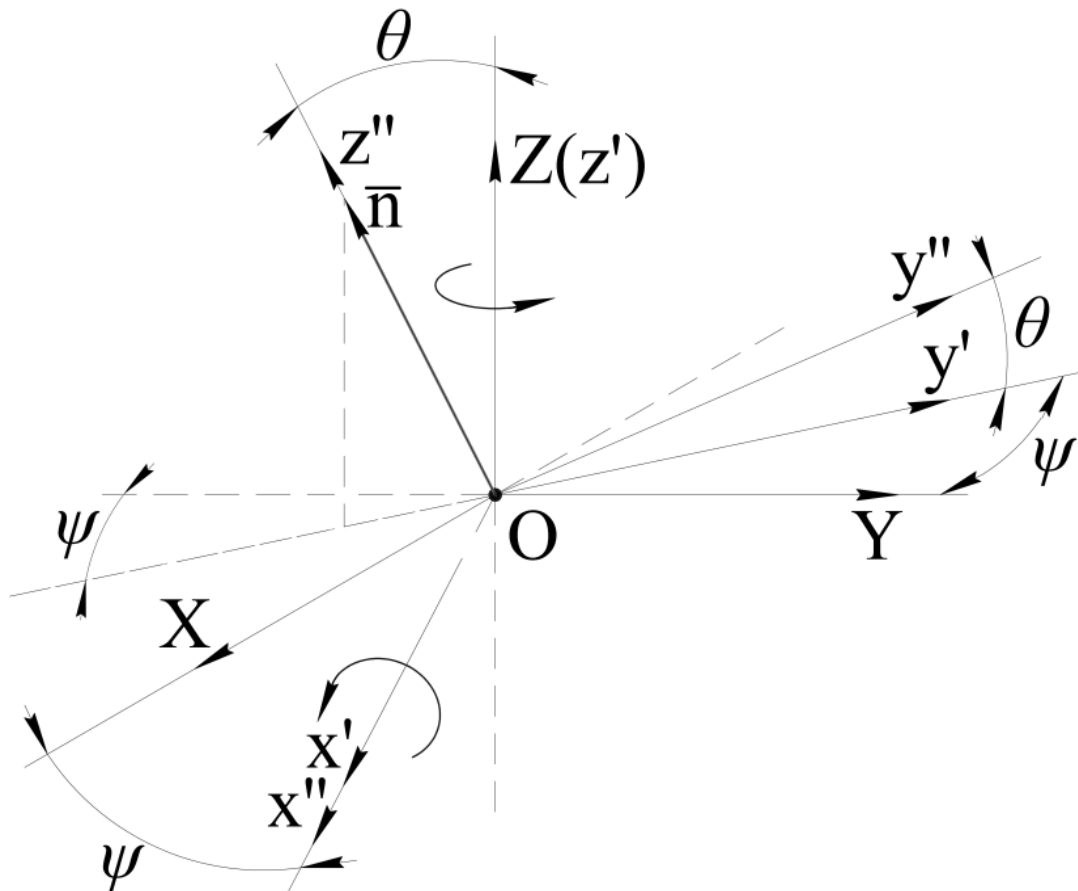


Рис. 2.25 Куты Ейлера для нахождения ориентации вектора \bar{n}

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

Кут ψ - це кут, який 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). Очевидно, що цей кут ψ рівний куту який відраховується від від'ємної півосі Y до проекції нормалі \bar{n} на площину XOY .

Кут θ - це кут, повороту навколо лінії вузлів Ox' . Додатній напрямок якого відраховується проти стрілки годинника, якщо дивитись з додатного напрямку Ox' .

Запишемо закон руху центра мас вантажу по гвинтовій траєкторії (рис. 2.26) у вигляді:

$$\begin{aligned}x &= R \cdot \cos \gamma(t); \\y &= R \cdot \sin \gamma(t); \\z &= k \cdot \gamma(t),\end{aligned}\tag{2.24}$$

де $\gamma(t)$ - деяка функція часу, R - радіус гвинтової траєкторії, k – коефіцієнт, який визначає величину вертикального переміщення вантажу.

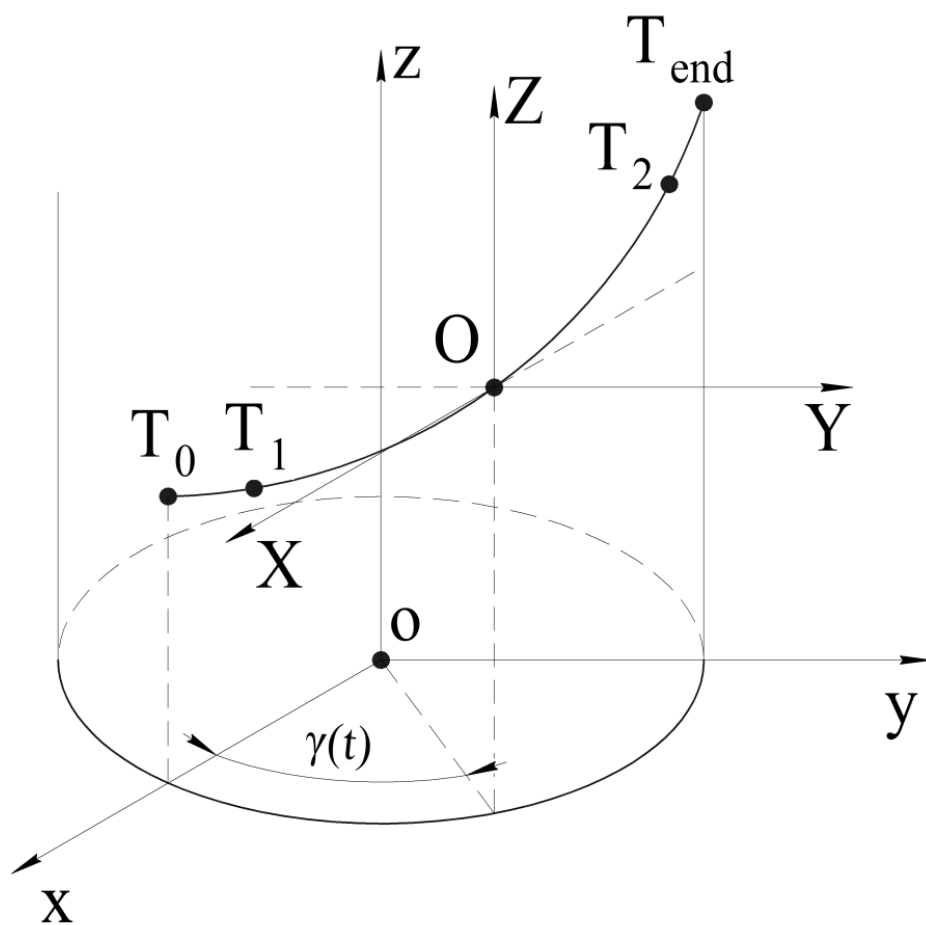


Рис. 2.26 Гвинтова траєкторія для якої буде проводитись оптимізація орієнтації захоплювального пристрою

Швидкість центра мас вантажу знаходимо за формулами:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= -R \sin \gamma \cdot \omega; \\ \dot{y} &= R \cos \gamma \cdot \omega; \\ \dot{z} &= k \omega,\end{aligned}\tag{2.25}$$

$$v = \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2} = \omega \sqrt{k^2 + R^2}. \quad (2.26)$$

Аналогічно для прискорення знайдемо:

$$\begin{aligned} \ddot{x} &= -R \cos \gamma \cdot \omega^2 - R \sin \gamma \cdot \varepsilon; \\ \ddot{y} &= -R \sin \gamma \cdot \omega^2 + R \cos \gamma \cdot \varepsilon; \\ \ddot{z} &= k\varepsilon, \end{aligned} \quad (2.27)$$

$$a = \sqrt{\ddot{x}^2 + \ddot{y}^2 + \ddot{z}^2} = \sqrt{R^2(\omega^4 + \varepsilon^2) + k^2\varepsilon^2},$$

$$\text{де } \omega = \frac{d\gamma}{dt}, \quad \varepsilon = \frac{d^2\gamma}{dt^2} = \frac{d\omega}{dt}.$$

Розглянемо першу ділянку траєкторії T_0-T_1 на якій відбувається розгін вантажу за час $0 \leq t \leq t_1$. Для цієї ділянки приймемо:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \sin^3 \frac{\pi t}{t_1}. \quad (2.28)$$

Інтегруючи двічі при початкових умовах $\omega(0) = 0$, $\gamma(0) = 0$, знайдемо:

$$\begin{aligned} \omega(t) &= \frac{\varepsilon_0 t_1}{\pi} \left(\frac{2}{3} - \cos \frac{\pi t}{t_1} + \frac{1}{3} \cos^3 \frac{\pi t}{t_1} \right); \\ \gamma(t) &= \frac{\varepsilon_0 t_1}{\pi} \left(\frac{2}{3} t - \frac{t_1}{3\pi} \sin \frac{\pi t}{t_1} \left(2 + \frac{1}{3} \sin^2 \frac{\pi t}{t_1} \right) \right). \end{aligned} \quad (2.29)$$

В точці T_1 коли $t=t_1$ отримаємо

$$\varepsilon(t_1) = \varepsilon_1 = 0, \quad \omega(t_1) = \omega_1 = \frac{4}{3} \frac{\varepsilon_0 t_1}{\pi}, \quad \gamma(t_1) = \gamma_1 = \frac{2}{3} \frac{\varepsilon_0 t_1^2}{\pi}. \quad (2.30)$$

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

$$\varepsilon(t) = 0. \quad (2.31)$$

Інтегруючи двічі з забезпеченням неперервності ω і γ при $t=t_1$ знайдемо

$$\omega(t) = \omega_1, \quad \gamma(t) = \frac{2}{3} \frac{\varepsilon_0 t_1}{\pi} (2t - t_1). \quad (2.32)$$

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

$$\varepsilon(t) = -\frac{\varepsilon_0 t_1}{t_{end} - t_2} \sin^3 \frac{\pi(t - t_2)}{t_{end} - t_2}. \quad (2.33)$$

Інтегруючи двічі з забезпеченням неперервності ω і γ при $t=t_2$ отримаємо:

$$\begin{aligned} \omega(t) &= \frac{\varepsilon_0 t_1}{\pi} \left[\frac{2}{3} + \cos \frac{\pi(t - t_2)}{t_{end} - t_2} \left(1 - \frac{1}{3} \cos^2 \frac{\pi(t - t_2)}{t_{end} - t_2} \right) \right]; \\ \gamma(t) &= \frac{\varepsilon_0 t_1}{3\pi} \left[2(t + t_2 - t_1) + \frac{t_{end} - t_2}{\pi} \sin \frac{\pi(t - t_2)}{t_{end} - t_2} \left(2 + \frac{1}{3} \sin^2 \frac{\pi(t - t_2)}{t_{end} - t_2} \right) \right]. \end{aligned} \quad (2.34)$$

З умови $t=t_{end}$, $\gamma=\pi/2$ знаходимо:

$$\varepsilon_0 = \frac{3\pi^2}{4t_1(t_{end} + t_2 - t_1)}. \quad (2.35)$$

Якщо час розгону рівний часу уповільнення, тобто $t_{end}-t_2=t_1$, тоді можна прийняти такі значення $\varepsilon(t)$, $\omega(t)$ і $\gamma(t)$:

$$\begin{aligned} \varepsilon(t) &= -\varepsilon_0 \sin^3 \frac{\pi(t - t_2)}{t_1}; \\ \omega(t) &= \frac{\varepsilon_0 t_1}{\pi} \left[\frac{2}{3} + \cos \frac{\pi(t - t_2)}{t_1} \left(1 - \frac{1}{3} \cos^2 \frac{\pi(t - t_2)}{t_1} \right) \right]; \\ \gamma(t) &= \frac{\varepsilon_0 t_1}{3\pi} \left[2(t + t_2 - t_1) + \frac{t_1}{\pi} \sin \frac{\pi(t - t_2)}{t_1} \left(2 + \frac{1}{3} \sin^2 \frac{\pi(t - t_2)}{t_1} \right) \right]; \\ \varepsilon_0 &= \frac{3\pi^2}{8t_1 t_2}. \end{aligned} \quad (2.36)$$

Підставивши значення $\varepsilon(t)$, $\omega(t)$ і $\gamma(t)$ для кожної з ділянок (5-10) в

рівняння (2.27) можемо знайти значення сил інерції:

$$F_x^{in} = -m\ddot{x}, \quad F_y^{in} = -m\ddot{y}, \quad F_z^{in} = -m\ddot{z}. \quad (2.37)$$

Сили інерції (2.37) діють на вантаж впродовж всього часу транспортування. Обчислення проводяться при таких параметрах: $m=1$ кг, $t_0=0$ с, $t_1=0,4$ с, $t_2=1,5$ с, $t_{end}=1,9$ с, $z=0,5$ м, $R=0,8$ м і результати представленні на рисунку 2.27.

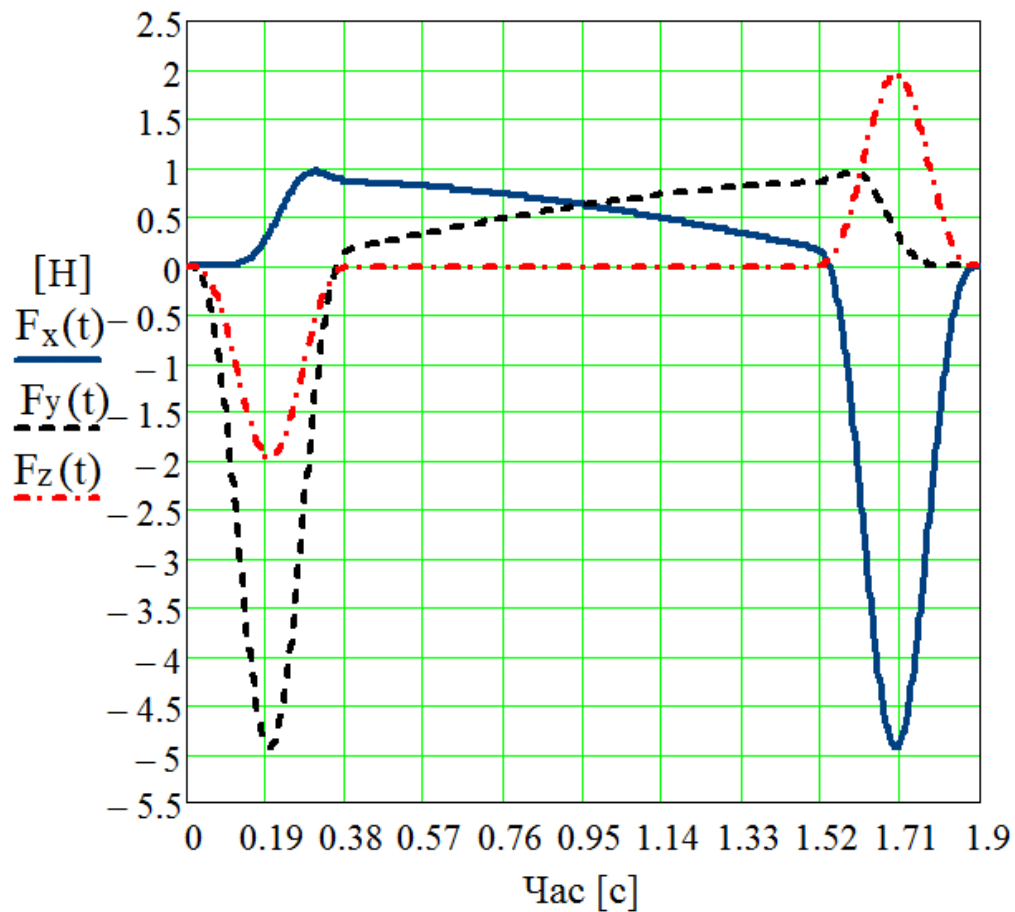


Рис. 2.27 Графіки залежності сил інерції від часу.

Оптимальна орієнтація буде забезпечена тоді коли в кожен момент часу вісь захоплювального пристрою буде направлена в протилежному напрямку до напрямку вектора рівнодійної сил інерції і сили тяжіння. Це пов'язано з тим, що сила притягання направлена в протилежному до \bar{n} напрямку. Отже при такій орієнтації роль сили притягання виконують сили інерції і сила тяжіння

вантаж.

На ділянці розгону T_0-T_1 в площині XOY будуть діяти складові сили інерції F_x^{in} і F_y^{in} (рис. 2.28). Отже $\psi = \pi + \sigma$, де $\text{ctg}\sigma = -\frac{F_y^{in}}{F_x^{in}}$, $\sigma = \pi - \text{arccctg} \frac{F_y^{in}}{F_x^{in}}$.

Таким чином

$$\psi = 2\pi - \text{arccctg} \frac{F_y^{in}}{F_x^{in}}. \quad (2.38)$$

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_{zop}^{in} і $F_z^{in} + mg = m(g + k\varepsilon(t))$, тому:

$$\theta = \text{arctg} \frac{\sqrt{(F_x^{in})^2 + (F_y^{in})^2}}{m(g + k\varepsilon(t))}. \quad (2.39)$$

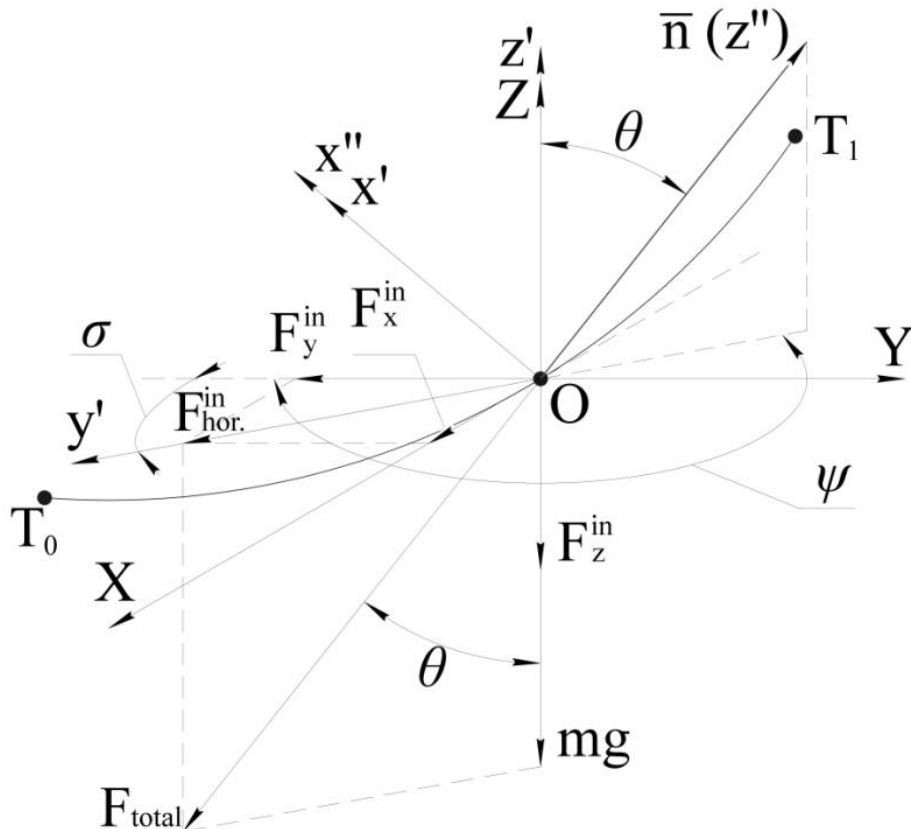


Рис. 2.28 Сили що діють на вантаж під час руху з прискоренням на ділянці траєкторії T_0-T_1

Так як ми не змінюємо орієнтацію точок контакту відносно локальної системи координат (XOY), кут φ не буде змінювати свого значення.

На другій ділянці, де рух рівномірний (Рис. 2.29), знаходимо оптимальну орієнтації аналогічним чином.

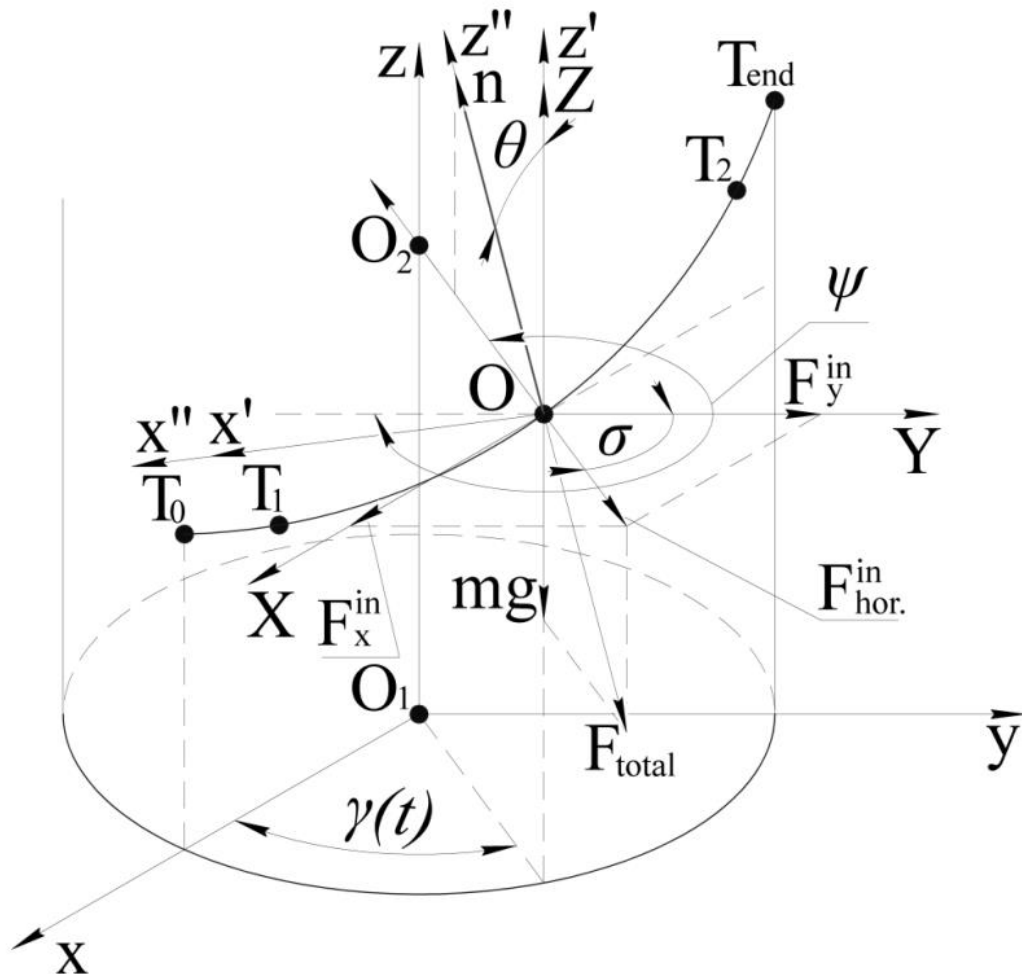


Рис. 2.29 Сили, що діють на вантаж під час руху з рівномірною швидкістю на ділянці траєкторії T_1-T_2

З рисунку 2.29 видно, що значення кута прецесії ψ на ділянці траєкторії T_1-T_2 буде змінюватись в прямій залежності від закону $\gamma(t)$, і буде приймати значення:

$$\psi = 2\pi - \sigma, \quad (2.40)$$

де $\sigma = \frac{\pi}{2} - \gamma(t)$ звідси:

$$\psi = \frac{3}{2}\pi + \gamma(t). \quad (2.41)$$

Так як $\varepsilon(t)=0$ на цій ділянці траєкторії, то кут нутації буде рівний:

$$\theta = \arctg \frac{\sqrt{(F_x^{in})^2 + (F_y^{in})^2}}{mg}. \quad (2.42)$$

Розглянемо третю ділянку траєкторії (уповільнення), що відповідає відрізку T_2-T_{end} . (рис. 2.30).

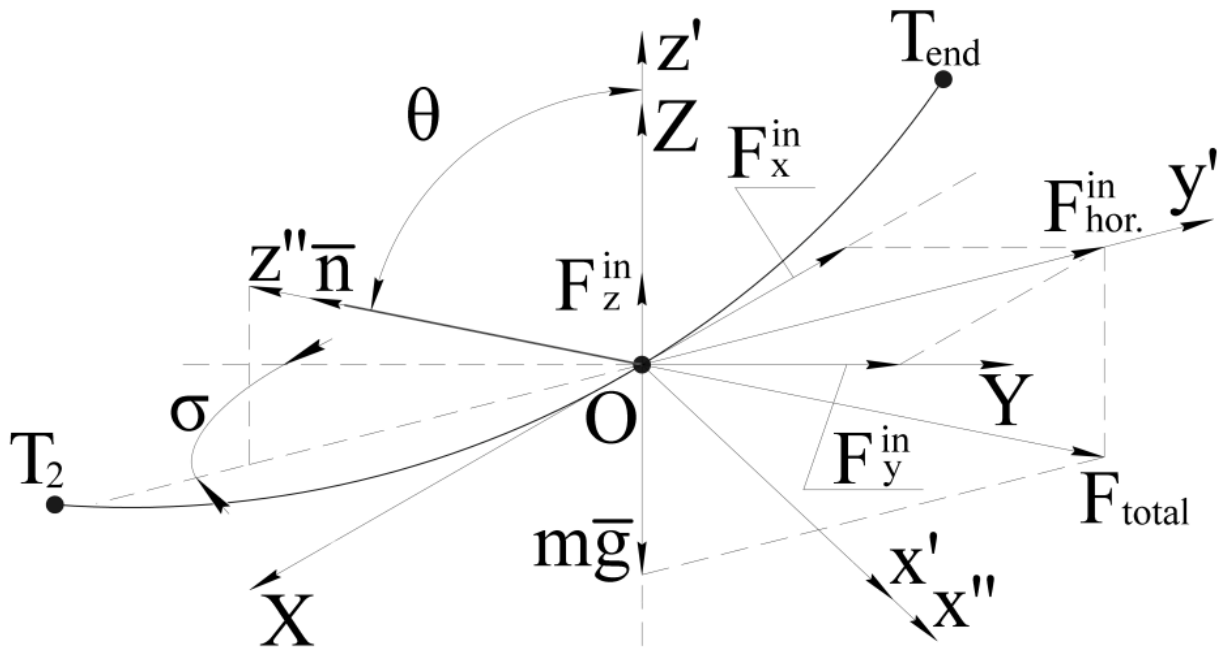


Рис. 2.30 Сили що діють на вантаж під час уповільнення на ділянці траєкторії T_2-T_{end}

На ділянці уповільнення T_3-T_4 кут ψ визначається з рівняння:

$$\psi = 2\pi + \sigma, \quad (2.43)$$

де $\operatorname{tg}\sigma = -\frac{F_x^{in}}{F_y^{in}}$, $\sigma = -\operatorname{arctg} \frac{F_x^{in}}{F_y^{in}}$ звідси:

$$\psi = 2\pi - \operatorname{arctg} \frac{F_x^{in}}{F_y^{in}}. \quad (2.44)$$

Кут θ (на третій ділянці) визначається аналогічно як на першій і приймає значення:

$$\theta = \operatorname{arctg} \frac{\sqrt{(F_x^{in})^2 + (F_y^{in})^2}}{m(g + k\varepsilon(t))}. \quad (2.45)$$

Рівняння (2.38-2.45) дозволяють визначити оптимальну орієнтацію захоплювального пристрою в кожен момент часу (рис. 2.31).

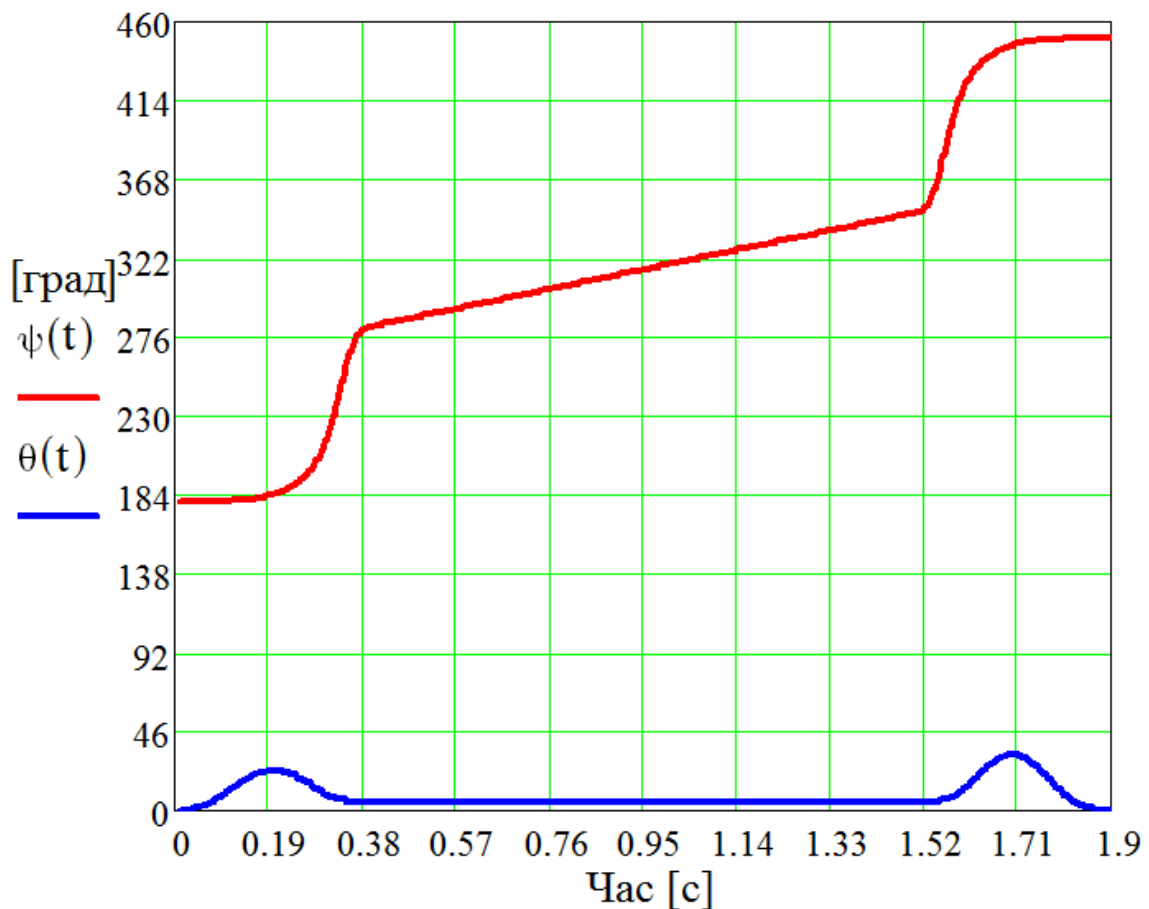


Рис. 2.31 Графіки зміни оптимальної орієнтації протягом всього часу транспортування

Знаючи оптимальну орієнтації в кожен момент часу необхідно знайти мінімальну необхідну силу притягання впродовж всього часу транспортування. Для цього запишемо умови рівноваги вантажу утримуваного захоплювальним пристроєм (рис. 2.32):

$$N_1 + N_2 + N_3 = N_{total}; \quad F_1^{tr} + F_2^{tr} + F_3^{tr} = N_{total} f; \quad (2.46)$$

$$F_x = 0 \rightarrow N_{total} \sin \theta \sin \psi - N_{total} f \cos \theta \sin \psi - F_{li} \sin \theta \sin \psi - F_x^{in} = 0; \quad (2.47)$$

$$F_y = 0 \rightarrow N_{total} \sin \theta \cos \psi - N_{total} f \cos \theta \cos \psi - F_{li} \sin \theta \cos \psi - F_y^{in} = 0; \quad (2.48)$$

$$F_z = 0 \rightarrow -mg + N_{total} \cos \theta - N_{total} f \sin \theta - F_{li} \cos \theta + F_z^{in} = 0. \quad (2.49)$$

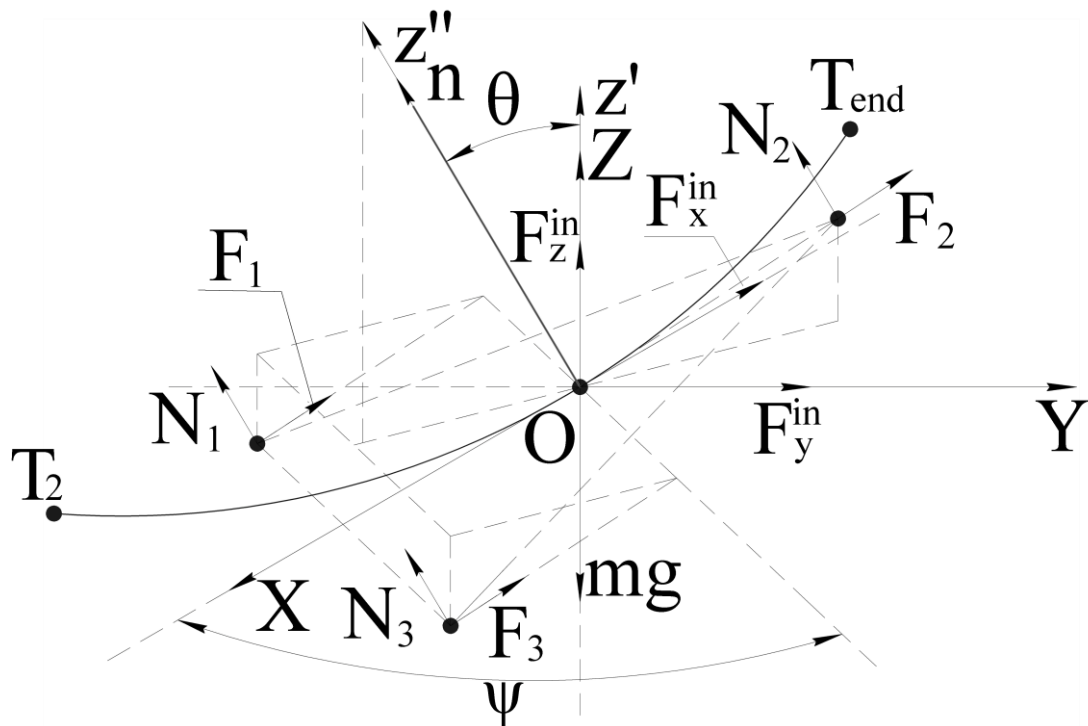


Рис. 2.32 Сили, що діють на вантаж

Провівши аналіз рівнянь (2.47-2.49) для знаходження мінімальної необхідної сили притягання, необхідно прийняти умову $N_{total} \geq 0$, що забезпечить безвідривне транспортування вантажу. Виходячи з рівняння (2.49) можна

знайти обмеження на мінімальну силу притягання для транспортування вантажу по гвинтовій траєкторії з оптимальною орієнтацією (рис. 2.33):

$$F_{np} \geq \begin{cases} \frac{-F_z^{in} - mg}{\cos \theta} & \text{якщо } 0 \leq \psi(t) \leq t_1; \\ \frac{-mg}{\cos \theta} & \text{якщо } t_1 \leq \psi(t) \leq t_2; \\ \frac{F_z^{in} - mg}{\cos \theta} & \text{якщо } t_2 \leq \psi(t) \leq t_{end}. \end{cases} \quad (2.50)$$

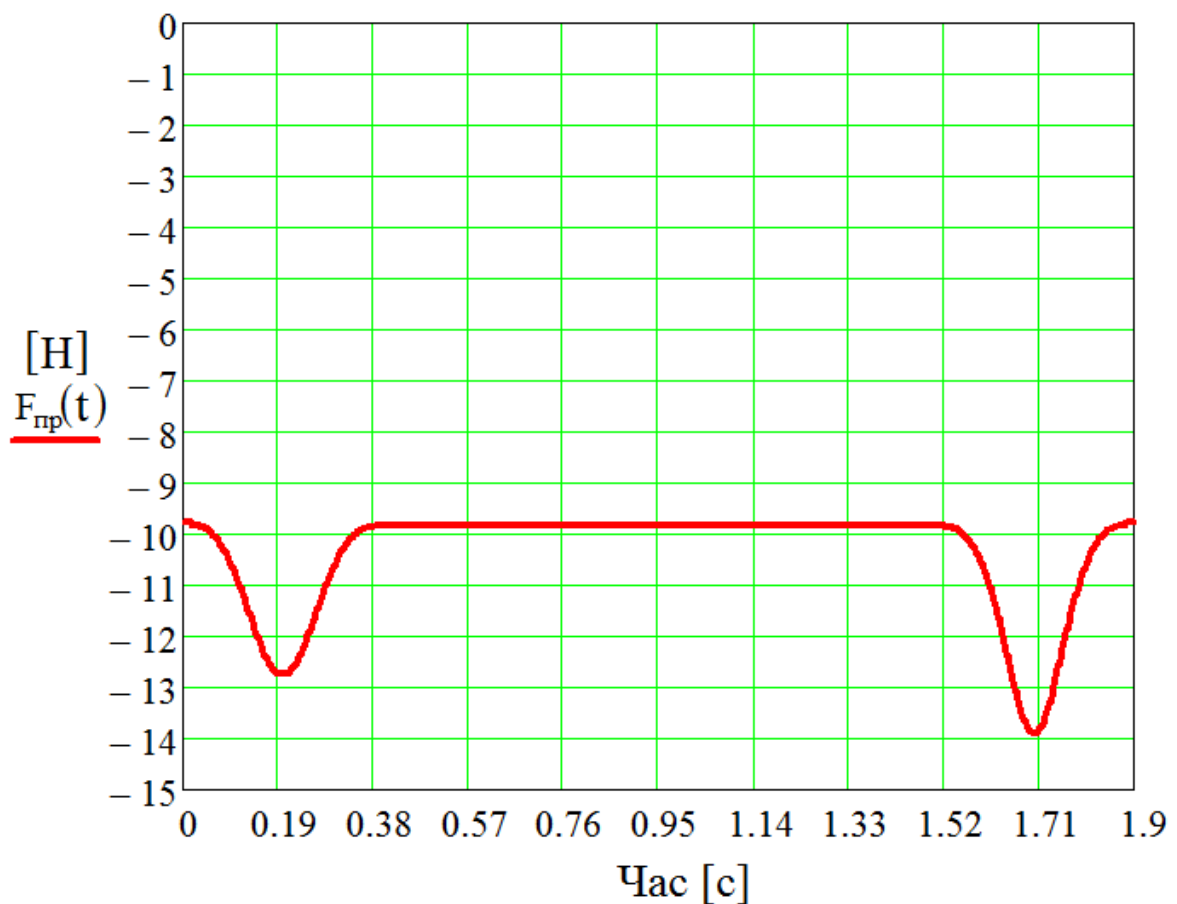


Рис. 2.33 Графік залежності мінімально необхідної сили притягання від часу транспортування вантажу по гвинтовій траєкторії

З рисунку 2.33 можна зробити висновок, що використовуючи метод оптимізації орієнтації для транспортування вантажу по гвинтовій траєкторії можна не застосовувати силу притягання. Це дозволить значно зменшити енергетичні затрати на транспортування вантажу струминними

захоплювальними пристроями.

2.5. Висновки

Запропонована математична модель для оптимізації орієнтації струминних захоплювальних пристроїв під час транспортування вантажу по прямолінійній траєкторії. Вона дозволяє визначити мінімальну необхідну силу притягання для утримування вантажу струминним захоплювальним пристроєм під час руху в кожен момент часу.

Виведено ряд формул та рівнянь для визначення оптимальної орієнтації і необхідної сили притягання для випадку транспортування вантажу із зміщеним центром.

Проведені теоретичні дослідження силових характеристик струминного захоплювального пристрою при різних параметрів руху в критичних точках прямолінійної траєкторії.

Запропонована математична модель для оптимізації орієнтації струминних захоплювальних пристроїв під час транспортування вантажу по гвинтовій траєкторії в кожен момент часу. Вона також дозволяє визначити мінімальну необхідну силу притягання для утримування вантажу струминним захоплювальним пристроєм під час руху в кожен момент часу.

Завдяки теоретичним дослідженням доведено ефективність використання представлених методів для мінімізації силових характеристик струминних захоплювальних пристроїв під час транспортування вантажу по прямолінійній і гвинтовій траєкторії

РОЗДІЛ 3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ТРАНСПОРТУВАННЯ НА СИЛОВІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗАХОПЛЮВАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ

3.1. Загальна методика проведення експериментальних досліджень

Для підтвердження результатів теоретичних досліджень та уточнення аналітичних залежностей, розроблено та виготовлено технологічне обладнання для проведення експериментального дослідження. Основне завдання дослідження полягало в перевірці достовірності та степені точності запропонованих математичних моделей.

Згідно мети дисертаційної роботи та поставлених задач, а також проведеного теоретичного аналізу, програма експериментальних досліджень процесу транспортування вантажу полягає у наступному:

1. Спроекувати та виготовити функціонально придатні зразки технологічного обладнання для проведення дослідження транспортування вантажу;

2. Провести лабораторні дослідження мінімально необхідних силових характеристик струминних ЗП з різними варіантами траєкторій, коефіцієнта тертя фрикційних елементів, параметрів руху та масо-габаритних параметрів вантажу, з метою підтвердження достовірності математичної моделі;

3. Встановити основний параметр який впливатиме на мінімально необхідну силу притягання струминного захоплювального пристрою.

Для дослідження процесу безконтактного захоплення виробів з допомогою струминних захоплювачів, проведено комплекс експериментальних досліджень, за наступною схемою [130, 128]:

- на основі попереднього проведення експериментів, встановлено раціональні значення основних рівнів та інтервалів варіації вагомих факторів, що найбільш суттєво впливають на досліджувані процеси,

зокрема параметри руху вантажу, коефіцієнт тертя між вантажем і захоплювальним пристроєм та параметри вантажу;

- проведено серію відсіюючих експериментів [1,76] з метою пошуку інших вагомих факторів, на основні параметрів факторів, прийнятих раніше вагомими;
- проведено ряд експериментів з рівномірними інтервалами зміни кожного із вагомих факторів, для порівняння отриманих середніх значень із теоретичними даними.

У процесі експериментального дослідження регулюються наступні параметри:

- тиск живлення у захоплювачі;
- масо-габаритні параметри вантажу (площа, маса та зміщення центра мас відносно осі захоплювального пристрою);
- коефіцієнт тертя між фрикційними елементами та вантажем (матеріал фрикційних елементів);
- параметри руху вантажу (швидкість, прискорення);
- параметри траєкторії (кут нахилу траєкторії відносно глобальної системи координат, форма).

Для достовірного проведення експерименту із струминними захоплювачами, необхідним є підведення відповідно підготовленого стиснутого повітря.

Для визначення мінімальної необхідної сили притягання в залежності від зміни параметрів руху захоплювального пристрою проводиться експеримент в якому проводяться заміри сили притягання за допомогою електронних ваг з точністю ± 5 грам де в якості контролюючого елемента виступає датчик відриву вантажу від фрикційних елементів.

3.2. Обладнання для проведення експериментальних досліджень

Для проведення експериментальних досліджень було розроблено та виготовлено дослідну установку на базі Національного Центру Робототехніки Словацької Республіки, в Словацькому технічному університеті в Братиславі (Додаток Б), функціональна схема якої представлена на рис. 3.1.

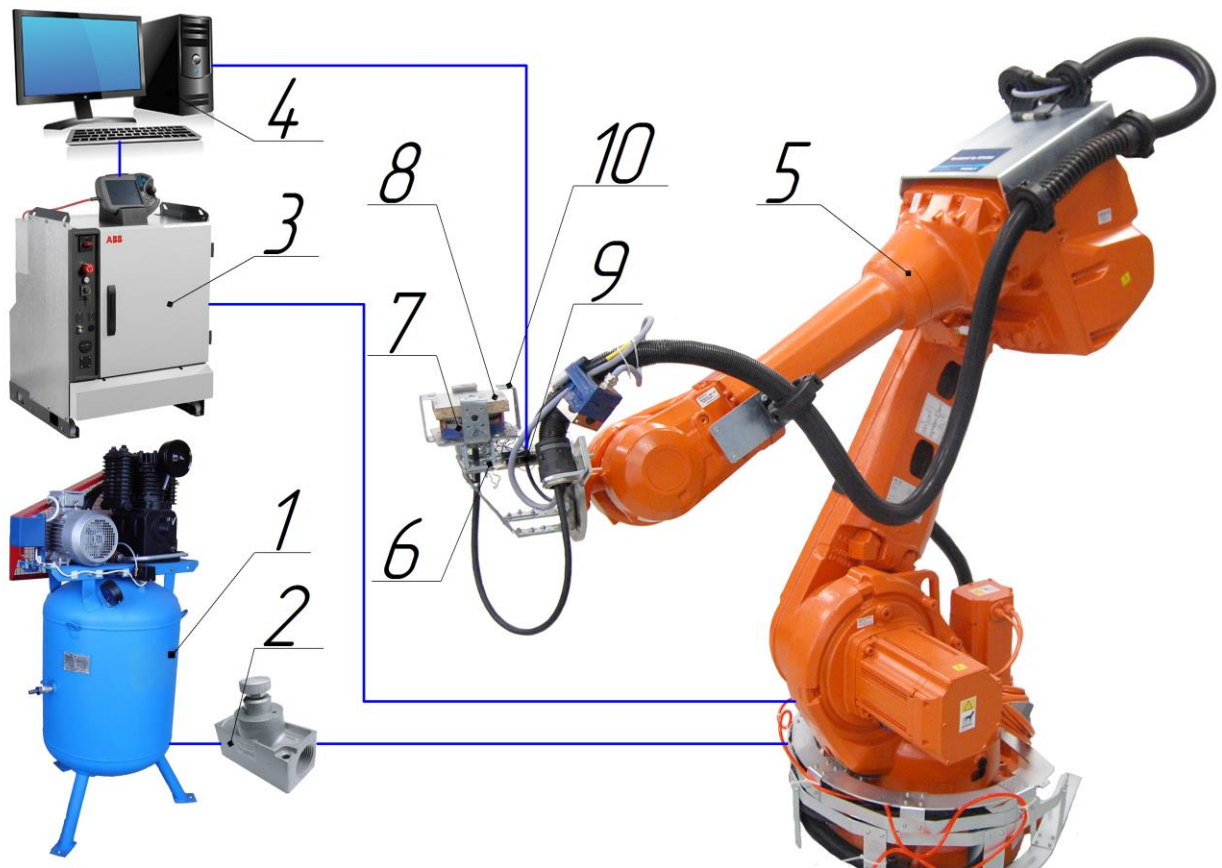


Рис. 3.1 Функціональна схема дослідної установки

Експериментальна установка містить компресор 1 який з'єднаний з струминним захоплюючим пристроєм 7 через пневмодросьель 2. За допомогою персонального комп'ютера 4, на якому встановлене ліцензійне програмне забезпечення ABB RobotStudio, через контролер 3, проводиться програмування промислового робота 5. На кінцевій ланці промислового робота 5 закріплений орієнтуючий подовжувач кінцевої ланки 6, на якому змонтований струминний

захоплюючий пристрій 7. Струминний захоплювальний пристрій 7 призначений для транспортування плоских деталей типу пластина 8. Для забезпечення безпеки і контролю проковзування вантажу відносно осі захоплювального пристрою в конструкцію орієнтуючого подовжувача кінцевої ланки робота додані захисні елементи 10. Також для фіксування відриву вантажу від фрикційних елементів захоплювального пристрою під час транспортування було спроектовано датчик відриву 9.

Для роботи струминного захоплювача використовується стиснуте повітря, яке нагнітається за допомогою компресора НЕСНТ 0,85/7-250: потужність двигуна 5,5 кВт, напруга 380 В, продуктивність 600 л/хв., максимальний тиск 0,7 МПа, ємність повітрозбірника 330 л. Регулювання Сили притягання струминного захоплювального пристрою відбувається за допомогою пневмодроселя 2 рис. 3.2.

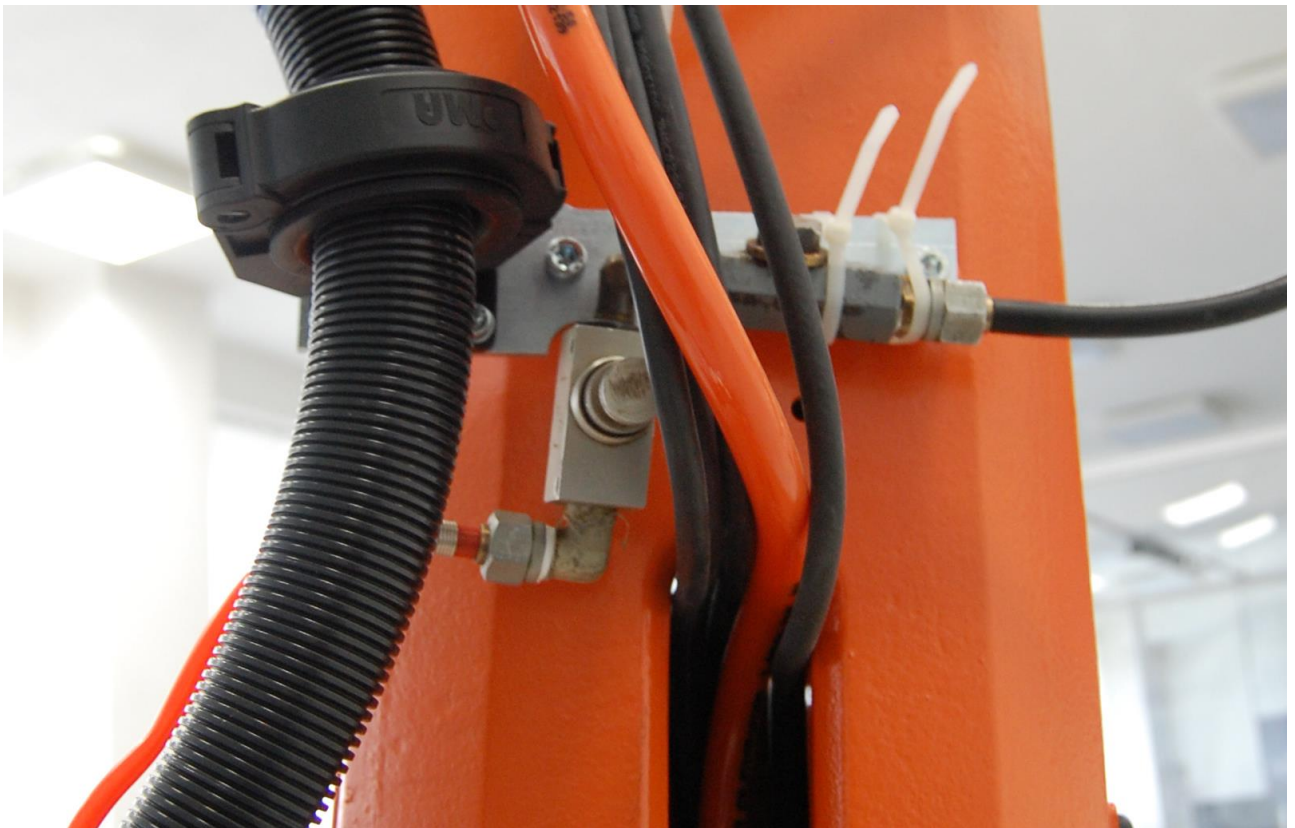


Рис. 3.2 Пневмодросель змонтований на промисловому роботі

Вимірювання сили притягання проводяться за допомогою електронних

ваг з точністю ± 5 грамм рис. 3.3.



Рис. 3.2 Вимірювання сили притягання захоплювального пристрою

Для зменшення орієнтуючих рухів промислового робота спроектований орієнтуючий подовжувач кінцевої ланки робота 6 (рис. 3.3). Він забезпечує переорієнтацію струминного захоплювального пристрою на 90 градусів в порівнянні із орієнтацією кінцевої ланки промислового робота. Також забезпечує подовження на 140 мм і зміщення кінцевої ланки відносно осі кінцевої ланки промислового робота на 110 мм.

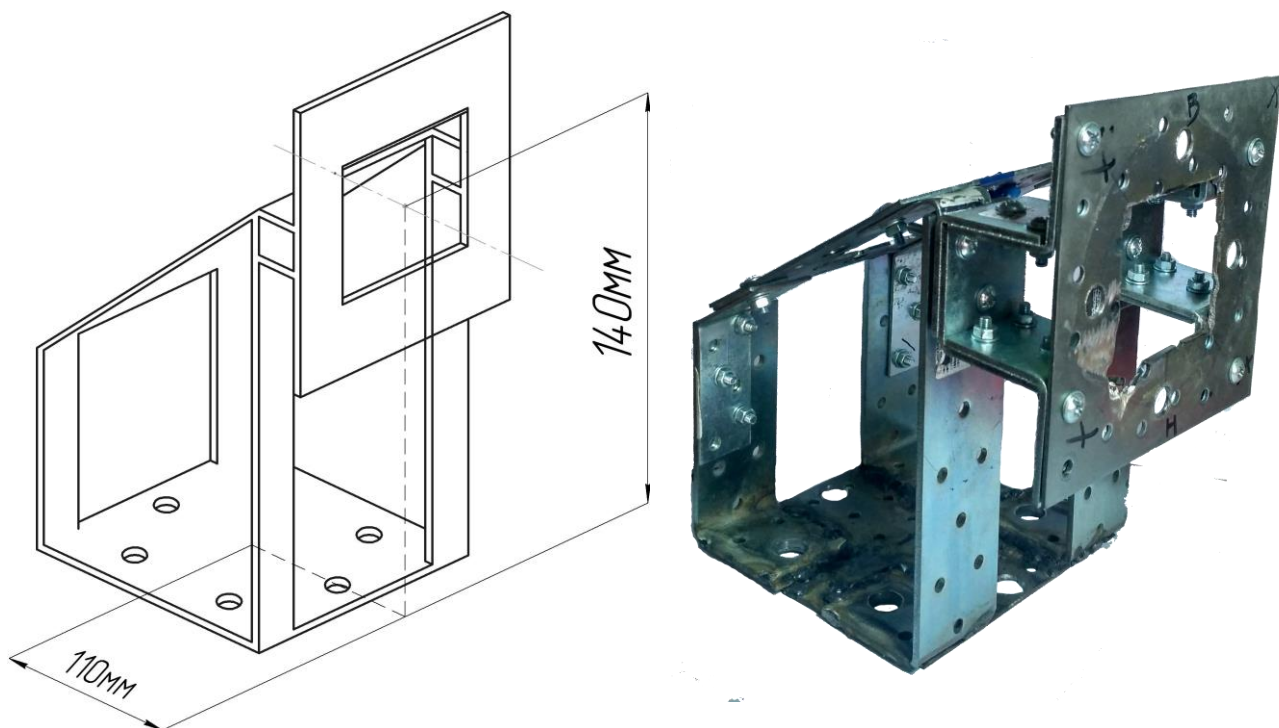


Рис. 3.3 Конструкція орієнтуючого подовжувача кінцевої ланки промислового робота

До орієнтуючого подовжувача кінцевої ланки робота 6 кріпиться струминний захоплюючий пристрій 7, захисні елементи 10, датчик відриву 9 та вантаж 8 рис. 3.4.

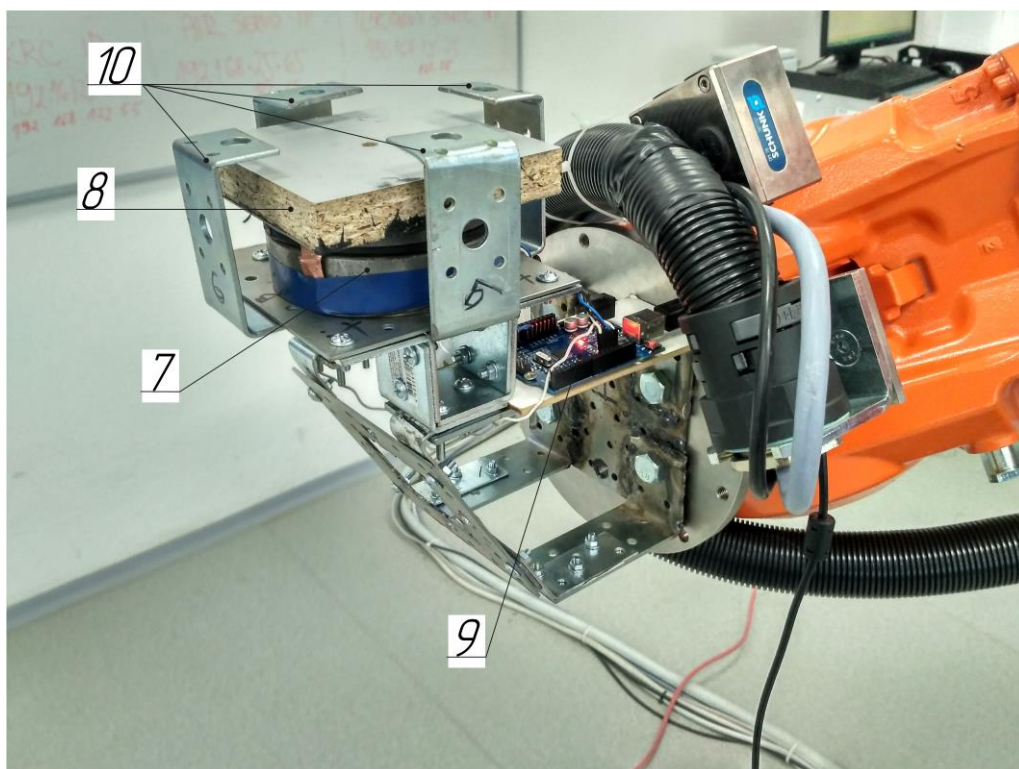
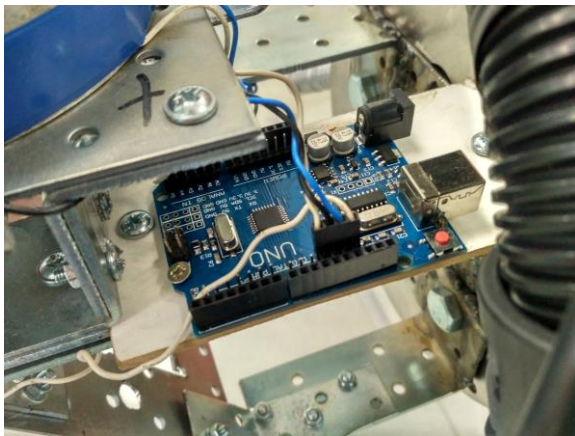
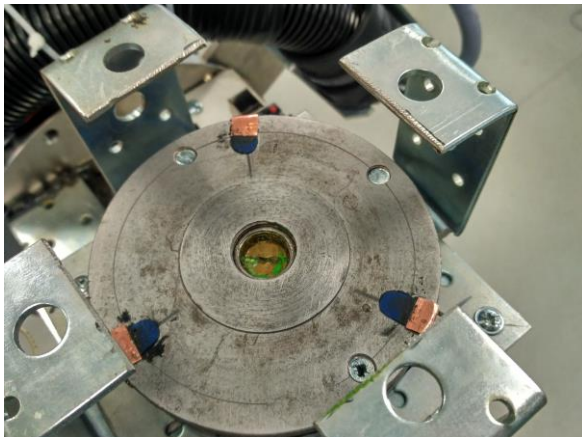


Рис. 3.4 Оснащення подовжувача кінцевої ланки промислового робота

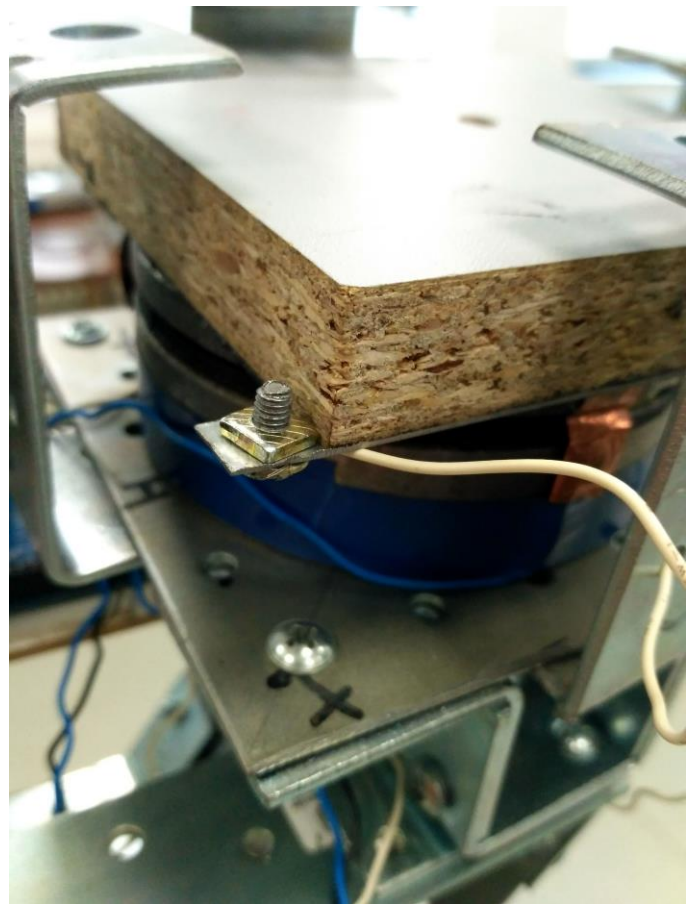
Датчик відриву 9 побудований на основі плати Arduino UNO (рис. 3.5а). Він запрограмований таким чином, щоб при відриві вантажу від будь-якого з трьох контактів, які розташовані на фрикційних елементах струминного захоплювального пристрою (рис. 3.5б), відбувалось сповіщення про відрив на ПК в режимі реального часу. Вантаж (рис. 3.5с), має електропровідну поверхню і під'єднаний до плати датчика.



а



б



с

Рис. 3.5 Оснащення подовжувача кінцевої ланки промислового робота

Використовується промисловий робот нового покоління IRB 4600-60 [97] фірми АВВ. Використання компактних роботизованих комплексів на базі IRB 4600 забезпечує зростання продуктивності та якості продукції.

IRB 4600 володіє найвищими характеристиками в своєму класі, зокрема він розвиває високі прискорення та швидкості. Це робить його незамінним в

задачах завантаження/розвантаження, транспортування, укладання. Високе прискорення дозволяє йому обходити перешкоди і переміщатися строго по заданій траєкторії. Все це сприяє збільшенню виробничих потужностей і продуктивності в цілому.

Для контролю рухів промислового робота використовується контролер IRC5 ABB [97]. IRC5. Це контролер п'ятого покоління, який поєднує в собі управління рухом, гнучкість, модульність, зручність використання та безпеку. Продуктивність збільшується за рахунок розширеної діагностики, швидкого знаходження помилок та моніторингу в реальному часі стану робота.

Програмування промислового робота здійснювалось на персональному комп'ютері за допомогою програмного середовища RobotStudio [97] фірми ABB. RobotStudio це офлайн програмування з використанням імітаційних програм (Virtual Robot Technology), що дозволяє працювати з промисловим роботом безпосередньо на персональному комп'ютері.

Програмування в режимі офлайн - оптимальний спосіб максимізації рентабельності роботизованих систем. Програмне забезпечення ABB RobotStudio, призначене для імітаційного моделювання і офлайн-програмування, дозволяє виконувати операції з програмування на ПК в офісі без необхідності зупинки виробництва. Воно також дозволяє заздалегідь готувати програми для роботизованих систем, що призводить до підвищення загальної продуктивності. RobotStudio дозволяє підвищити прибутковість роботизованих систем за рахунок забезпечення виконання таких завдань, як навчання, програмування та оптимізація. Вигляд робочого середовища у даному програмному пакеті зображений на рис. 3.6.

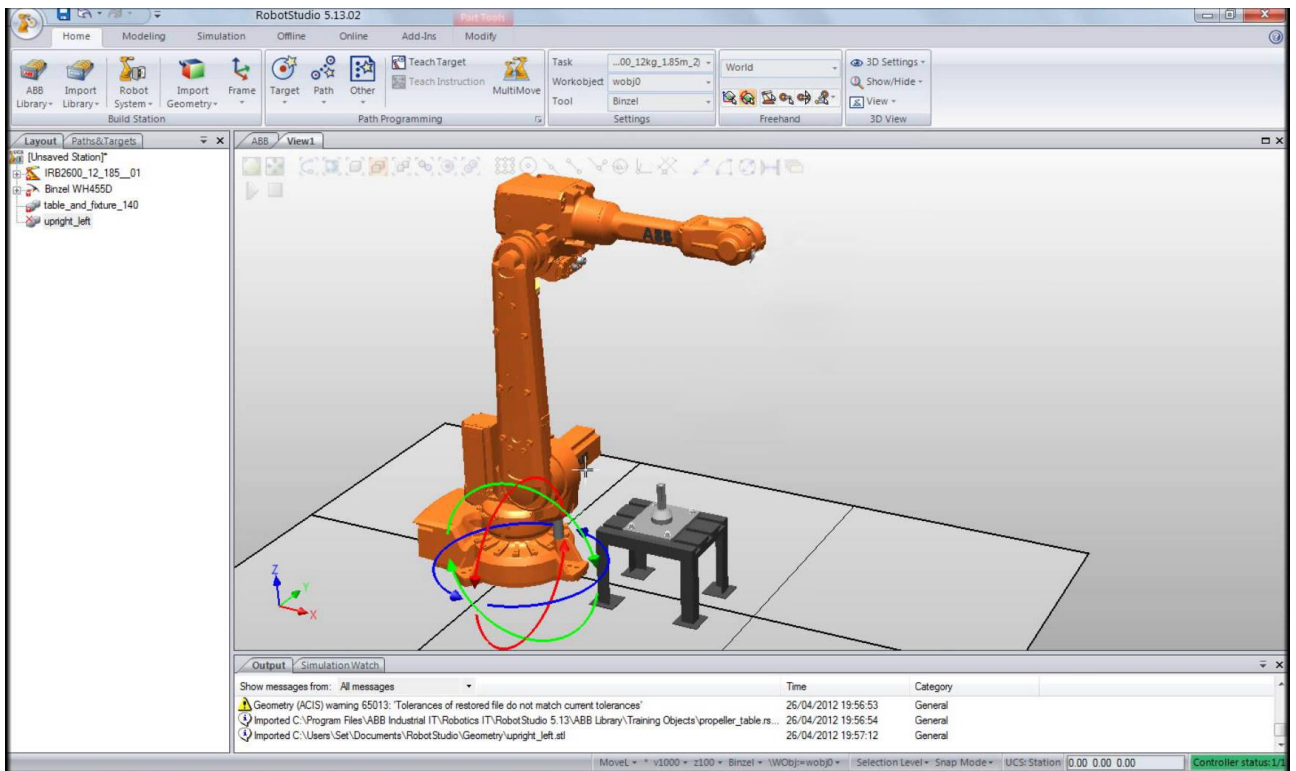


Рис. 3.6 Вигляд програмного середовища RobotStudio

RobotStudio використовує мову програмування RAPID, що дозволяє розробляти алгоритми керування з можливістю синхронізації декількох паралельно виконуваних завдань, а також використовувати стандартні цикли. Також у мові передбачені стандартні засоби для визначення координатних систем і дозволу сингулярності при позиціонуванні маніпулятора. При цьому забезпечується точність позиціонування 0,06-0,1 мм. Порівняно з мовою KRL (KUKA) ця мова дозволяє простіше реалізувати синхронне виконання кількох програм, але при цьому має обмежені можливості по їх структуризації.

За допомогою програмного середовища RobotStudio і контролера IRC5 можна отримати дані, що стосуються швидкості кінцевої ланки, прискорення, орієнтації, енергії затраченої на виконання певної операції і показників двигунів.

3.3. Експериментальні дослідження впливу параметрів руху на необхідну силу притягання при транспортування вантажів по прямолінійній траєкторії

Перший етап експериментальних досліджень полягав у визначенні впливу параметрів руху захоплювального пристрою (прискорення a , швидкості v і орієнтації α) на мінімальну необхідну силу притягання F_{\min}^{at} для утримування вантажу під час транспортування по прямолінійній траєкторії.

Для визначення мінімальної необхідної сили притягання, в залежності від параметрів руху захоплювального пристрою, проведений багатofакторний експеримент. У якості об'єкта маніпулювання використано паралелепіпед (0,11м/0,11м/0,02м) вагою 0,22 кілограм з електропровідною поверхнею для спрацювання датчика відриву.

Основними факторами, що суттєво впливають на оптимальну орієнтацію (а відповідно і на необхідну силу притягання) є прискорення a і швидкість v захоплювального пристрою під час транспортування вантажу. Робот програмувався для переміщення вантажу по прямолінійній траєкторії (рис. 3.7) завдовжки 1,8 м. Оптимальна орієнтація (кут α) визначається з трансцендентного рівняння (2.24), а її схематичний вигляд зображений на рисунку 3.8.

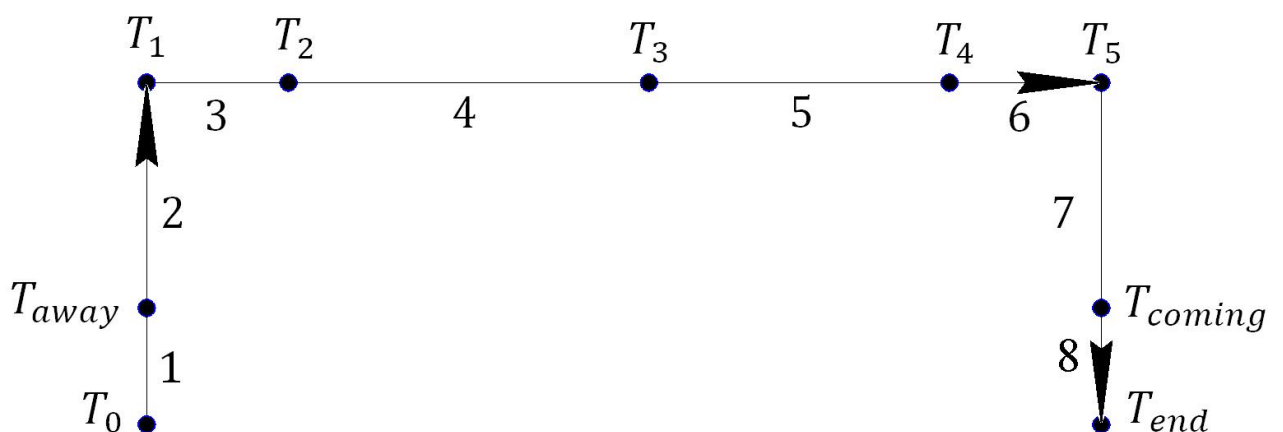


Рис. 3.7 Прямолінійна траєкторія по якій буде здійснюватись транспортування

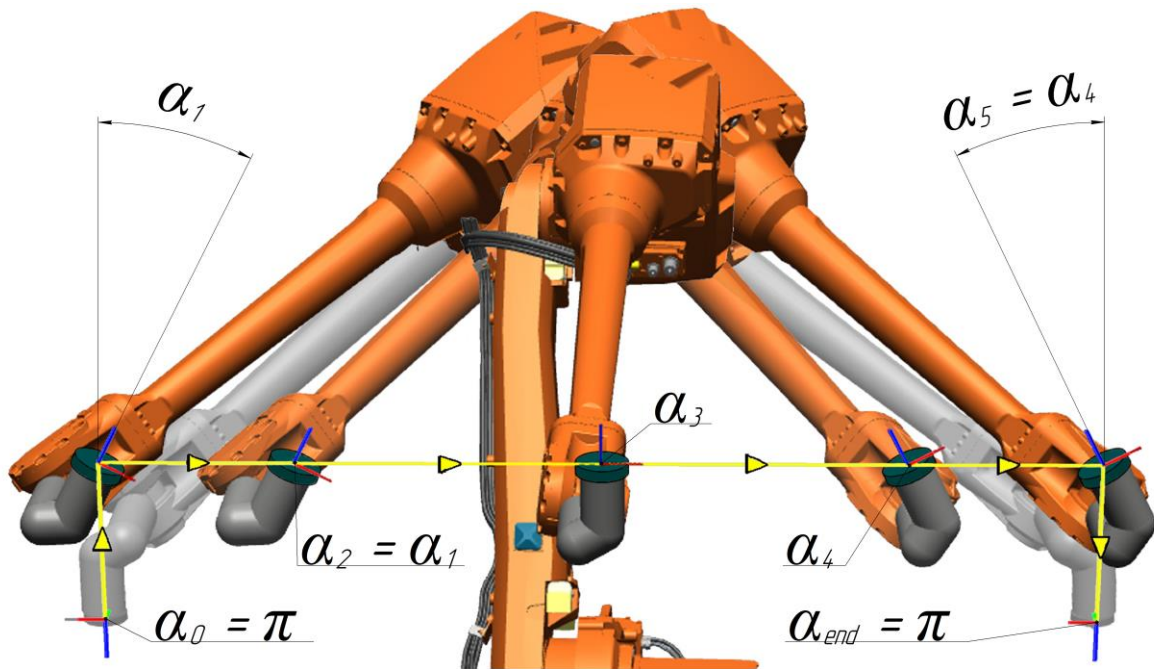


Рис. 3.8 Оптимізація орієнтації захоплювального пристрою при транспортуванні вантажу по прямолінійній траєкторії

Мінімальну силу притягання F_{np} , необхідну для утримування об'єкта маніпулювання при оптимальній орієнтації, визначаємо за формулою 2.25.

Для перевірки достовірності цієї моделі проводилося експериментальне дослідження, що полягає у знаходженні необхідної сили притягання ЗП при оптимальній орієнтації і без переорієнтації. Експеримент проводився для діапазону прискорень від 0,5 до 7 м/с², та швидкостей від 0,33 до 0,995 м/с (таблиця 3.1) у відповідності до технічних характеристик робота.

Таблиця 3.1

ДАНІ ПО ПРОВЕДЕННЮ ЕКСПЕРИМЕНТУ

Сила притягання F		Фактори	
<i>З оптимальною орієнтацією</i>	<i>Без переорієнтації</i>	<i>Прискорення x₁</i>	<i>Швидкість x₂</i>
0	4,2	1,75	0,6
0,25	4,37	2	0,64
0,8	4,7	2,5	0,72
1,3	5	3	0,78

Сила притягання F		Фактори	
<i>З оптимальною орієнтацією</i>	<i>Без переорієнтації</i>	<i>Прискорення</i> x_1	<i>Швидкість</i> x_2
1,8	5,3	3,5	0,82
2,25	5,62	4	0,88
2,65	5,95	4,5	0,93
3,05	6,3	5	0,98
3,45	6,6	5,5	0,995
3,8	6,9	6	0,995
4,1	7,15	6,5	0,995
4,4	7,4	7	0,995

Проведемо статистичний аналіз отриманих результатів. Спершу розрахуємо коефіцієнт лінійної регресії. Запишемо трилінійне рівняння з трьома невідомими b_0 , b_1 , b_2 :

$$\begin{aligned} \sum y_i &= nb_0 + b_1 \sum x_{1i} + b_2 \sum x_{2i}; \\ \sum x_{1i} y_i &= b_0 \sum x_{1i} + b_1 \sum x_{1i}^2 + b_2 \sum x_{1i} x_{2i}; \\ \sum x_{2i} y_i &= b_0 \sum x_{2i} + b_1 \sum x_{1i} x_{2i} + b_2 \sum x_{2i}^2. \end{aligned} \quad (3.1)$$

Для зручності проведення розрахунків помістимо результати проміжних розрахунків в таблицю 3.2:

Таблиця 3.2

Y	X_1	X_2	X_1^2	X_2^2	$X_1 Y$	$X_2 Y$	$X_1 X_2$	Y^2
0	1,75	0,6	3,063	0,36	0	0	1,05	0
0,25	2	0,64	4	0,41	0,5	0,16	1,28	0,0625
0,8	2,5	0,72	6,25	0,518	2	0,576	1,8	0,64
1,3	3	0,78	9	0,608	3,9	1,014	2,34	1,69
1,8	3,5	0,82	12,25	0,672	6,3	1,476	2,87	3,24

Продовження таблиці 3.2

Y	X_1	X_2	X_{12}	X_{22}	X_1Y	X_2Y	X_1X_2	Y^2
2,25	4	0,88	16	0,774	9	1,98	3,52	5,063
2,65	4,5	0,93	20,25	0,865	11,925	2,465	4,185	7,023
3,05	5	0,98	25	0,96	15,25	2,989	4,9	9,303
3,45	5,5	0,995	30,25	0,99	18,975	3,433	5,473	11,903
3,8	6	0,995	36	0,99	22,8	3,781	5,97	14,44
4,1	6,5	0,995	42,25	0,99	26,65	4,08	6,468	16,81
4,4	7	0,995	49	0,99	30,8	4,378	6,965	19,36
27,85	51,25	10,33	253,313	9,129	148,1	26,331	46,82	89,533
2,321	4,271	0,861	21,109	0,761	12,342	2,194	3,902	7,461

Для наших даних система рівнянь має вигляд:

$$\begin{aligned}
 27,85 &= 12 b_0 + 51,25b_1 + 10,33b_2; \\
 148,1 &= 51,25b_0 + 253,3125b_1 + 46,82b_2; \\
 26,33075 &= 10,33b_0 + 46,82b_1 + 9,1286b_2.
 \end{aligned}
 \tag{3.2}$$

Вирішуючи систему методом Крамера, знаходимо:

$$\begin{aligned}
 b_0 &= -2,783; \\
 b_1 &= 0,625; \\
 b_2 &= 2,83.
 \end{aligned}
 \tag{3.3}$$

Рівняння регресії:

$$Y = -2,783 + 0,625 X_1 + 2,83 X_2. \tag{3.4}$$

Знайдемо середні квадратичні відхилення ознак:

$$\begin{aligned}
 S(y) &= \sqrt{y^2 - \bar{y}^2} = \sqrt{7,461 - 2,321^2} = 1,44; \\
 S(x_1) &= \sqrt{x_1^2 - \bar{x}_1^2} = \sqrt{21,109 - 4,271^2} = 1,694; \\
 S(x_2) &= \sqrt{x_2^2 - \bar{x}_2^2} = \sqrt{0,761 - 0,861^2} = 0,14.
 \end{aligned}
 \tag{3.5}$$

Тепер потрібно провести аналіз якості емпіричного рівняння лінійної регресії. Побудова емпіричного рівняння регресії є початковим етапом аналізу. Перше ж побудоване за вибіркою рівняння регресії дуже рідко є задовільним з тих чи інших характеристик. Тому наступною найважливішою оцінкою є перевірка якості рівняння регресії. Прийнята усталена схема такої перевірки, яка проводиться за наступними напрямками:

- перевірка статистичної значущості коефіцієнтів рівняння регресії;
- перевірка загальної якості рівняння регресії;
- перевірка властивостей даних, здійсненість яких передбачалася при оцінюванні рівняння.

Перш ніж проводити аналіз якості рівняння регресії, необхідно визначити дисперсії і стандартні помилки коефіцієнтів, а також інтервальні оцінки коефіцієнтів. При цьому:

$$\begin{aligned}
 S^2 &= \frac{\sum e_i^2}{n - m - 1}; \\
 S^2 &= \frac{0,0138}{12 - 2 - 1} = 0,00153,
 \end{aligned}
 \tag{3.6}$$

де $m = 2$ - кількість змінних моделі.

$$\begin{aligned}
 S_y &= \sqrt{0,00153} = 0,0391; \\
 S_{b_1}^2 &= \frac{0,24}{34,43 * 0,24 - 2,7^2} 0,00153 = 0,000435; \\
 S_{b_2}^2 &= \frac{34,43}{34,43 * 0,24 - 2,7^2} 0,00153 = 0,0634.
 \end{aligned}
 \tag{3.7}$$

Стандартні помилки коефіцієнтів:

$$S_{b_0} = \sqrt{0,0184} = 0,136;$$

$$S_{b_1} = \sqrt{0,000435} = 0,0209;$$

$$S_{b_2} = \sqrt{0,0634} = 0,252.$$
(3.8)

Таблиця 3.3

Розрахунок залишків e_i

$Y(X_1, X_2)$	$e_i = (Y_i - Y(X_1, X_2))$	e_i^2	$e_i - e_{i-1}$	$(e_i - e_{i-1})^2$
0,00791	-0,00791	6,3E-5	0	0
0,277	-0,0273	0,000745	0,0194	0,000375
0,816	-0,016	0,000257	-0,0112	0,000127
1,298	0,00181	3,0E-6	-0,0178	0,000319
1,724	0,0763	0,00582	-0,0745	0,00554
2,206	0,0441	0,00195	0,0322	0,00103
2,66	-0,00974	9,5E-5	0,0538	0,0029
3,114	-0,0636	0,00404	0,0538	0,0029
3,468	-0,0184	0,000338	-0,0452	0,00204
3,781	0,0193	0,000371	-0,0377	0,00142
4,093	0,00692	4,8E-5	0,0123	0,000152
4,405	-0,00543	2,9E-5	0,0123	0,000152
27,85	0	0,0138	-0,00248	0,017

Проведемо оцінку факторів на мультиколінеарність.

Таблиця 3.4

Матриця парних коефіцієнтів кореляції

-	y	x_1	x_2
y	1	0,996	0,972
x_1	0,996	1	0,948
x_2	0,972	0,948	1

Коефіцієнт регресії b_i можна також знайти за наступними формулами:

$$b_1 = \frac{r_{yx1} - r_{yx2}r_{x1x2}}{1 - r_{x1x2}^2} \frac{s(y)}{s(x_1)};$$

$$b_2 = \frac{r_{yx2} - r_{yx1}r_{x1x2}}{1 - r_{x1x2}^2} \frac{s(y)}{s(x_2)},$$
(3.9)

де r_{yx1} , r_{yx2} , r_{x1x2} - коефіцієнти парної кореляції між результатом і кожним з факторів і між факторами; $s(x_1)$, $s(x_2)$ - середнє відхилення 1-го і 2-го факторів відповідно; $s(y)$ - середнє відхилення результативної ознаки.

$$b_1 = \frac{0,996 - 0,972 \cdot 0,948}{1 - 0,948^2} \cdot \frac{1,44}{1,694} = 0,625;$$

$$b_2 = \frac{0,972 - 0,996 \cdot 0,948}{1 - 0,948^2} \cdot \frac{1,44}{0,14} = 2,83.$$
(3.10)

Параметр a можна визначити за формулою:

$$a = \bar{y} - b_1 \bar{x}_1 - b_2 \bar{x}_2;$$

$$a = 2.321 - 0.625 \cdot 4.271 - 2.83 \cdot 0.861 = -2.783.$$
(3.11)

При оцінці мультиколінеарності чинників слід враховувати, що чим ближче до 0 визначник матриці міжфакторної кореляції, тим сильніша

мультиколінеарність факторів і ненадійніші результати регресії.

Для відбору найбільш значущих чинників x_i враховуються такі умови:

- зв'язок між результативною ознакою і факторами повинен бути вищим міжфакторного зв'язку;
- зв'язок між факторами повинен бути не більше 0,7;
- при високому міжфакторному зв'язку ознак, відбираються фактори з меншим коефіцієнтом кореляції між ними.

Більш об'єктивну характеристику тісноти зв'язку дають часткові коефіцієнти кореляції, що вимірюють вплив на результат фактора x_i при незмінному рівні інших факторів.

Коефіцієнт приватної кореляції відрізняється від простого коефіцієнта лінійної парної кореляції тим, що він вимірює парну кореляцію відповідних ознак (y і x_i) за умови, що вплив на них інших факторів (x_j) усунуто.

На підставі часткових коефіцієнтів можна зробити висновок про обгрунтованість включення змінних в регресійну модель. Якщо значення коефіцієнта мале або незначне, то це означає, що зв'язок між даним фактором і результативною змінною або дуже слабкий, або зовсім відсутній, тому фактор можна виключити з моделі.

$$r_{yx_1/x_2} = \frac{0,996 - 0,972 \cdot 0,948}{\sqrt{(1 - 0,972^2)(1 - 0,948^2)}} = 0,995, \quad (3.12)$$

тіснота зв'язку сильна.

$$r_{yx_2/x_1} = \frac{0,972 - 0,996 \cdot 0,948}{\sqrt{(1 - 0,996^2)(1 - 0,948^2)}} = 0,966, \quad (3.13)$$

тіснота зв'язку сильна.

$$r_{x_1x_2/y} = \frac{0,948 - 0,966 \cdot 0,972}{\sqrt{(1 - 0,996^2)(1 - 0,972^2)}} = -0,937, \quad (3.14)$$

тіснота зв'язку сильна.

Тепер запишемо модель регресії в стандартному масштабі. Модель

регресії в стандартному масштабі передбачає, що всі значення досліджуваних ознак переводяться в стандарти (стандартизовані значення) за формулами:

$$t_j = \frac{x_{ji} - \bar{x}_j}{S(x_j)}, \quad (3.15)$$

де x_{ji} - значення змінної x_{ji} в i -ому спостереженні.

$$t_y = \frac{y_i - \bar{y}}{S(y)}. \quad (3.16)$$

Таким чином, початок відліку кожної стандартизованої змінної поєднується з її середнім значенням, а в якості одиниці зміни приймається її середнє квадратичне відхилення S .

Якщо зв'язок між змінними в природному масштабі лінійна, то зміна початку відліку і одиниці вимірювання цієї властивості не порушать, так що і стандартизовані змінні будуть пов'язані лінійним співвідношенням:

$$t_y = \sum \beta_j t_{xj}. \quad (3.17)$$

Для оцінки β -коефіцієнтів застосуємо матрицю парних коефіцієнтів кореляцію. При цьому система нормальних рівнянь буде мати вигляд:

$$\begin{aligned} r_{x_1y} &= \beta_1 + r_{x_1x_2} \cdot \beta_2 + \dots + r_{x_1x_m} \cdot \beta_m; \\ r_{x_2y} &= r_{x_2x_1} \cdot \beta_1 + \beta_2 + \dots + r_{x_2x_m} \cdot \beta_m; \\ &\dots \\ r_{x_my} &= r_{x_mx_1} \cdot \beta_1 + r_{x_mx_2} \cdot \beta_2 + \dots + \beta_m. \end{aligned} \quad (3.18)$$

Для наших даних (беремо з матриці парних коефіцієнтів кореляції):

$$\begin{aligned} 0,996 &= \beta_1 + 0,948\beta_2; \\ 0,972 &= 0,948\beta_1 + \beta_2. \end{aligned} \quad (3.19)$$

Дану систему лінійних рівнянь вирішуємо методом Гаусса: $\beta_1 = 0,735$; $\beta_2 = 0,276$.

Шукане рівняння в стандартизованому масштабі: $t_y = \beta_1 t_{x1} + \beta_2 t_{x2}$.

Розрахунок β -коефіцієнтів можна виконати і за формулами:

$$\beta_1 = \frac{r_{yx1} - r_{yx2}r_{x1x2}}{1 - r_{x1x2}^2} = \frac{0,996 - 0,972 \cdot 0,948}{1 - 0,948^2} = 0,735 ;$$

$$\beta_2 = \frac{r_{yx2} - r_{yx1}r_{x1x2}}{1 - r_{x1x2}^2} = \frac{0,972 - 0,996 \cdot 0,948}{1 - 0,948^2} = 0,276$$
(3.20)

Стандартизована форма рівняння регресії має вигляд:

$$t_y = 0,735x_1 + 0,276x_2. \quad (3.21)$$

Знайдені з даної системи β -коефіцієнти дозволяють визначити значення коефіцієнтів в регресії в масштабі за формулами:

$$b_j = \beta \frac{S(y)}{S(x_j)} ;$$
(3.22)

$$a = \bar{y} - \sum b_j \bar{x}_j .$$

Обчислюємо стандартні коефіцієнти регресії через коефіцієнти множинної регресії b_1 і b_2 :

$$\beta_1 = b_1 \frac{S(x_1)}{S(y)} = 0,625 \frac{1,694}{1,44} = 0,735 ;$$

$$\beta_2 = b_2 \frac{S(x_2)}{S(y)} = 2,83 \frac{0,14}{1,44} = 0,276.$$
(3.23)

Отримуємо рівняння регресії в стандартизованому масштабі:

$$t_y = 0,735t_{x1} + 0,276t_{x2}. \quad (3.24)$$

Коефіцієнт множинної кореляції можна визначити через матрицю парних коефіцієнтів кореляції:

$$R = \sqrt{1 - \frac{\Delta_r}{\Delta_{r11}}} ,$$
(3.25)

де Δ_r - визначник матриці парних коефіцієнтів кореляції; Δ_{r11} - визначник матриці між факторної кореляції.

$$\Delta_r = \begin{array}{|c|c|c|} \hline 1 & 0,996 & 0,972 \\ \hline 0,996 & 1 & 0,948 \\ \hline 0,972 & 0,948 & 1 \\ \hline \end{array} = 5,6E-5; \quad (3.26)$$

$$\Delta_{r11} = \begin{array}{|c|c|} \hline 1 & 0,948 \\ \hline 0,948 & 1 \\ \hline \end{array} = 0,102.$$

Коефіцієнт множинної кореляції

$$R = \sqrt{1 - \frac{5,6E-5}{0,102}} = 1. \quad (3.27)$$

Аналогічний результат отримаємо при використанні інших формул:

$$R = \sqrt{1 - (1 - r_{yx1}^2)(1 - r_{yx2|x1}^2)}; \quad (3.28)$$

$$R = \sqrt{1 - (1 - 0,996^2)(1 - 0,966^2)} = 0,9997.$$

Зв'язок між ознакою Y і факторами X_i низька.

Розрахунок коефіцієнта кореляції виконаємо, використовуючи відомі значення лінійних коефіцієнтів парної кореляції і β-коефіцієнтів.

$$R = \sqrt{\sum r_{yxi} \beta_{yxi}} = \sqrt{r_{yx1} \beta_{yx1} + r_{yx2} \beta_{yx2}}; \quad (3.29)$$

$$R = \sqrt{0,996 \cdot 0,735 + 0,972 \cdot 0,276} = \sqrt{0,999} = 1.$$

Коефіцієнт детермінації $R^2 = 0,999$.

Оцінімо тісноту зв'язків. Тіснота зв'язку результативної ознаки з факторними визначається величиною коефіцієнта лінійної множинної кореляції і детермінації, який може бути обчислений на основі матриці парних коефіцієнтів кореляції:

$$R^2 = \frac{r_{yx1}^2 + r_{yx2}^2 - 2r_{yx1}r_{yx2}r_{x1x2}}{1 - r_{x1x2}^2};$$

$$R^2 = \frac{0,996^2 + 0,972^2 - 2 \cdot 0,996 \cdot 0,972 \cdot 0,948}{1 - 0,948^2} = 0,102.$$
(3.30)

Більш об'єктивну оцінку якості побудованої моделі дає скоригований індекс множинної детермінації, що враховує поправку на число ступенів свободи:

$$\bar{R}^2 = 1 - (1 - R^2) \frac{n-1}{n-m-1},$$
(3.31)

де n - число спостережень, m - число факторів.

$$\bar{R}^2 = 1 - (1 - 0,999) \frac{12-1}{12-2-1} = 0,999.$$
(3.32)

Порівняльна оцінка впливу аналізованих чинників на результативний ознака проводиться:

- середнім коефіцієнтом еластичності, що показує на скільки відсотків середньому по сукупності зміниться результат y від своєї середньої величини при зміні фактора x_i на 1% від свого середнього значення;

$$E_i = b_i \frac{\bar{x}_i}{\bar{y}};$$

$$E_1 = 0,625 \frac{4,27}{2,32} = 1,15.$$
(3.33)

Частковий коефіцієнт еластичності $E_1 > 1$. Отже, він істотно впливає на результативну ознаку Y .

$$E_2 = 2,83 \frac{0,86}{2,23} = 1,05.$$
(3.34)

Частковий коефіцієнт еластичності $E_2 > 1$. Отже, він істотно впливає на результативну ознаку Y .

Частку кожного фактора в загальній варіації результативної ознаки визначають коефіцієнти роздільної детермінації: $d_i^2 = r_{yxi}^2 \beta_i$.

$$\begin{aligned}d^2_1 &= 1 \cdot 0,735 = 0,73; \\d^2_2 &= 0,97 \cdot 0,278 = 0,27.\end{aligned}\tag{3.35}$$

При цьому повинно виконуватися рівність:

$$d^2_1 + d^2_2 = R^2_{yx1x2}.\tag{3.36}$$

Проведемо оцінку значимості коефіцієнтів регресії з допомогою t -критерію Стьюдента. Оцінка значущості коефіцієнтів регресії b_1 і b_2 проводиться за допомогою t -критерію Стьюдента і пов'язана з порівнянням їх значень з величиною випадкових помилок mb_1 і mb_2 . Більш простим способом розрахунку фактичних значень t_{b1} і t_{b2} є їх визначення через критерії F :

Провіримо гіпотезу H_0 про рівність окремих коефіцієнтів регресії нулю (при альтернативі H_1 не рівно) на рівні значущості $\alpha=0,01$.

$$t_{\text{крит}}(n-m-1; \alpha/2) = (9; 0,005) = 3,25;$$

$$t_{bj} = \frac{b_j}{S_{bj}};\tag{3.37}$$

$$t_{b0} = \frac{|-2,78|}{0,14} = 20,49.$$

Оскільки $20,49 > 3,25$, то статистична значимість коефіцієнта регресії b_0 підтверджується (відкидаємо гіпотезу про рівність нулю цього коефіцієнта).

$$t_{b1} = \frac{0,62}{0,0209} = 29,96.\tag{3.38}$$

Оскільки $29,96 > 3,25$, то статистична значимість коефіцієнта регресії b_1 підтверджується (відкидаємо гіпотезу про рівність нулю цього коефіцієнта).

$$t_{b2} = \frac{2,83}{0,25} = 11,24.\tag{3.39}$$

Оскільки $11,24 > 3,25$, то статистична значимість коефіцієнта регресії b_2 підтверджується (відкидаємо гіпотезу про рівність нулю цього коефіцієнта).

Тепер визначимо довірчий інтервал коефіцієнтів регресії, які з надійністю 99% будуть наступними:

$$\begin{aligned}
 & (b_j - t_{\text{крит}} S_{b_j}; b_j + t_{\text{крит}} S_{b_j}); \\
 & (-2,78 - 3,25 * 0,14; -2,78 + 3,25*0,14); \\
 & (-3,22;-2,34).
 \end{aligned}
 \tag{3.40}$$

З імовірністю 99% можна стверджувати, що значення даного параметра b_0 будуть лежати в знайденому інтервалі.

$$\begin{aligned}
 & (0,62 - 3,25 * 0,0209; 0,62 + 3,25*0,0209); \\
 & (0,56;0,69).
 \end{aligned}
 \tag{3.41}$$

З імовірністю 99% можна стверджувати, що значення даного параметра b_1 будуть лежати в знайденому інтервалі.

$$\begin{aligned}
 & (2,83 - 3,25 * 0,25; 2,83 + 3,25*0,25); \\
 & (2,01;3,65).
 \end{aligned}
 \tag{3.42}$$

З імовірністю 99% можна стверджувати, що значення даного параметра b_2 будуть лежати в знайденому інтервалі.

Тепер потрібно перевірити гіпотезу про статичну значимість рівняння регресії.

Перевірка гіпотези H_0 про статистичну значущість рівняння регресії і показника тісноти зв'язку ($R^2 = 0$) проводиться по F -критерієм Фішера порівнянням $F_{\text{факт}}$ з $F_{\text{табл}}$. Перевірка значущості моделі регресії проводиться з використанням F -критерію Фішера, розрахункове значення якого знаходиться як відношення дисперсії вихідного ряду спостережень досліджуваного показника і не зміщеної оцінки дисперсії залишкової послідовності для даної моделі.

Якщо розрахункове значення з $k1 = (m)$ і $k2 = (n-m-1)$ ступенями свободи більше табличного при заданому рівні значущості, то модель вважається значущою $R^2 = 0,999$.

Оцінка статистичної значущості парної лінійної регресії проводиться за наступним алгоритмом:

1. Висунуто нульову гіпотезу про те, що рівняння в цілому статистично незначуще: $H_0: R^2=0$ на рівні значущості α .

2. Далі визначають фактичне значення F -критерію:

$$F = \frac{R^2}{1-R^2} \frac{n-m-1}{m};$$

$$F = \frac{0,999}{1-0,999} \frac{12-2-1}{2} = 8141,33,$$
(3.43)

де $m=2$ для множинної регресії з двома факторами.

3. Табличне значення визначається за таблицями розподілу Фішера для заданого рівня значущості, беручи до уваги, що число ступенів свободи для загальної суми квадратів (більшої дисперсії) дорівнює 2 і число ступенів свободи залишкової суми квадратів (меншої дисперсії) для лінійної регресії $n-2-1$.

4. Якщо фактичне значення F-критерію менше табличного, то немає підстави відхиляти нульову гіпотезу.

В іншому випадку нульова гіпотеза відхиляється, і з ймовірністю $(1-\alpha)$ приймається альтернативна гіпотеза про статистичну значущість рівняння в цілому.

Табличне значення критерію зі ступенями свободи $k_1=2$ і $k_2=9$, $F_{kp}=8,02$. Оскільки фактичне значення $F > F_{kp}$, то коефіцієнт детермінації статистично значимий (знайдена оцінка рівняння регресії статистично надійна).

А тепер знайдемо часткові критерії Фішера. Часткові критерії F_{x_1} і F_{x_2} оцінюють статистичну значущість включення факторів x_1 і x_2 в рівняння множинної регресії і доцільність включення в рівняння одного фактора після іншого. Тобто F_{x_1} оцінює доцільність включення в рівняння x_1 після включення в нього фактора x_2 .

Відповідно F_{x_2} вказує на доцільність включення в модель чинника x_2 після включення фактора x_1 .

$$F_{x_1} = \frac{R^2 - r_{yx_2}^2}{1 - r_{yx_1}^2} \frac{n - m - 1}{2};$$

$$F_{x_2} = \frac{R^2 - r_{yx_1}^2}{1 - r_{yx_2}^2} \frac{n - m - 1}{2}.$$
(3.44)

Знайдемо r_{yx1} , r_{yx2} .

$$\begin{aligned} r_{yx1}^2 &= 0,996^2 = 0,992; \\ r_{yx2}^2 &= 0,972^2 = 0,944; \end{aligned} \quad (3.45)$$

$$F_{x1} = \frac{0,999 - 0,972^2}{1 - 0,996^2} \frac{12 - 2 - 1}{2} = 29,84. \quad (3.46)$$

Оскільки фактичне значення $F > F_{kp}$, то коефіцієнт F_{x1} статистично значимий, тобто доцільно включати в рівняння x_1 після включення в нього фактора x_2 . Приріст факторної дисперсії за рахунок додаткового фактора x_1 є істотним.

$$F_{x2} = \frac{0,999 - 0,996^2}{1 - 0,972^2} \frac{12 - 2 - 1}{2} = 0,627. \quad (3.47)$$

Оскільки фактичне значення $F < F_{kp}$, то коефіцієнт F_{x2} статистично не значимий, тобто недоцільно включати в рівняння x_2 після включення в нього фактора x_1 . Тому в подальшому буде досліджуватись відношення мінімальної необхідної сили притягання від фактора x_1 , тобто прискорення.

За результатами моделювання та експериментальних досліджень побудований графік залежності мінімальної необхідної сили притягання від прискорення (рис. 3.9).

Для інтервалу прискорення від 0 до $1,75 \text{ м/с}^2$ вантаж утримується за рахунок сил тертя між вантажем і захоплювальним пристроєм при цьому ЗП може бути відключений.

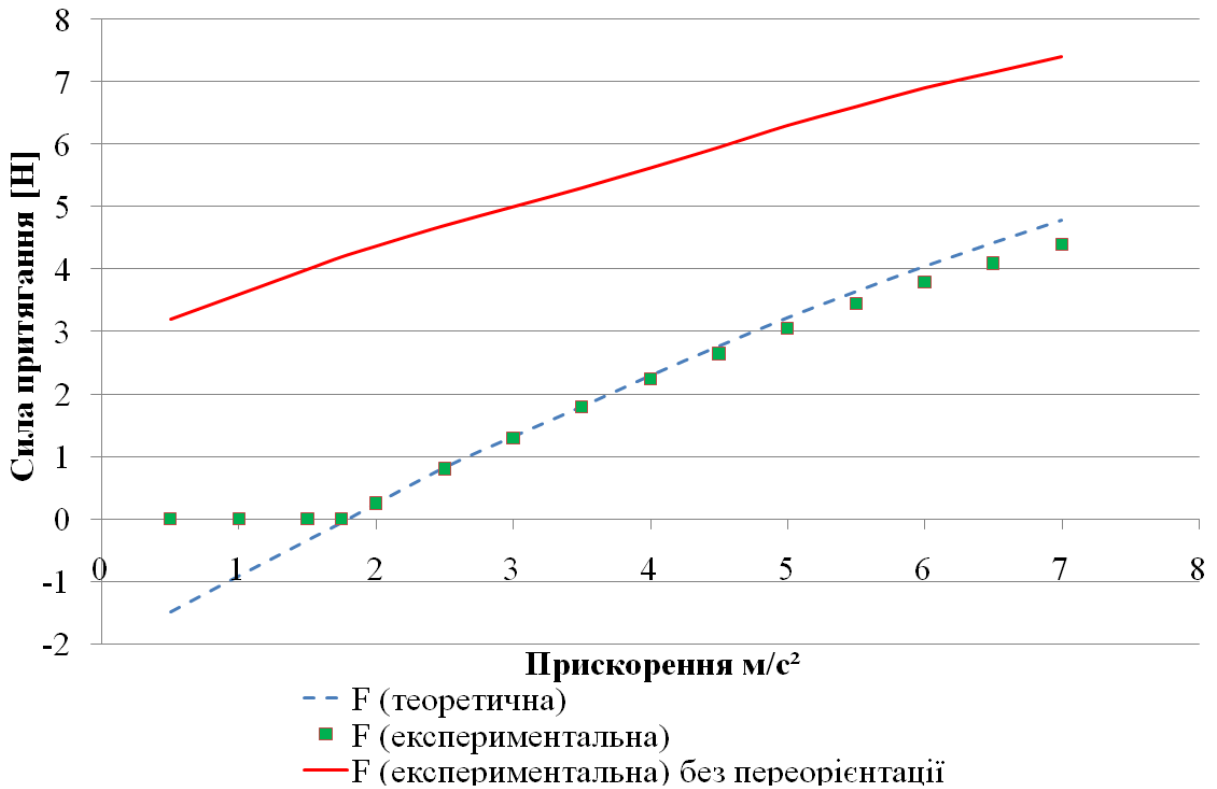


Рис. 3.9 Графік залежності мінімальної необхідної сили притягання від прискорення

Проаналізуємо вплив коефіцієнта тертя на мінімальну необхідну силу притягання (рис. 3.10). Дослідження проводились при наступних параметрах: $A=0,11\text{ м}$, $B=0,11\text{ м}$, $H=0,02\text{ м}$, $v=0,64\text{ м/с}$, $d=0,04\text{ м}$, $c=0,02\text{ м}$, $\rho=1,25\text{ кг/м}^3$, $\beta=0\text{ рад}$, $E=0\text{ м}$, $m=0,22\text{ кг}$, $\omega=0\text{ рад/с}$, $\varepsilon=0\text{ рад/с}^2$.

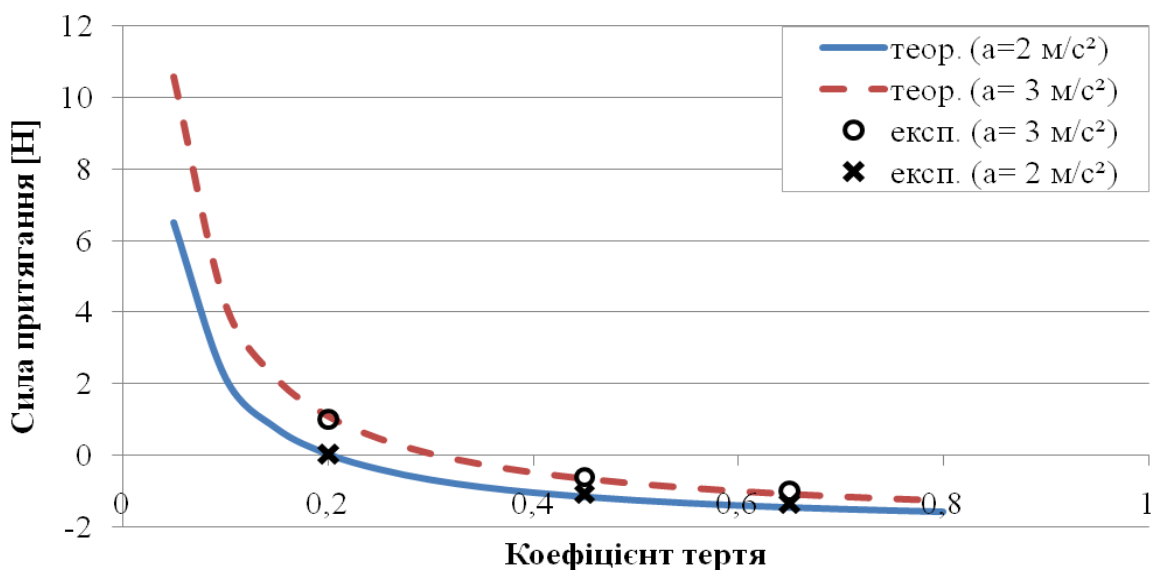


Рис. 3.10 Графік впливу коефіцієнта тертя вантажу до фрикційних елементів ЗП на мінімальну необхідну силу притягання

З рисунку 3.10 видно, що при малих значеннях коефіцієнта тертя необхідно підвищувати силу притягання, тобто збільшувати витрату стиснутого повітря. Отже, з метою мінімізації сили притягання захоплювального пристрою, необхідно використовувати базуючі елементи з високими фрикційними властивостями (гума, силікон та ін.).

Так як сила притягання захоплювального пристрою у значній мірі залежить від прискорення кінцевої ланки маніпулятора, тобто сили інерції, тому необхідно дослідити вплив маси вантажу на мінімальну необхідну силу притягання СЗП (рис. 3.11). Дослідження проведені при наступних параметрах: $A=0,11$ м, $B=0,11$ м, $H=0,02$ м, $v=0,64$ м/с, $d=0,04$ м, $c=0,02$ м, $\rho=1,25$ кг/м³, $\beta=0$ рад, $E=0$ м, $a=2$ м/с², $\omega=0$ рад/с, $\varepsilon=0$ рад/с².

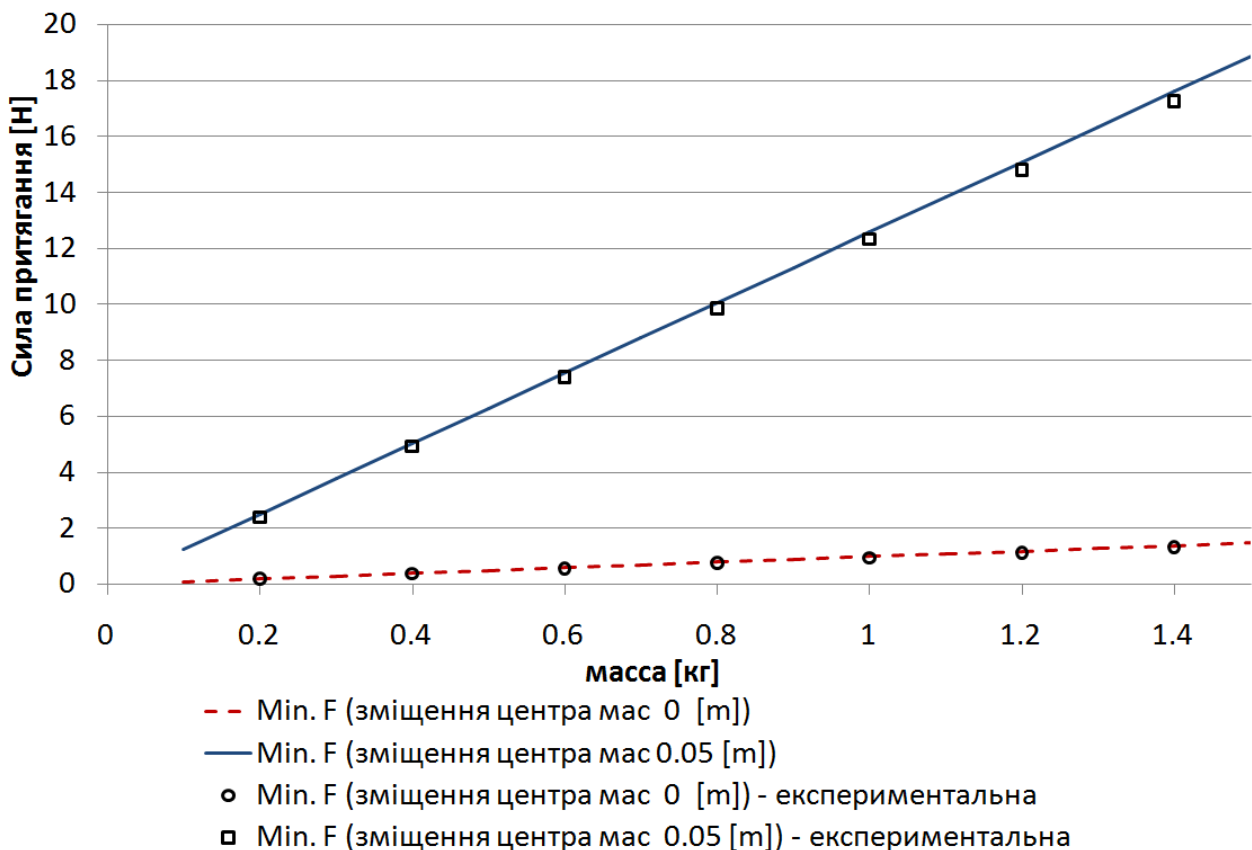


Рис. 3.11 Графік впливу маси вантажу на мінімальну необхідну силу притягання захоплювального пристрою

Очевидно, що вплив маси вантажу на силу притягання ЗП буде збільшуватись при збільшенні прискорення. Це пов'язано з тим, що маса та

прискорення вантажу призводить до збільшення сил інерції, які діють на вантаж.

Отримані експериментальні результати підтверджують адекватність математичної моделі для оптимальної орієнтації струминного захоплювального пристрою. Також можна побачити на скільки зменшиться мінімальна необхідна сила притягання при застосуванні моделі оптимізації орієнтації в порівнянні з транспортуванням без переорієнтації вантажу. Але основним висновком з рисунку 3.9 є очевидність значного впливу прискорення вантажу на мінімальну необхідну силу притягання. Статистичний аналіз показав, що коефіцієнт детермінації між теоретичними і експериментальними даними, при варіюванні значеннями прискорення і швидкості, складає 0,9991, відносна похибка значень 2,63%.

3.4. Експериментальні дослідження впливу параметрів руху на необхідну силу притягання при транспортуванні вантажів по гвинтовій траєкторії

Для відтворення гвинтової траєкторії використовувалось програмне середовище RobotStudio фірми ABB, яке дозволяє забезпечити оптимальну орієнтацію впродовж всього часу транспортування. Під час програмування траєкторії з багатьма точками орієнтації може виникнути помилка в відтворенні такої програми (рис. 3.12).

Для уникнення даної помилки необхідно вимкнути опцію «Restrict placing of circlepoints» в пункті меню «motion configuration».

Експериментальні дослідження проводились при транспортуванні органічного скла завдовжки 0,585м і завширшки 0,535м, масою 1кг по гвинтовій траєкторії радіусом 0,8 м на 90 градусів з підйомом на 0,5 м (рис. 3.13).

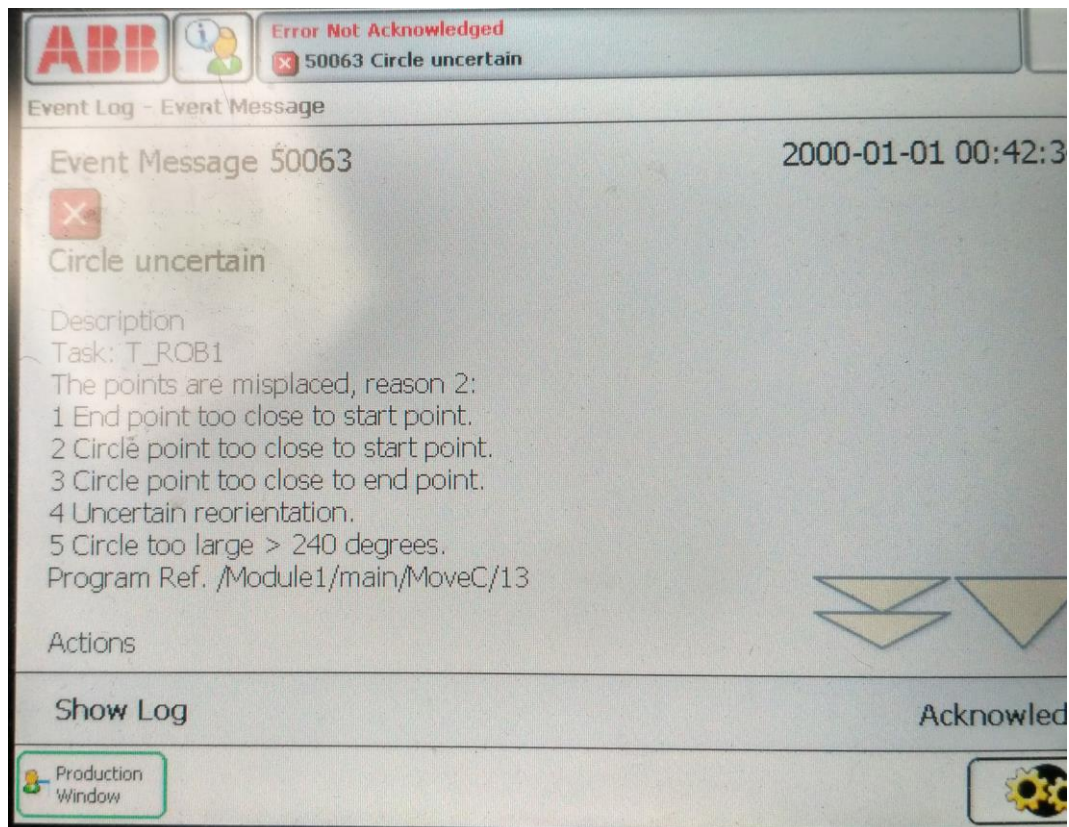


Рис. 3.12 Помилка під час програмування промислового робота



Рис. 3.13 Вигляд експериментальної установки під час експерименту

Перевірку достовірності математичної моделі динамічної взаємодії вантажу і ЗП при транспортування по гвинтовій траєкторії проведено із знаходженням мінімальної необхідної сили притягання при транспортуванні без зміни орієнтації захоплювача (рис. 3.14). Це пов'язано з тим, що при русі по гвинтовій траєкторії вантаж притискується до базуючих елементів ЗП за рахунок відцентрових сил.

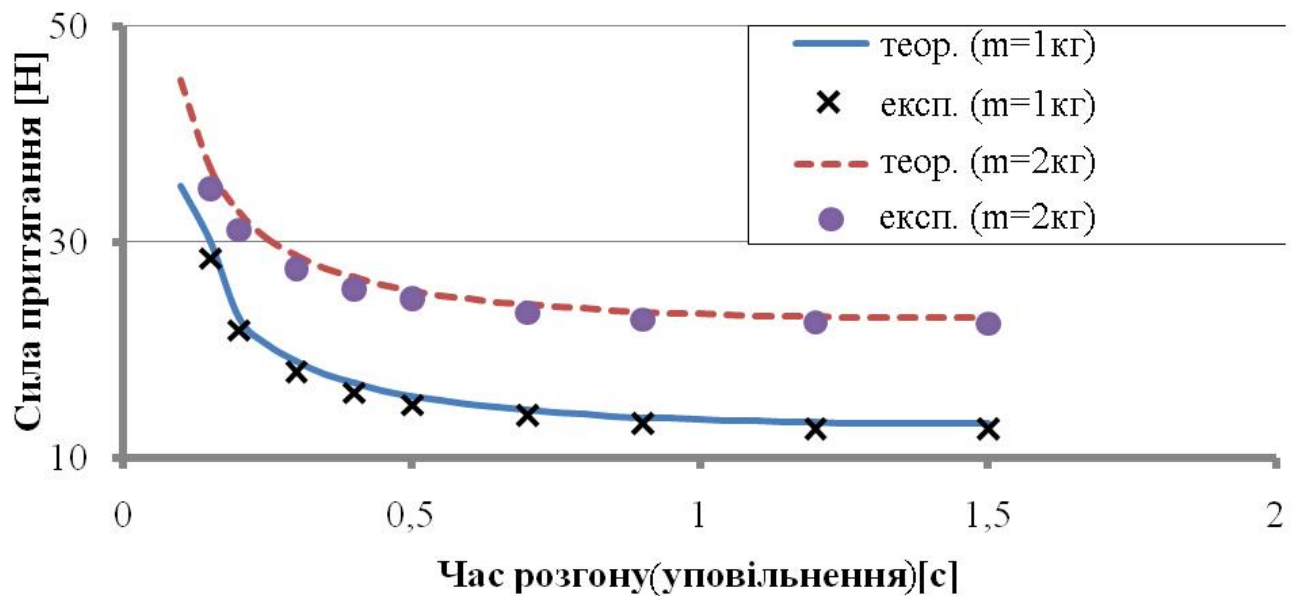


Рис. 3.14 Графіки залежності мінімальної необхідної сили притягання від часу розгону/уповільнення

Отримані результати підтверджують адекватність моделі для оптимізації орієнтації струминного захоплювального пристрою під час транспортування вантажу по гвинтовій траєкторії. Статистичний аналіз отриманих експериментальних даних показав, що коефіцієнт детермінації між теоретичними і експериментальними даними, при варіюванні значеннями часу розгону і висотою підйому вантажу, складає 0,95, відносна похибка значень 4,56%.

3.5. Висновки

Аналіз експериментальних досліджень підтвердив достовірність отриманих теоретичних залежностей, що свідчить про їх придатність для практичних розрахунків. Максимальне відхилення теоретичних значень від експериментальних не перевищує 4,6%.

Проведена статистична обробка експериментальних результатів. Під час неї встановлено, що основним параметром який впливатиме на оптимальну орієнтацію, а отже і на мінімальну необхідну силу притягання буде прискорення і уповільнення під час руху захоплювального пристрою.

Експериментальні дослідження процесу маніпулювання вантажами по гвинтовій траєкторії з оптимізацією орієнтації ЗП показали, достовірності математичної моделі динамічної взаємодії вантажу.

РОЗДІЛ 4

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ЗАВАНТАЖУВАЛЬНО-
РОЗВАНТАЖУВАЛЬНИХ ОПЕРАЦІЙ НА БАЗІ СТРУМИННИХ
ЗАХОПЛЮВАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ

4.1. Дослідження впливу масо-габаритних параметрів на оптимальну орієнтацію та мінімальну необхідну силу притягання при транспортуванні по прямолінійній траєкторії

Проведемо дослідження впливу параметрів вантажу (площі поверхні вантажу, маси та зміщення центра мас вантажу відносно осі ЗП, коефіцієнта тертя між вантажем і фрикційними елементами ЗП) на оптимальну орієнтацію та на мінімальну необхідну силу притягання струминного захоплювального пристрою.

Силкові та витратні характеристики струминного захоплювального пристрою Bosch NCT 100 подано на рис (рис. 4.1) [99].

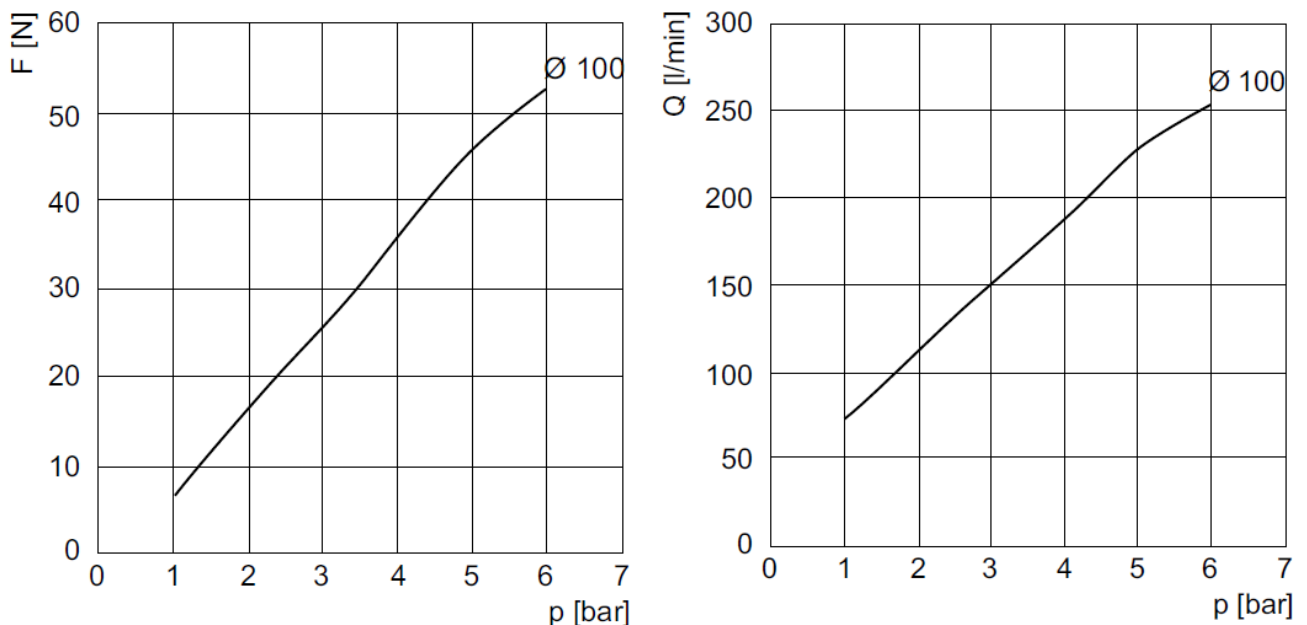


Рис. 4.1 Технічні характеристики струминного захоплювального пристрою

Для визначення оптимальної орієнтації (кут α) та мінімальної необхідної сили притягання струминного захоплювального пристрою використовуємо формули (2.22), (2.23).

Дослідження проводились з програмуванням промислового робота для руху вантажу по прямолінійній траєкторії (рис. 3.7). Дана траєкторія реалізується за допомогою маніпулятора IRB 4600 (ABB), а дані для перевірки моделі отриманні за допомогою програмного забезпечення RobotStudio (ABB).

Проаналізуємо вплив площі вантажу на оптимальну орієнтацію захоплювального пристрою при маніпулюванні по заданій траєкторії за допомогою формул (2.24, 2.25) та методики [14]. Результати обчислень наведені на рисунку 4.2 та проведені при наступних параметрах: $H = 0,005$ м, $d = 0,04$ м, $c = 0,02$ м, $\rho = 1,25$ кг/м³, $\beta = 0$ рад, $a = 4$ м/с², $m = 0,9$ кг, $\omega = 0$ рад/с, $\varepsilon = 0$ рад/с², $f = 0,404$.

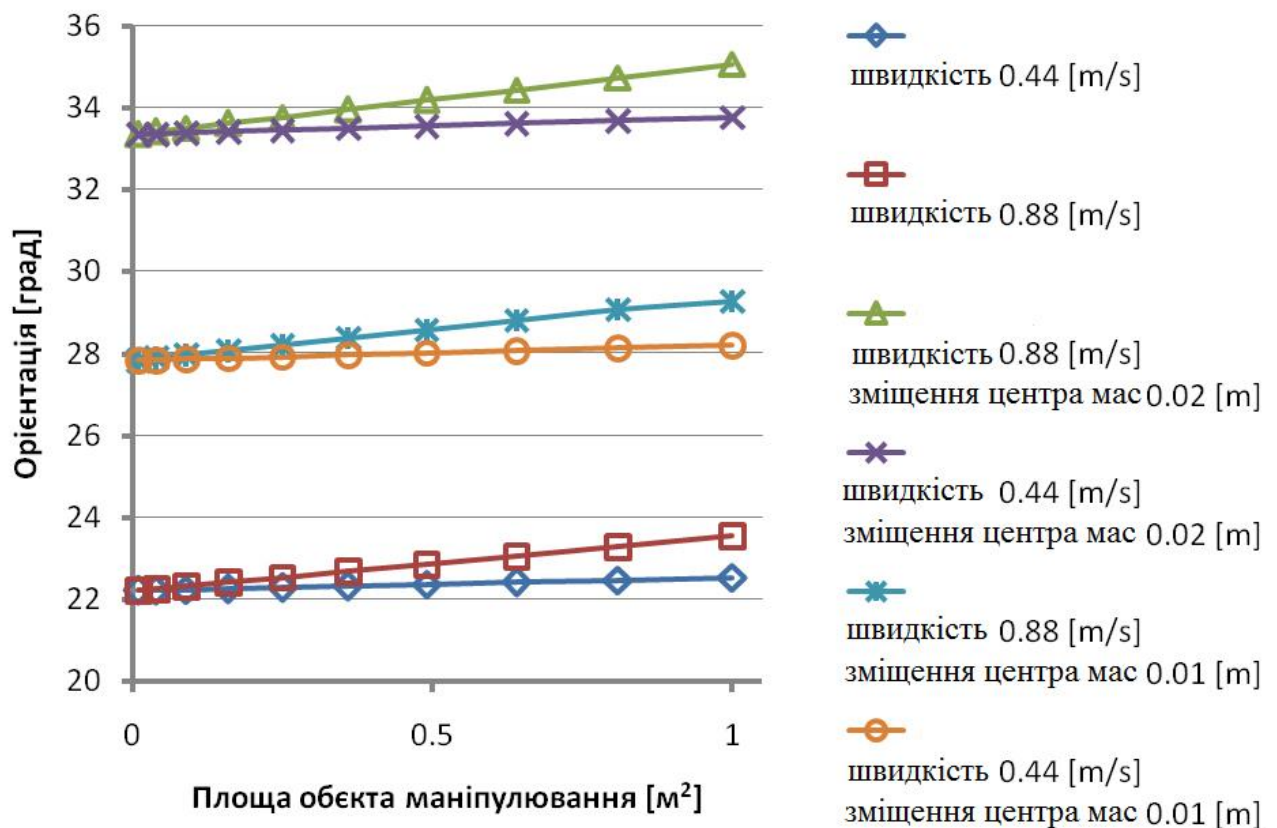


Рис. 4.2 Вплив площі вантажу на оптимальну орієнтацію ЗП при різних параметрах руху

Як видно з рисунку 4.2 орієнтація змінюється при збільшенні площі вантажу та швидкості руху захоплювального пристрою за рахунок зростання сил лобового опору, що діють на вантаж. Отже при розрахунку оптимальної орієнтації для габаритних вантажів або вантажів, що рухаються з великою швидкістю, доцільно враховувати силу лобового опору.

У найбільшій мірі вплив на оптимальну орієнтацію захоплювального пристрою матиме зміщений центр мас вантажу, що в свою чергу вплине на мінімальну необхідну силу притягання.

Для дослідження впливу зміщення центра мас на мініимально необхідну силу притягання (рис. 4.3) був проведений експеримент при наступних експериментальних параметрах: $A=0,585$ м, $B=0,535$ м, $H=0,005$ м, $v=0,64$ м/с, $d=0,04$ м, $c=0,02$ м, $\rho=1,25$ кг/м³, $\beta=0$ рад, $a=2$ м/с², $m=0,9$ кг, $\omega=0$ рад/с, $\varepsilon=0$ рад/с², $f=0,404$.

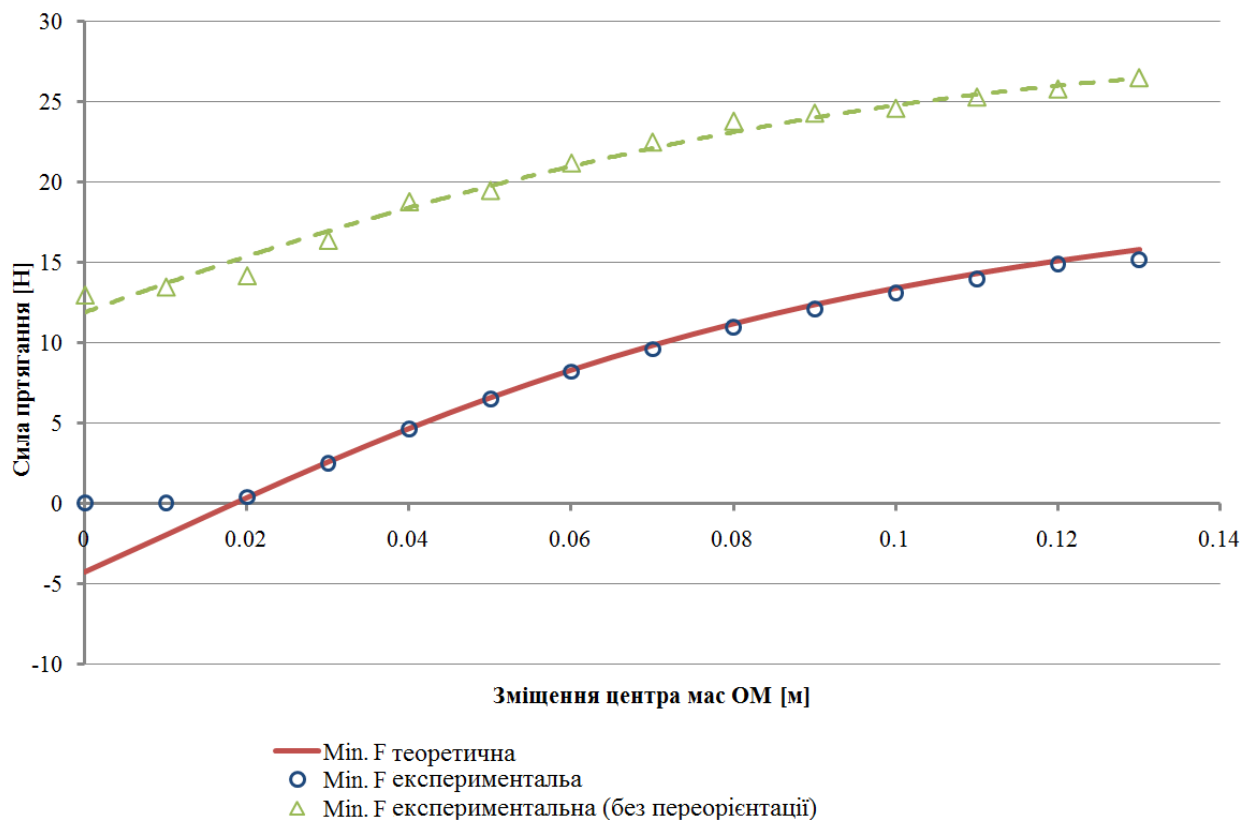


Рис. 4.3 Графік впливу зміщення центра мас вантажу на мінімальну необхідну силу притягання ЗП

Рисунок 4.3 підтверджує адекватність математичної моделі для оптимізації орієнтації струминного захоплювального пристрою (максимальна відносна похибка не перевищує 5%). Також можна побачити на скільки зменшиться мінімальна необхідна сила притягання при застосуванні моделі оптимізації орієнтації в порівнянні з транспортування без переорієнтації вантажу. Але основним висновком з рисунку 3 є очевидність значного впливу зміщення центру мас вантажу на мінімальну необхідну силу притягання.

Вплив маси вантажу та зміщення його центру мас відносно осі ЗП на оптимальну орієнтацію (рис. 4.4) та мінімально необхідну силу притягання (рис. 4.5) зручно представити у вигляді тривимірного графіку. Розрахунки проведені при наступних параметрах: $A=0,11$ м, $B=0,11$ м, $H=0,02$ м, $v=0,64$ м/с, $d=0,04$ м, $c=0,02$ м, $\rho=1,25$ кг/м³, $\beta=0$ рад, $a=2$ м/с², $\omega=0$ рад/с, $\varepsilon=0$ рад/с².

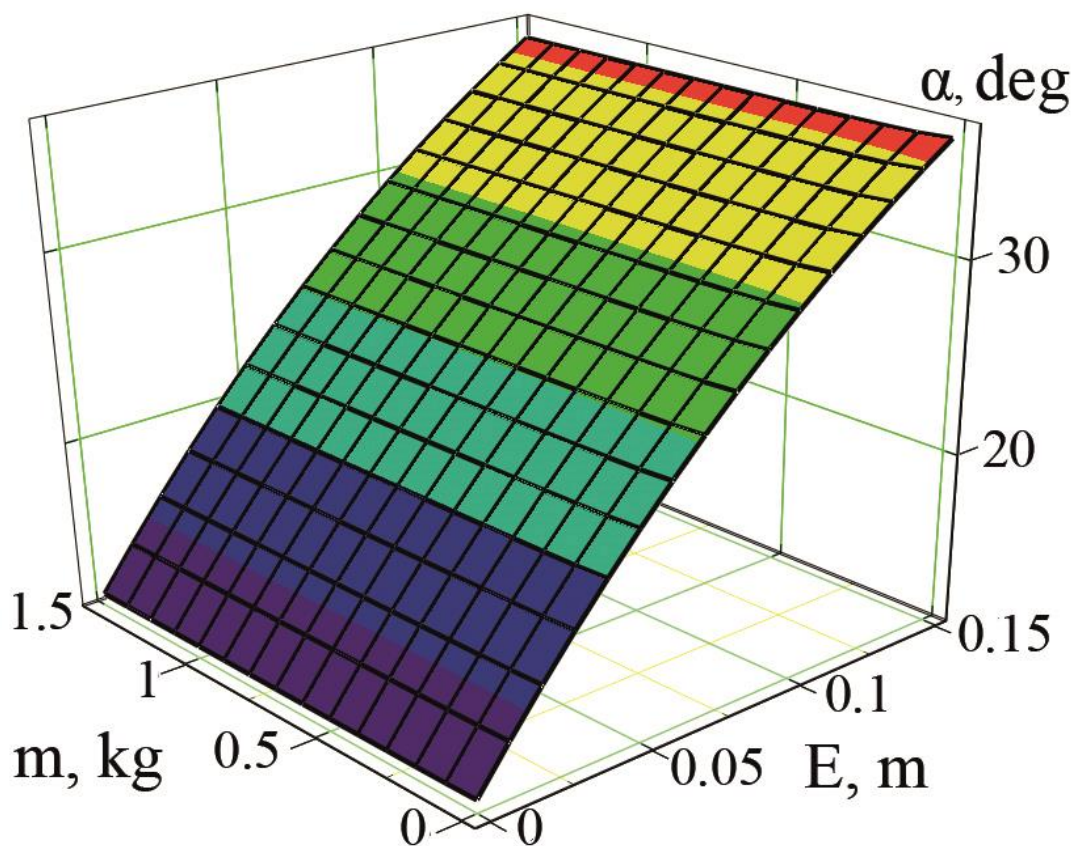


Рис. 4.4 Графік впливу маси і зміщення центру мас вантажу на оптимальну орієнтацію ЗП

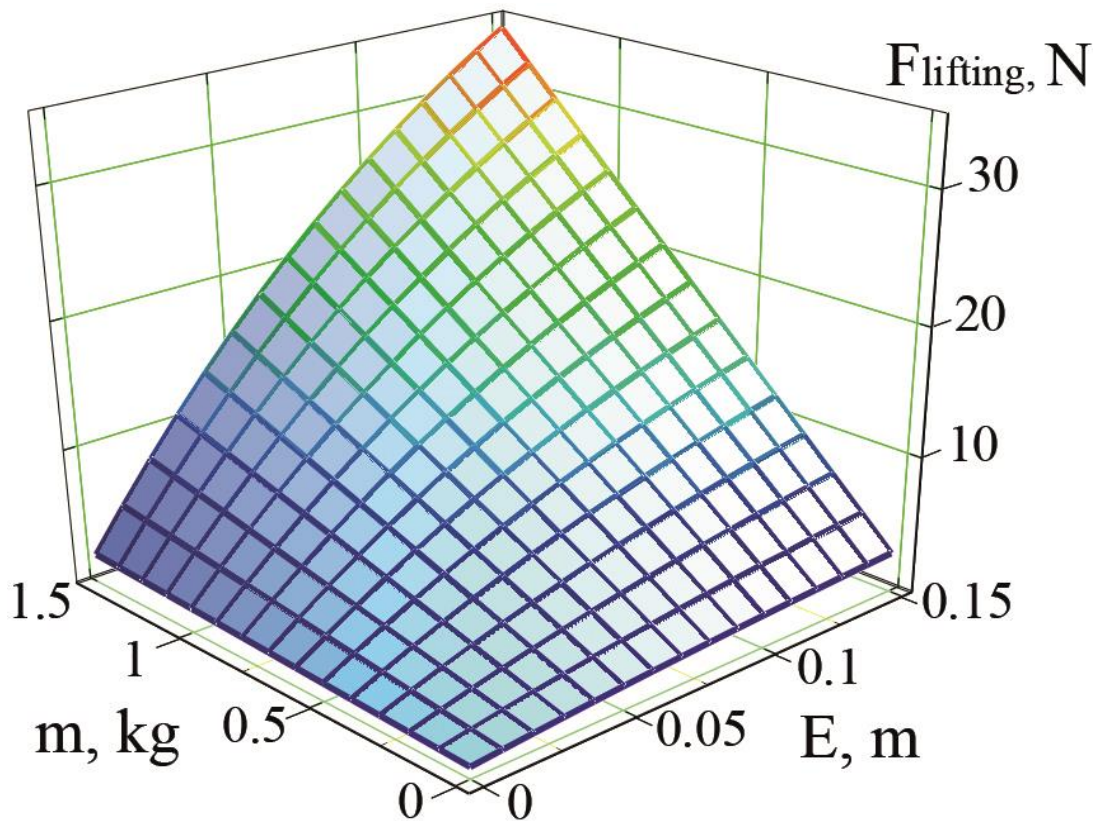


Рис. 4.4 Графік впливу маси і зміщення центра мас вантажу на мінімальну необхідну силу притягання ЗП

У діапазоні зміни маси вантажу від 0,1–1,5 кг, оптимальна орієнтація струминного захоплювального пристрою змінюється не більше ніж на 5%. З рисунку 4.7 видно, що при зміщенні центра мас і маси вантажу мінімальна необхідна сила притягання буде значно зростати. Це зумовлено тим, що при зміщеному центрі мас всі сили які діють на вантаж будуть порушувати рівновагу вантажу відносно ЗП.

4.2. Дослідження впливу параметрів руху і вантажу на мінімальну необхідну силу притягання при транспортуванні по гвинтовій траскторії

Проведемо дослідження впливу параметрів руху і вантажу на мінімальну необхідну силу притягання для утримування вантажу. Для визначення оптимальної орієнтації і мінімальної орієнтації будемо використовувати метод який описаний в пункті 2.4.

Спершу розглянемо вплив радіуса гвинтової траєкторії (рис 4.6) по якій буде рухатися захоплювальний пристрій. Цей параметр може змінюватись максимально до 1,5 м так як промисловий робот IRB 4600 має обмеження по забезпеченню орієнтації в просторі. Розрахунки проводились при таких параметрах: гвинтова траєкторія має 90 градусів, час розгону t_p і час уповільнення t_y рівний 0,5 с, час транспортування $t_{end}=2$ с, маса вантажу $m=1$ кг, підйом який здійснює за час транспортування $z=0,5$ м.

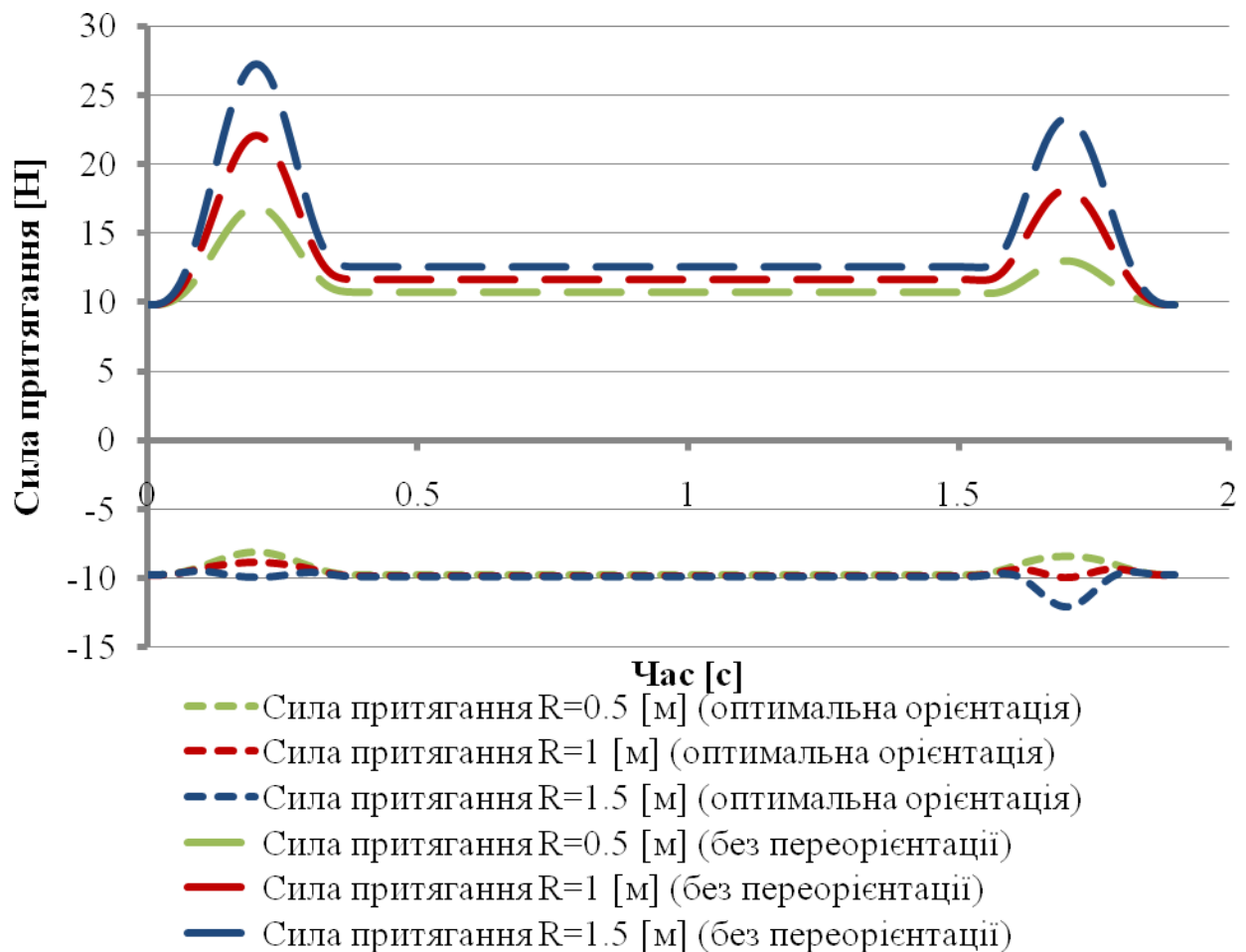


Рис. 4.6 Графіки зміни необхідної сили притягання за час транспортування для різних радіусів гвинтової траєкторії

З рисунку 4.6 видно, що при збільшенні радіуса гвинтової траєкторії мінімальна необхідна сила притягання зменшується (за рахунок збільшення відцентрових сил що будуть діяти на вантаж). Також важливим чинником який

впливає на те, що мінімальна необхідна сила притягання знаходиться в від'ємному діапазоні, є оптимізація орієнтації на протязі всього часу транспортування, за рахунок якої об'єкт притискується до фрикційних елементів захоплювача.

Ще одним параметром руху який має важливий вплив на мінімальну необхідну силу притягання є величина підйому вантажу відносно осі OZ (рис. 4.7). Графіки відповідають наступним параметрам: гвинтова траєкторія величиною 90° , радіус гвинтової траєкторії $R=1$ м, час розгону t_p і час уповільнення t_y рівний $0,5$ с, час транспортування $t_{\text{end}}=2$ с, маса вантажу $m=1$ кг.

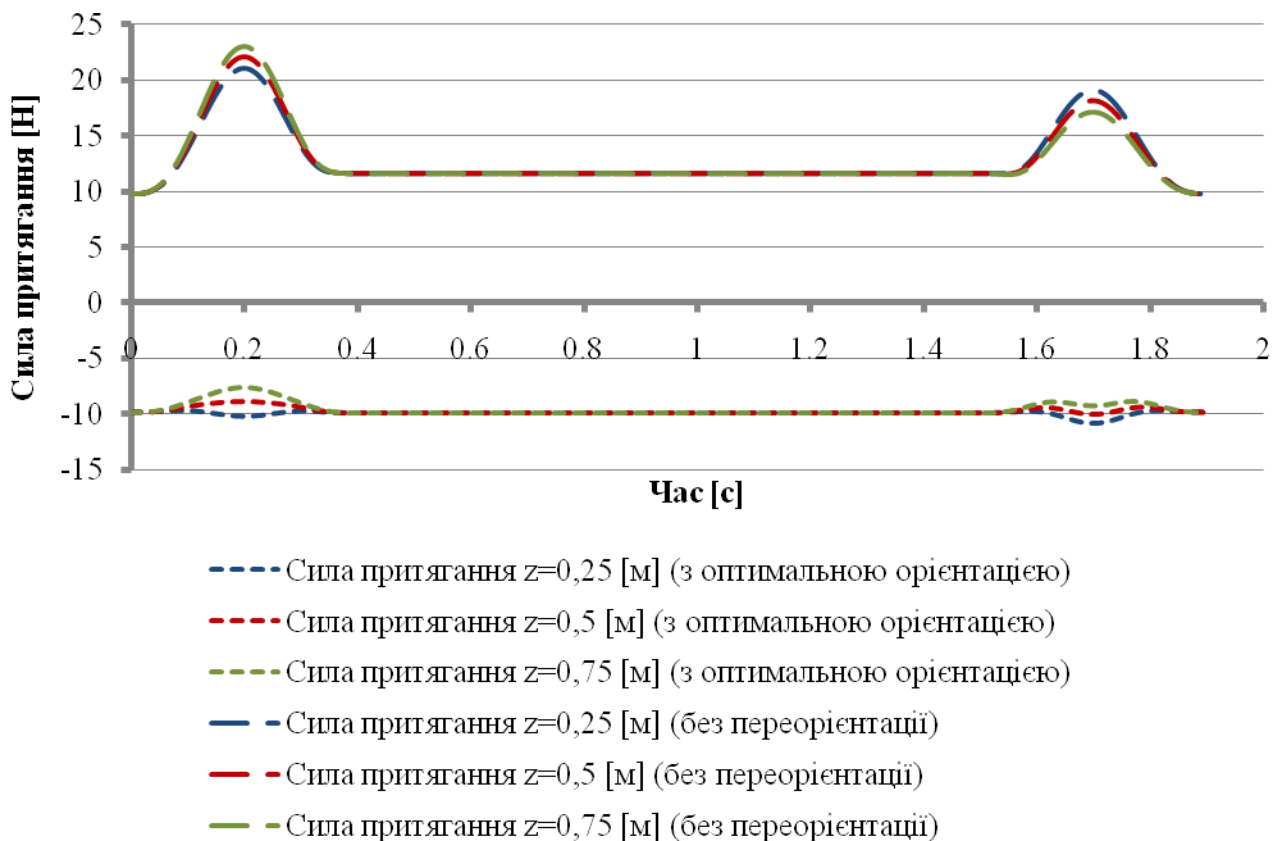


Рис. 4.7 Графіки зміни необхідної сили притягання за час транспортування для різних висот підйому вантажу відносно осі OZ

З рисунку 4.7 можна зробити висновок, що із збільшенням висоти підйому вантажу відносно осі OZ сила притягання на ділянках розгону і уповільнення будуть збільшуватись. Таку залежність можна пояснити

зростанням оптимальних кутів під час транспортування вантажами, а саме зростання кута θ .

Також на інерційність системи буде мати вагомий вплив маса вантажу як основна його характеристика. Тому необхідно дослідити вплив маси вантажу на мінімальну необхідну силу притягання (рис. 4.8).). Графіки відповідають наступним параметрам: гвинтова траєкторія величиною 90° , радіус гвинтової траєкторії $R=1$ м, час розгону t_p і час уповільнення t_y рівний $0,5$ с, час транспортування $t_{\text{end}}=2$ с, підйом який здійснюється за час транспортування $z=0,5$ м.

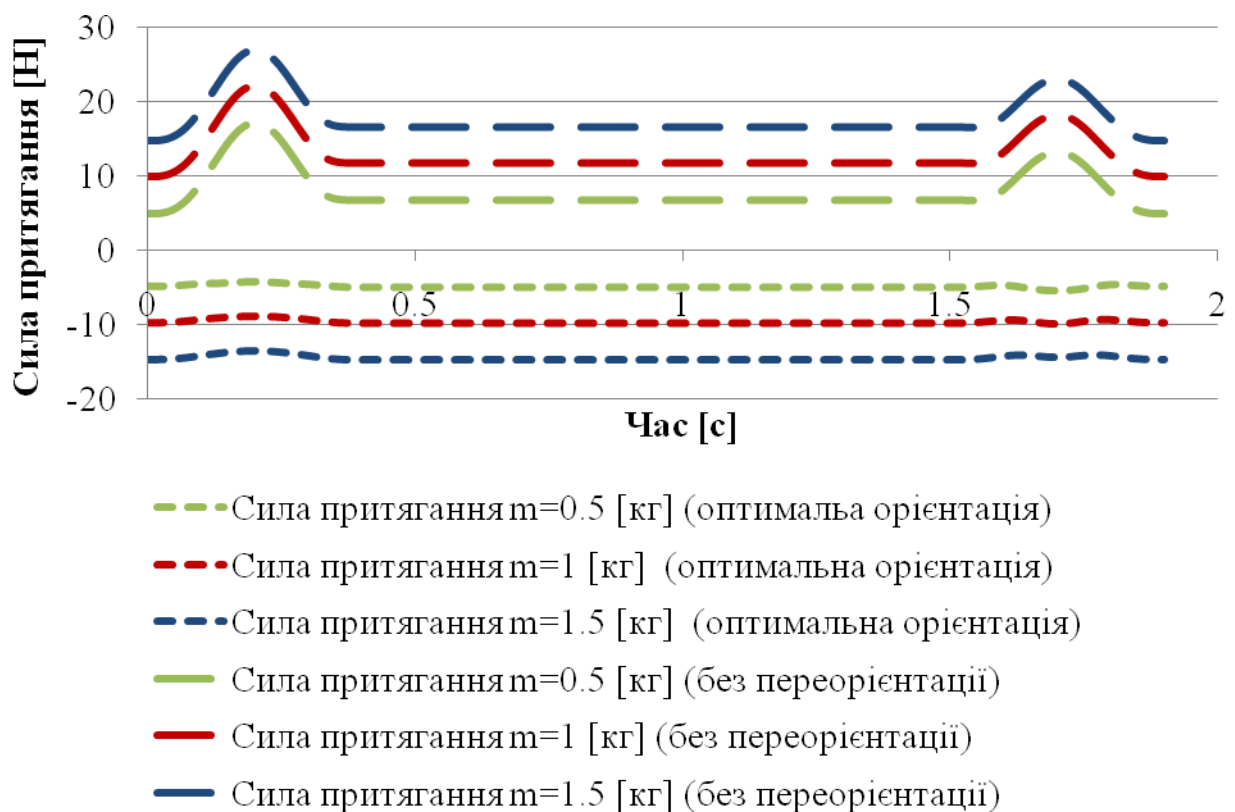


Рис. 4.8 Графіки зміни необхідної сили притягання за час транспортування для різних мас вантажу

З рисунку 4.8 очевидно, що мінімальна необхідна сила притягання із збільшенням маси вантажу буде зменшуватись. Очевидно, що ми отримаємо протилежну картину для випадку транспортування вантажу без переорієнтації. Цим самим підтверджується справедливність запропонованої математичної

моделі для оптимізації орієнтації захоплювальних пристроїв, щоб забезпечити мінімальні силові характеристик під час транспортування.

4.3. Дослідження енергетичних затрат на транспортування вантажів при різних схемах вантажно-завантажувальних операціях

Зменшення енергоспоживання при використанні моделі для оптимальної орієнтації струминного захоплювального пристрою пов'язане із зменшенням мінімально необхідної сили притягання для утримання вантажу (рис. 4.9), тобто зменшенням споживання стиснутого повітря. Розрахунки оптимальної орієнтації, силових характеристик струминного захоплювального пристрою, та енергетичних затрат для транспортування вантажу, проведені при наступних параметрах: $a=5 \text{ м/с}^2$, $m=0,9 \text{ кг}$, $f=0,404$, $H=0,005 \text{ м}$, $\beta=0 \text{ рад}$, $\omega=0 \text{ рад/с}$, $\varepsilon=0 \text{ рад/с}^2$.

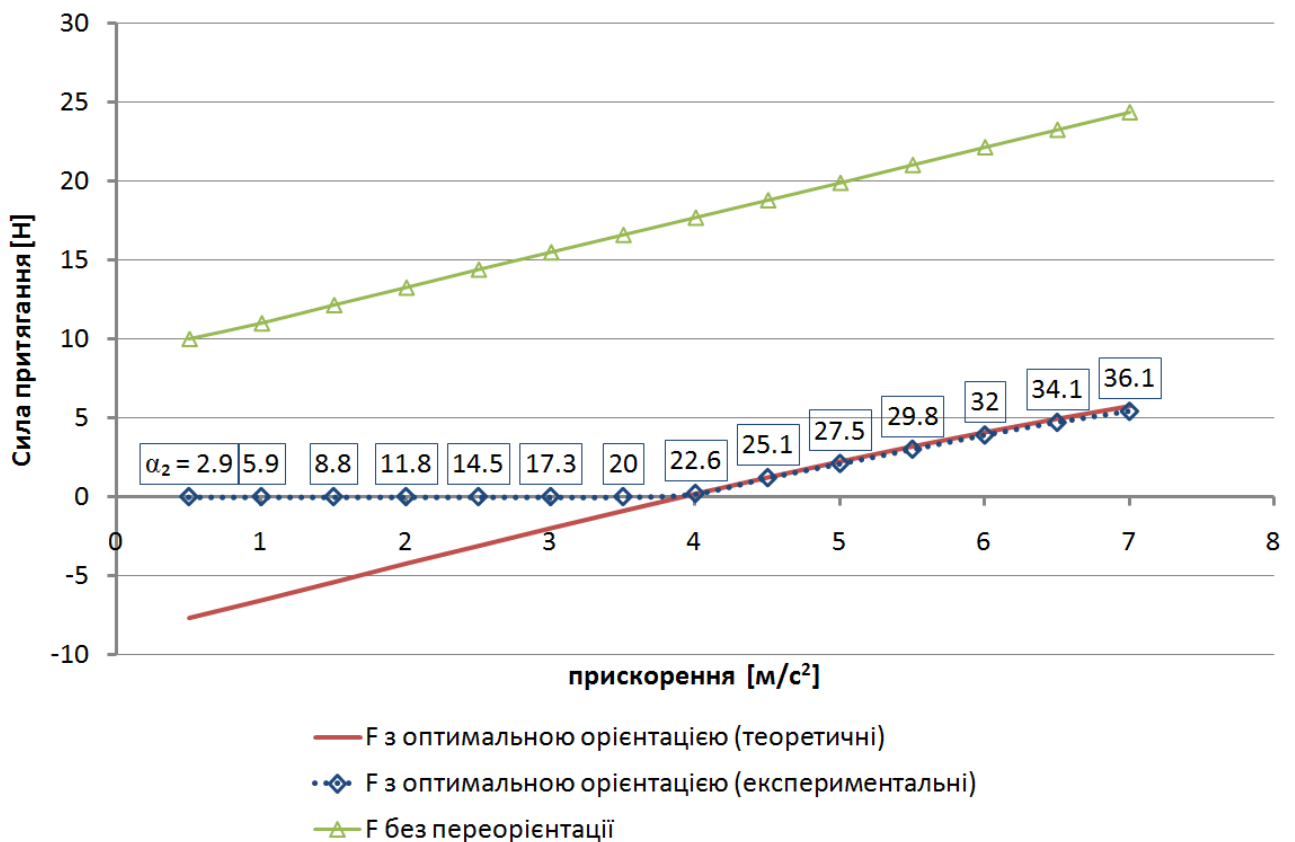


Рис. 4.9 Графік залежності мінімальної необхідної сили притягання від прискорення струминного захоплювального пристрою

Загальне енергоспоживання на виконання транспортної операції включає роботу виконану маніпулятором та струминного захоплювального пристрою. Для обчислення виконаної роботи струминним захоплювальним пристроєм використовуємо формулу:

$$A = N_{cn} \cdot t = P_m \cdot Q \cdot t, \quad (4.1)$$

де P_m - магістральний тиск, Q - витрати стиснутого повітря через щілину ЗП, N_{cn} - споживана потужність СЗП. Надалі розрахунки енергоспоживання СЗП здійснюватимуться на основі технічних характеристик захоплювача NCT-100 (фірми Bosch) [99].

Роботу затрачену маніпулятором для виконання транспортної операції, зручно визначати за допомогою функціональних можливостей програмного пакету RobotStudio (ABB) [97].

Перш за все розглянемо типові методи захоплення вантажу типу пластина, які найчастіше використовуються на практиці:

1. Захоплення вантажу, що лежить на горизонтальній площині паралельній глобальній площині XOY. Відвід вантажу відбувається рухом захоплювального пристрою в напрямку (OZ), що перпендикулярний до горизонтальної площини (рис. 4.10 а).
2. Захоплення вантажу, за вертикальну площину, перпендикулярну до глобальної площини XOY. Відвід вантажу відбувається рухом захоплювального пристрою в напрямку паралельному до горизонтальної площини (рис. 4.10 б).
3. Захоплення вантажу, розташованому в накопичувачі, паралельно до глобальної площини XOY. Відвід вантажу відбувається рухом захоплювального пристрою в напрямку (OZ), що перпендикулярний до горизонтальної площини, а потім паралельно до глобальної площини (рис. 4.10 с).

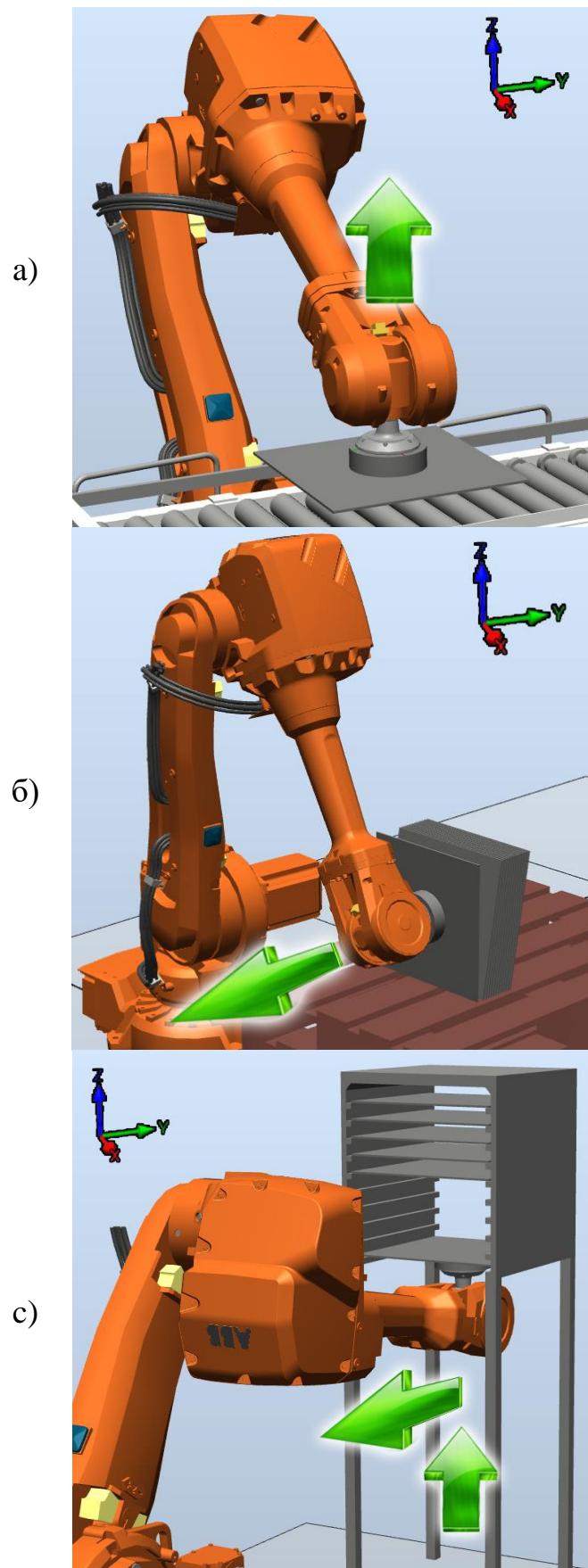


Рис. 4.10 Схеми захоплення вантажу:
а – з горизонтального положення, б – з вертикального положення,
с – з накопичувача

Розглянемо перший метод транспортування вантажу із захопленням вантажу, що лежить на горизонтальній площині паралельній глобальній площині XOY . Відвід вантажу відбувається рухом захоплювального пристрою в напрямку (OZ) , перпендикулярному до горизонтальної площини XOY (Рис. 4.10 а). Будемо використовувати траєкторію яка має форму наведену на рисунку 3.7.

При транспортуванні вантажу без використання переорієнтації на всіх ділянках траєкторії буде зберігатись горизонтальна орієнтація. При транспортуванні вантажу з оптимізацією орієнтації СЗП будемо застосовувати методику (рис. 3.6). На ділянці 1 траєкторії орієнтація ЗП не буде змінюватись. На ділянці 2 траєкторії орієнтація ЗП буде змінюватись з горизонтальної, на оптимальну, що відповідає параметрам руху на ділянці 3 (рівномірно прискорений рух ЗП). На ділянці 3 траєкторії буде зберігатись оптимальна орієнтація ЗП, а на ділянці 4 буде змінюватись орієнтація ЗП з попередньої орієнтації на оптимальну орієнтацію, що відповідає параметрам руху на ділянках 4-5 (рівномірний рух ЗП). Далі на ділянці 5 буде відбуватись переорієнтація ЗП з попередньої на орієнтацію яка буде оптимальна для ділянки 6 (уповільнення ЗП). На ділянці 6 буде зберігатись оптимальна орієнтація на протязі усєї ділянки. Після ділянки 6 траєкторії на ділянці 7 відбувається переорієнтація ЗП з попередньої орієнтації на горизонтальну для розвантаження вантажу.

На ділянці 8 траєкторії при незмінній орієнтації відбувається розвантаження вантажу. Відповідно до характеристик струминного захоплювача NCT-100 проведено обчислення затрат енергії на утримування вантажу при відпрацюванні роботом заданої траєкторії та часових параметрів (рис. 4.11).

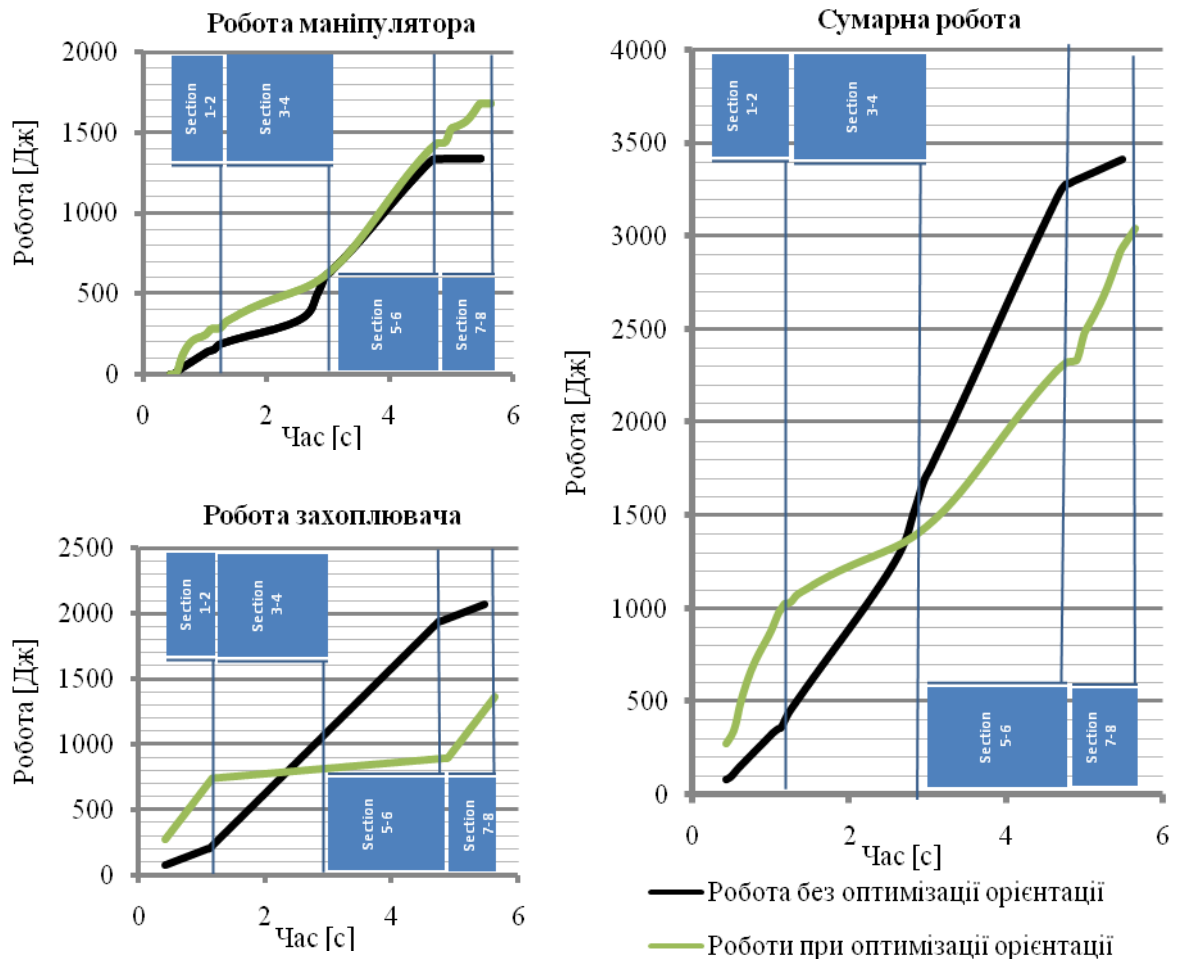


Рис. 4.11 Графіки затраченої енергії на транспортування вантажу при першому методі захоплення

Як видно з рисунку 4.11, мінімізуючи енергетичні затрати захоплювального пристрою за рахунок оптимальної орієнтації ми отримали більші енергетичні затрати на виконання орієнтуючих рухів маніпулятором, також частково зросли затрати на переорієнтацію на початку і в кінці траєкторії. Так як під час переорієнтації з горизонтального положення ЗП в оптимальне, він буде проходити через таку орієнтацію, при якій необхідно забезпечувати максимальну підймальну силу. В цілому, загальна затрачена робота на транспортування при використанні методу оптимізації орієнтації знизилась на 11%.

Тепер розглянемо другий метод захоплення вантажу, що розташований в накопичувачі, паралельно до глобальної площини XOY . Відвід вантажу відбувається рухом захоплювального пристрою в напрямку (OZ) ,

перпендикулярному до горизонтальної площини, а потім паралельно до глобальної площини. Будемо використовувати траєкторію таку ж як і в попередньому випадку. При транспортуванні вантажу без використання переорієнтації на всіх ділянках траєкторії, буде зберігатись його вертикальна орієнтація, окрім ділянки 7. На ділянці 7 відбувається переорієнтація вантажу з вертикального в горизонтальне положення, а на ділянці 8 його розвантаження на горизонтальну площину. При транспортуванні вантажу з оптимізацією орієнтації СЗП (рис. 4.12) на ділянці 1, траєкторії орієнтація ЗП не буде змінюватись. На ділянці 2 траєкторії орієнтація ЗП буде змінюватись з вертикальної, яка була при захопленні, на оптимальну орієнтацію, що буде на ділянці 3 під час прискорення. Далі по аналогії з попереднім методом захоплення.

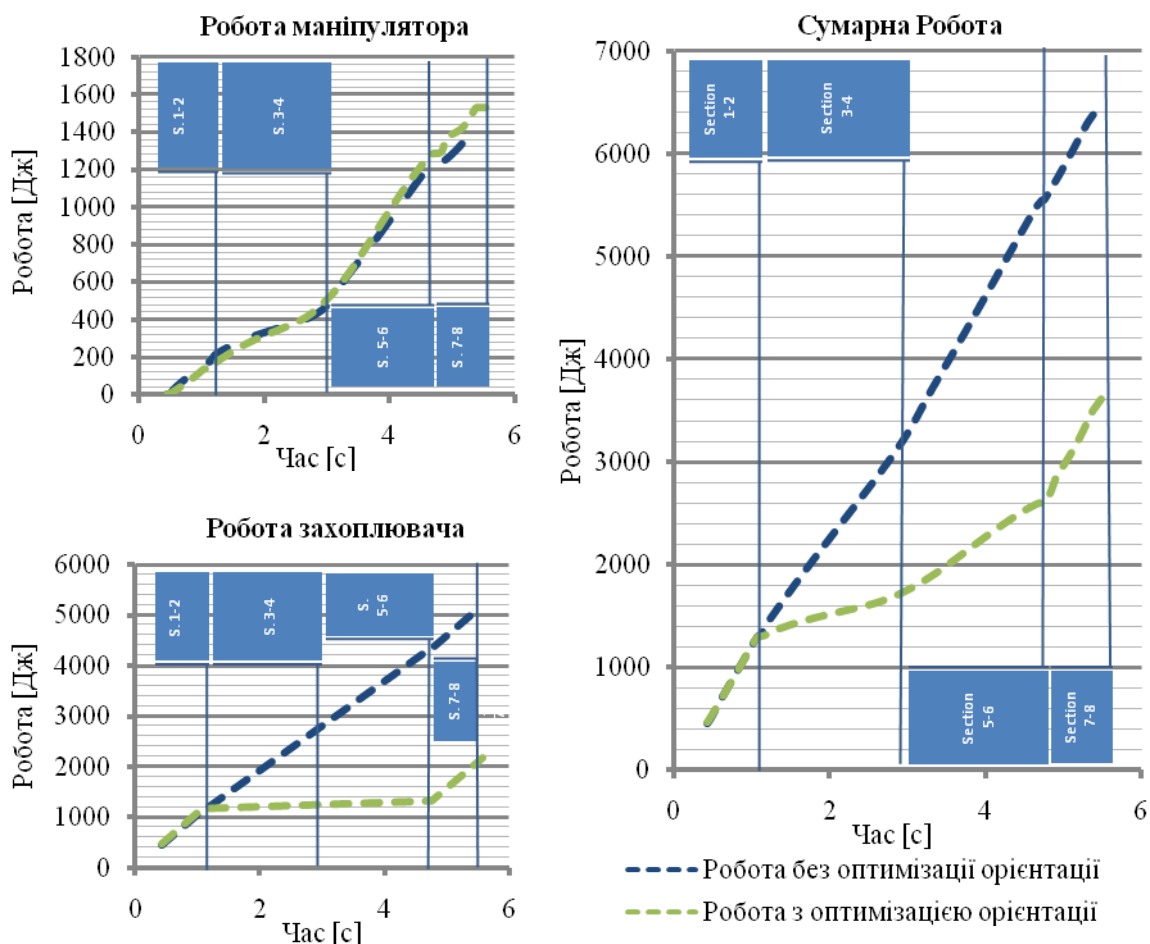


Рис. 4.12 Графіки затраченої енергії на транспортування вантажу при другому методі захоплення

Як видно з рисунку 4.12, мінімізуючи енергоспоживання ЗП за рахунок оптимальної орієнтації, ми отримали зростання енергетичних затрат на виконання орієнтуючих рухів маніпулятором на 5%. Підводячи підсумки загальної затраченої роботи на транспортування з використанням методу оптимізації орієнтації СЗП, енергетичні затрати скоротилися на 43%.

Розглянемо третій метод захоплення вантажу, що лежить в накопичувачі, паралельно до глобальної площини XOY . Відвід вантажу відбувається рухом захоплювального пристрою в напрямку (OZ) , перпендикулярному до горизонтальної площини, а потім паралельно до глобальної площини (рис. 4.10 с). Будемо використовувати траєкторію таку ж як і в попередньому випадку. При транспортуванні вантажу без використання переорієнтації, на всіх ділянках траєкторії буде зберігатись горизонтальна орієнтація, окрім ділянки 7 де відбувається переорієнтація вантажу на 180° , а на ділянці 8 розвантаження вантажу на горизонтальну площину. При транспортуванні вантажу з використанням методу оптимізації орієнтації СЗП (рис. 4.13) на ділянці 1 траєкторії зберігається початкова орієнтація. На ділянці 2 траєкторії орієнтація ЗП буде змінюватися з горизонтальної, що була при захопленні, на оптимальну орієнтацію, що буде на ділянці 3 під час прискорення. Далі по аналогії з попереднім методом захоплення.

Як видно з рисунку 4.13, мінімізуючи енергетичні затрати захоплювального пристрою за рахунок оптимальної орієнтації, ми отримали зростання енергетичних затрат на виконання орієнтуючих рухів маніпулятором на 5%. У підсумку, загальна затрачена робота на транспортування при використанні методу оптимізації орієнтації зменшилась на 7%.

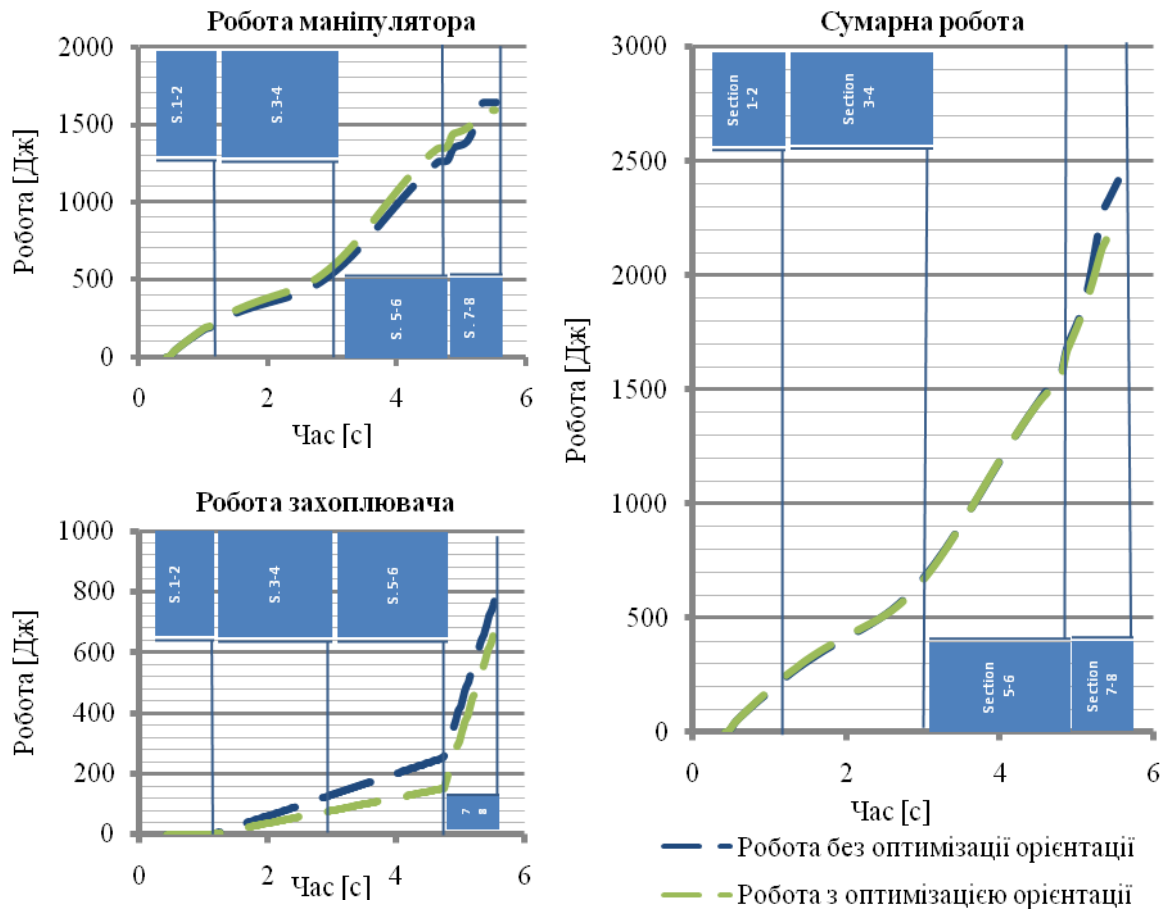


Рис. 4.13 Графіки затраченої енергії на транспортування вантажу при третьому методі захоплення

Аналіз затраченої роботи при транспортуванні вантажу по типовій траєкторії з незмінними параметрами руху та параметрами вантажу, для різних методів захоплення, показує, що найоптимальнішим методом захоплення (з точки зору енергоефективності) вантажу за нижню горизонтальну площину.

Також доцільно оцінити вплив маси вантажу, як одного з основних факторів, що впливають на силові характеристик СЗП, а отже і на збільшення енергоспоживання (рис. 4.14).

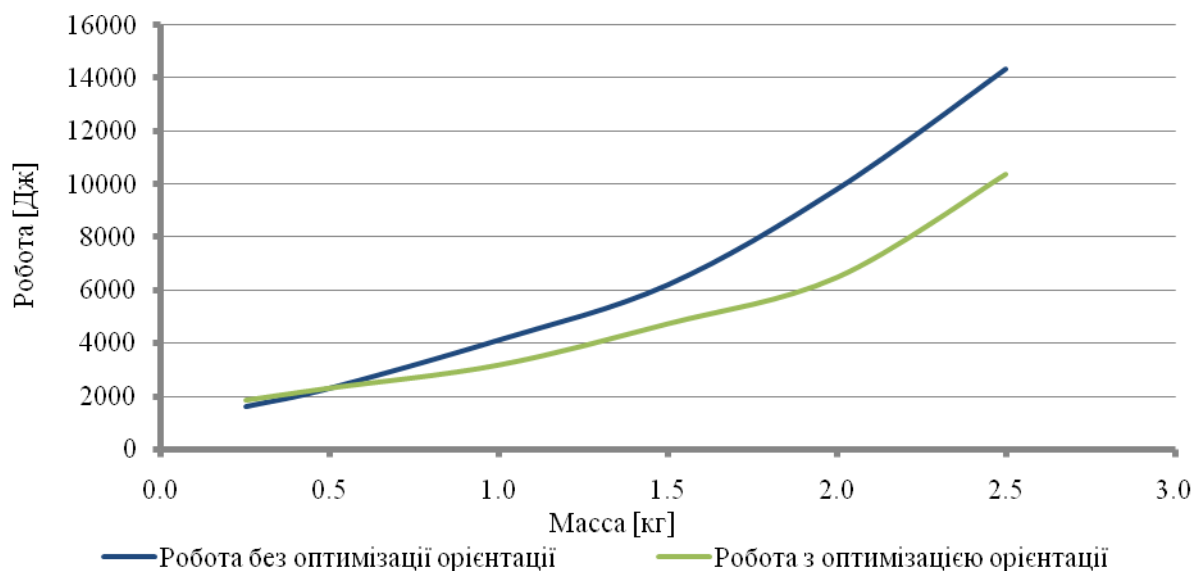


Рис. 4.14 Графіки залежності сумарної затраченої роботи від маси вантажу при першому методі захоплення

Як видно з рисунку 4.14 ефективність впровадження методу оптимізації орієнтації збільшується із збільшенням маси вантажу. Так при масі $m=1$ кг енергетичні затрати на транспортування вантажу зменшились на 20%, а при масі $m=2$ кг - на 32%. Водночас, для даних параметрів руху та технічних характеристик робота IRB 4600 використання даного методу недоцільне при $m < 0,6$ кг.

Окрім маси вантажу, на транспортування вагомий вплив має прискорення вантажу на усіх ділянках траєкторії. Тому необхідно розглянути вплив прискорення вантажу, як основної складової сили інерції, що виникає при русі вантажу, на силові характеристики та енергетичні затрати СЗП при транспортуванні вантажу (рис. 4.15).

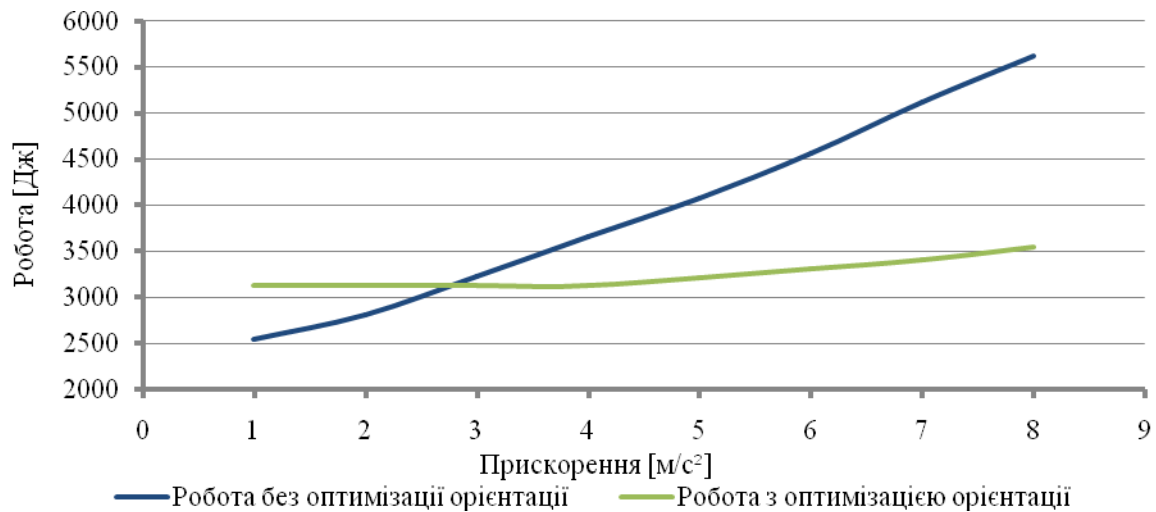


Рис. 4.15 Графіки сумарної затраченої роботи для транспортування вантажу з різним прискоренням при захопленні першим методом

Як видно з рисунку 4.15, ефективність впровадження методу оптимізації орієнтації збільшується із збільшенням прискорення вантажу. Так для вантажу масою 1 kg при прискоренні вантажу $a=3 \text{ м/с}^2$ енергетичні затрати зменшились на 5%, а при прискоренні вантажу $a=8 \text{ м/с}^2$ на 46%. Водночас, для даних параметрів руху та технічних характеристик робота IRB 4600 використання даного методу недоцільне при $a < 3 \text{ м/с}^2$. Про те, при програмуванні промислових роботів, найчастіше не використовують обмеження за прискоренням. Таке транспортування призводить до збільшення енергетичних затрат. Так для типової траєкторії, не задавши обмеження на прискорення кінцевої ланки маніпулятора на ділянках траєкторії 1,2,7,8, програмний пакет RobotStudio автоматично обмежить його до $a=10 \text{ м/с}^2$, а на ділянках 3,4,5,6 до $a=7 \text{ м/с}^2$. Знайдемо енергетичні затрати для таких даних при оптимальній орієнтації СЗП обмеживши прискорення до 5 м/с^2 при однаковому часі транспортування (рис. 4.16).

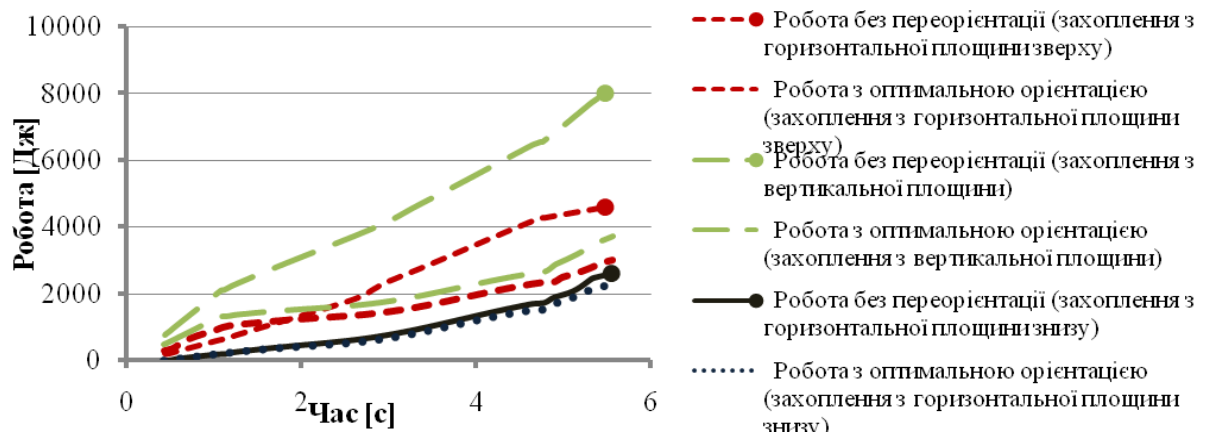


Рис. 4.16 Графіки сумарної затраченої енергії на транспортування вантажу з різним прискоренням при захопленні першим методом

Як видно з рисунку 4.16, енергетичні затрати на транспортування вантажу, коли прискорення не обмежується - зростають. В такому випадку методика оптимізації орієнтація СЗП матиме ще більший ефект. Так для захоплення вантажу за верхню горизонтальну площину енергетичні затрати на транспортування зменшаться на 35%, для захоплення вантажу з вертикальної площини на 54%, а для захоплення вантажу за нижню горизонтальну площину на 14%.

4.4. Дослідження енергетичних затрат на транспортування вантажів по гвинтовій траєкторії

Під час транспортування вантажу без оптимізації він транспортується паралельно до локальної площини XOY і не змінює орієнтації впродовж всього часу транспортування (рис. 4.17).

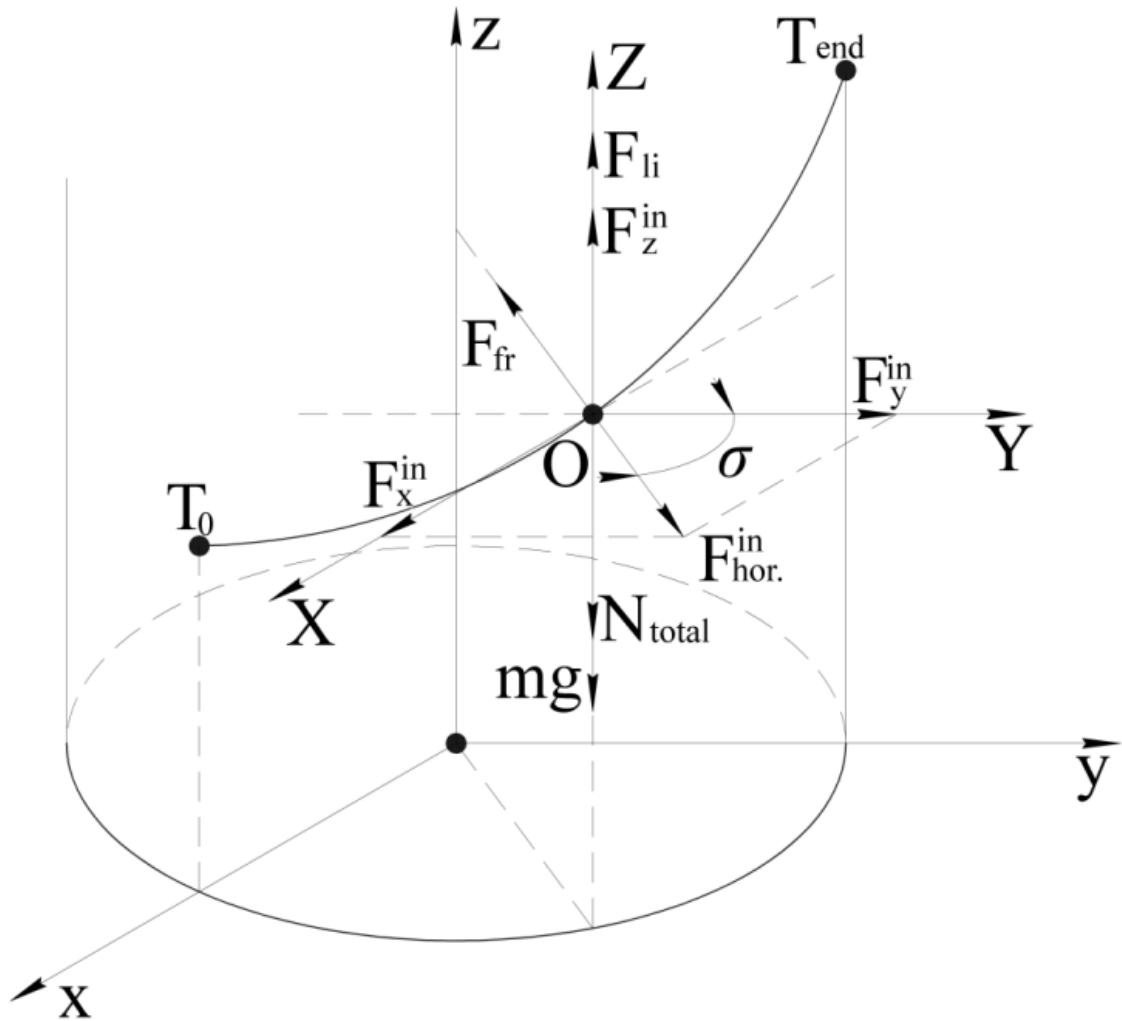


Рис. 4.17 Сили, що діють на вантажу при транспортуванні без переорієнтації

Запишемо умову рівноваги для трьох ділянок траєкторій:

- перша ділянка (розгін):

$$N_1 + N_2 + N_3 = N_{total}; \quad F_1^{tr} + F_2^{tr} + F_3^{tr} = N_{total} f;$$

$$\begin{cases} F_x = 0 \rightarrow F_x^{in} - N_{total} f \sin \sigma = 0; \\ F_y = 0 \rightarrow F_y^{in} + N_{total} f \cos \sigma = 0; \\ F_z = 0 \rightarrow F_z^{in} + F_{np} - N_{total} - mg = 0; \end{cases} \quad (4.2)$$

- друга ділянка (рівномірний рух)

$$\begin{cases} F_x = 0 \rightarrow F_x^{in} - N_{total} f \sin \sigma = 0; \\ F_y = 0 \rightarrow F_y^{in} + N_{total} f \cos \sigma = 0; \\ F_z = 0 \rightarrow F_{np} - N_{total} - mg = 0; \end{cases} \quad (4.3)$$

- третя ділянка (уповільнення)

$$\begin{cases} F_x = 0 \rightarrow F_x^{in} + N_{total} f \sin \sigma = 0; \\ F_y = 0 \rightarrow F_y^{in} - N_{total} f \cos \sigma = 0; \\ F_z = 0 \rightarrow F_z^{in} + F_{np} - N_{total} - mg = 0. \end{cases} \quad (4.4)$$

Якщо визначити з системи рівнянь (4.2-4.4) суми нормальних реакцій N_{total} вантажу з захоплювальним пристроєм і підставити в F_z , отримаємо обмеження мінімальної необхідної сили притягання на утримування захоплювальним пристроєм вантажу для кожної з ділянок траєкторії (рис. 4.18):

$$F_{np} \geq \begin{cases} \frac{-F_y^{in}}{f \cdot \cos(\sigma)} + mg - F_z^{in} \text{ якщо } 0 \leq t \leq t_1 \text{ де } \sigma = \pi - \text{arctg} \left(\frac{F_y^{in}}{F_x^{in}} \right); \\ \frac{-F_y^{in}}{f \cdot \cos(\sigma)} + mg \text{ якщо } t_1 \leq t \leq t_2 \text{ де } \sigma = \pi - \text{arctg} \left(\frac{F_y^{in}}{F_x^{in}} \right); \\ \frac{F_y^{in}}{f \cdot \cos(\sigma)} + mg - F_z^{in} \text{ якщо } t_2 \leq t \leq t_{end} \text{ де } \sigma = -\text{arctg} \left(\frac{F_x^{in}}{F_y^{in}} \right). \end{cases} \quad (4.5)$$

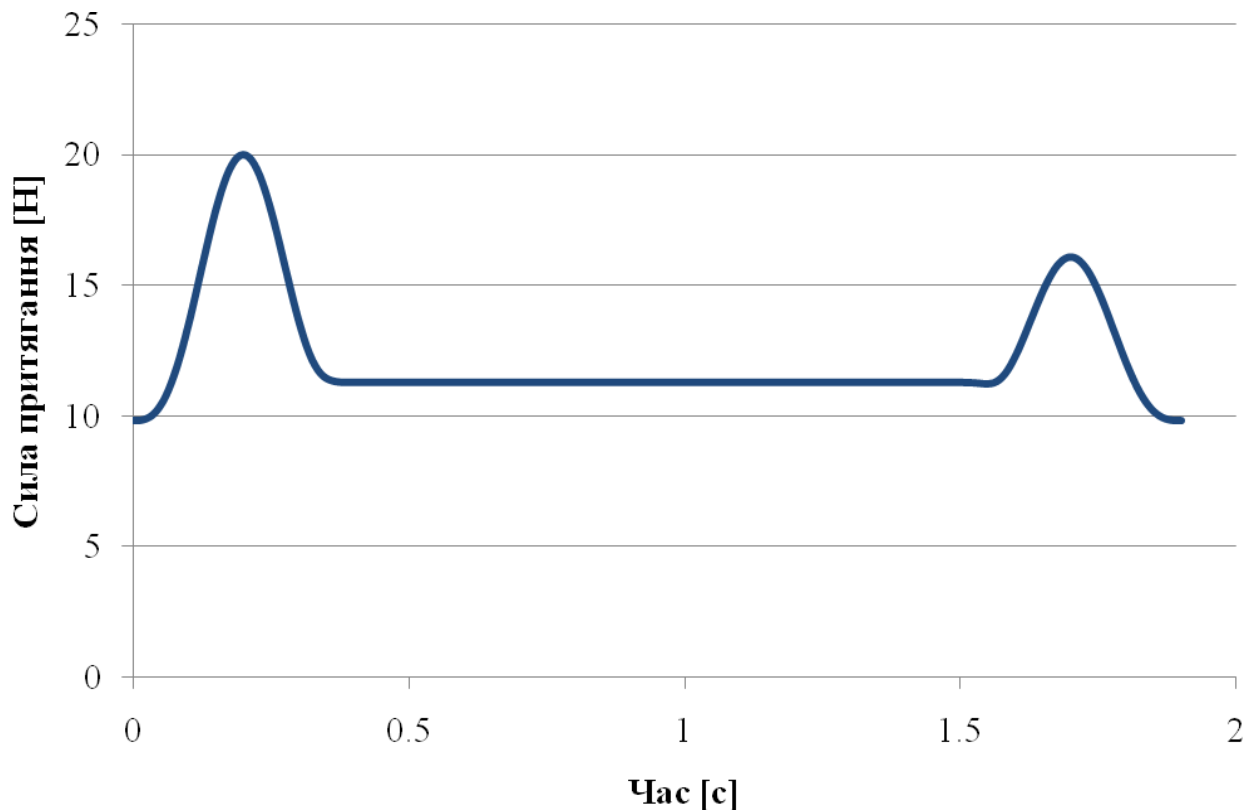


Рис. 4.18 Графік мінімально необхідної сили притягання під час транспортування без переорієнтації

Як правило при транспортуванні вантажу сила притягання встановлюється на всьому відрізку рівною максимальному значенню необхідної сили притягання за весь час транспортування. Найбільше значення сили притягання необхідне на ділянці розгону захоплювального пристрою. В нашому випадку під час транспортування вантажу без переорієнтації необхідно забезпечувати мінімально необхідну силу притягання 20 Н.

Якщо для прикладу взяти технічні характеристики струминного захоплювального пристрою NCT-100 фірми Bosch Rexroth [99] для забезпечення підіймальної сили 20 Н необхідний тиск 2.4 бар, при цьому тиску витрата стиснутого повітря становитиме 130 л/хв. Маючи дані необхідні для утримування вантажу можна порахувати затрачувану енергію (рис. 4.19) на забезпечення безвідривного транспортування для транспортування з оптимізацією орієнтації і без оптимізації за формулою 4.1.

Результати по споживанню енергії маніпулятором отриманні з ліцензійного програмного середовища RobotStudio фірми ABB [97] для транспортування вантажу по гвинтовій траєкторії з оптимізацією орієнтації і без переорієнтації (рис. 4.19).

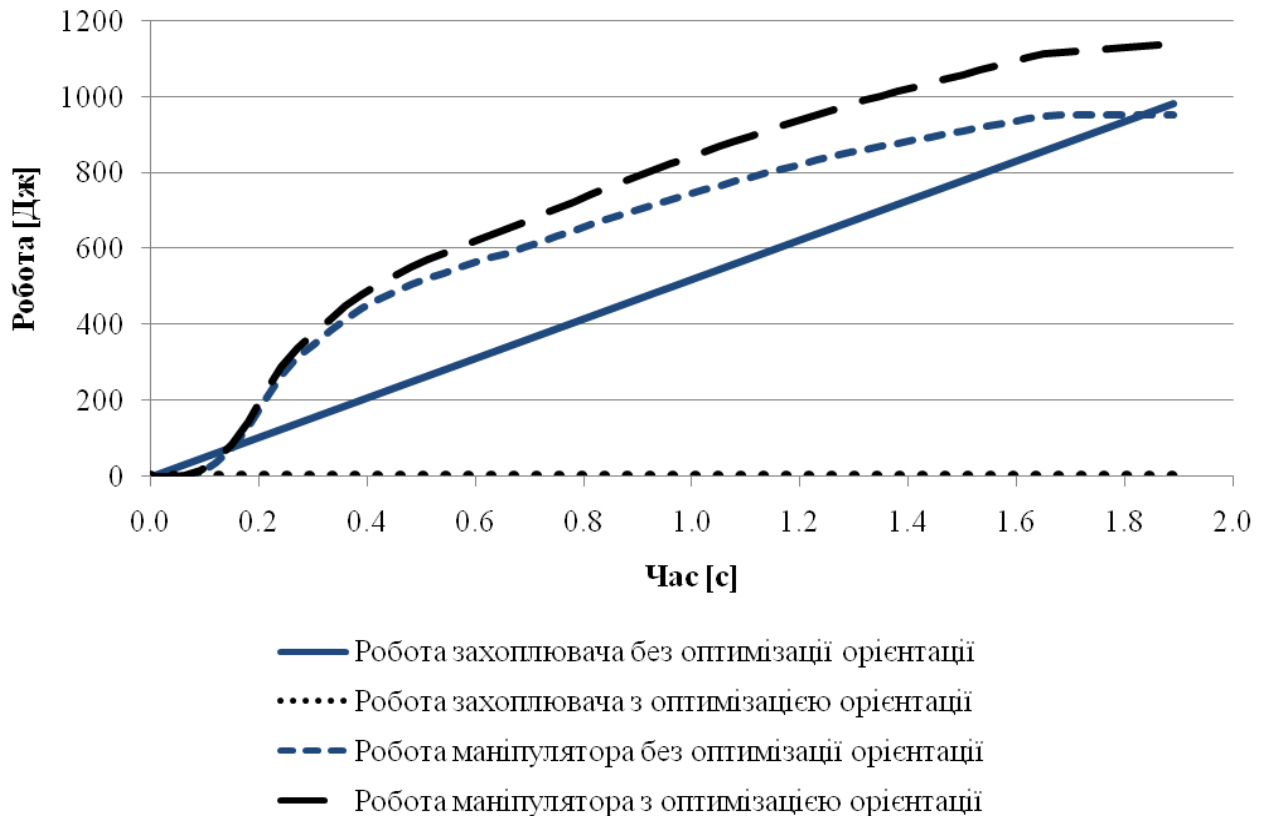


Рис. 4.19 Графіки енергоспоживання захоплювача та промислового робота

Якщо підсумувати енергоспоживання комплексу маніпулятор-захоплювач при транспортуванні вантажу по гвинтовій траєкторії двома способами (рис. 4.20), виявилось, що для транспортування без переорієнтації затрачено 1937 Дж енергії, а з оптимізацією орієнтації затрачено 1140 Дж. Це на 41% (797 Дж) менше ніж споживає такий комплекс при транспортуванні без переорієнтації.

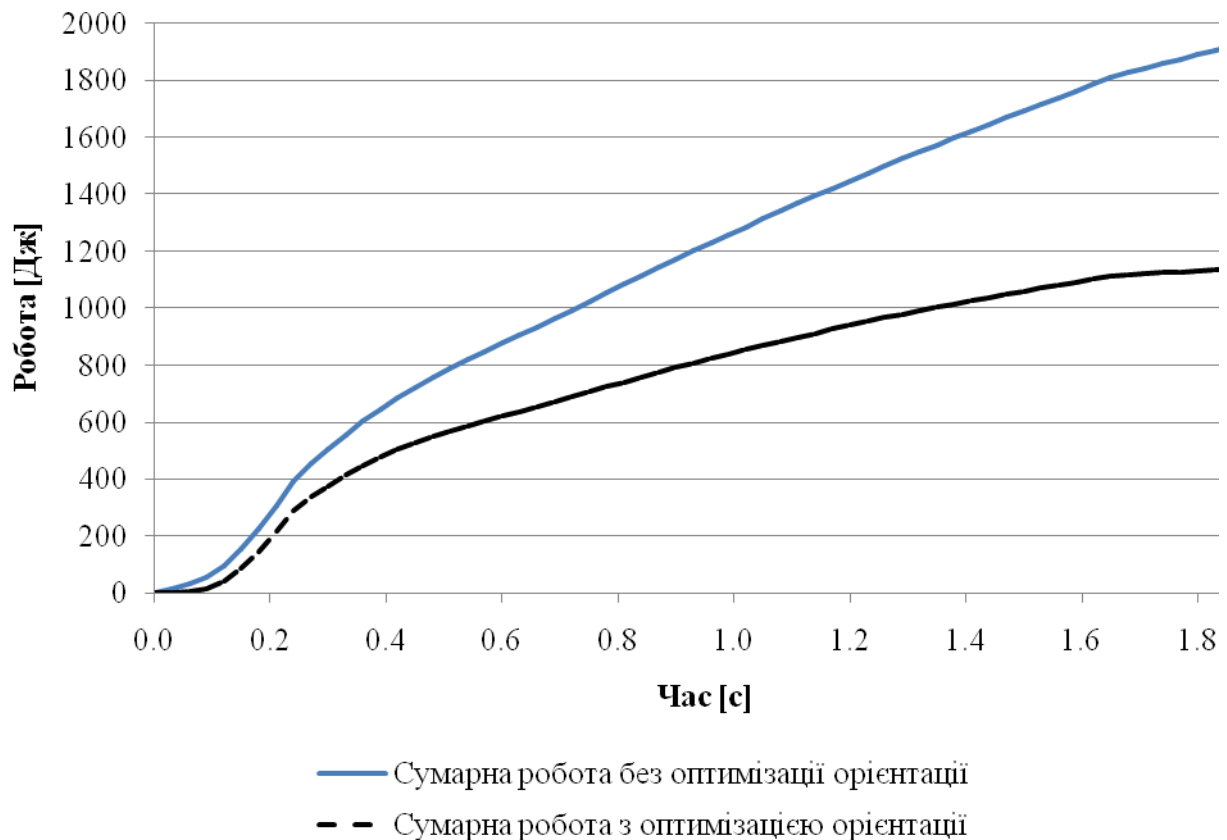


Рис. 4.20 Графіки сумарного енергоспоживання захоплювача і промислового робота

4.5. Висновки

Досліджено вплив параметрів вантажу на мінімальну необхідну силу притягання струминного захоплювального пристрою для різних параметрів руху по прямолінійній траєкторії. Розглянутий випадок транспортування вантажу по прямолінійній траєкторії, з проведенням експериментів за допомогою маніпулятора IRB 4600 (ABB). При цьому використовувалось програмне забезпечення RobotStudio. Доведено адекватність моделі і ефективність використання даного методу оптимізації орієнтації захоплювальних пристроїв для мінімізації енергоспоживання під час виконання промисловим роботом маніпулятивних функцій.

Проаналізовано вплив висоти підйому вантажу по гвинтовій траєкторії, радіуса гвинтової траєкторії та маси вантажу на силові характеристики захоплювального пристрою.

Досліджено енергоефективність транспортування вантажу із

застосуванням методу оптимізації орієнтації та здійснено його порівняння з методом без переорієнтації захоплювального пристрою. Аналіз затраченої роботи на транспортування вантажу для різних методів захоплення показав, що найефективнішим методом захоплення (з точки зору мінімізації енергозатрат) буде його захоплення за горизонтальну площину знизу. Використання методу оптимізації орієнтації захоплювального пристрою у процесі маніпулювання вантажем, дозволило знизити енергетичні затрати до 54% у порівнянні з транспортуванням без переорієнтації. Доведено, що при збільшенні маси вантажу і прискорення захоплювального пристрою, енергоефективність методу оптимізації орієнтації збільшується в порівнянні з транспортуванням вантажу без переорієнтації.

Проведений аналіз енергоефективності впровадження методу оптимізації орієнтації струминного захоплювального пристрою під час транспортування вантажу по гвинтовій траєкторії. Доведено, із збільшенням маси вантажу ефективність впровадження даного методу буде збільшуватись, що позитивно вплине на загальні енергетичні затрати під час транспортування вантажів. Встановлено, що метод моделювання орієнтації під час транспортування вантажу по гвинтовій траєкторії дозволяє знизити енергетичні затрати на транспортування до 41% у порівнянні з транспортуванням без переорієнтації.

РОЗДІЛ 5

МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ВАНТАЖОПІДІЙМАЛЬНОСТІ ПНЕВМАТИЧНИХ ЗАХОПЛЮВАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ ТА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТАБІЛЬНОСТІ УТРИМУВАННЯ ВАНТАЖУ

5.1. Методи забезпечення стабільного утримування вантажу відносно захоплювального пристрою

Із проведених раніше досліджень випливає, що під час транспортування вантажу із зміщеним центром мас дуже важливу роль відіграє розміщення фрикційних елементів на захоплювачі. Якщо центр мас вантажу лежить в межах трикутника з вершинами на фрикційних елементах, то мінімально необхідна сила притягання є практично сталою. Як тільки центр мас вантажу зміщується за межі цього трикутника, можна спостерігати значне зростання мінімально необхідної сили притягання для транспортування вантажу з такими параметрами.

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.

Тому була запропонована схема струминного захоплювального пристрою (рис. 5.1), що дозволяє налагоджувати положення фрикційних елементів, залежно від габаритів вантажу та розташування його центру мас.

Суть пристрою полягає в поєднанні регульованих планок 3 зі струминним захоплювальним пристроєм 1. Через отвір 2 в камеру 7 СЗП підводиться стиснене повітря, і далі витікає через конічне сопло, тим самим створюючи розрідження під конічною вставкою 5 та підіймання вантажу. СЗП кріпиться до маніпулятора за допомогою отворів 4. На регульованих планках встановлені фрикційні елементи 6, положення яких можна змінювати в

площині захоплювача. Самі фрикційні елементи мають змінні гумові вставки, які вибирають в залежності від характеристик поверхні вантажу, щоб забезпечити максимальний коефіцієнт тертя. Це дозволить знизити значення мінімальної необхідної сили притягання під час транспортування вантажів.

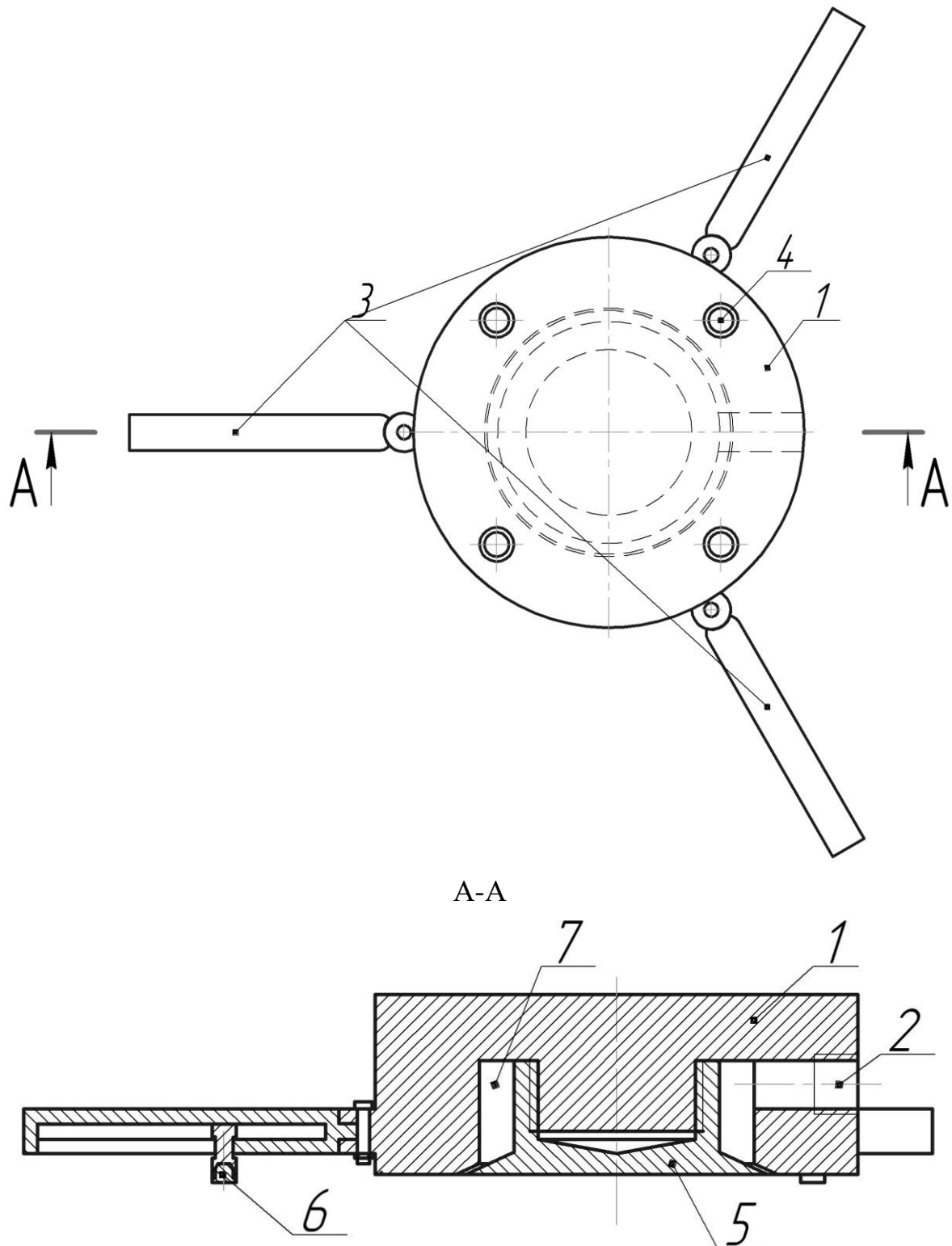


Рис. 5.1 СЗП з можливістю зміни позиції фрикційних елементів

Для покращення стабільного положення вантажу під час транспортування та виключення його контакту із захоплювальним пристроєм доцільне використання принципу повітряної подушки та наступних конструктивних підходів:

1 – застосування комбінації трьох струминних захоплювачів (для безконтактного базування вантажів) разом з основним пневматичним (ежекційним, вихровим, вакуумним) захоплювачем (для створення підіймальної сили);

2 – виконання спеціальних заглиблень на активній (взаємодіючій з вантажем) поверхні струминного захоплювача, в зоні яких, при певних умовах будуть виникати повітряні подушки;

3 – використання групи струминних захоплювальних пристроїв для покращення рівномірності розподілу навантаження на поверхні габаритних, у тому числі й нежорстких вантажів.

5.2. Обґрунтування конструкції та параметрів струминно-вакуумних захоплювальних пристроїв

У порівнянні з вакуумними струминні захоплювачі відрізняються високою надійністю, довговічністю роботи, точністю базування вантажу, а також високими динамічними характеристиками. До недоліків даних пристроїв можна віднести порівняно низькі силові характеристики.

Запропонований вакуумно-струминний захоплювальний пристрій для плоских вантажів (рис. 5.2) у порівнянні із струминним захоплювачем аналогічних витратних характеристик, має в 2.5-4 рази вищу вантажопідйомність. Крім того, в даному пристрої відсутні недоліки, що характерні для вакуумних захоплювачів.

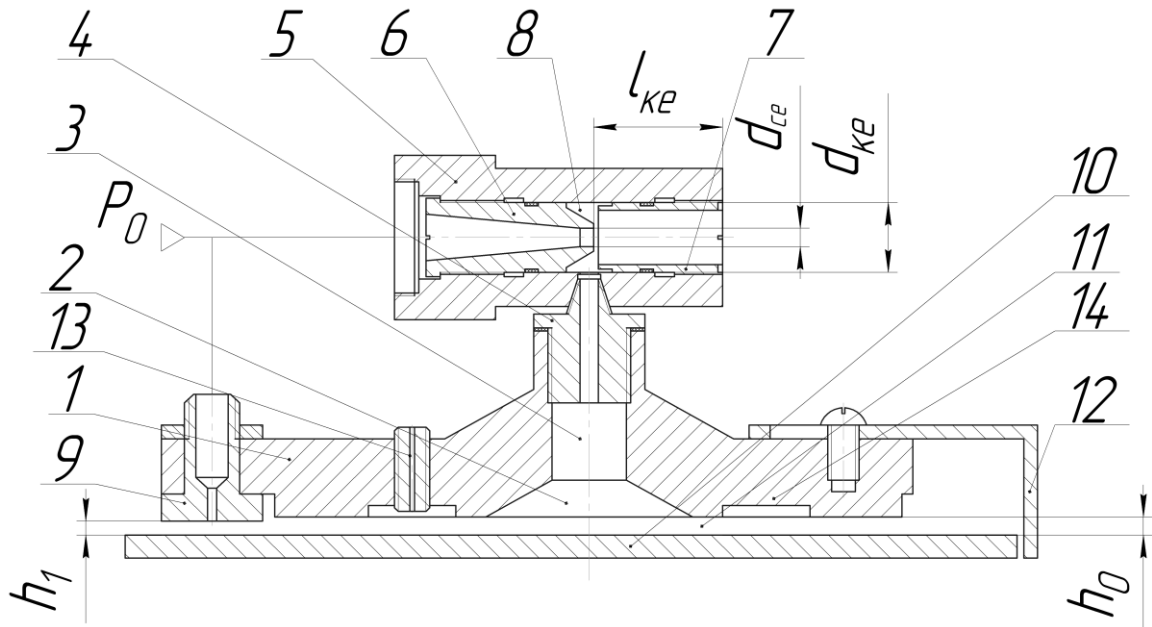


Рис. 5.2 Конструктивна схема вакуумно-струминного захоплювального пристрою

У даному пристрої застосовується жорсткий присос 1 у якому виконана порожнина 2 з каналом 3, до якого за допомогою переходника 4 приєднаний корпус 5 ежектора. Останній складається із сопла 6 і втулки 7. Утворена при цьому прийомна камера 8, з'єднана каналом 3 з порожниною 2. На периферії жорсткого присосу 1 змонтовано три струминних захоплювачі 9. Плоскі торцеві поверхні захоплювачів 9 лежать в одній площині, а їх осі розташовані на деякому радіусі і відстань між ними – однакова. Також торцеві поверхні захоплювачів 9 зміщені відносно торцевої поверхні присосу 1 таким чином, щоб $h_0 - h_1 = 0,03 \div 0,05$ мм.

Захоплювач працює за таким принципом. При подачі стиснутого повітря від пневмосистеми в сопло 6, у камері 8 за рахунок ежекції створюється розрідження, унаслідок чого, з порожнини 2 через канал 3 відсмоктується повітря, створюючи в ній область пониженого тиску. Витікаючи із сопл СЗП 9 потоки повітря, спрямовані убік вантажу 10, діють на нього силами в'язкого тертя, а також реактивною відштовхуючою силою. При зменшенні проміжку h_1

між плоскими поверхнями СЗП та вантажу до величини меншої 0,5мм, присмоктуюча дія струменів повітря починає зростати та переважати реактивну силу. Також при зменшенні проміжку 11 зростає величина розрідження у порожнині 2 присосу, у результаті чого вантаж переміщується в напрямку торця захоплювача. При $h_0 < 0,04$ мм величина розрідження в порожнині 2 досягає максимуму, а між торцевими поверхнями СЗП та вантажем створюються пружні пневматичні подушки.

Утримуваний різницею атмосферного тиску й абсолютного тиску в порожнині 2, вантажу 10 не знаходиться в безпосередньому контакті з торцем присосу 1, оскільки врівноважується пружністю утворених пневматичних подушок. Фіксація вантажу від зміщень у горизонтальній площині здійснюється за рахунок упорів 12.

Жорсткий присос 1 залежно від конструктивного виконання (рис. 5.3), забезпечує різні експлуатаційні характеристики (відстань з якої захоплюється вантаж, максимальна сила притягання при оптимальному значенні відстані між захоплювачем та вантажем і т.д.). Суцільний плоский торець жорсткого присосу (рис. 5.3, а) забезпечує захоплення вантажу з більшої відстані. Зміщення між торцевими поверхнями присосу на величину δ (рис. 5.3, b, d) або використання у конструкції присосу капілярного дроселя 13 (рис. 5.3, e) забезпечує можливість безконтактного утримування вантажу навіть без використання СЗП. Наявність кільцевої порожнини 14 у конструкції присосу (рис. 5.3, c, d, e) забезпечує підвищення сили притягання.

Незважаючи на те, що утримуюча сила вакуумно-струминного захоплювача визначається в основному піднімальною здатністю присосу, використання в його конструкції струминних захоплювачів дозволить покращити динамічні характеристики, забезпечити захоплення вантажу з більшої відстані та їх безконтактне утримування.

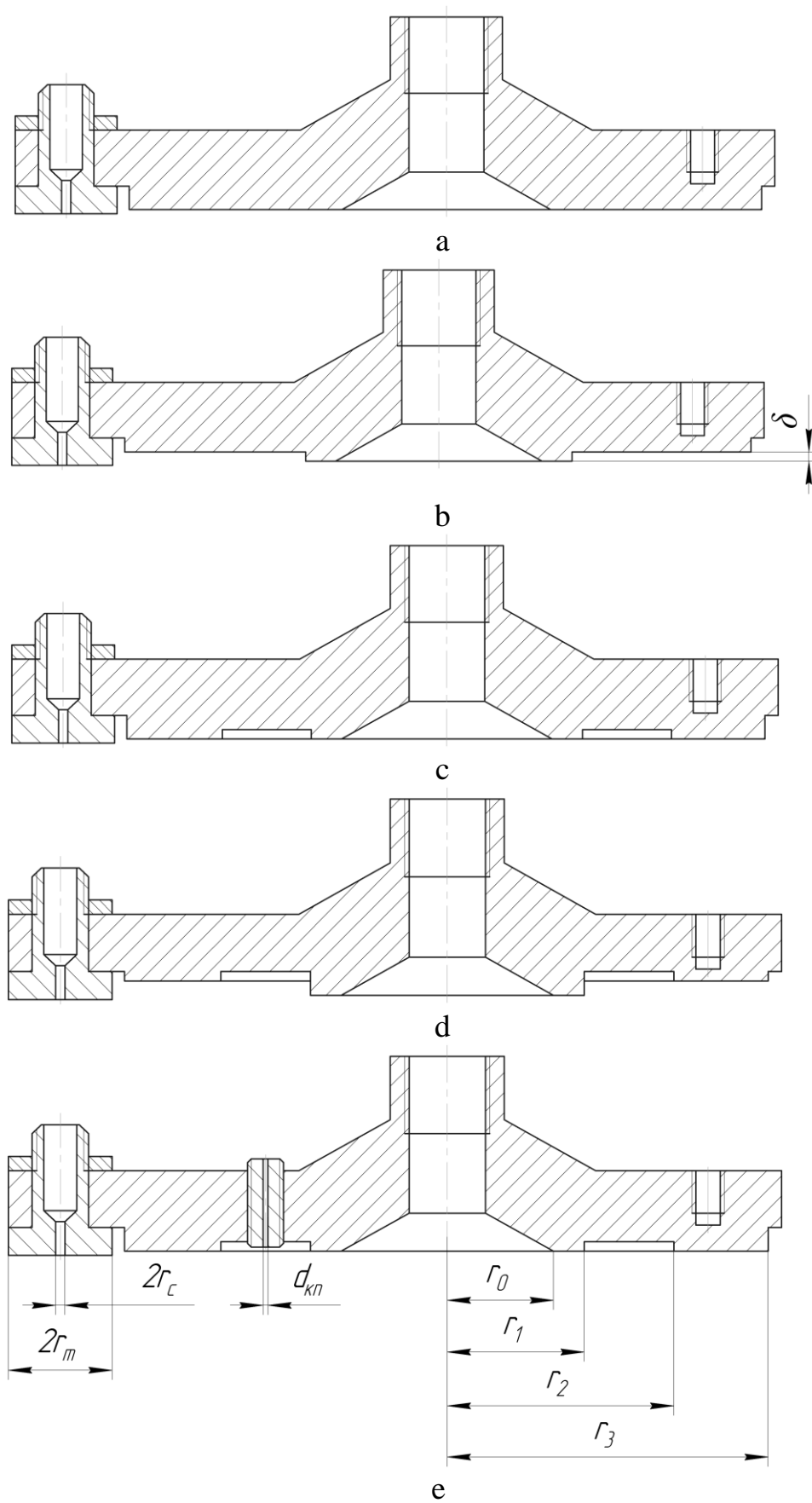


Рис. 5.3 Варіанти конструкції жорсткого присосу

У загальному випадку сила притягання вакуумно-струминним

захоплювачем плоского вантажу

$$F = F_1 + 3F_2, \quad (5.1)$$

де F_1 – сила, що виникає від дії на вантаж різниці атмосферного тиску й абсолютного тиску в зоні навпроти присосу 1 ($0 < r < r_3$); F_2 – сила, що виникає від дії одного СЗП.

Сила притягання створювана вакуумним присосом (рис. 5.3, е)

$$F_1 = \pi r_0^2 (p_a - p_1) + 2\pi \int_{r_0}^{r_1} (p_a - p_{r1}) r dr + \\ + \pi (r_2^2 - r_1^2) (p_a - p_2) + 2\pi \int_{r_2}^{r_3} (p_a - p_{r2}) r dr, \quad (5.2)$$

де p_{r1} , p_{r2} – функції розподілу абсолютного тиску повітря в радіальному проміжку відповідно для зон $r_0 < r < r_1$ і $r_2 < r < r_3$; p_1 – абсолютний тиск створюваний ежектором в порожнині 2; p_2 – абсолютний тиск у порожнині 14; p_a – атмосферний тиск; r_0 , r_1 , r_2 , r_3 – радіуси торцевої поверхні присосу.

Величину абсолютного тиску p_1 в камері ежектора визначаємо за допомогою чисельних методів з наступного рівняння [21]:

$$1,4229 \mu_{ce}^2 d_{ce}^2 p_0 \left(1 - \left(\frac{p_1}{p_0} \right)^{0,1429} \right) - \frac{\pi d_{ke}^2}{4} (p_a - p_1) + \\ + \frac{\pi h_0^6 p_1^3}{36 \mu_0^2 R T_a (d_{ke}^2 - d_{ce}^2) (\ln(r_1/r_0))^2} \left(\frac{\frac{p_a^2 \left(\frac{(h_0 + \delta)^3}{3 \ln(r_3/r_2)} + \frac{d_{kn}^4}{64b} \right) + \frac{h_0^3}{3 \ln(r_1/r_0)}}{\frac{(h_0 + \delta)^3}{3 \ln(r_3/r_2)} + \frac{d_{kn}^4}{64b} + \frac{h_0^3}{3 \ln(r_1/r_0)}} - 1 \right)^2 - \\ - \frac{4 + \frac{2\lambda_e l_{ke}}{d_{ke}}}{\pi \rho_a d_{ke}^2} \left(\frac{0,5378 \mu_{ce} d_{ce}^2 p_0 + \sqrt{R T_a}}{12 \mu_0 R T_a \ln(r_1/r_0)} + \frac{\frac{p_a^2 \left(\frac{(h_0 + \delta)^3}{3 \ln(r_3/r_2)} + \frac{d_{kn}^4}{64b} \right) + \frac{h_0^3}{3 \ln(r_1/r_0)}}{\frac{(h_0 + \delta)^3}{3 \ln(r_3/r_2)} + \frac{d_{kn}^4}{64b} + \frac{h_0^3}{3 \ln(r_1/r_0)}} - 1 \right)^2 \right) = 0, \quad (5.3)$$

де p_0 – абсолютний тиск повітря на вході в ежектор; $R=287,14$ Дж/(кг·°К) – газова стала для повітря; T_a – абсолютна температура потоку повітря в змішувальній камері ежектора, яка приблизно рівна температурі оточуючого середовища; ρ_a – густина повітря на виході з прийомної камери ежектора, що рівна атмосферній; $\mu_0=1,71 \cdot 10^{-5} + 4,94 \cdot 10^{-8}t$ [кг/(с·м)] – коефіцієнт динамічної в'язкості повітря; d_{ce} – діаметр сопла ежектора; $d_{ке}$ – діаметр прийомної камери ежектора; $l_{ке}$ – довжина камери ежектора; λ_e – середнє значення коефіцієнта в'язкого тертя потоку до внутрішніх стінок камери ежектора [81]; μ_{ce} – коефіцієнт витрати повітря через сопло ежектора [81]; $d_{кн}$, b – діаметр та довжина капілярного дроселя.

Абсолютний тиск p_2 у порожнині 14 знаходимо за формулою

$$p_2^2 = \frac{p_a^2 \left(\frac{(h_0 + \delta)^3}{3 \ln(r_3/r_2)} + \frac{d_{кн}^4}{64b} \right) + p_1^2 \frac{h_0^3}{3 \ln(r_1/r_0)}}{\frac{(h_0 + \delta)^3}{3 \ln(r_3/r_2)} + \frac{d_{кн}^4}{64b} + \frac{h_0^3}{3 \ln(r_1/r_0)}}. \quad (5.4)$$

Функції розподілу тиску в радіальному проміжку мають вигляд [21]:

$$p_{r1} = \sqrt{p_2^2 - \frac{p_2^2 - p_1^2}{\ln \frac{r_1}{r_0}} \ln \frac{r_1}{r}}, \quad (5.5)$$

$$p_{r2} = \sqrt{p_a^2 - \frac{p_a^2 - p_2^2}{\ln \frac{r_3}{r_2}} \ln \frac{r_3}{r}}.$$

У результаті, сила F_1 виразиться інтегралом:

$$F_1 = \pi r_0^2 (p_a - p_1) + \pi (r_2^2 - r_1^2) (p_a - p_2) +$$

$$+ 2\pi \int_{r_0}^{r_1} \left(p_a - \sqrt{p_2^2 - \frac{p_2^2 - p_1^2}{\ln \frac{r_1}{r_0}} \ln \frac{r_1}{r}} \right) r dr + 2\pi \int_{r_2}^{r_3} \left(p_a - \sqrt{p_a^2 - \frac{p_a^2 - p_2^2}{\ln \frac{r_3}{r_2}} \ln \frac{r_3}{r}} \right) r dr, \quad (5.6)$$

рішення якого знаходять наближеним методом, попередньо обчисливши

значення p_1 і p_2 за допомогою залежностей (5.3) і (5.4).

Розрахунки складових F_1 , F_2 та результуючої сили притягання F проводились за допомогою формул (5.1), (5.6) та методики [21]. Графіки залежності цих сил від величини радіального проміжку h_0 показані на рисунках 5.4, 5.5. Розрахунки проводились при надлишковому тиску живлення ежектора та струминних захоплювачів $p_{0н}=300\text{кПа}$ та різних типів присосів з наступними параметрами: $r_0=25\text{мм}$; $r_1=26\text{мм}$; $r_2=30\text{мм}$; $r_3=40\text{мм}$; $d_{ce}=1\text{мм}$; $d_{ке}=2\text{мм}$; $l_{ке}=8\text{мм}$; $\mu_{ce}=0,92$; $\lambda_{ке}=0,035$ $r_c=1\text{мм}$; $r_m=12\text{мм}$.

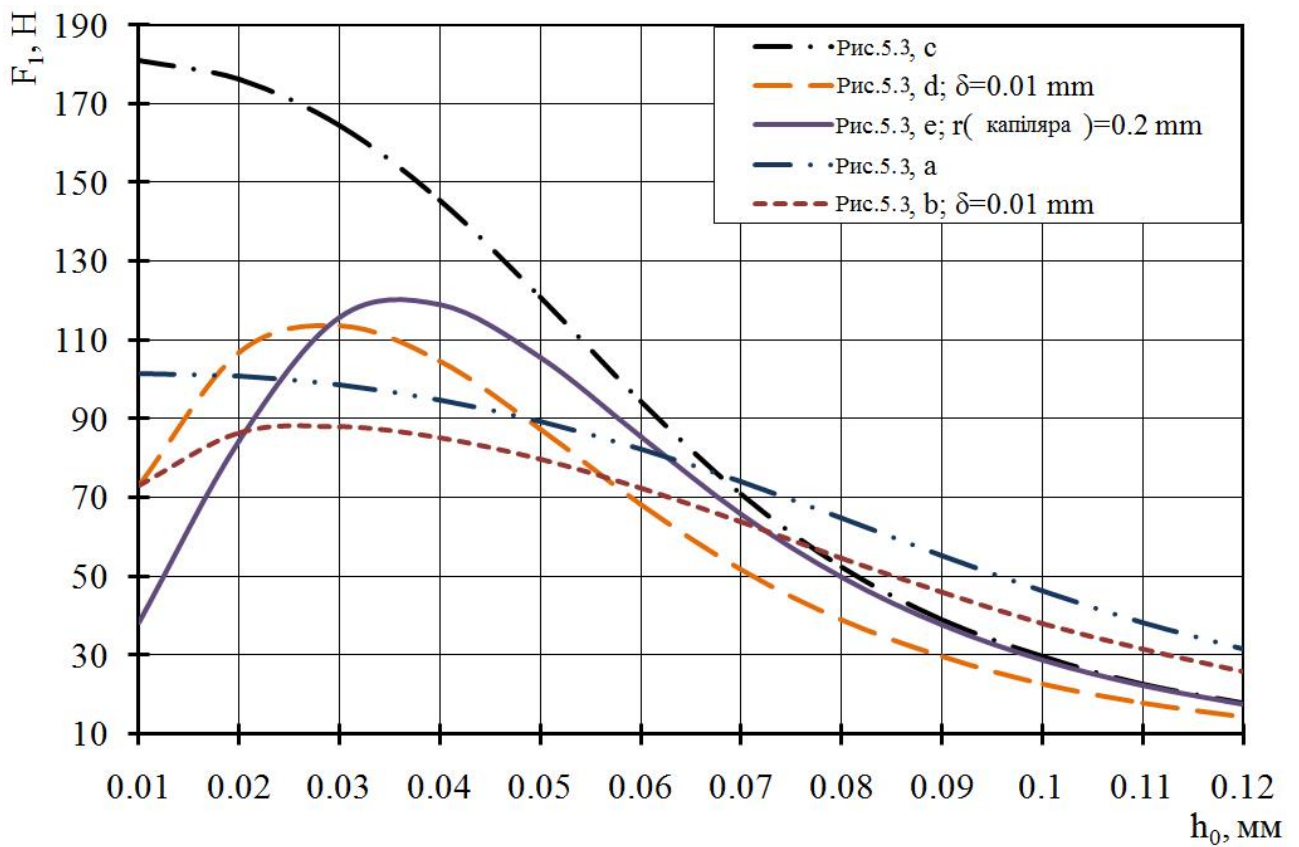


Рис. 5.4 Графіки залежності складової сили F_1 від радіального проміжку h_0 для захоплювачів з різними конструктивними параметрами присосу

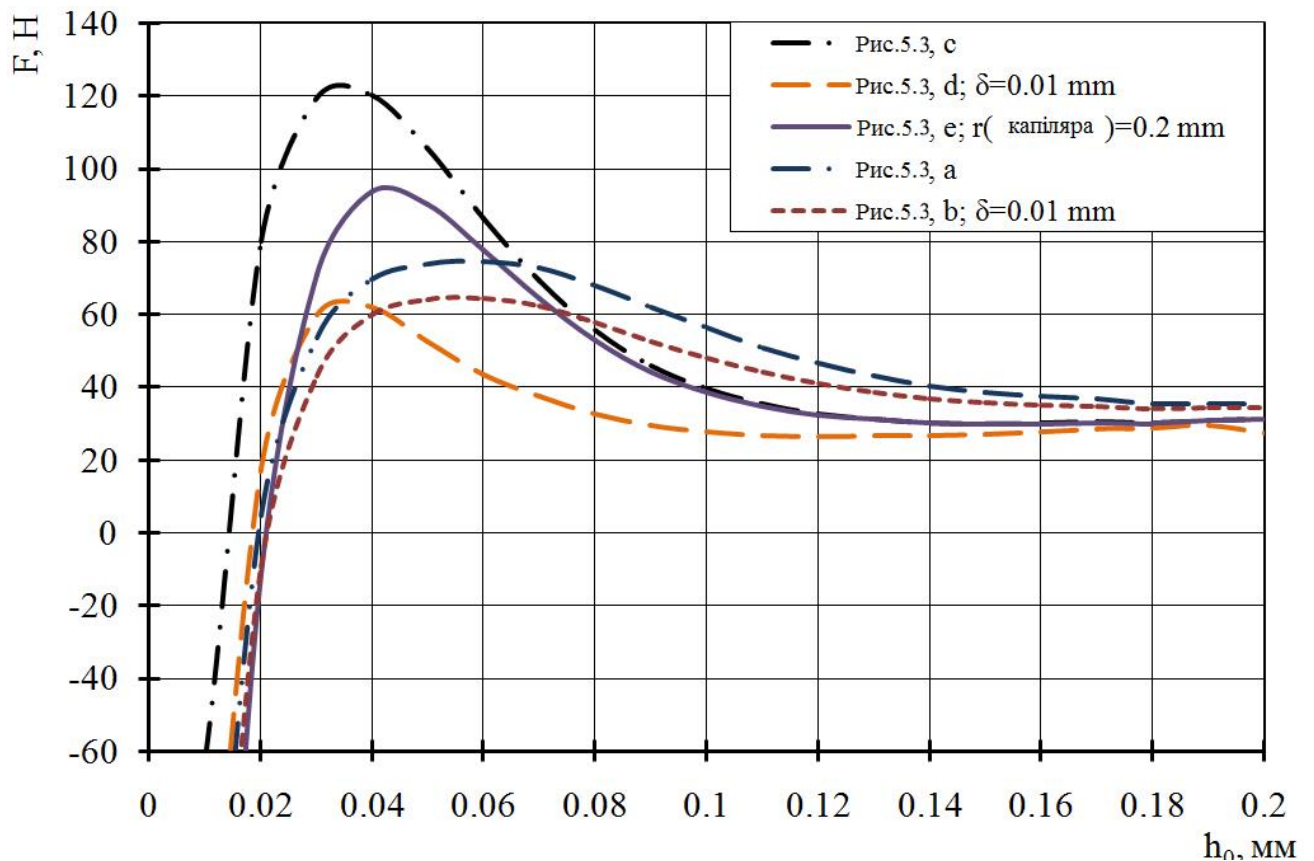


Рис. 5.5 Залежність результуючої сили F від радіального проміжку h_0 для захоплювачів з різними конструктивними параметрами присосу

З рис. 5.4, 5.5 видно, що наявність порожнини 14 у присосі, збільшує силу притягання вантажу. Проте, якщо у присосі з наявною порожниною 14 додатково використовується дросель 13 або у ньому наявне зміщення δ між торцевими поверхнями, це призводить до зменшення сили притягання приблизно на 30%. При цьому забезпечується можливість безконтактного утримування вантажу навіть без використання струминних захоплювачів 9. У такому випадку оптимальне значення радіального проміжку при $h_0=0,02\dots0,04$ мм (рис. 5.4).

Використання струминних захоплювачів 9 у даному пристрої забезпечує безударне захоплення вантажів, так як при $h_0<0,08$ мм у проміжку між торцями струминних захоплювачів та вантажу утворюються три пружних пневматичних подушки. Така комбінація забезпечує захоплення вантажу з більшої відстані та їхнє надійне безконтактне утримування у процесі маніпулювання. Якщо торці

присоса і струминних захоплювачів лежать у одній площині то максимальна сила присмокування деталей комбінованим захоплювачем проявляється при проміжках $h_1=0,04\dots0,06\text{мм}$.

Аналіз таких параметрів струминно-вакуумних захоплювачів з різними конструкціями присосу (рис. 5.3), як максимальна підймальна сила, максимальна відстань з якої може бути захоплений вантаж певної маси та значення робочого (відповідає усталеному положенню захопленого вантажу) радіального проміжку дозволяє визначити їх переваги та недоліки (таблиця 5.1).

Таблиця 5.1

Переваги та недоліки струминно-вакуумних захоплювачів з різними конструкціями присосу

Конструкція присосу	Характеристики струминно-вакуумних захоплювачів (більші значення +/менші значення –)		
	Підймальна сила	Відстань захоплення вантажу	Робочий радіальний проміжок
рис. 5.3, а	-	++	+
рис. 5.3, b	-	+	+
рис. 5.3, c	++	+	-
рис. 5.3, d	-	-	-
рис. 5.3, e	+	+	+

Отже, для забезпечення максимальної підймальної сили доцільно використовувати присос відповідно до рисунку 5.3, с. При необхідності захоплення вантажу з більшої відстані доцільно використовувати присос відповідно до рисунку 5.3,а. Конструкція присосу відповідно до рисунку 5.3,е задовольняє найбільше вимог. Конструкцію присосу відповідно до рисунку 5.3,d забезпечує найгірші характеристики, тому може вважатись нераціональною.

5.3. Безконтактні струминні захоплювальні пристрої для транспортування вантажів з плоскою поверхнею захоплення

Розроблено конструкцію струминного захоплювального пристрою (рис. 5.6) для безконтактного транспортування плоских вантажів, яка захищена патентом на корисну модель [106].

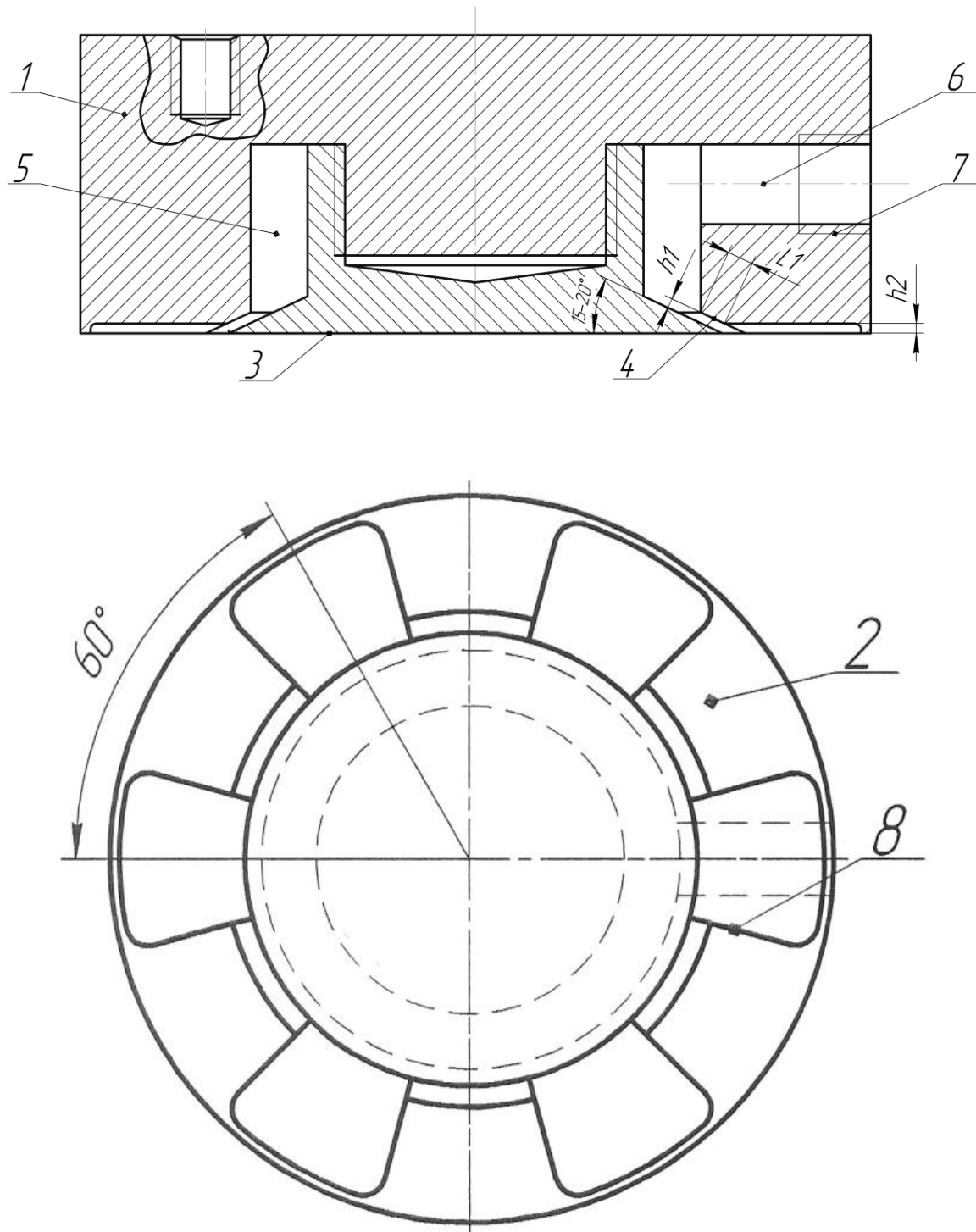


Рис. 5.6 Безконтактний струминний захоплювальний пристрій

Пристрій містить корпус 1, взаємодіючи з вантажем робочу поверхню 2, конічну вставку 3, яка разом з фаскою корпуса утворює кільцеве конічне сопло 4 висотою $h_1=0,08-0,1$ мм і довжиною $L_1=(4...5)h_1$, виконане під кутом $15-20^\circ$. Сопло з'єднане з робочою камерою 5, яка через отвір 6 із різьбою 7 з'єднана з джерелом тиску. Робоча поверхня 2 оснащена шістьма рівномірно розташованими заглибинами 8 глибиною $h_2=0,05-0,1$ мм, які прилягають до сопла 4. Зворотна сторона корпусу 1 має монтажні отвори для з'єднання із рукою маніпулятора.

Безконтактний струминний захоплювальний пристрій працює наступним чином. Стиснуте повітря від джерела тиску через отвір 6 надходить в робочу камеру 5 і через конічне сопло 4 витікає в проміжок між поверхнями струминного захоплювального пристрою та вантажу. При відстані до вантажу більше 0,2мм витікаючий із сопла потік повітря притягує вантаж. При відстані до вантажу менше 0,08мм в зонах, що відповідають заглибленням 8 утворюються пружні пневматичні подушки, які забезпечують рівноважний стан вантажу при дії дестабілізуючих факторів (розгін, гальмування, переорієнтація, зміщений центр мас вантажу відносно осі ЗП).

Таким чином, стабільність утримування вантажу під час його транспортування та переорієнтації забезпечується за рахунок розсосередження зон взаємодії струминного захоплювача з поверхнею вантажу.

5.4. Безконтактні струминні захоплювальні пристрої для транспортування циліндричних вантажів

Розроблено конструктивну схему безконтактного СЗП призначеного для захоплення циліндричних вантажів з лотка-ската (рис. 5.7), яка захищена патентом на корисну модель [105].

В основу корисної моделі поставлена задача безконтактного утримування вантажу циліндричної форми, розсосередження зон взаємодії струминного

захоплювального пристрою і вантажу, уникнення взаємного впливу потоків повітря витікаючи із сопел (за рахунок пазів) і забезпечення стабільності утримування вантажу під час транспортування та переорієнтації.

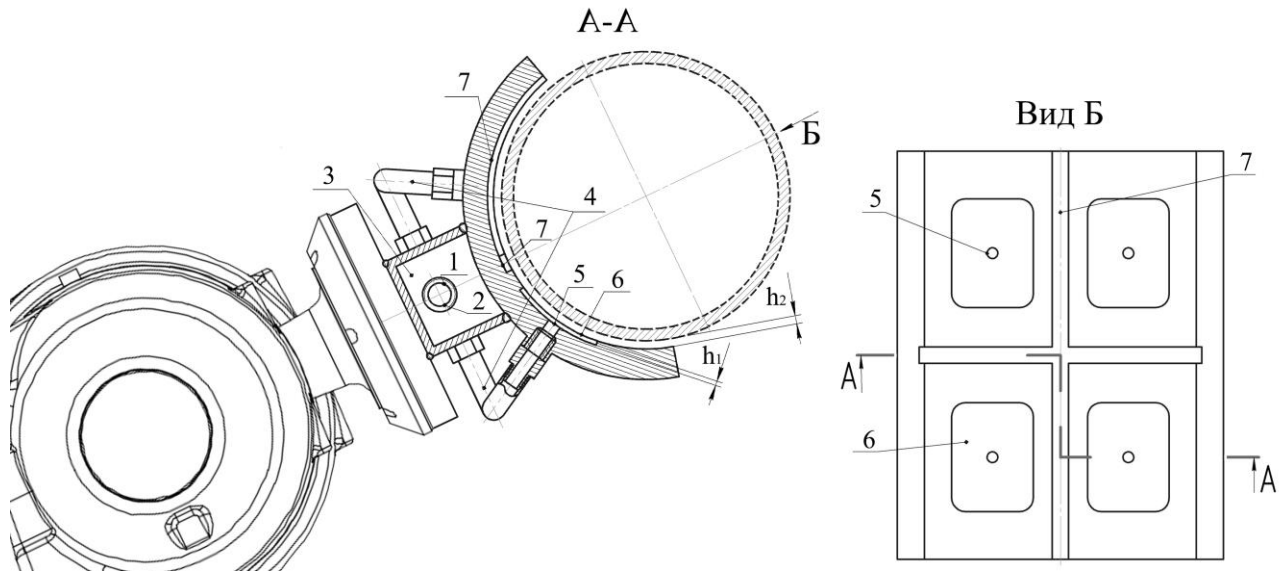


Рис. 5.7 Безконтактний струминний захоплювальний пристрій

Пристрій містить корпус, який має циліндричну поверхню для взаємодії з вантажем. Циліндрична поверхня оснащена чотирма заглибинами 6 глибиною h_1 виконаними на внутрішній циліндричній поверхні корпусу, симетрично відносно поздовжньої і поперечної площини симетрії захоплювального пристрою. У середині заглибин 6 виконані сопла 5, осі яких розташовані радіально до осі циліндричної поверхні. Сопла 5 з'єднують робочу камеру 3 з атмосферою, через трубки 4, які кріпляться до них за допомогою штуцерів. Робоча камера 3 через отвір 2 за допомогою штуцера 1 та повітряної магістралі з'єднана з джерелом тиску. Циліндрична поверхня оснащена поздовжнім і поперечним 7 пазами, які проходять посередині цієї поверхні. Робоча камера 3 кріпиться до корпусу і пластини зварними з'єднаннями. Пластина має кріплення для з'єднання із рукою робота чи маніпулятора.

Струминний захоплювальний пристрій працює наступним чином. Стиснуте повітря від джерела тиску через штуцер 1 для повітряної магістралі і отвір 2 надходить в робочу камеру 3. Далі стиснуте повітря по трубках 4

надходить в чотири сопла 5 і витікає в проміжок між циліндричними поверхнями струминного захоплювального пристрою та вантажу. При цьому стиснуте повітря витікаючи із чотирьох сопел 5 розосереджує зони взаємодії захоплювача і вантажу. При $h_2 > 0.2 \text{ мм}$ витікаючи із сопел потоки повітря притягують вантаж. При $h_2 < 0.08 \text{ мм}$ в зонах, що відповідають заглибленням 6 глибиною h_1 , утворюються пружні пневматичні подушки. Поздовжній і поперечний пази 7 призначені для унеможливлення взаємного впливу потоків повітря витікаючих із сопел 5.

Таким чином запропонований струминний захоплювальний пристрій дає змогу безконтактного захоплення і транспортування циліндричних вантажів, забезпечуючи стабільність утримання вантажу під час переорієнтації і маніпулюванні вантажами із зміщеним центром мас.

5.5. Рекомендації по застосуванню методу оптимізації орієнтації. Методика інженерного розрахунку параметрів струминного захоплювального пристрою

Вихідними даними для проектування технологічного процесу з використанням промислових роботів для автоматизації вантажно-розвантажувальних операцій є: параметри вантажу (маса, зміщення центра мас, форма вантажу), характеристики вантажно-розвантажувального процесу (схема вантажно-розвантажувального процесу, наявність перешкод, час транспортування).

Методика застосування оптимізації орієнтації струминного захоплювального пристрою при виконанні вантажно-розвантажувальних операцій складається з таких етапів:

1. Визначення технічних характеристик промислового робота для забезпечення виконання параметрів технологічного процесу.
2. Вибір струминного захоплювального пристрою в залежності від

параметрів вантажу.

3. Вибір траєкторії по якій буде здійснюватись вантажно-розвантажувальний процес.

4. Визначення оптимальної орієнтації струминного захоплювального пристрою, відповідно до заданої траєкторії, параметрів захоплювального пристрою, промислового робота та розрахунків, викладених в підрозділах 2.3, 2.4.

5. В залежності від всіх вище наведених параметрів, згідно розрахунків, які викладені в підрозділі 3.3, визначають параметри руху захоплювального пристрою, при яких забезпечується мінімальне енергоспоживання захоплювальним пристроєм із максимальною продуктивністю вантажно-розвантажувального процесу.

6. Програмування промислового робота на виконання вантажно-розвантажувального процесу.

Для прикладу розглянемо автоматизацію процесу завантаження заготівок у фрезерний верстат з ЧПК. При цьому транспортуються паралелепіпед 300x300x100мм масою 3кг, без зміщеного центра мас відносно осі захоплювального пристрою. Довжина транспортного шляху від конвеєра, що подає заготівку до місця розвантаження складає 1 метр без перешкод.

Перший етап визначення параметрів промислового робота для забезпечення виконання вхідних параметрів технологічного процесу.

На вибір промислового робота буде впливати лише два параметри, які задаються при виконанні вантажно-розвантажувального процесу. Перший параметр - маса вантажу. Отже необхідно врахувати вантажопідйомність промислового робота. В нашому випадку транспортуватиметься вантаж масою 3 кг, попри це необхідно враховувати масу самого струминного захоплювального пристрою із комунікаціями для його роботи (1 кг) та масу орієнтуючого подовжувача (2 кг). Тобто для забезпечення такого технологічного процесу необхідно вибрати промисловий робот, який має вантажопідйомність більшу-рівну 5 кг, але яка не перевищує 10 кг (таблиця

5.2). Промисловий робот з більшою вантажопідіймальністю не доцільно використовувати з точки зору зростання енергетичних затрат на виконання поставленого технологічного завдання.



Таблиця 5.2

Промислові роботи вантажопідіймальністю $5 \leq m \leq 10$ кг різних виробників

Виробник	Модель ПР
ABB	IRB 1200, IRB 140, IRB 1410, IRB 1600, IRB 1660ID
KUKA	KR 6, KR 16, KR AGILUS, KR CIBERTECH, LBR iiwa
Fanuc	ARC MATE 50iD/7L, ARC MATE 100iC/7L, CR-7iA/L, LR MATE 200iD/7L, M-10iA/7L
Mitsubishi	RV-7F, RV-7FL, RV-7FLL
Motoman (Yaskawa)	EPX1250, GP7, GP8, MH5LS II
Denso	VS-068, VS-087

Другий параметр який впливає на вибір промислового робота це параметри робочої зони ПР. Так як із технологічного завдання вантаж потрібно транспортувати впродовж 1 метра, необхідно обрати ПР з робочою зоною більшою за 1 метр. Це зумовлено тим, що ПР не може виконувати орієнтуючі дії на межі своєї робочої зони і ми не зможемо в такому випадку застосувати метод оптимізації орієнтації. Розглянемо для прикладу ПР виробників ABB та KUKA, як таких, що мають найбільші функціональні можливості серед інших виробників. Для аналізу вибрано ABB IRB 1600-6/1.45 та KUKA KR6-3 (таблиця 5.3).

Порівняльна таблиця IRB 1600 та KR 6

Назва	ABB IRB 1600-6 / 1.45	KUKA KR 6-3
Вигляд		
Вантажопідіймальність	6 кг	6 кг
Параметри робочої зони	1,45 м	1,6 м
Точність позиціонування	0,02 мм	0,05 мм

Моделі ПР слід вибирати з точки зору забезпечення параметрів робочої зони роботи при найменшій вантажопідіймальності з наведених ПР в таблиці 7. Як видно з таблиці 8 характеристики даних ПР практично ідентичні. Для прикладу вибираємо ABB IRB 1600-6/1.45.

Другий етап - вибір струминного захоплювального пристрою для виконання вантажно-розвантажувальної операції. При виборі СЗП необхідно враховувати параметри вантажу: масу, зміщення центру мас, тип захоплення (контактний або безконтактний). Перш за все, в залежності від вантажу, вибирається тип захоплення. Наприклад для транспортування заготовки, що буде проходити етап фрезерування на верстаті з ЧПУ, немає додаткових вимог до способу її утримування, так як заготовка із сталі і контактні деформації – відсутні. Якщо вантаж має легко пошкоджувану поверхню або є крихким то необхідно використовувати безконтактні струминні захоплювальні пристрої. Визначення типу необхідного струминного захоплювального пристрою

залежно від параметрів вантажу викладений у підрозділах 1.3, 1.4 дисертаційної роботи, а принцип забезпечення стабільності утримування вантажу зі зміщеним центром мас описаний у підрозділах 5.1-5.4 дисертаційної роботи.

Третій етап передбачає вибір траєкторії по якій буде здійснюватись вантажно-розвантажувальний процес. Якщо на шляху транспортування немає перешкод - застосовують прямолінійну траєкторію, при наявності перешкод - використовують дугову або гвинтову траєкторію.

На четвертому етапі, для заданої траєкторії, параметрів захоплювального пристрою, промислового робота, згідно розрахунків, які викладені в підрозділі 2.3, 2.4, 3.3 дисертаційної роботи (додаток Г, Д), визначають оптимальну орієнтацію струминного захоплювального пристрою. Так як найбільш вагомий вплив на оптимальну орієнтацію має прискорення струминного захоплювального пристрою, використовуючи рівняння 2.22 і 2.23 можна побудувати графік залежності мінімальної необхідної сили притягання від прискорення (рис. 5.8) з показниками оптимальної орієнтації на ділянках прискорення при яких і визначається мінімальна необхідна сила притягання.

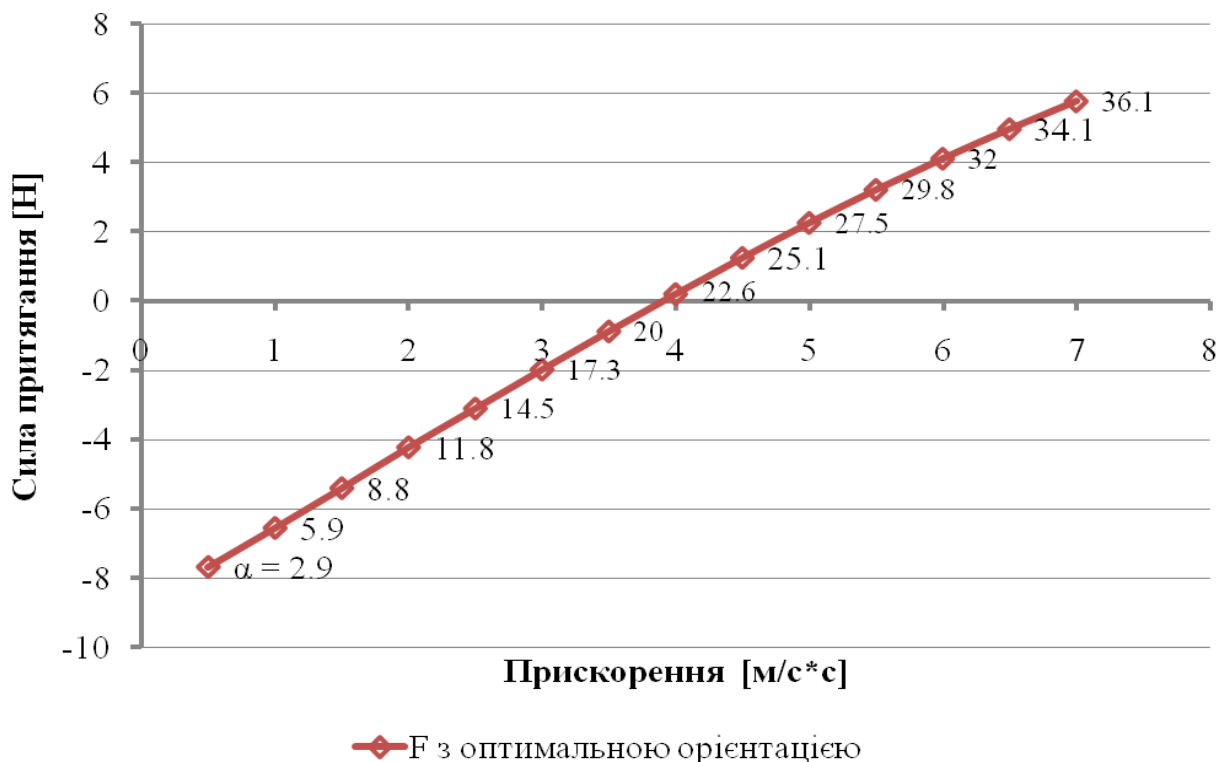


Рис. 5.8 Графік залежності мінімальної необхідної сили притягання від прискорення струминного захоплювального пристрою

На п'ятому етапі, в залежності від всіх вище наведених параметрів та розрахунків (підрозділ 3.3), визначають параметри руху захоплювального пристрою, при яких забезпечується мінімальне енергоспоживання при максимальній продуктивності вантажно-розвантажувального процесу. Так мінімальне енергоспоживання захоплювального пристрою буде забезпечуватись доти, доки мінімальна необхідна сила притягання буде рівна нулю (рисунок 5.8). Максимальна продуктивність досягається при максимальному прискоренні, отже при мініальному часі проведення вантажно-розвантажувальної операції. В нашому випадку максимальне прискорення $3,8 \text{ м/с}^2$ при якому забезпечуватиметься максимальний ефект впровадження методу оптимізації орієнтації.

На шостому етапі відбувається програмування вантажно-розвантажувального процесу. Після запуску програми RobotStudio необхідно створити проект в діалоговому вікні (5.9). При цьому вибираємо місце збереження, назву проекту, пункт «Solution with Station and Robot Controller», в пункті «Robot model» вибираємо модель ПР «IRB 1600 6kg 1.45m» та нажимаємо кнопку «Create».

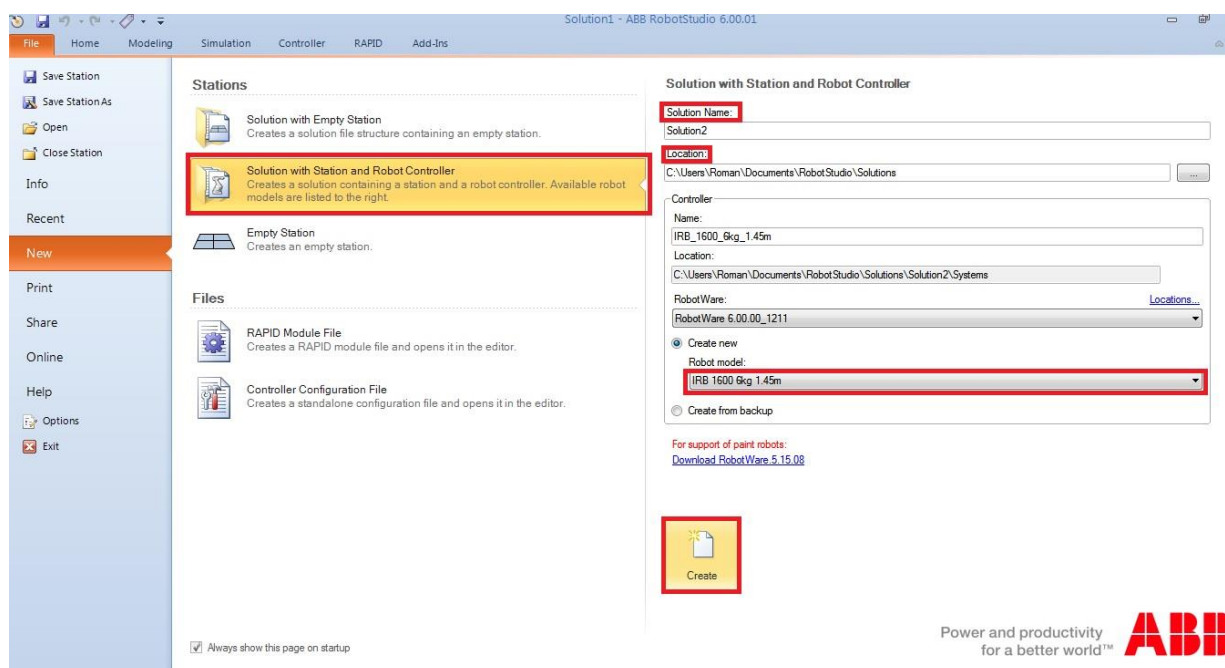


Рис. 5.9 Створення проекту в RobotStudio

Після створення проекту відкриється вікно «Home» (рис. 5.10). На якому є такі елементи:

1. Панель меню.
2. Інструменти кожної панелі.
3. Робоча область.
4. Параметри руху, при яких буде програмуватись ПР.
5. Панелі: компонентів, траєкторій, режимів і подій.
6. Промисловий робот (IRB 1600).

Про готовність до програмування і справності проекту свідчить зелений фон «Controller status» в правому нижньому краю вікна програми.

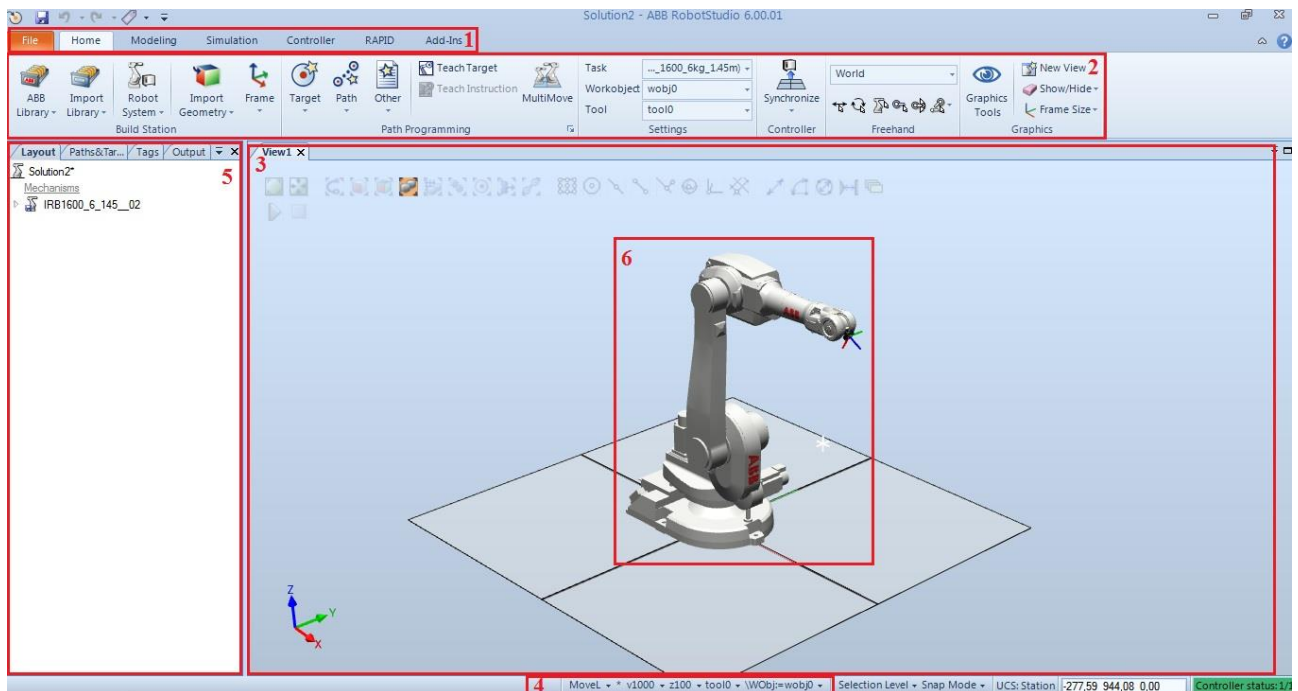


Рис. 5.10 Візуальне середовище програми (пункт меню - «Home»)

Тепер необхідно додати всі додаткові елементи для подальшої роботи з ними:

1. Конвеєр;
2. Контролер;
3. Захоплювальний пристрій з периферією;
4. Вантаж;

5. Місце розвантаження.

Щоб додати об'єкт в систему необхідно вибрати його з бібліотеки або додати його модель. Для додавання об'єкта з бібліотеки необхідно натиснути «Import Library» - «Equipment» - «Об'єкт (IRC5)» (рис. 5.11). Після чого розмістити всі компоненти на їх місце знаходження. В результаті всі об'єкти мають зайняти своє місце і бути готовим до програмування (рис. 5.12).

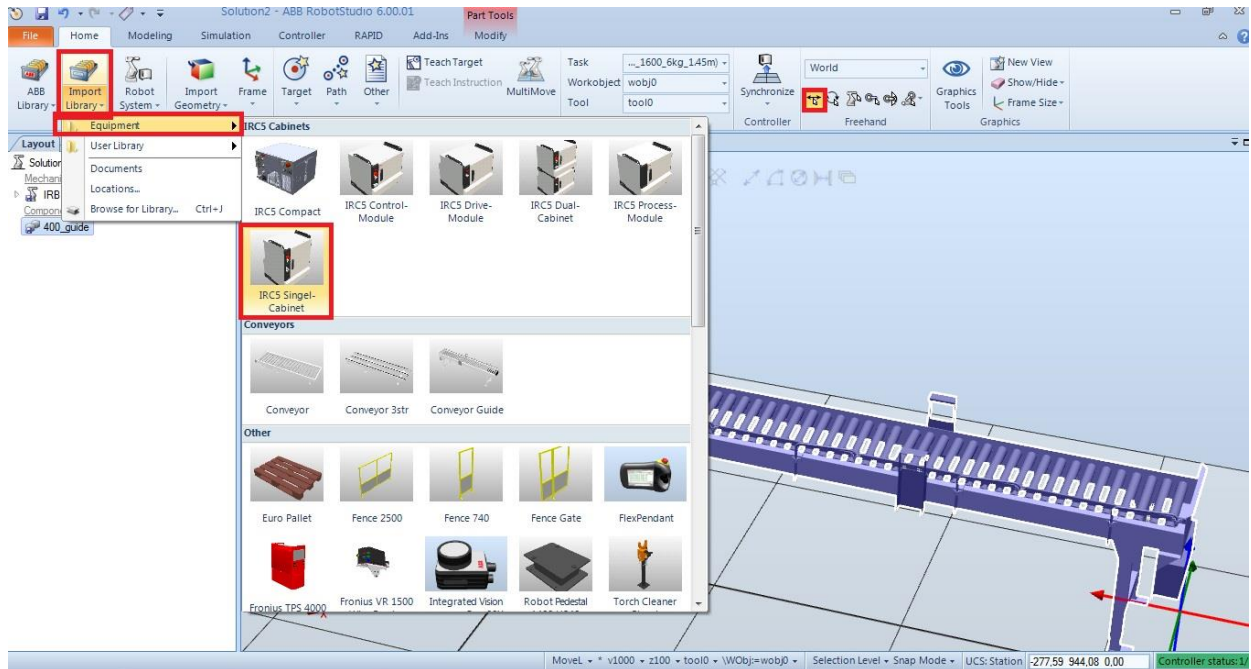


Рис. 5.11 Додавання нового об'єкта

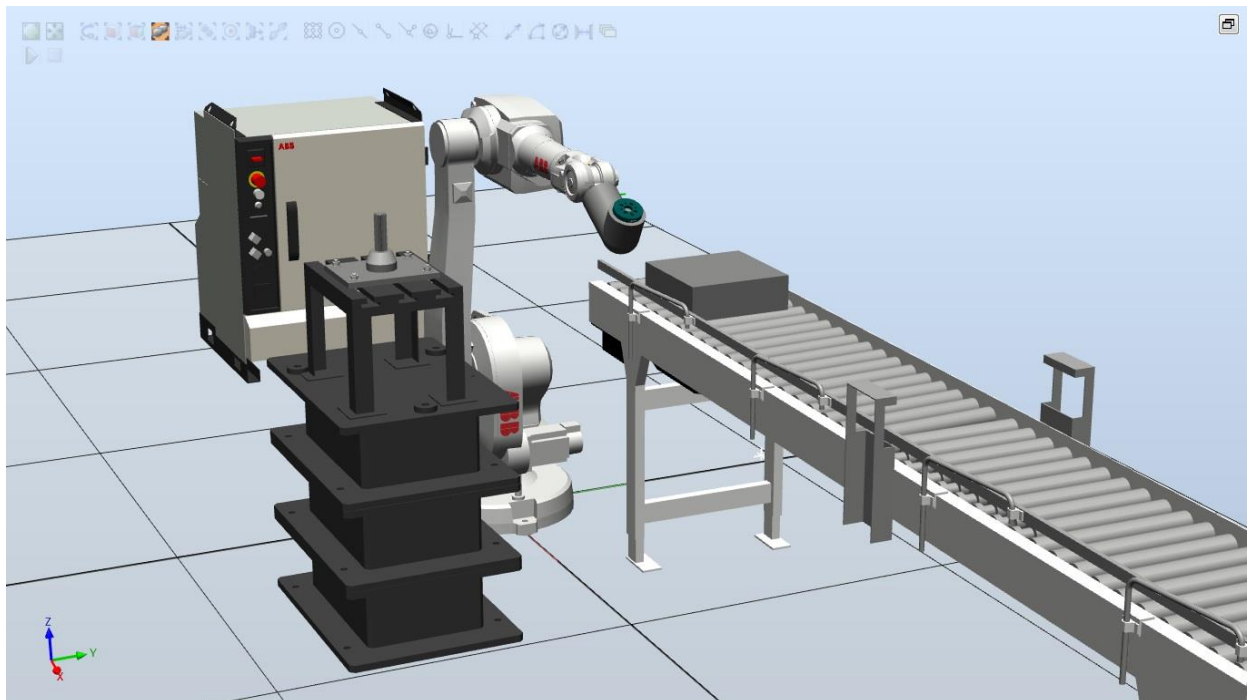


Рис. 5.12 Загальний вигляд всіх компонентів

Після цього необхідно задати основні точки траєкторії згідно запропонованого методу оптимізації траєкторії. Є два методи задання за допомогою візуального програмування і за допомогою програмного коду мовою RAPID. Розглянемо метод візуального програмування (рис. 5.13).

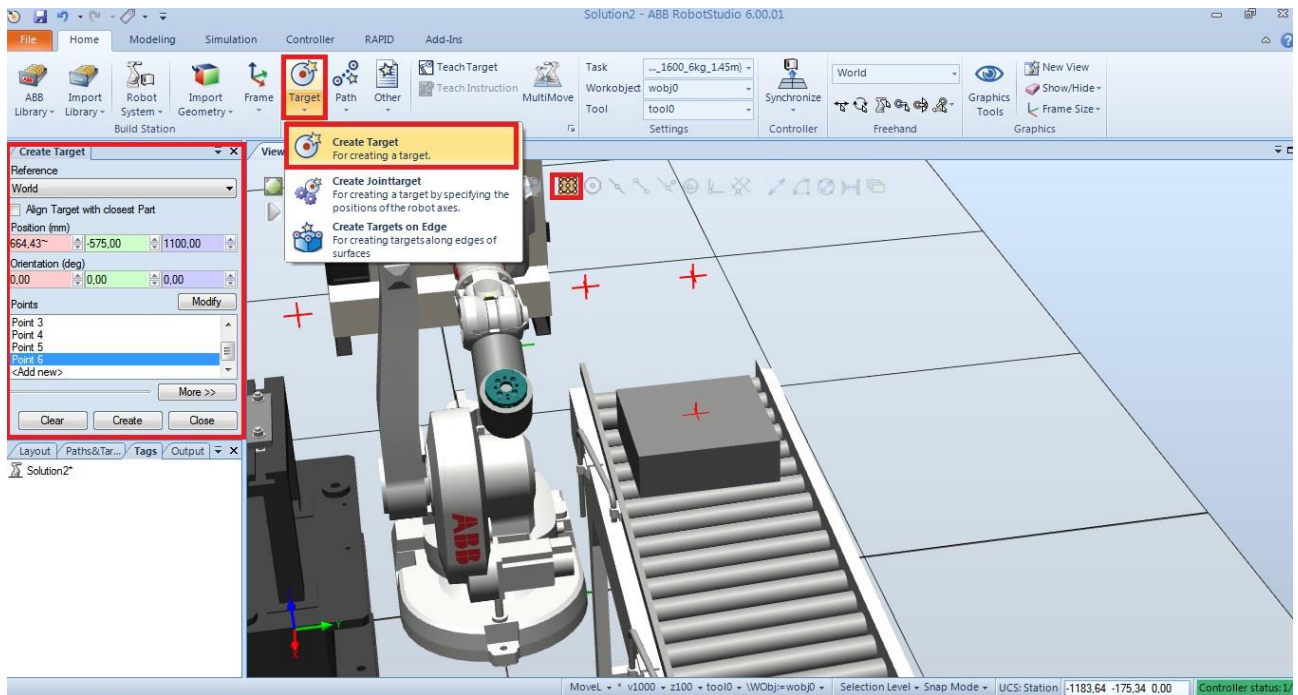


Рис. 5.13 Створення точок траєкторії

Спершу необхідно вибрати інструмент «Target» - «Create Target», після чого задати початкову точку траєкторії на вантажі. Після створення всіх точок траєкторії необхідно підтвердити їх, натиснувши на кнопку «Create» на панелі «Create Target».

Для створення траєкторії по ключових точках, необхідно в вкладці «Path» створити траєкторію під іменем «main», після чого виділити по порядку руху всі точки траєкторії і через меню правої кнопки миші вибрати пункт «Add to path» - «main» - «first» (рис 5.14).

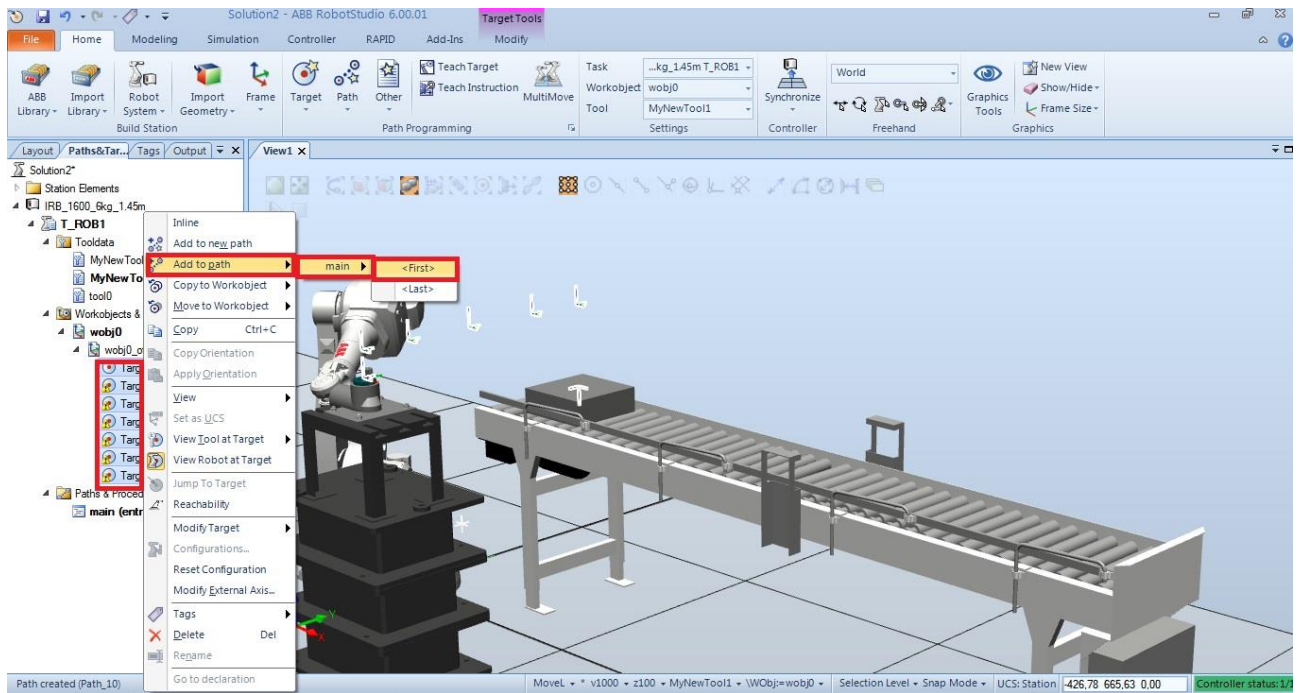


Рис. 5.14 Створення шляху (траєкторії)

Після створення шляху необхідну здійснити конфігурацію ланок маніпулятора. Зазвичай використовується автоматична конфігурація. Для цього потрібно правою клавішею миші натиснути на траєкторії «main» - «Configurations» - «Auto Configuration» (рис. 5.15).

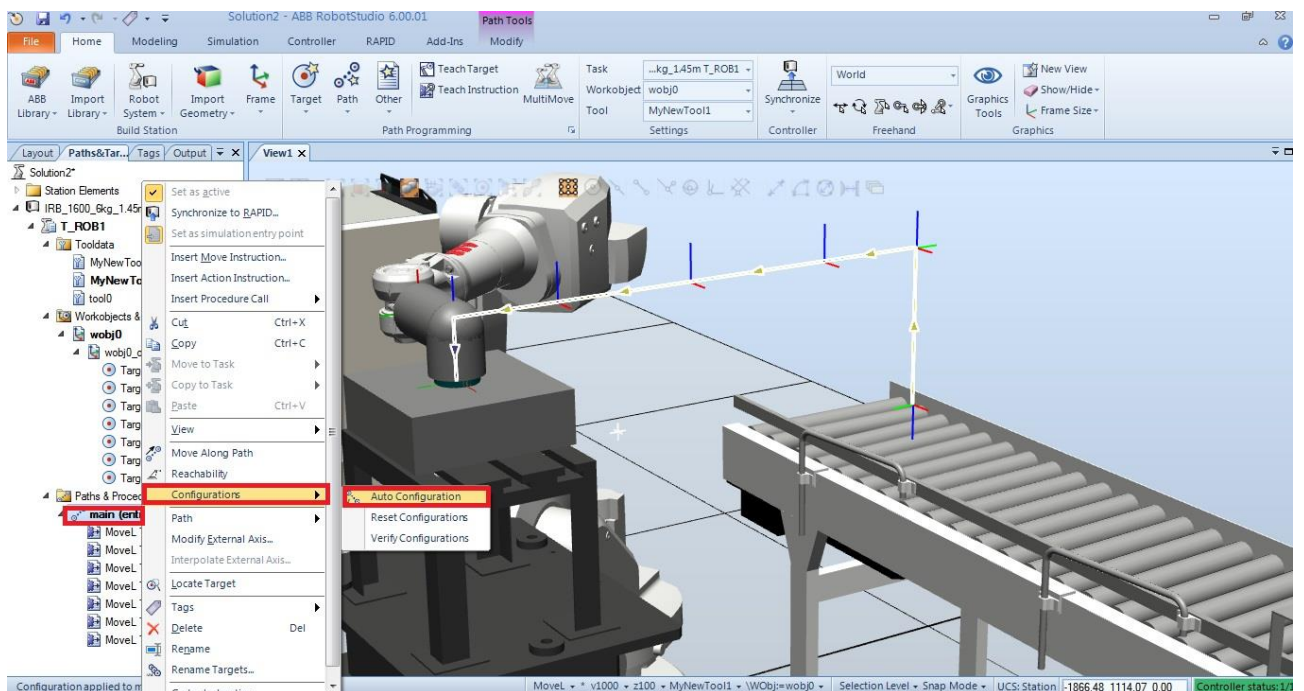


Рис. 5.15 Конфігурація ланок маніпулятора для виконання заданої траєкторії

Маючи параметри оптимальної орієнтації, що отримані на четвертому етапі (підрозділ 2.3), ми можемо запрограмувати орієнтацію згідно цього методу. Так для ділянки розгону запрограмуємо орієнтацію 21.217 (град), тобто дві точки, що відповідають за цю ділянку (рис. 5.16). Для цього вибираємо точку траєкторії («Target_20, Target_30»), права кнопка миші на ній «Modify Target» - «Set Position».

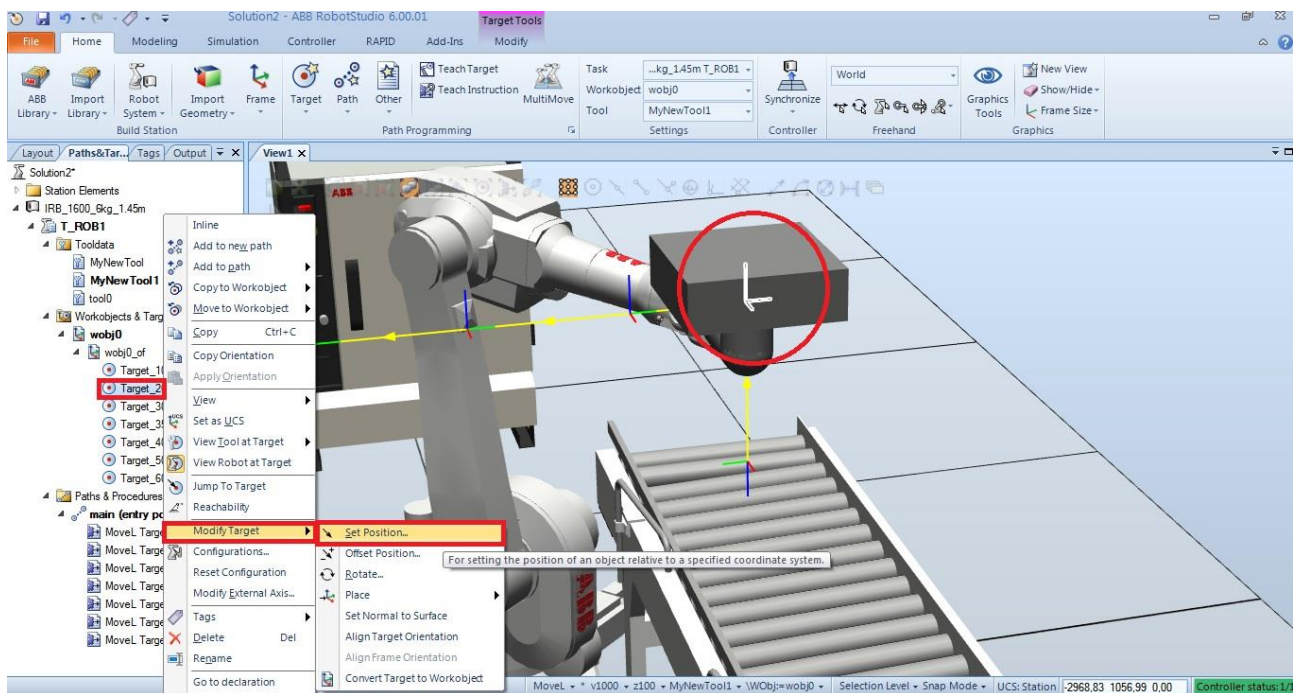


Рис. 5.16 Задання оптимальної орієнтації захоплювальному пристрою

Після задання оптимальної орієнтації захоплювального пристрою, необхідно запрограмувати параметри руху визначені на п'ятому етапі. Для цього необхідно синхронізувати розроблену візуальну програму з програмним кодом в RAPID, тому виконуємо «Synchronize» - «Synchronize to RAPID» (рис. 5.17). Після цього переходимо в вкладку RAPID та на вкладку Controller, далі відкриваємо програму керування промислового робота «RAPID» - «T_ROB1» - «Module1» (рис. 5.18). Для керування швидкістю додаємо функцію «**VAR speeddata vmedium**», а для керування прискоренням, в залежності від ділянок (захоплення, переорієнтація, пряма траєкторія, переорієнтація і розвантаження),

добавляємо функцію «PathAccLim».

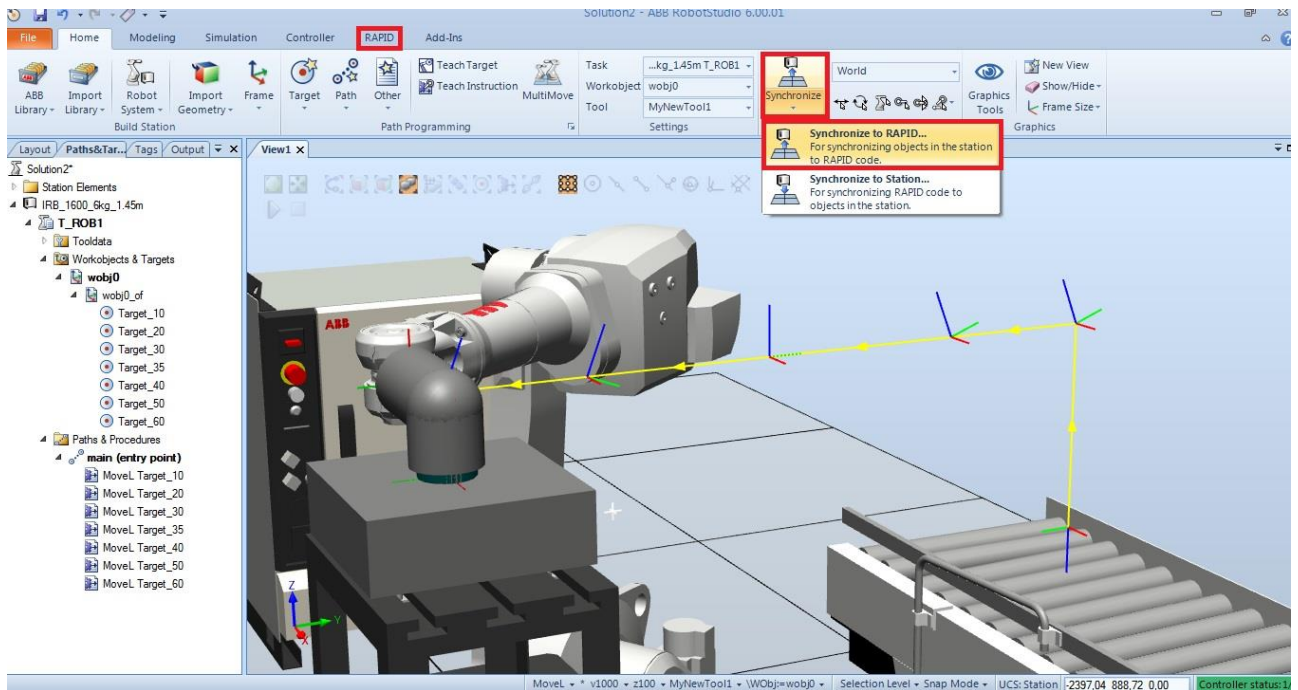


Рис. 5.17 Конфігурація ланок маніпулятора для виконання заданої траєкторії

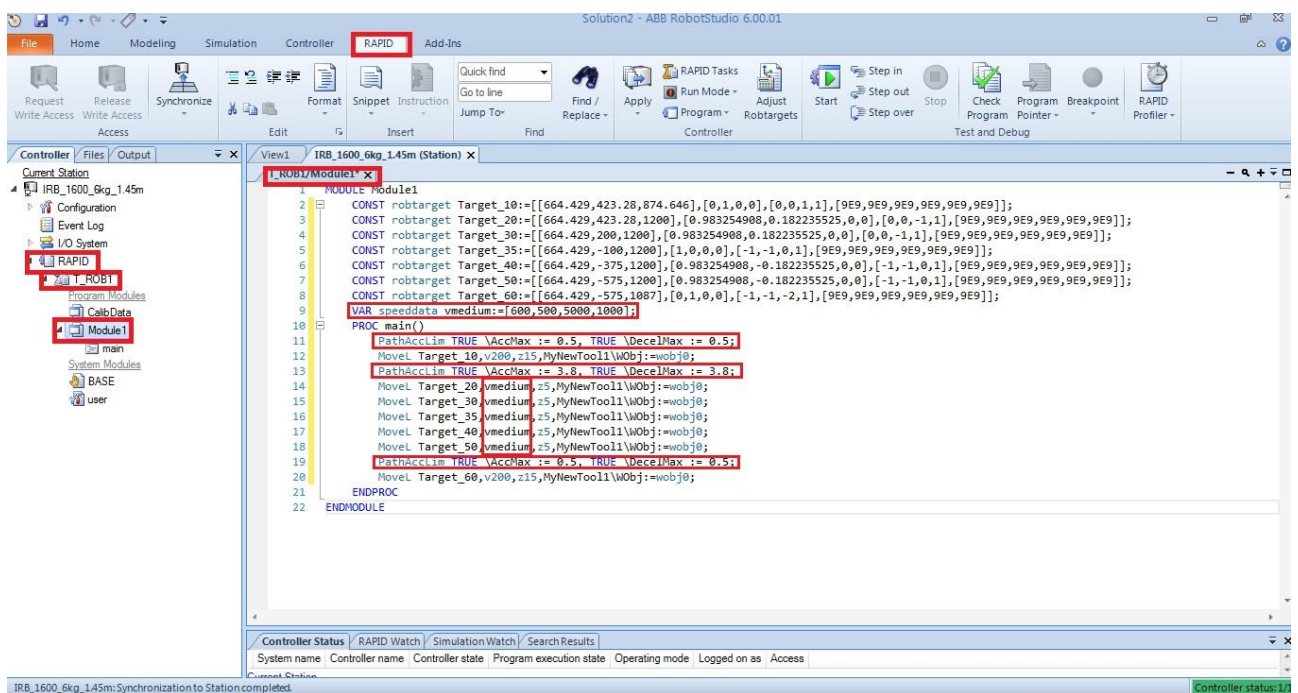


Рис. 5.18 Задання обмежень на прискорення та уповільнення кінцевої ланки маніпулятора

Після виконання вказаних змін синхронізуємо виконавчу програму в

контролер. Тепер робот готовий до виконання вантажно-розвантажувальної операції. Програма представлена в Додатку Е.

Методика розрахунку параметрів струминного захоплювального пристрою базується на основних положеннях, викладених в працях [2, 3, 5-9, 50-53, 31, 35, 112-115, 118-120, 124, 127] та принципів, викладених у підрозділах 5.1 - 5.4 дисертаційної роботи.

Проте часто при виборі струминних захоплювальних пристроїв різних фірм або їх конструюванні не звертають увагу на важливість параметрів базуючих елементів. Основною з вимог до конструктивного виконання базуючих елементів на торці СЗП є необхідність уникнення утворення вихрових зон при обтіканні їх потоком стисненого повітря (рис. 5.19).

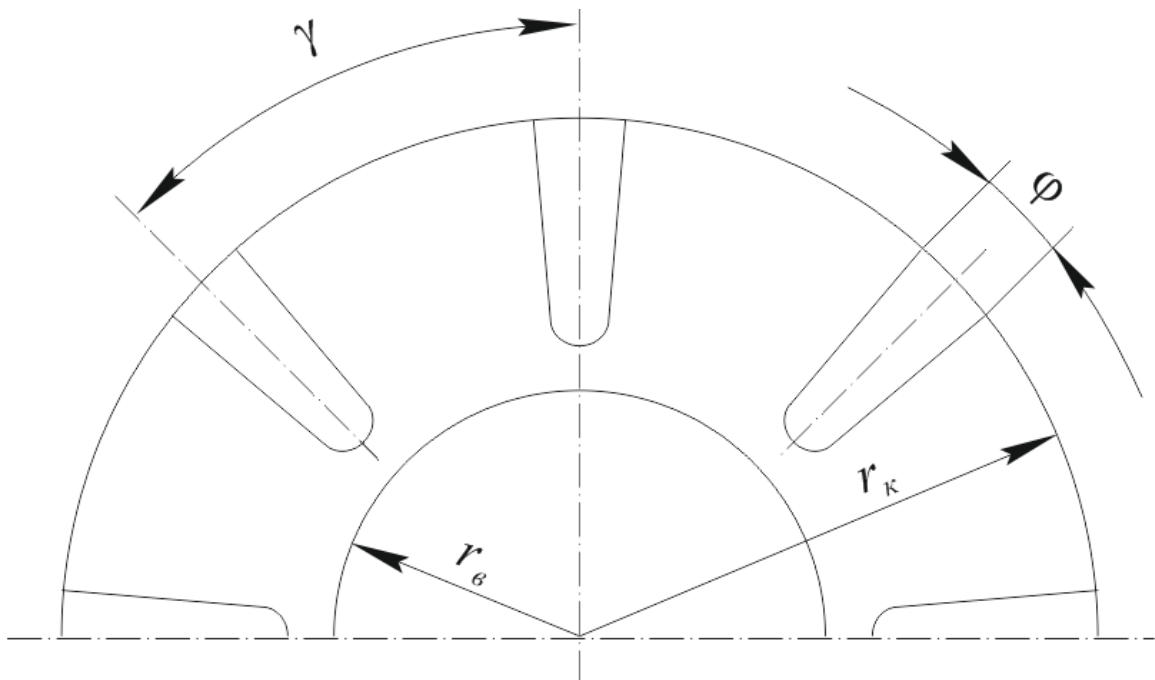


Рис. 5.19 Схема розташування базуючих елементів на торці СЗП

Базуючі елементи виконуються у вигляді кутових секторів з величиною кута $\phi \leq 10^\circ$. Кількість базуючих елементів обмежена, так як їх зростання приводить до зниження силових характеристик захоплювача. Якщо вихідна площа $S_{\text{в}}$ радіального проміжку зменшується при розташуванні базуючих елементів не більш як на 10% то силові характеристики захоплювача практично не змінюються. Враховуючи, що вихідна площа радіального проміжку при

відсутності фрикційних накладок рівна $S_6=2\pi r_k h$, а при їх присутності

$$S_{6н} = (2\pi - \varphi n)r_k h, \quad (5.7)$$

отримаємо залежність для розрахунку кількості n базуючих елементів з кутовою величиною φ і висотою h

$$n \leq \frac{0.2\pi}{\varphi [\text{рад.}]} = \frac{36}{\varphi [\text{град.}]} \quad (5.8)$$

Даний метод проектування базуючих елементів використовує фірма Schmalz (рис. 5.20) [103].

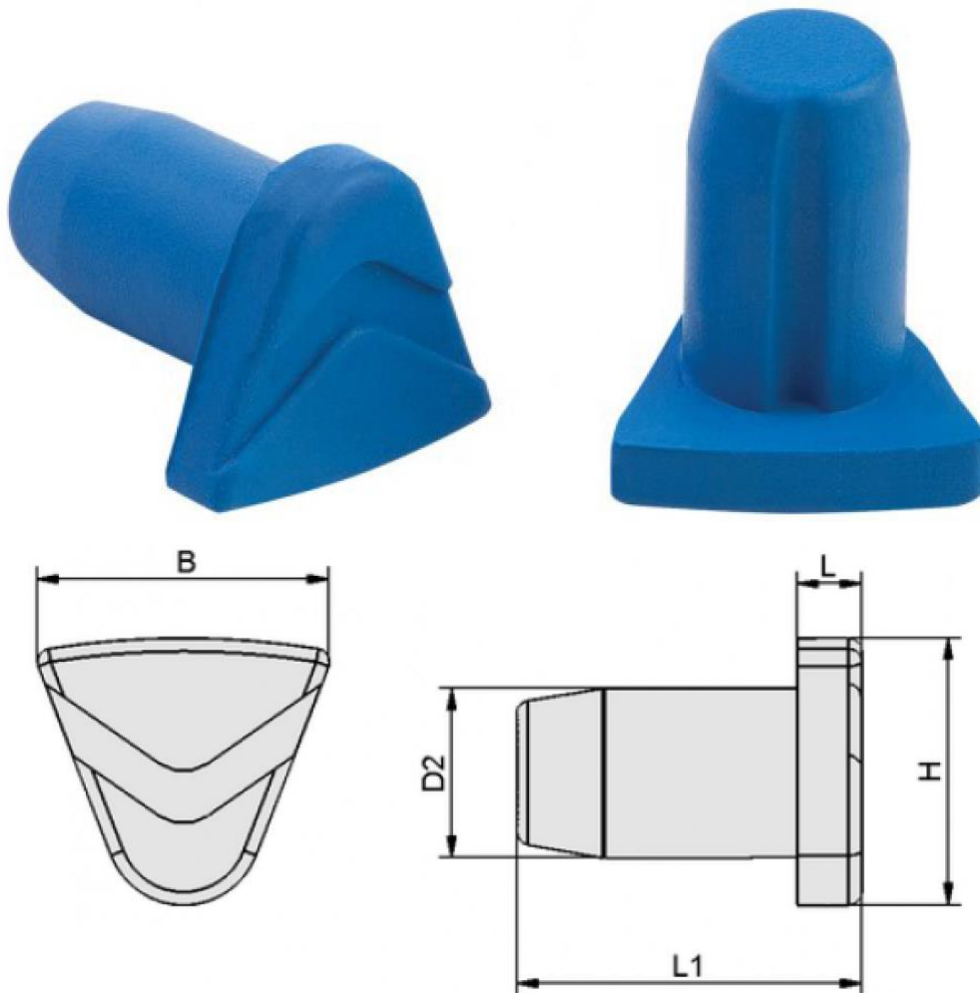


Рисунок 5.20 Конструкція базуючих елементів фірми Schmalz для СЗП

Під час виконання транспортування вантажу за допомогою СЗП використовуючи метод оптимізації орієнтації, одним з найважливіших

факторів який впливає на мінімальну необхідну вантажопідіймальність виявився коефіцієнт тертя вантажу до базуючих елементів. Коефіцієнт тертя цілком залежить від параметрів базуючих елементів та вантажу. Його можна знайти експериментальним шляхом визначивши кут η між площиною контакту базуючих елементів і горизонтальною площиною, при якому починається проковзування вантажу. Тоді коефіцієнт тертя $f = \tan(\eta)$.

5.6. Висновки

Запропоновано способи використання в захоплювальних пристроях принципу повітряної подушки з метою забезпечення стабільного положення вантажу. Представленні конструкції захоплювальних пристроїв, які відповідають кожному з цих методів.

Проведено моделювання протікання потоків повітря в ежекторі та радіальному проміжку між взаємодіючими поверхнями струминно-вакуумного захоплювача та вантажу, що дало змогу дослідити розподіл розрідження на поверхні вантажу. На основі проведеного моделювання встановлено вплив геометричних параметрів та параметрів стиснутого повітря на силові характеристики струминно-вакуумних захоплювачів. Запропоновано раціональні конструкції вакуумних присосів та обґрунтовано їх конструктивні параметри, що дозволить підвищити піднімальну здатність захоплювачів або знизити витрати стисненого повітря.

Представлено конструкції безконтактних струминних захоплювальних пристроїв, які забезпечують утворення між вантажем і поверхнею захоплюючого пристрою пневматичних подушок. Таке конструктивне рішення покращує стійкості утримування вантажів із зміщеним центром, або під час розгону чи гальмування. Також пневматичні подушки запобігають зіткненню вантажу з струминним захоплювальним пристроєм під час його переорієнтації в просторі.

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

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язано важливі наукові задачі оптимізації орієнтації кінцевої ланки маніпулятора та роззосередження 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 Стьюдента 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 вантажопідймальність та стабільність утримування вантажу. Результати роботи впроваджені на ПАТ «Булат», річний економічний ефект становить 26355 грн.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Anselin L. Spatial econometrics: methods and models / L. Anselin // Springer Science & Business Media. – 2013. – №4. – P. 284.
2. Babur O. Evaluation of handling results of various materials using a non-contact end-effector. / O. Babur, E. Fehmi, F. Fehim // Industrial Robot: An International Journal. – 2003. – № 30(4). – P. 363 – 369.
3. Babur O. Examination of the movement of a woven fabric in the horizontal direction using a non-contact end-effector. / O. Babur, E. Fehmi // Gebze Institute of Technology, Department of Design and Manufacturing Engineering. –08.11.2004.
4. Bobrow J.E. Time-optimal control of robotic manipulators along specified paths. / J.E. Bobrow, S. Dubowsky, J.S. Gibson // The international journal of robotics research. – 1985. – № 4(3). – P. 3 – 17.
5. Brun X. Effect of Substrate Flexibility on the Pressure Distribution and Lifting Force Generated by a Bernoulli Gripper. / X.F. Brun, S.N. Melkote, // Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 2012. – № 134(5). – DOI: 051010.
6. Brun X.F. Analysis of handling stresses and breakage of thin crystalline silicon wafers. / X. F. Brun // Georgia Institute of Technology. – 2008.
7. Brun X.F. Analysis of stresses and breakage of crystalline silicon wafers during handling and transport. / X.F. Brun, S.N. Melkote, // Solar energy materials and solar cells. – 2009. – № 93(8). – P. 1238 – 1247.
8. Brun X.F. Evaluation of handling stresses applied to EFG silicon wafer using a Bernoulli Gripper. / X.F. Brun, S.N. Melkote // In Photovoltaic Energy Conversion, Conference Record of the 2006 IEEE 4th World Conference. – IEEE, 2006. – № 2. – P. 1346 – 1349.
9. Brun, X. F., & Melkote, S. N. (2009). Modeling and prediction of the flow, pressure, and holding force generated by a Bernoulli handling device. / X.F. Brun, S.N. Melkote, // Journal of Manufacturing Science and Engineering. –

2009. – № 131(3). – DOI: 031018.
10. Chatraei A. Optimal Control of Robot Manipulators. / A. Chatraei, D.M.I.V. ZAda. – 2011.
 11. Chettibi T. Minimum cost trajectory planning for industrial robots. / T. Chettibi, H.E. Lehtihet, M. Haddad, S. Hanchi, // European Journal of Mechanics-A/Solids. – 2004. – № 23(4). – P. 703 – 715.
 12. Cook D. Intermediate robot building. / D. Cook // Apress. Second Edition. – 2010. – P. 48.
 13. Danyluk S. Initiative on Photovoltaic Manufacturing. DOE Solar Energy Technologies Program Peer Review / S. Danyluk, S. Melkote, A. Dugenske // Georgia Institute of Technology. – Denver, Colorado, 2007.
 14. Davis S. An end effector based on the Bernoulli principle for handling sliced fruit and vegetables / S. Davis, J.O. Gray, D.G. Caldwell // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. – 2008. – № 24(2). – P. 249–257.
 15. Dini G. Grasping leather plies by Bernoulli grippers / G. Dini, G. Fantoni, F. Failli // CIRP Annals-Manufacturing Technology. – 2009. – № 58(1). – P. 21 – 24.
 16. Fu K. S. Robotics: Control, Sensing, Vision, and Intelligence / K.S. Fu, R.C. Gonzales, C. Lee // McGrawHill. Inc. – Singapore, 1987.
 17. Giovanni M. Carlomagno. Process for applying forces to glass sheets, in particular at a high temperature. – US Patent No 4,921,520. – 1990.
 18. Grippers with special operating principles. Floating suction pad SBS, http://www.millsom.com.au/vac_components/02_Suction_Pads/SBS.pdf
 19. Gujarati Damodar. Econometrics by example / D. Gujarati // Palgrave Macmillan. – 2014.
 20. Höppner J. Verfahren zur berührungslosen Handhabung mittels leistungsstarker Schallwandler. – Herbert Utz Verlag, 2002. – Vol. 164.
 21. Justification of Design and Parameters of Bernoulli-Vacuum Gripping Device / V. Savkiv, R. Mykhailyshyn, F. Duchon, O. Fendo // International Journal of Advanced Robotic Systems. – 2017. – № 14(6). – DOI: 1729881417741740.

22. Khoukhi A. Optimal Control for Robot Manipulators. In Optimization. / A. Khoukhi, Y. Hamam // Optimal Control and Partial Differential Equations. – Birkhäuser Basel, 1992. – P. 207 – 218.
23. Korolev E. Aerodynamic resistance of badly streamline bodies / E. Korolev, R. Zhamalov // Gazette NGIEI. – 2011. – № 2.1(2). – P. 61 – 77.
24. Krivts I.L. Pneumatic actuating systems for automatic equipment: structure and design. / I.L. Krivts, G.V. Krejnin. – Crc Press, 2016. – P. 346.
25. Loitsyanskii L.G. Mechanics of Liquids and Gases: International Series of Monographs in Aeronautics and Astronautics: Division II: Aerodynamics / L.G. Loitsyanskii // Elsevier. – 2014. – №6. – P. 804.
26. Mantriota G. Optimal grasp of vacuum grippers with multiple suction cups. / G. Mantriota // Mechanism and machine theory. – 2007. – № 42(1). – P. 18 – 33.
27. Mantriota, G. Theoretical model of the grasp with vacuum gripper / G. Mantriota // Mechanism and machine theory. – 2007. – № 42(1). – P. 2 – 17.
28. Murray R.M. A mathematical introduction to robotic manipulation / R.M. Murray, Z. Li, S.S. Sastry // CRC press. – 1994. – P. 456.
29. Non-contact Transportation of Flat Panel Substrate by Combined Ultrasonic Acoustic Viscous and Aerostatic Forces / I. Hiromi, F. Masaaki, O. Masami, K. Akira // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. April 2007. – № 8(2). – P. 44 – 48.
30. Orientation Modeling of Bernoulli Gripper Device with Off-Centered Masses of the Object of manipulation. / V. Savkiv, R. Mykhailyshyn, O. Fendo, M. Mykhailyshyn // Procedia Engenering. – 2017. – № 187. – P. 264 – 271.
31. Parr A. Hydraulics and pneumatics: a technician's and engineer's guide. / A. Parr // Elsevier. – 2011. – P. 222.
32. Peng J. Coordinating multiple robots with kinodynamic constraints along specified paths / J. Peng, S. Akella, // The International Journal of Robotics Research. – 2005. – № 24(4). – P. 295 – 310.

33. Petterson Anders. Bernoulli principle gripper for handling of planar and 3D (food) products / A. Petterson // *Industrial Robot: An International Journal*. – 2010. – № 37(6). – P. 518 – 526.
34. Pfeiffer F. Optimal path planning including forces at the gripper / F. Pfeiffer, K. Richter // *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. – 1990. – № 3(3). – P. 251 – 258.
35. Pod hlavičkou Národného centra robotiky pracujú už aj odborníci zo zahraničia / F. Duchoň, Ľ. Chovanec, R. Mykhailyshyn, V. Savkiv // *ATP journal*. – 2017. – № 3. – P. 54 – 55.
36. Rathakrishnan Ethirajan. Applied gas dynamics / E. Rathakrishnan // John Wiley & Sons. – 2010. – P. 643.
37. Rosidah S. A novel, flexible and multi-functional handling device based on Bernoulli principle / S. Rosidah, S. Nefti // *System Engineering and Technology (ICSET), 2011 IEEE International Conference on. IEEE*. – 2011.
38. Ruppert D. Statistics and finance: an introduction / D. Ruppert // Springer Science & Business Media. – 2004.
39. Shah P. Orientation capability representation and application to manipulator analysis and synthesis. / P. Shah, J.S. Dai // *Robotica*. – 2002. – № 20(5). – P. 529 – 535.
40. Shiller Z. On singular time-optimal control along specified paths. / Z. Shiller // *IEEE Transactions on Robotics and Automation*. – 1994. – № 10(4). – P. 561 – 566.
41. Shiller Z. On the optimal control of robotic manipulators with actuator and end-effector constraints. / Z. Shiller, S. Dubowsky // *In Robotics and Automation. Proceedings. 1985 IEEE International Conference*. – 1985. – № 2. – P. 614 – 620.
42. Shiller Z. Time-energy optimal control of articulated systems with geometric path constraints / Z. Shiller // *In Robotics and Automation, 1994. Proceedings., 1994 IEEE International Conference*. – 1994. – P. 2680 – 2685.
43. Shiller Z. Trajectory preshaping for high-speed articulated systems / Z. Shiller,

- H. Chang // Transactions-american society of mechanical engineers journal of dynamic systems measurement and control. – 1995. – № 117. – P. 304 – 320.
44. Shin K. Minimum-time control of robotic manipulators with geometric path constraints / K. Shin, N. McKay // IEEE Transactions on Automatic Control. – 1985. – № 30(6). – P. 531 – 541.
45. Siciliano B. Springer Handbook of Robotics / B. Siciliano, O. Khatib. – Berlin : Springer, 2008. – P. 1631.
46. Tuleja P. Unilateral gripping with active vacuum suction cup Calculation of gripping force and number of suction cups. / P. Tuleja, L. Sidlovska // Transfer inovacii. – 2014. – № 29. – P. 232 – 235.
47. Vandaele V. Non-contact handling in microassembly: Acoustical levitation / V. Vandaele, P. Lambert, A. Delchambre // Precision Engineering. – 2005. – № 29(4). – P. 491 – 505.
48. Wang J.J. Optimal control of robotic manipulators. / J.J. Wang // International Journal of Robotics & Automation. – 1989. – № 4(1). – P. 27-35.
49. Wu C.J. Experiments: planning, analysis, and optimization / C.J. Wu, S.H. Michael // John Wiley & Sons. – 2011. – P. 552.
50. Xin L. Analysis of vortex levitation / L. Xin, K. Kawashima, T. Kagawa // Experimental Thermal and Fluid Science. – 2008. – № 32. – P. 1448 – 1454.
51. Xin L. Development of a new noncontact gripper using swirl vanes / X. Li, T. Kagawa // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. – 2013. – № 29(1). – P. 63 – 70.
52. Xin L. Experimental comparison of Bernoulli gripper and vortex gripper / X. Li, T. Kagawa // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. – 2015. – № 16(10). – P. 2081 – 2090.
53. Xin L. Theoretical and experimental study of factors affecting the suction force of a Bernoulli gripper / X. Li, T. Kagawa // Journal of Engineering Mechanics. – 2014. – № 140(9). – DOI: 04014066.
54. А.с. 1310203 СССР, МКИ В 25 J 15/00. Струйное захватное устройство / В.В. Дмитриенко, С.Ю. Османов (СССР). – № 3996994/25–08; заявл.

- 29.12.85; опубл. 15.05.87, Бюл. № 18.
55. А.с. 460096 СССР, МКИ В 65 J 59/64. Автоматический питатель листовых заготовок / М.А. Козловский, Я.И. Проць и др (СССР). – №1858939/11; Заявлено 15.12.76; Опубл. 30.08.76, Бюл. №45.
56. А.с. 602345 СССР, МКИ В 23 Q 7/04. Пневматический захват / С.С. Ефремов, Е.И. Гурин (СССР). – № 2424354/25–08; заявл. 29.11.76; опубл. 15.04.78, Бюл. № 14.
57. Автоматизація досліджень з використанням комп'ютерно-інтегрованих технологій для прогнозування властивостей епоксидних композитів / І.Г. Добротвор, В.В. Федоров, В.І. Бадищук, І.В. Чихіра // Науковий вісник Херсонської державної морської академії. – 2013. – №2(9). – С. 161 – 165.
58. Автоматическая загрузка технологических машин: Справочник / И.С. Бляхеров, Г.М. Варьяш, А.А. Иванов и др. // Под общ. ред. И.А. Клусова. М.: Машностроение. – 1990. – 400 с.
59. Блажнов А.А. Вихревые вакуумные захватные устройства роботов и методика их проектирования: дис.. канд.. техн.. наук / А.А. Блажнов // ФГАОУВО Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. 2017.
60. Богачева А.В. Элементы и устройства струйной техники / А.В. Богачева, А.Н. Добрынин, В.Г. Завьялов // М.: Энергия. – 1972. – 96 с.
61. Бохонский А. И. Оптимальное управление переносным движением деформируемых объектов: теория и технические приложения. / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская, М.И. Мозолевский // Севастополь: Изд-во СевНТУ. – 2007.
62. Бохонский А.И. Восстановленные функционалы как критерии оптимальности управлений переносным движением деформируемых объектов / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская // Вісник СевНТУ. – 2013. – № 137. – С. 68 – 73.
63. Бохонский А.И. Оптимальное перемещение объекта манипулятором с одного транспортера на другой. / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская. –

- 2005.
64. Бохонский А.И. Оптимальное перемещение упругого объекта по заданной траектории. / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская, М.М. Майстришин. – 2011.
 65. Бохонский А.И. Оптимальное управление перемещением груза телескопическим манипулятором с пневмоприводами. / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская // Севастопольский национальный технический университет. – 2004.
 66. Бохонский А.И. Реверсионный принцип оптимальности в задачах управления переносным движением деформируемых объектов. / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская // Вісник СевНТУ. Серія: Механіка, енергетика, екологія. – 2014. – № 148. – С. 130 – 133.
 67. Бронштейн Ю.П. Исполнительные механизмы захватывающих устройств / Ю.П. Бронштейн. // Л.: Машиностроение (Ленингр. отд-ние). – 1982. – 232 с.
 68. В.А. Иванов. Математические основы теории оптимального и логического управления. / В.А. Иванов, В.С. Медведев // М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2011. – 600 с.
 69. Вакуумная техника: Справочник / Е.С. Фролов, В.Е. Минайчев, А.Т. Александров и др. // Под общ. ред. Е.С. Фролова, В.Е. Минайчева. – М.: Машиностроение, 1992. – 480 с.
 70. Воротников С.А. Информационные устройства робототехнических систем / С.А. Воротников // М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 384 с.
 71. Гайдамака В.Ф. Грузоподъемные машины / В.Ф. Гайдамака. – К.: Выща школа, 1989. – 328 с.
 72. Герц Е.В. Расчет пневмоприводов. Справочное пособие / Е.В. Герц, Г.В. Крейнин. – М.: Машиностроение, 1975. – 272 с.
 73. Гідроприводи та гідропневмоавтоматика: Підручник / В.О. Федорець, М.Н. Педченко, В.Б. Струтинський та ін. За ред. В.О. Федорця. – К:Вища школа, – 1995. – 463 с.

74. Зажигаев Л.С. Методы планирования и обработки результатов физического эксперимента / Л.С. Зажигаев, А.А. Кишьян, Ю.И. Романиков. – М.: Атомиздат, 1978. – 232 с.
75. Залманзон Л.А. Аэрогидродинамические методы измерения входных параметров автоматических систем / Л.А. Залманзон. – М.: Наука, 1973. – 464 с.
76. Залманзон Л.А. Специализированные аэрогидродинамические системы автоматического управления / Л.А. Залманзон. – М.: Наука, 1978. – 464 с.
77. Зенкевич С.Л. Основы управления манипуляционными роботами / С.Л. Зенкевич, А.С. Ющенко // Основы управления манипуляционными роботами. 2-е изд. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. – 480 с.
78. Ибрагимов И.А. Элементы и системы пневмоавтоматики / И.А. Ибрагимов, Н.Г. Фарзанае, Л.В. Илясов. // [2-е изд., перераб. и доп.]. – М.: Высш. шк., 1985. – 544 с.
79. Иванов А.А. Проектирование систем автоматического манипулирования миниатюрными изделиями / А.А. Иванов – М.: Машиностроение, 1981. – 271 с.
80. Идельчик И.Е. Аэродинамика технологических аппаратов / И.Е. Идельчик – М.: Машиностроение, 1983. – 351 с.
81. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / Идельчик И.Е. – Рипол Классик, 2013.
82. Іванченко Ф.К. Підйомно-транспортні машини: Підручник / Ф.К. Іванченко. – К.: Вища шк., 1993. – 413 с.
83. Кирилович В.А. Інформаційна модель об'єктів маніпулювання для умов роботизованих механоскладальних технологій / В. А. Кирилович // Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. – 2009. – № 4(51). – С. 27 – 36.
84. Кирилович В.А. Формалізований опис орієнтуючих рухів об'єктів роботизації на основі теорії кватерніонів / В. А. Кирилович, І. Ю. Черепанська // Вісник Національного університету "Львівська

- політехніка". – 2006. – № 551 : Автоматика, вимірювання та керування. – С. 114 – 122.
85. Козырев Ю.Г. Захватные устройства и инструменты промышленных роботов / Ю. Г. Козырев. – Москва: КНОРУС, 2010. – 312 с.
86. Комаров М.С. Нелинейные задачи динамики машин / М.С. Комаров. – М.: Машиностроение, 1968. – 284 с.
87. Лобов Н.А. Динамика грузоподъемных кранов / Н.А. Лобов. – М.: Машиностроение, 1987. – 160 с.
88. Ловейкін В.С. Динамічна оптимізація підйомних машин / В.С. Ловейкін, А.П. Нестеров. – Х.: ХДАДТУ, 2002. – 285 с.
89. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа: Учеб. для вузов. 7-е изд., испр. М.: Дрофа. / Л.Г. Лойцянский – 2003. – 840 с.
90. Мельничук П.П. Задачі технологічної взаємодії схватів промислових роботів з об'єктами маніпулювання в механоскладальних гнучких виробничих комірках / П.П. Мельничук, В.А. Кирилович, Р.С. Моргунов // Процеси механічної обробки в машинобудуванні. – 2011. – № 10. – С. 24 – 40.
91. Мельничук П.П. Семантична модель технологічної взаємодії схватів промислових роботів з об'єктами маніпулювання./ П.П. Мельничук, В.А. Кирилович, Р.С. Моргунов // Вісник ЖДТУ. – 2011. – № 1(56). – С. 24 – 29.
92. Методика автоматизованого кінематичного формування програмних траєкторій переміщення схвата промислових роботів при синтезі роботизованих механоскладальних технологій / М.В. Богдановський, В.А. Кирилович, М.О. Ковбаса, Т.Є. Нужда // Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. – 2004. – №. 4 (31) Т. 2. – С. 92–102.
93. Михайлишин М.С. Дослідження умов безвідривного транспортування об'єктів захоплення вальними пристроями струменевого типу / М.

- Михайлишин, Я. Проць, Т. Децик // Вісник Тернопільського національного технічного університету. – 2012. – №3 (67). – С. 162 – 172.
94. 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. – № 81(1). – Р. 107 – 117.
95. Моделювання динаміки механізмів вантажопідйомних машин / В.С. Ловейкін, Ю.В. Човнюк, М.Г. Діктерук, С.І. Пастушенко. – К. Миколаїв: РВВ МДАУ, 2004. – С. 286.
96. Оптимізація форми активної поверхні струменевих захоплювальних пристроїв промислових роботів / В. Савків, Я. Проць, О. Фендьо, Г. Савків // Вісник ТНТУ. – Тернопіль, 2010. – № 15(1). – С. 73 – 80.
97. Офіційний сайт фірми АВВ [Електронний ресурс]. – Режим доступ: <http://new.abb.com/products/robotics/robotstudio>
98. Офіційний сайт фірми Automation Distribution Incorporated [Електронний ресурс]. – Режим доступ: <http://www.smcnpneumaticsdistributor.com/smc-product/xt-2074.html>.
99. Офіційний сайт фірми Bosch Rexroth [Електронний ресурс]. – Режим доступ: <http://www.boschrexroth.com/pneumatics-catalog>
100. Офіційний сайт фірми ВР and Technology [Електронний ресурс]. – Режим доступ: <http://www.br.com>.
101. Офіційний сайт фірми Festo AG & Co [Електронний ресурс]. – Режим доступ: https://www.festo.com/net/sv_se/SupportPortal/default.aspx?cat=4564.
102. Офіційний сайт фірми mechatronic systemtechnik gmbh [Електронний ресурс]. – Режим доступ: <http://www.mechatronic.at/technology/end-effectors.html>.
103. Офіційний сайт фірми Schmalz [Електронний ресурс]. – Режим доступ: <https://www.schmalz.com/en/vacuum-technology-for-automation/vacuum-components/special-grippers/floating-suction-cups/floating-suction-cups-sbs>.
104. Офіційний сайт фірми SMC Corporation, Non-contact conveyance is possible

- Series XT661. [Електронний ресурс]. – Режим доступ: <http://www.smcworld.com>
105. Пат. 119726 Україна, МПК В25J 15/00. Струминний захоплювальний пристрій / В.Б. Савків, Р.І. Михалишин; заявник і патентотримувач Тернопільський нац. тех. ун-т. імені Івана Пулюя. – № 201702403; заявл. 15.03.2017; опубл. 10.10.2017, Бюл. № 19.
106. Пат. 119819 Україна, МПК В25J 15/00. Безконтактний струминний захоплювальний пристрій / В.Б. Савків, Р.І. Михалишин; заявник і патентотримувач Тернопільський нац. тех. ун-т. імені Івана Пулюя. – № 201703755; заявл. 18.04.2017; опубл. 10.10.2017, Бюл. № 19.
107. Пиралишвили Ш.А. Вихревой эффект / Ш.А. Пиралишвили // Т. 1: Физическое явление, эксперимент, теоретическое моделирование. – 2013.
108. Пневматические устройства и системы в машиностроении: Справочник / Е.В. Герц, А.И. Кудрявцев, О.В. Ложкин и др. / Под общ. ред. Е.В. Герц. – М.: Машиностроение, 1981. – 408 с.
109. Промышленные роботы для миниатюрных изделий / Р.А.Бансявичюс, А.А.Иванов, Н.И.Камышный и др. / Под. ред. В.Ф.Шаньгина. – М.: Машиностроение, 1985. – 264 с.
110. Проць Я.І. Газодинамічний аналіз струйних захоптів плоских заготовок. / Я.І. Проць, В.Б. Савків // Оптимізація виробничих процесів. – Севастополь: Издательство СевГТУ. – 1999. – С. 63 – 68.
111. Проць Я.І. Дослідження статичних характеристик струменево-фрикційних пристроїв подачі листового матеріалу. / Я.І. Проць, П.С. Федорів, Ю.О. Цяпута, В.В. Скочиляс // Поліграфія і видавнича справа. – 2011. – № (2). – С. 93 – 98.
112. Проць Я.І. Захоплювальні пристрої промислових роботів: навчальний посібник / Я.І. Проць – Тернопіль: Тернопільський державний технічний університет імені Івана Пулюя, 2008. – 232 с.
113. Проць Я.І. Струменеві пристрої для захоплення та контролю розмірів об'єктів в процесі маніпулювання / Я.І. Проць, В.Б. Савків, І.Р. Козбур //

- Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 1998. – №1. – С. 22 – 25.
114. Пупков К.А. Интеллектуальные системы. / К.А. Пупков, В.Г. Коньков. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003.
115. Рабинович А.Н. Автоматическое ориентирование и загрузка штучных деталей / А.Н. Рабинович. – К.: Техніка, 1968. – 543 с.
116. Рехтен А.В. Струйная техника: основы, элементы, схемы / А.В. Рехтен. – М.: Машиностроение, 1980. – 237 с.
117. Робототехнические системы в сборочном производстве / Под ред. Е.В.Пашкова. – К.: Выща школа, 1987. – 270 с.
118. Савків В. Струменеві захоплюючі пристрої об'єктів типу “фланці” / В. Савків, Я. Проць // Вісник Тернопільського державного технічного університету імені Івана Пулюя. – Тернопіль, 1998. – № 3(4). – С. 120 – 124.
119. Савків В. Удосконалення конструкції струминних ежекційних захоплювачів автоматичних пристроїв завантаження / В. Савків, О. Фендьо, Г. Савків // Вісник ТНТУ. – Тернопіль, 2010. – № 15(3). – Р. 64 – 74.
120. Савків В.Б. Автоматизація процесів завантаження об'єктів типу тіла обертання на основі струменевих захоплюючих пристроїв [Текст]: дис.. канд.. техн.. наук / В.Б. Савків. 1999.
121. Савків В.Б. Газодинамічний аналіз струменевих захоплювачів “сопло з розвинутою поверхнею торця” / В.Б. Савків, Я.І. Проць // Вісник Тернопільського державного технічного університету імені Івана Пулюя. – Тернопіль, 1999. – № 3(1). – С. 48 – 54.
122. Сливинская А.Г. Электромагниты и постоянные магниты / А.Г. Сливинская. – М.: Энергия, 1972. – 248 с.
123. Смолдырев А.Е. Пневматический транспорт штучных грузов / А.Е. Смолдырев, А.В. Тантлевский. – М.: Машиностроение, 1979. – 158 с.
124. Степанов Г.Ю. Гидродинамическая теория аппаратов на воздушной

- подушке / Г.Ю. Степанов. – М.: Машгиз, 1963. – 186 с.
125. Фендьо О. Дослідження технічних характеристик струменевих захоплювальних пристроїв промислових роботів і маніпуляторів / О. Фендьо, В. Савків // Наукові нотатки ЛНТУ. – Луцьк, 2010. – № 28. – С. 544 – 548.
126. Фендьо О.М., Фендьо Е.Н., & Fend'o E.N. (2012). Обґрунтування параметрів та конструкцій струминних захоплювачів пристроїв завантаження [Текст]: дис.. канд.. техн.. наук / О.М. Фендьо. 2012.
127. Ханжонков В.И. Аэродинамика аппаратов на воздушной подушке / В.И. Ханжонков – М.: Машиностроение, 1973. – С. 359.
128. Хикс Ч. Основные принципы планирования эксперимента / Хикс Ч. – М.: Мир, 1967. – С. 406.
129. Челпанов И.Б. Бесконтактное вихревое вакуумное захватное устройство для промышленных роботов. / И.Б. Челпанов, А.А. Блажнов, А.В. Кочетков // Интернет-журнал Науковедение. – 2015. – № 7.1.
130. Яхимович В.А. Ориентирующие механизмы сборочных автоматов / В.А. Яхимович. – М.: Машиностроение, 1975. – 164 с.

ДОДАТКИ

ТОВАРИСТВО
З ДОДАТКОВОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ
"БУЛАТ"



THE ADDITIONAL
LIABILITY COMPANY
"BULAT"

Юридична адреса: 48120, Україна, Тернопільська обл., смт Микулинці, вул.Тернопільська.35 Телефони: +380-355-151-145, тел/факс : +380-355-151-000	Address: 48120, Mykulyntsi, Ternopil region, Ukraine 35 Ternopilska St Tel. +380 355 151-145 Fax. +380-355-151-000
--	--



«Затверджую»
Генеральний директор
ТДВ «Булат»
Ковальчук О.В.
« 27 » червня 2017 р.

АКТ
Впровадження результатів дисертаційної роботи
Михайлишина Романа Ігоровича на ТДВ «Булат»

Ми, що нижче підписалися головний інженер Дармограй Б.М. та головний технолог ТДВ «Булат» Стасишин Р.М., науковий керівник к.т.н., доцент Савків В.Б. та відповідальний виконавець Михайлишин Р.І. склали цей акт в тому, що для транспортних операцій завантаження/розвантаження заготовок у фрезерний верстат з ЧПК використано розроблену Михайлишином Р.І. математичну модель оптимізації орієнтації струминного захоплювального пристрою для транспортування об'єктів.

Використання математичної моделі оптимізації орієнтації струминного захоплювального пристрою у процесі транспортування об'єктів виробництва скорочує час на виконання транспортних операцій, підвищує коефіцієнт використання фрезерного верстату з ЧПК і знижує енергетичні затрати для транспортування заготовок. Прогнозований економічний ефект від впровадження запропонованої математичної моделі складе 26355 грн.

Головний інженер

Головний технолог

Науковий керівник

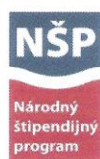
Відповідальний виконавець

Б.М. Дармограй

Р.М. Стасишин

В.Б. Савків

Р.І. Михайлишин



SAIA, n. o. | Sasinkova 10 | 812 20 Bratislava 1
Tel.: 02/59 30 47 00, 59 30 47 11 | Fax: 02/59 30 47 01
E-mail: saia@saia.sk | www.saia.sk | IČO: 31 821 596

DEKRÉT O UDELENÍ ŠTIPENDIA/LETTER OF AWARD

Národný štipendijný program Slovenskej republiky na podporu mobility študentov, doktorandov, vysokoškolských učiteľov a výskumných, resp. umeleckých pracovníkov
National Scholarship Programme of the Slovak Republic for the Support of Mobility of Students, PhD Students, University Teachers, Researchers and Artists

Meno a priezvisko/ Name and surname:	Roman Igorevych Mykhailyshyn
Dátum narodenia/Date of birth:	18.04.1992
Štátna príslušnosť/Citizenship:	Ukrajina/Ukraine
Adresa trvalého pobytu/ Permanent residence address:	Киевская 10/140 46032 Тернополь Ukrajina/Ukraine
Nástup na štipendijný pobyt/ Beginning of the scholarship stay:	01.02.2017
Dĺžka pobytu (v mesiacoch)/ Duration of the stay (in months):	1
Prijímajúca inštitúcia/ Host institution:	Slovenská technická univerzita v Bratislave; Fakulta elektrotechniky a informatiky
Kontaktná osoba/ Contact person:	doc. Ing. František Duchoň, PhD.
Štipendium na mesiac/ Scholarship per month:	580 €
Výška štipendia spolu/ Scholarship in total:	580 €

Bratislava 20. 12. 2016


Mgr. Michal Fedák,
zástupca výkonnej riaditeľky/Deputy Director

* Vytvorenie Národného štipendijného programu na podporu mobility študentov, doktorandov, vysokoškolských učiteľov a výskumných, resp. umeleckých pracovníkov schválila vláda SR v roku 2005. NSP je financovaný Ministerstvom školstva, vedy, výskumu a športu. SR. Program administratívne zabezpečuje SAIA, n. o.

Štipendisti Národného štipendijného programu sú štipendistami vlády Slovenskej republiky.

* Establishment of the National Scholarship Programme for the support of mobility of students, PhD students, university teachers, researchers and artists was approved by the Government of the Slovak Republic in 2005. The National Scholarship Programme of the Slovak Republic is funded by the Ministry of Education, Science, Research and Sport of the Slovak Republic. The programme is managed by SAIA, n. o.

Scholarship holders of the National Scholarship Programme are scholarship holders of the Government of the Slovak Republic.

SAIA n.o.
Sasinkova 10
81220 Bratislava

Váš list:

Naše číslo:

Vybavuje:

V Bratislave

Dr. rer. nat. Martin
Drozda

2. 2. 2017

Vec: Potvrdenie o prijatí študenta v rámci Národného štipendijného programu SR

Týmto potvrdzujeme, že pán **Roman Igorevych Mykhailyshyn** nastúpil dňa 1.2.2017 na Fakulte elektrotechniky a informatiky STU v Bratislave na študijný pobyt v rámci Národného štipendijného programu Slovenskej republiky.

Toto potvrdenie je vystavené pre SAIA n.o.

S pozdravom



Dr. rer. nat. Martin Drozda

Prodekan pre zahraničné vzťahy

SAIA n.o.
Sasinkova 10
81220 Bratislava

Váš list:

Naše číslo:

Vybavuje:

V Bratislave

Dr. rer. nat. Martin
Drozda

2. 3. 2017

Vec: Potvrdenie o ukončení študijného pobytu v rámci Národného štipendijného programu SR

Týmto potvrdzujeme, že pán **Roman Igorevyč Mykhailyshyn** ukončil dňa 2.3.2017 na Fakulte elektrotechniky a informatiky STU v Bratislave študijný pobyt v rámci Národného štipendijného programu Slovenskej republiky.

Toto potvrdenie je vystavené pre SAIA n.o.

S pozdravom


Dr. rer. nat. Martin Drozda

Prodekan pre zahraničné vzťahy

Розрахунок економічного ефекту від впровадження методу оптимізації орієнтації струминного захоплювального пристрою.

Розглянемо впровадження запропонованої моделі для транспортування заготовок в фрезерний верстат, для подальшої обробки.

Витрати стиснутого повітря на виконання транспортних операцій:

	Витрата стиснутого повітря м ³		
	За операцію	За день	За рік
Без переорієнтації	0,741	2 134	512 160
З оптимізацією орієнтації	0,452	1 301	312 240
		Різниця	≈ 200 000

Питома витрата електроенергії на виробництві стисненого повітря визначається за формулою:

$$H = \frac{0.00272 \cdot L_{i3}}{\eta_{i3} \eta_e \eta_n} \left[\frac{\text{кВт} \cdot \text{год}}{1000 \text{ м}^3} \right]$$

де:

L_{i3} - робота ізотермічного стиснення;

η_{i3} - ізотермічний к.к.д. компресора;

η_e - к.к.д. електродвигуна;

η_n - к.к.д. передачі;

Робота ізотермічного стиснення можемо взяти з даних наведених нище:

Таблиця даних поршневих компресорів:

P , ат	3	4	5	6	7	8	9	12
L_{i3} , КГМ/М ³	11220	15700	18300	20700	22500	24600	26300	29800

Таблиця даних турбокомпресорів:

P , ат	3	4	5	7	8	9
L_{i3} , КГМ/М ³	17900			19450	20800	21950

Проведеом підрахунки при таких даних:

$$L_{i3} = 11220 \left[\text{KzM} / \text{M}^3 \right], \eta_{i3} = 0.72, \eta_e = 0.7, \eta_n = 0.8,$$

тоді

$$H = 111.2 \left[\frac{\text{кВт} \cdot \text{год}}{1000 \text{M}^3} \right].$$

Розрахуємо економічний ефект з розрахунку, що ми зекономимо 200 тис. м³ стиснутого повітря за рік.

$$H_p = H \cdot Q = 111.2 \cdot 200 = 13246 \left[\text{кВт} \cdot \text{год} \right]$$

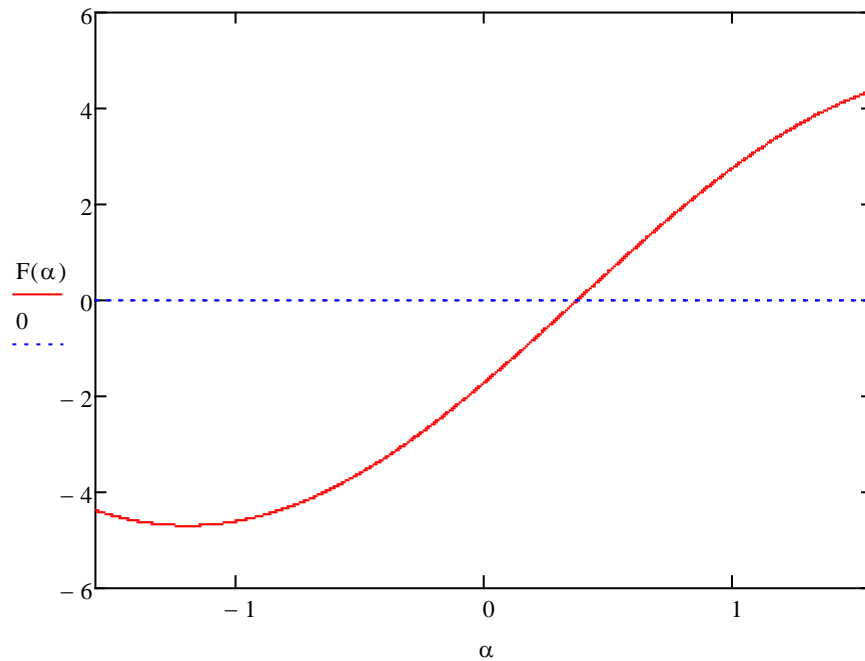
$$E = H_p \cdot 1.99 = 26355 \left[\text{грн} \right]$$

Модель динамічної взаємодії захоплювального пристрою і вантажу для випадку виконання вантажно розвантажувальної операції по прямолінійної траєкторії в

MathCAD

$$\begin{aligned}
 d &:= 0.04 & c &:= \frac{d}{2} & q &:= 1.25 & B &:= 0.3 & A &:= 0.3 \\
 H &:= 0.1 & \beta &:= 0 & g &:= 9.8 & a &:= 3.8 & m &:= 3 & \varepsilon &:= 0 \\
 E &:= 0 & v &:= 0.5 & f &:= 0.404 & \omega &:= 0 & R &:= \sqrt{E^2 + \frac{H^2}{4}}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 F(\alpha) &:= m \cdot \left[\varepsilon \cdot \left(R^2 + \frac{H \cdot d}{2 \cdot f} \right) \cdot (-1) \cdot \frac{d}{f} \cdot \omega^2 \cdot E \right] + \\
 &+ m \cdot \left[\frac{d}{f} \cdot [g \cdot \sin(\alpha) + (-1) \cdot a \cdot \cos(\alpha + \beta)] - \right. \\
 &\quad \left. - g \cdot \left[E \cdot \cos(\alpha) + (-1) \cdot \frac{H}{2} \cdot \sin(\alpha) \right] - \right. \\
 &\quad \left. - a \cdot \left(E \cdot \sin(\alpha + \beta) + \frac{H}{2} \cdot \cos(\alpha + \beta) \right) \right] \\
 &- \left[q \cdot B \cdot H \cdot v^2 \cdot \frac{\pi \cdot \cos(\alpha)}{4 + \pi \cos(\alpha)} \cdot \left[\left(\frac{d}{f} + \frac{A}{2} \right) \cdot \cos(\alpha + \beta) + \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. + \left[E + (-1) \cdot \frac{A}{2} \right] \cdot \sin(\alpha + \beta) \right] + \right. \\
 &\quad \left. + q \cdot A \cdot B \cdot v^2 \cdot \frac{\pi \cdot \sin(\alpha)}{4 + \pi \sin(\alpha)} \cdot \left[\left(\frac{d}{f} + H \right) \cdot \cos(\alpha + \beta) + E \cdot \sin(\alpha + \beta) \right] \right]
 \end{aligned}$$

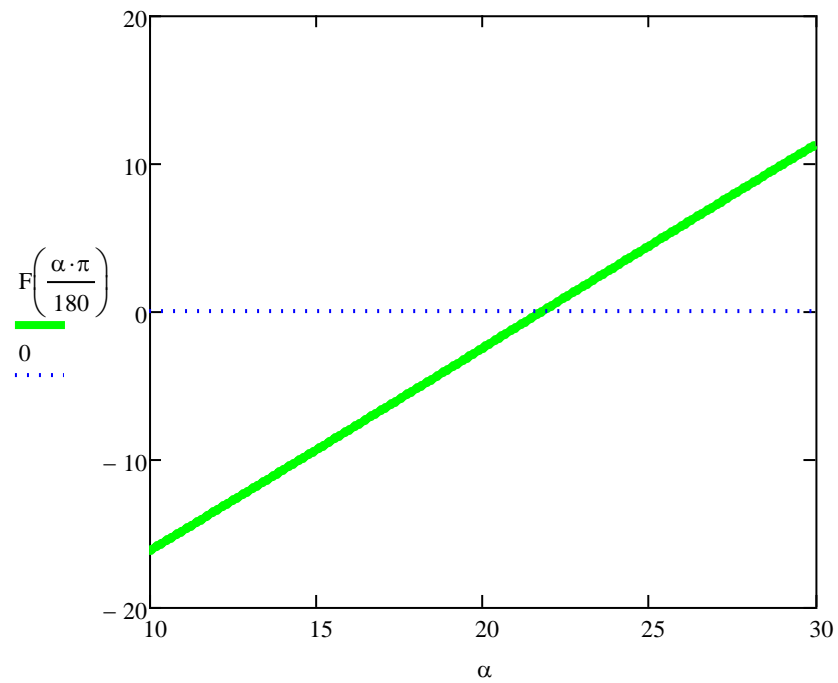


Кут оптимальної орієнтації на ділянці розгону

$$\underline{L} := \text{root}(F(\alpha), \alpha, 0, 2) = 0.37 \quad L \cdot \frac{180}{\pi} = 21.217$$

Сила притягання в найнесприятливіший момент транспортування коли орієнтація рівна 21.217, а прискорення вже відсутнє ($a=0$), тобто мінімальна необхідна сила притягання.

$$\begin{aligned} \underline{F}(\alpha) := & m \cdot g \cdot \left[\frac{\sin(\alpha)}{f} + (-1) \cdot \cos(\alpha) \right] - \\ & \left[q \cdot B \cdot H \cdot (v)^2 \cdot \frac{\pi \cdot \cos(\alpha)}{4 + \pi \cos(\alpha)} \right. \\ & \left. + q \cdot A \cdot B \cdot (v)^2 \cdot \frac{\pi \cdot \sin(\alpha)}{4 + \pi \sin(\alpha)} \right] + m \cdot a \cdot \left(\frac{\cos(\alpha + \beta)}{f} + \sin(\alpha + \beta) \right) - \\ & - m \cdot (\omega)^2 \cdot \left(\frac{E}{f} - \frac{H}{2} \right) + m \cdot \varepsilon \cdot \left(\frac{H}{2 \cdot f} + E \right) \end{aligned}$$



Для оптимальної орієнтації в 21.217 градусів забезпечується утримування об'єкта маніпулювання лише за допомогою інерційних, гравітаційних сил та сил тертя.

Модель динамічної взаємодії захоплювального пристрою і вантажу для випадку виконання вантажно розвантажувальної операції по гвинтовій траєкторії в

MathCAD

$$m := 1 \quad t_1 := 0.6 \quad t_2 := 1.4 \quad t_3 := 2 \quad R := 1 \quad g := 9.807$$

$$z := 0.5 \quad k := \frac{z \cdot 2}{\pi} = 0.318$$

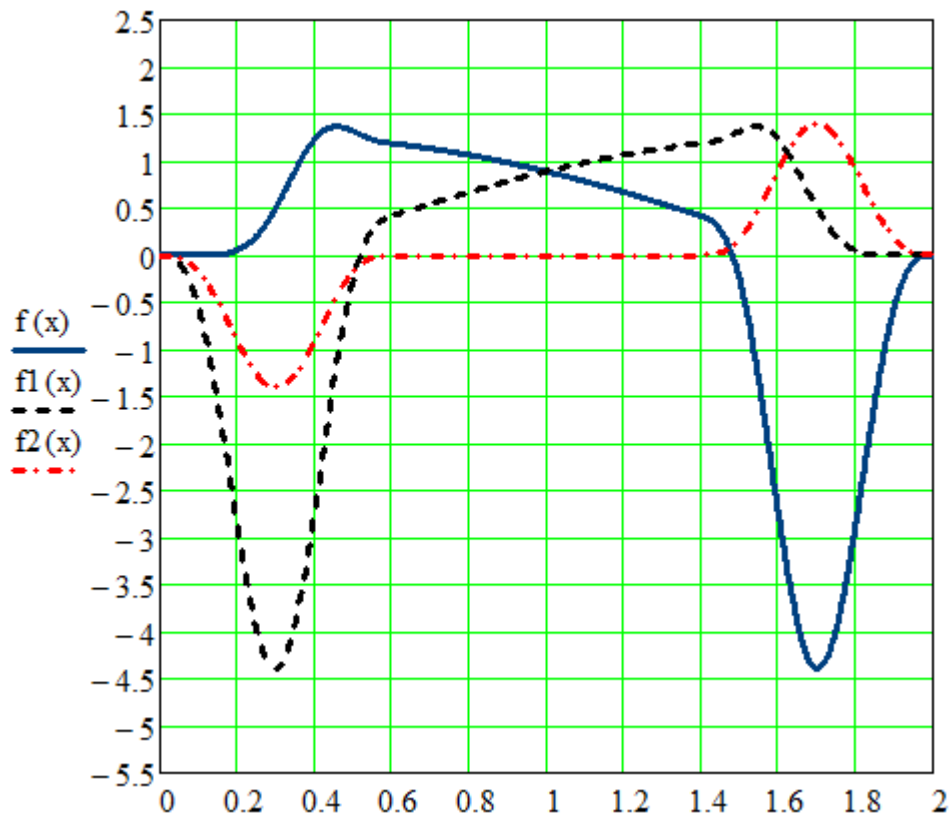
$$\gamma(x) := \begin{cases} \left[\frac{3 \cdot \pi^2}{8 \cdot t_1 \cdot t_2} \cdot t_1 \cdot \left[\frac{2}{3} \cdot x - \frac{t_1}{3 \cdot \pi} \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot x}{t_1}\right) \cdot \left[2 + \frac{1}{3} \cdot \left(\sin\left(\frac{\pi \cdot x}{t_1}\right) \right)^2 \right] \right] \right] & \text{if } 0 \leq x < t_1 \\ \left[\frac{2}{3} \cdot \frac{3 \cdot \pi^2}{8 \cdot t_1 \cdot t_2} \cdot t_1 \cdot (2 \cdot x - t_1) \right] & \text{if } t_1 \leq x < t_2 \\ \left[\frac{3 \cdot \pi^2}{4 \cdot t_1 \cdot (t_3 + t_2 - t_1)} \cdot t_1 \cdot \left[2 \cdot (x + t_2 - t_1) + \frac{t_3 - t_2}{\pi} \cdot \sin\left[\frac{\pi \cdot (x - t_2)}{t_3 - t_2}\right] \cdot \left[2 + \frac{1}{3} \cdot \left[\sin\left[\frac{\pi \cdot (x - t_2)}{t_3 - t_2}\right] \right]^2 \right] \right] \right] & \text{if } t_2 \leq x < t_3 \end{cases}$$

$$\underline{\varepsilon}(x) := \begin{cases} \left[\frac{3 \cdot \pi^2}{8 \cdot t_1 \cdot t_2} \cdot \left(\sin\left(\frac{\pi \cdot x}{t_1}\right) \right)^3 \right] & \text{if } 0 \leq x < t_1 \\ (0) & \text{if } t_1 \leq x < t_2 \\ \left[\frac{3 \cdot \pi^2}{4 \cdot t_1 \cdot (t_3 + t_2 - t_1)} \cdot t_1 \cdot \left[\sin\left[\frac{\pi \cdot (x - t_2)}{t_3 - t_2}\right] \right]^3 \right] & \text{if } t_2 \leq x < t_3 \end{cases}$$

$$f(x) := \begin{cases} R \cdot \left[\frac{3 \cdot \pi^2}{8 \cdot t_1 \cdot t_2} \cdot t_1 \cdot \left[\frac{2}{3} - \cos\left(\frac{\pi \cdot x}{t_1}\right) + \frac{1}{3} \cdot \left(\cos\left(\frac{\pi \cdot x}{t_1}\right) \right)^3 \right] \right]^2 \cdot \cos\left[\frac{3 \cdot \pi^2}{8 \cdot t_1 \cdot t_2} \cdot t_1 \cdot \left[\frac{2}{3} \cdot x - \frac{t_1}{3 \cdot \pi} \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot x}{t_1}\right) \cdot \left[2 + \frac{1}{3} \cdot \left(\sin\left(\frac{\pi \cdot x}{t_1}\right) \right)^2 \right] \right] \right] + \\ R \cdot \left[\left(\frac{3 \cdot \pi^2}{8 \cdot t_1 \cdot t_2} \cdot t_1 \right)^2 \cdot \cos\left[\frac{2}{3} \cdot \frac{3 \cdot \pi^2}{8 \cdot t_1 \cdot t_2} \cdot t_1 \cdot (2 \cdot x - t_1) \right] + 0 \cdot \sin\left[\frac{2}{3} \cdot \frac{3 \cdot \pi^2}{8 \cdot t_1 \cdot t_2} \cdot t_1 \cdot (2 \cdot x - t_1) \right] \right] & \text{if } t_1 \leq x < t_2 \\ R \cdot \left[\frac{3 \cdot \pi^2}{4 \cdot t_1 \cdot (t_3 + t_2 - t_1)} \cdot t_1 \cdot \left[\frac{2}{3} + \cos\left[\frac{\pi \cdot (x - t_2)}{t_3 - t_2}\right] \cdot \left[1 - \frac{1}{3} \cdot \left[\cos\left[\frac{\pi \cdot (x - t_2)}{t_3 - t_2}\right] \right]^2 \right] \right] \right]^2 \cdot \cos\left[\frac{3 \cdot \pi^2}{4 \cdot t_1 \cdot (t_3 + t_2 - t_1)} \cdot t_1 \cdot \left[2 \cdot (x + t_2 - t_1) + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{3 \cdot \pi^2}{8 \cdot t_1 \cdot t_2} \cdot \left(\sin\left(\frac{\pi \cdot x}{t_1}\right) \right)^3 \cdot \sin\left[\frac{3 \cdot \pi^2}{8 \cdot t_1 \cdot t_2} \cdot t_1 \cdot \left[\frac{2}{3} \cdot x - \frac{t_1}{3 \cdot \pi} \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot x}{t_1}\right) \cdot \left[2 + \frac{1}{3} \cdot \left(\sin\left(\frac{\pi \cdot x}{t_1}\right) \right)^2 \right] \right] \right] \right] \right] & \text{if } 0 \leq x < t_1 \end{cases}$$

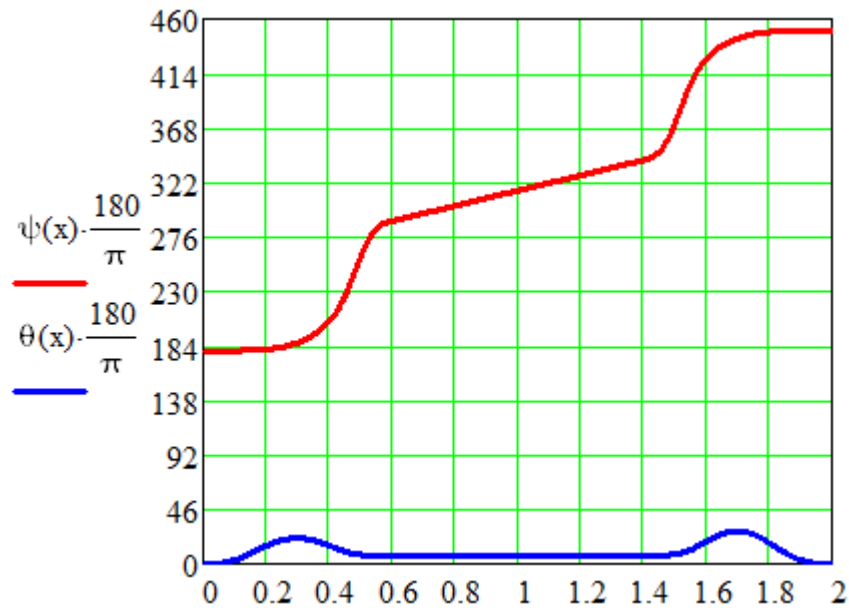
$$+ \frac{t_3 - t_2}{\pi} \cdot \sin\left[\frac{\pi \cdot (x - t_2)}{t_3 - t_2}\right] \cdot \left[2 + \frac{1}{3} \cdot \left[\sin\left[\frac{\pi \cdot (x - t_2)}{t_3 - t_2}\right] \right]^2 \right] \right] + \left[\frac{3 \cdot \pi^2}{4 \cdot t_1 \cdot (t_3 + t_2 - t_1)} \cdot t_1 \cdot \left[\sin\left[\frac{\pi \cdot (x - t_2)}{t_3 - t_2}\right] \right]^3 \right] \cdot \sin\left[\frac{3 \cdot \pi^2}{4 \cdot t_1 \cdot (t_3 + t_2 - t_1)} \cdot t_1 \cdot \left[2 \cdot (x + t_2 - t_1) + \right. \right.$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{t_3 - t_2}{\pi} \cdot \sin\left[\frac{\pi \cdot (x - t_2)}{t_3 - t_2}\right] \cdot \left[2 + \frac{1}{3} \cdot \left[\sin\left[\frac{\pi \cdot (x - t_2)}{t_3 - t_2}\right]\right]^2\right] \quad \text{if } t_2 \leq x \leq t_3 \\
f_1(x) := & \begin{cases} \left[\frac{3 \cdot \pi^2}{8 \cdot t_1 \cdot t_2} \cdot t_1 \cdot \left[\frac{2}{3} - \cos\left(\frac{\pi \cdot x}{t_1}\right) + \frac{1}{3} \cdot \left(\cos\left(\frac{\pi \cdot x}{t_1}\right)\right)^3 \right] \right]^2 \cdot R \cdot \sin(\gamma(x)) + -R \cdot (\varepsilon(x) \cdot \cos(\gamma(x))) & \text{if } 0 \leq x < t_1 \\ \left[R \cdot \left(\frac{4}{3} \cdot \frac{3 \cdot \pi^2}{8 \cdot t_1 \cdot t_2} \cdot t_1 \right)^2 \cdot \sin(\gamma(x)) + -R \cdot \varepsilon(x) \cdot \cos(\gamma(x)) \right] & \text{if } t_1 \leq x < t_2 \\ \left[\frac{3 \cdot \pi^2}{4 \cdot t_1 \cdot (t_3 + t_2 - t_1)} \cdot t_1 \cdot \left[\frac{2}{3} + \cos\left[\frac{\pi \cdot (x - t_2)}{t_3 - t_2}\right] \cdot \left[1 - \frac{1}{3} \cdot \left[\cos\left[\frac{\pi \cdot (x - t_2)}{t_3 - t_2}\right]\right]^2 \right] \right]^2 \cdot R \cdot \sin\left[\frac{3 \cdot \pi^2}{4 \cdot t_1 \cdot (t_3 + t_2 - t_1)} \cdot t_1 \cdot \left[2 \cdot (x + t_2 - t_1) + \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. + \frac{t_3 - t_2}{\pi} \cdot \sin\left[\frac{\pi \cdot (x - t_2)}{t_3 - t_2}\right] \cdot \left[2 + \frac{1}{3} \cdot \left[\sin\left[\frac{\pi \cdot (x - t_2)}{t_3 - t_2}\right]\right]^2 \right] \right] \right] + -R \cdot \varepsilon(x) \cdot \cos(\gamma(x)) & \text{if } t_2 \leq x \leq t_3 \end{cases} \\
f_2(x) := & -k \cdot (\varepsilon(x))
\end{aligned}$$

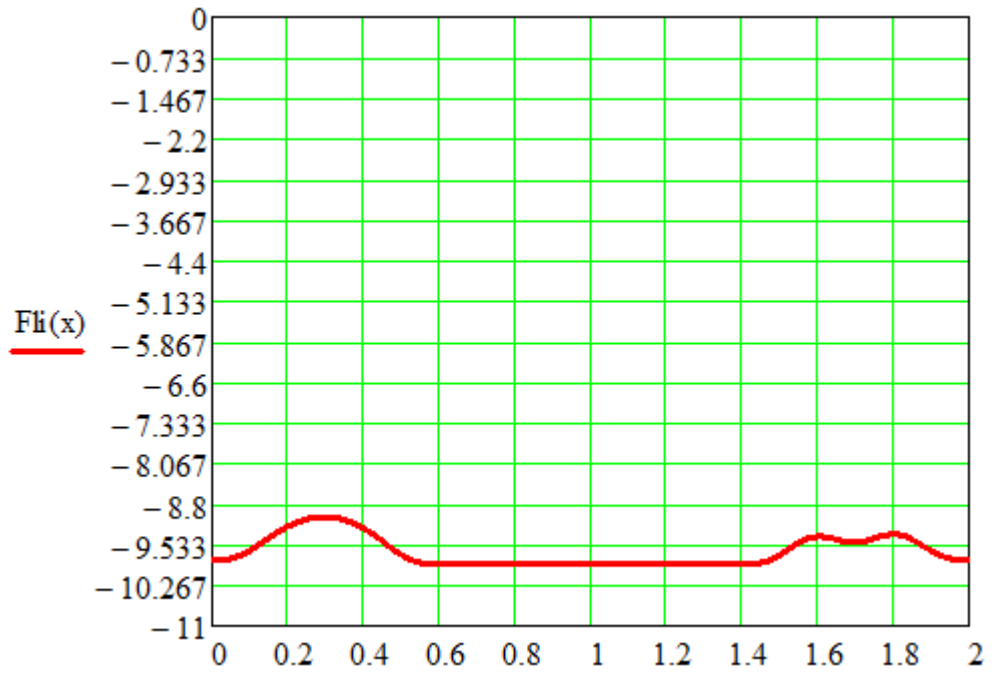


$$\psi(x) := \begin{cases} \pi & \text{if } x = 0 \\ \left(2 \cdot \pi - \operatorname{acot} \left(\frac{f_1(x)}{f(x)} \right) \right) & \text{if } 0 < x < t_1 \\ \left(\frac{3}{2} \cdot \pi + \gamma(x) \right) & \text{if } t_1 \leq x < t_2 \\ \left(\frac{(\ f(x) \)}{\sqrt{(f(x))^2 + (f_1(x))^2}} \right) & \text{if } t_2 \leq x < t_3 \end{cases}$$

$$\theta(x) := \operatorname{atan} \left[\frac{\sqrt{(f(x))^2 + (f_1(x))^2}}{m \cdot (g + k \cdot \varepsilon(x))} \right]$$



$$Fli(x) := \begin{cases} \frac{-f_2(x) - m \cdot g}{\cos(\theta(x))} & \text{if } 0 \leq x \leq t_1 \\ \frac{-m \cdot g}{\cos(\theta(x))} & \text{if } t_1 < x \leq t_2 \\ \frac{f_2(x) - m \cdot g}{\cos(\theta(x))} & \text{if } t_2 < x \leq t_3 \end{cases}$$



Програма вантажно розвантажувальної операції в RobotStudio

```

MODULE Module1
  CONST robtarget
  Target_10:=[[664.429,423.28,874.646],[0,1,0,0],[0,0,1,1],[9E9,9E9,9E9,9E9,9E9,9E9]];
  CONST robtarget
  Target_20:=[[664.429,423.28,1200],[0.983254908,0.182235525,0,0],[0,0,-
  1,1],[9E9,9E9,9E9,9E9,9E9,9E9]];
  CONST robtarget Target_30:=[[664.429,200,1200],[0.983254908,0.182235525,0,0],[0,0,-
  1,1],[9E9,9E9,9E9,9E9,9E9,9E9]];
  CONST robtarget Target_35:=[[664.429,-100,1200],[1,0,0,0],[-1,-
  1,0,1],[9E9,9E9,9E9,9E9,9E9,9E9]];
  CONST robtarget Target_40:=[[664.429,-375,1200],[0.983254908,-0.182235525,0,0],[-1,-
  1,0,1],[9E9,9E9,9E9,9E9,9E9,9E9]];
  CONST robtarget Target_50:=[[664.429,-575,1200],[0.983254908,-0.182235525,0,0],[-1,-
  1,0,1],[9E9,9E9,9E9,9E9,9E9,9E9]];
  CONST robtarget Target_60:=[[664.429,-575,1087],[0,1,0,0],[-1,-1,-
  2,1],[9E9,9E9,9E9,9E9,9E9,9E9]];
  VAR speeddata vmedium:=[600,500,5000,1000];
  PROC main()
    PathAccLim TRUE \AccMax := 0.5, TRUE \DecelMax := 0.5;
    MoveL Target_10,v200,z15,MyNewTool1\WObj:=wobj0;
    PathAccLim TRUE \AccMax := 3.8, TRUE \DecelMax := 3.8;
    MoveL Target_20,vmedium,z5,MyNewTool1\WObj:=wobj0;
    MoveL Target_30,vmedium,z5,MyNewTool1\WObj:=wobj0;
    MoveL Target_35,vmedium,z5,MyNewTool1\WObj:=wobj0;
    MoveL Target_40,vmedium,z5,MyNewTool1\WObj:=wobj0;
    MoveL Target_50,vmedium,z5,MyNewTool1\WObj:=wobj0;
    PathAccLim TRUE \AccMax := 0.5, TRUE \DecelMax := 0.5;
    MoveL Target_60,v200,z15,MyNewTool1\WObj:=wobj0;
  ENDPROC
ENDMODULE

```